

В. И. БАЛОВНЕВ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СО СРЕДОЙ
РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАШИН**

Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР в качестве
учебного пособия для студентов вузов,
обучающихся по специальности
„Строительные и дорожные машины и оборудование“



МОСКВА „ВЫСШАЯ ШКОЛА“ 1981

ББК 38.6—5

Б20

УДК 625.76.08.001.57

Рецензенты:

кафедра «Строительные машины»

Киевского инженерно-строительного института

(зав. кафедрой — проф. Ю. А. Ветров);

Д. И. Федоров — докт. техн. наук, проф.

(Центральный научно-исследовательский институт строительства)

Баловнев В. И.

Б 20 Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин: Учебное пособие для студентов вузов. — М.: Высш. школа, 1981. — 335 с., ил.

В пер.: 1 р.

В учебном пособии рассмотрены: методы моделирования процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин; система показателей эффективности; вопросы ограничения линейных размеров моделей, а также конструкции моделирующих стендов и технико-экономической эффективности моделирования; модели процессов разрушения, включая оборудование с газодинамическим воздействием на среду, и др. Приведены данные по использованию методов подобия и моделирования для определения технических параметров машин.

Предназначается для студентов механических специальностей строительных и автодорожных вузов и факультетов, будет полезно специалистам, занимающимся исследованиями в области дорожно-строительной техники.

Б $\frac{31803-093}{001(01)-81}$ 110—81

3204010000

ББК 38.6—5
6С6.08

© Издательство «Высшая школа», 1981

Повышение эффективности производства и качества выпускаемой продукции на базе внедрения новой техники, машин большой единичной мощности, автоматизированных и роботизированных комплексов, новых технологических процессов является, как указано в постановлении ЦК КПСС об экономическом и социальном развитии СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года, одним из определяющих направлений развития машиностроения. Быстрейшая реализация в народном хозяйстве достижений фундаментальных и прикладных научных исследований является одной из основных проблем развития экономики страны. Рабочие процессы дорожно-строительных машин могут быть эффективно интенсифицированы при опережающих темпах научных изысканий и своевременной реализации результатов исследований.

Повышение энергонасыщенности, рост размеров оборудования и создание крупных сверхтяжелых машин и автоматизированных комплексов машин, совершенствование оборудования и рабочих процессов в границах традиционных принципов взаимодействия со средой и создание машин-роботов, разработка и применение оборудования, основанного на использовании новых методов воздействия на среду на базе достижений фундаментальных наук, определяют основные направления развития строительного и дорожного машиностроения. Это обусловлено гидрофикацией машин, внедрением совершенных двигателей, газотурбинных силовых установок, обеспечением комфорта и повышением безопасности работы оператора, автоматизацией рабочих процессов, использованием компьютеров и электронных вычислительных машин (ЭВМ), систем автоматизированного проектирования (САПР) и др.

Успехи математического моделирования на базе ЭВМ, развитие систем автоматизированного проектирования с интерактивными системами общения исследователя с ЭВМ, их внедрение в народное хозяйство как основы повышения эффективности и качества создаваемых новых машин и комплексов вызывают большой интерес и к методам физического и физико-математического моделирования. Последнее объясняется тем, что эти методы применимы для исследования процессов, уравнения которых не выявлены достаточно четко. Кроме того, физические модели как опытные образцы системы являются объектами проверки решений и их вариантов, полученных машинными способами.

Основы теории подобия и методов моделирования в гидродинамике, тепло- и электротехнике, механике грунтов изложены в трудах отечественных исследователей — академиков М. В. Кирпичева, Л. И. Седова, профессоров А. А. Гухмана, В. А. Веникова, Н. Н. Бусленко, Г. Н. Баласанова, П. М. Алабушева и др.

Вопросы моделирования напряженного состояния и разрушения твердых тел рассмотрены в работах А. Г. Назарова, Г. И. Покровского, Г. Н. Кузнецова и др. Обширные исследования выполнены по моделированию действия взрыва Г. И. Покровским, О. Е. Власовым, Н. В. Мельниковым и др. В сельскохозяйственном машиностроении вопросы подобия и моделирования рассмотрены в работах В. Н. Горячкина, В. М. Мацепура и др. Методы подобия и моделирования находят большое применение в машиностроении, металлургии, геологии.

За рубежом общие вопросы моделирования рассмотрены Г. Мерфи и Д. Шуринг. Интерес представляют исследования по моделированию подсистем «двигатель — грунт» М. Г. Беккера и процессов почвообрабатывающих машин Д. Е. Кобба, В. Р. Гилл и др.

Моделирование, как пишет академик Л. И. Седов, является ответственной научной задачей, имеющей принципиальное и познавательное значение, но это только исходная база для главной задачи — фактического установления законов природы, отыскания общих свойств и характеристик явлений, разработки экспериментальных и теоретических методов исследования и наконец в получении приемов и рекомендаций для производства [25]. Сами по себе методы теории подобия и моделирования, подчеркивает проф. В. А. Веников, не содержат рецептов решения конкретных задач. Теорию подобия рассматривают как методическую основу исследования в различных отраслях науки и техники, и в этом отношении ее возможности практически безграничны [7].

Учебное пособие является первым научно-методическим руководством по применению физического и некоторых других видов моделирования, главным образом на базе механического подобия, в области изучения и решения задач, касающихся анализа процессов взаимодействия со средой рабочих органов землеройных, дорожно-строительных, коммунальных и других машин. В нем использованы научные разработки автора, а также результаты экспериментальных исследований рабочих процессов машин, выполненные под руководством автора в лаборатории моделирования кафедры дорожно-строительных машин Московского автомобильно-дорожного института кандидатами техн. наук Ю. П. Бакатиным, В. Я. Дворковым, А. Б. Ермиловым, Э. А. Кравцовым, Р. К. Кудайбергеновым, И. К. Растегаевым, А. В. Рубайловым, М. И. Селедцовым, Л. А. Хмарой, Е. И. Чижиком и др.

Автор благодарен сотрудникам кафедры «Строительных машин» Киевского инженерно-строительного института (зав. кафедрой проф. Ю. А. Ветров) и проф. Д. И. Федорову за ценные замечания, сделанные при рецензировании книги, а также выражает искреннюю признательность заслуженному деятелю науки и техники РСФСР, докт. техн. наук, проф. П. М. Алабужеву за критические замечания, которые были учтены при работе над рукописью.

Автор

Глава I

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СО СРЕДОЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

§ 1.1. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разработка и исследование дорожно-строительных машин и комплексов как и других сложных систем предполагают рассмотрение вопросов: 1) связанных с синтезом системы объектов, который заключается в выборе структуры значений и условий их применения; 2) касающихся анализа системы, заключающегося в изучении ее свойств, в зависимости от значений основных параметров и структуры.

Ввиду разнородности отдельных машин и оборудования, входящих в дорожно-строительные комплексы, совершенствования способов их применения, быстрых темпов морального старения машин наиболее важными задачами являются: разработка методов создания техники на базе достижений фундаментальных наук; использование достижений весьма отдаленных областей техники; ускорение темпов поиска новых технических решений и их реализации в народном хозяйстве; своевременная постановка перед наукой новых прикладных задач.

Реализация указанных положений в инженерной практике требует научной организации процесса создания новой техники, которая на современном этапе разворачивается на базе системного анализа (рис. 1.1), составляющего основу новой прикладной науки — системотехники [4]. Содержание системного анализа включает вопросы формирования методов формализации сложных неопределенных задач и представление их в виде, доступном для решения на ЭВМ с широким привлечением методов моделирования. Пос-



Рис. 1.1. Применение моделей в научной и инженерной деятельности

леднее позволяет учитывать на этапе синтеза и анализа объектов проявление в системе как неформальных человеческих факторов, так и формальных технических характеристик и закономерностей поведения объектов.

Системный анализ ставит и решает задачи по созданию простых качественно-количественных описаний сложных систем: социальной, экономической, производственной, технической и комбинированной структуры, для исследования и создания целенаправленных систем, обладающих заданными свойствами, более сложными, чем их модели-описания.

Система задается системными объектами, их свойствами и связями. Системные объекты характеризуются входом, процессом, выходом, обратной связью и ограничением. *Входом* называется то, что изменяется при протекании данного процесса; *выходом* — то, что получается в результате такого изменения. Объединение подсистем в систему строится с помощью прямых и обратных связей (рис. 1.2).

Наиболее важными вопросами, решаемыми методами системного анализа при проектировании, являются: исследование эффективности новых методов воздействия на среду, разработка перспективных образцов техники и комплексов машин, анализ взаимодействия различного оборудования и комплексов в технологии и с окружающей средой, распределение ресурсов и др. Этапы решения задач системного анализа следующие (см. рис. 1.1): 1) формирование проблемы, целей, задач и показателей оценки эффективности процессов, объектов и систем; 2) установление потребностей и ограничений; 3) выявление соответствия затрат имеющимся ресурсам и выявление альтернатив с их анализом на моделирующих системах; 4) оценка и сравнение результатов решения по выявляемым альтернативам; 5) формирование вариантов решения; 6) исследование возможной эффективности применения решения в конкретных условиях эксплуатации и оценка результатов; при получении неудовлетворительного результата — повторение этапов решения.

Практика решения задач методами системного анализа показывает, что наибольшую сложность представляют первый и третий этапы, так как ошибки, допущенные на этих этапах, не могут быть исправлены на последующих. Упущенная альтернатива приводит к неправильному выводу.

Постановка или формирование проблемы включает составление системного описания или модели системы, которая должна отражать три основные стороны объекта во взаимосвязи его со средой или другими системами: 1) функциональные свойства, которые характеризуют назначение и содержание деятельности объекта; соответствующее описание строится на основании критерия эффективности и должно выражать сущность процесса; 2) морфологические свойства, которые характеризуют составные части объекта и связи между подсистемами и их устройством; 3) информационные свойства, которые характеризуют оценку управляемости и неопределенности объекта, например, посредством определения энтропии.

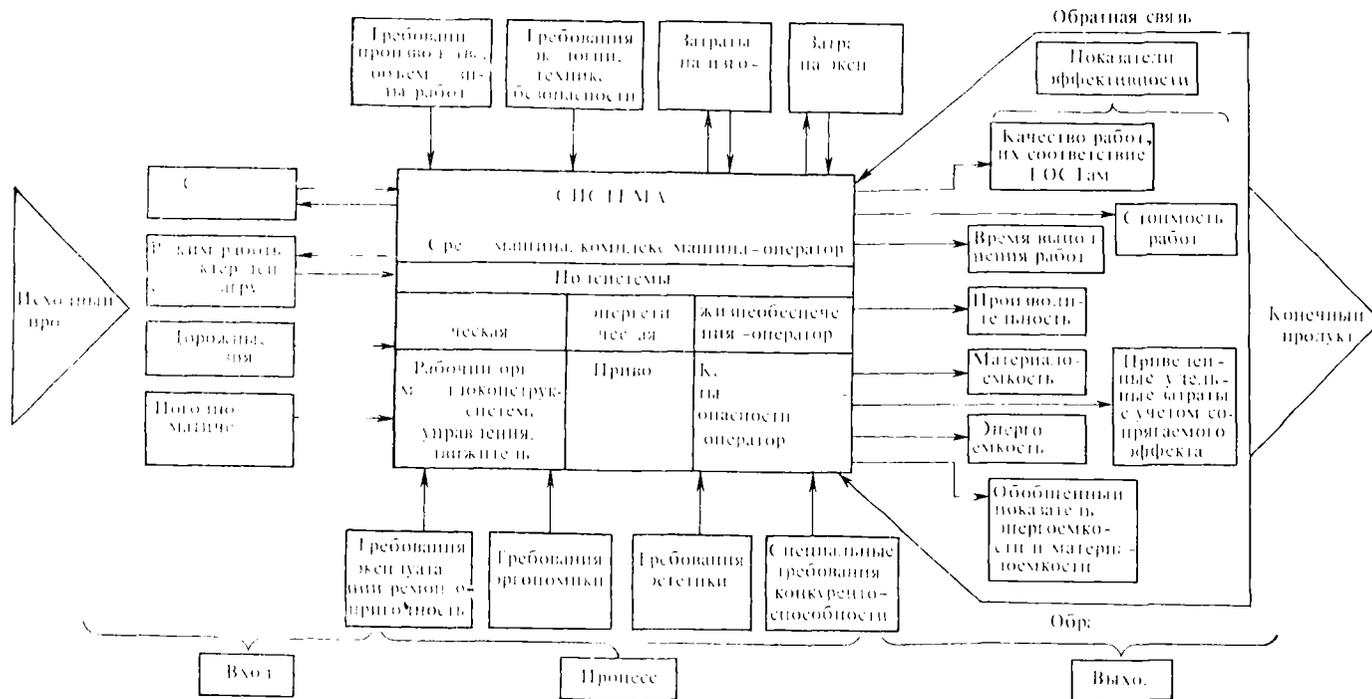


Рис. 1. Представление работы дорожно-строительной деятельности процесс:

Сложные системы в дорожном строительстве представляют собой организационно-технологический процесс строительства, машины и комплексы машин, реализующие процесс. Последние представляют собой сложные технические объекты и поэтому могут рассматриваться как системы. На всех этапах проектирования необходимо обеспечивать требуемую эффективность разрабатываемых средств техники в разнообразных или заданных условиях эксплуатации. В связи с этим основным вопросом, с которым приходится сталкиваться на начальных этапах проектирования дорожно-строительных машин, является вопрос о количественном представлении эффективности разрабатываемой конструкции в вероятностных условиях эксплуатации. При этом для каждой совокупности значений параметров системы вычисляют соответствующие показатели, характеризующие свойства системы (эффективность, производительность, надежность и т. п.), и по сопоставлению показателей получают первое представление о преимуществах и недостатках сравниваемых объектов.

Показатель эффективности как возможная модель выхода должен быть сформирован в виде физически измеримой величины, непосредственно связанной с техническими и экономическими характеристиками и параметрами объекта. Основное требование к показателям такого типа заключается в его соответствии первичным сущностям материи — веществу, энергии и информации. Одним из наиболее общих и плодотворных показателей оценки эффективности технических систем являются показатели, имеющие энергетическую и массовую природу.

Исходным пунктом формирования показателя оценки эффективности является установление связей между показателем, характеризующим результат, и условиями эксплуатации объекта. При этом составляют множество признаков ситуации и желаемых результатов и в этом пространстве конструируют потенциал эффективности. Исходными являются признаки: непрерывно измеряемые (масса, энергия, скорость, стоимость и др.); дискретно измеряемые (число единиц оборудования, ходовых колес, элементов управления); упорядоченные (по величине производительности составных подсистем); неупорядоченные (входит в габарит, транспортабелен, опасен и др.); расплывчатые (перспективно, наглядно, привычно и др.).

Существуют два основных способа, позволяющих преодолеть трудности выбора показателей. При первом способе требуется, чтобы большая сложная проблема была определена с помощью обобщенных показателей, при втором способе большую сложную систему разбивают на небольшие группы и формируют подходящие конкретные показатели или критерии для каждой группы. В каждом случае проблема может быть решена отысканием системы, которая по каждой оцениваемой характеристике лучше сравниваемой с нею системы. Преимуществом и недостатком каждой системы оценивают показателями, в которые входят такие параметры, как время, стоимость и эффективность.

Реализация проекта должна соответствовать показателям по функциональному назначению, ресурсам и срокам исполнения. Чем сложнее система, тем труднее путь ее реализации, больше затра-

ы на ее создание, но тем значительнее ее преобразующее действие. требование всесторонней проверки принимаемых при проектировании сложных решений и минимизации затрат делают необходимым широкое использование методов моделирования на всех этапах создания системы. Поэтому моделирование физическое, математическое, интеллектуальное, социальное является одной из важнейших составных частей системного анализа.

Моделирование в системном анализе обусловлено тем, что такая методология позволяет наиболее экономично дать представление об объекте, цели и способе действий. Моделирование может осуществляться человеком с помощью вычислительных машин или других физических устройств. Модель, несмотря на ряд присущих ей ограничений, является оперативным и удобным объектом познания и исследования. Наиболее эффективным считают комбинированный метод исследования, сочетающий изучение систем на моделях с производственным экспериментом. Моделирование наиболее эффективно при оптимизации решения на этапе поиска. Представление результатов анализа моделями различного вида и назначения является новым и перспективным методом исследования и оценки эффективности систем.

Численное значение соответствующих показателей эффективности определяют: или обработкой данных натурального эксперимента, или моделированием систем и изучением характера функционирования объекта на моделях различного вида и назначения на базе электронных аналоговых вычислительных машин (АВМ), электронных цифровых вычислительных машин (ЭВМ), комбинированных и др.

Следует подчеркнуть, что экспериментальное изучение эффективности рабочего процесса реальной машины целесообразно только при: наличии соответствующего оборудования; возможности изменения режимов и параметров в требуемых для решения вопросов пределах; получении информации без чрезмерных затрат; обработке информации в естественном масштабе времени, не удлиняющем сроки решения задачи; изменении параметров и режимов в требуемых пределах, не приводящих к авариям.

При моделировании систем важной является операция проверки соответствия модели выхода выходу. Такая операция содержится во всех подсистемах с обратной связью. Проверка соответствия существует для каждой модели входа и выхода. Наличие или отсутствие соответствия между выходом и моделью выхода устанавливают с помощью определения различия между выходом и моделью выхода. Модель выхода представляет ожидаемый исход. Она может



Рис. 1.3. Формирование показателя оценки эффективности как многопроцесса

принимать количественную или качественную форму. Количественная форма модели выхода может выражать ожидаемый исход в виде предполагаемой величины (прибыль, потери, приведенные затраты, удельные технические показатели и т. д.), что видно из рис. 1.2. Такую величину называют *показателем оценки уровня*, или *стандартом*. Формирование показателя рекомендуется рассматривать как систем-

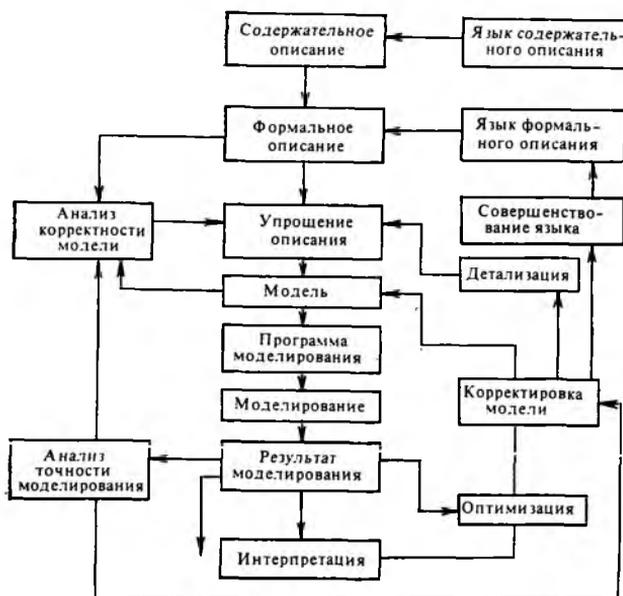


Рис. 1.4. Моделирование процесса с использованием предметно-математических моделирующих систем на базе ЭВМ

ный процесс (рис. 1.3). На заключительном этапе проверяется соответствие формируемого показателя оценке исследуемого объекта. Показатель пригоден для измерения, если соответствует условиям проблемы.

Схема процесса моделирования с помощью ЭВМ (рис. 1.4) включает этап содержательного описания моделируемой системы в пределах априорного значения. Этот этап должен строго учитывать исходные представления и не сопровождаться потерей или включением ложной информации. Содержательное описание преобразуется в формальное описание на языке моделирования путем составления моделирующего алгоритма. Каждый символ описания должен иметь количественное выражение. Реализация моделирующего алгоритма — моделирование — осуществляется в данном случае на ЭВМ. При физическом моделировании процесса его реализацию и исследование осуществляют на физической модели.

§ 1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ

Типология моделирования и классификация методов моделирования рассмотрены в работах исследователей советской школы [11], [25], [17]. Представленные ниже схемы являются результатом анализа и развития существующих разработок. Основанием классификации является материалистическое понимание модели как средства отображения и воспроизведения той или иной части действительности

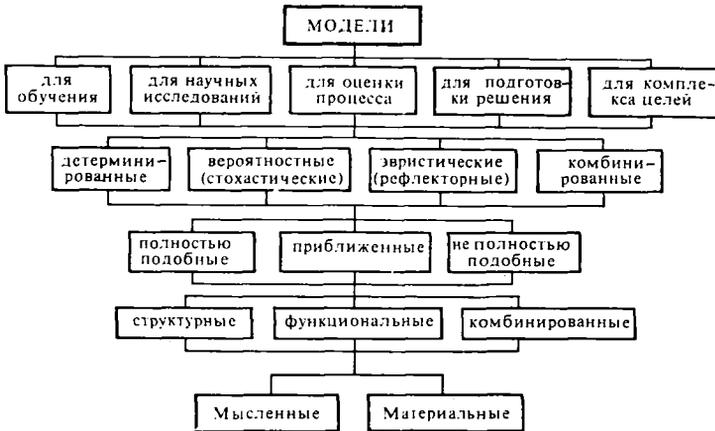


Рис. 1.5. Классификация моделей по назначению, методам описания, полноте подобия и физической природе

с целью ее более глубокого познания. С этой точки зрения подразделение моделей осуществляется в зависимости: 1) от целей и способа воспроизведения, т. е. от решаемых задач и тех средств, при помощи которых модель строится; 2) от характера тех объектов, которые воспроизводятся в моделях. Это позволяет классифицировать модели как по форме (способ построения), так и по содержанию (моделируемой действительности).

Классификация помогает исследователю ориентироваться в системе моделей и дает представление о перспективах развития исследований методами моделирования. Модели классифицируют по следующим признакам: по целевому назначению, методам описания, полноте подобия, воспроизводимым свойствам оригинала, физической природе, способу построения, составу, видам решаемых задач. Наиболее важным является целевой признак, который в значительной степени определяет тип и структуру модели. Пример классификации дан на рис. 1.5, на котором подклассы расположены по степени возрастания сложности. Модель обучения содержит следующие подгруппы моделей: для тренировки, приобретения навыков, слаживания, комплексного обучения. Модели для научных исследований формируются для получения соответствующих знаний, выявления механизмов протекания процесса и др. Модели оценки процессов

предназначаются для выявления характеристик, свойств, возможностей, сравнения и др. Модели подготовки решений содержат в своей структуре оценки альтернатив, выработку новых альтернатив, подготовку базового варианта решения.

Классификация моделей по методам описания (рис. 1.5) включает следующие подклассы моделей. Детерминированные модели, задаваемые уравнениями, решениями уравнений в виде функций времени и экспериментальными данными. Вероятностные, или стохастические, модели строятся на основании операций со случайными числами и процессами. Такие модели могут задаваться распределением случайных величин, их функциями, вариациями в пределах ограничений и т. п.

Модели детерминированные отражают процессы с однозначно определенными причинами и их следствиями. Стохастические модели не отражают ход отдельного события, но позволяют находить средних, суммарный результат однородных случайных явлений.

Моделирование любого вида при изучении линейных систем, параметры которых не зависят от параметров их режима (от текущих переменных), и нелинейных систем может проводиться в натуральном времени и во времени, измененном относительно натурального. Свойства нелинейных систем зависят от их состояния — режима. Нелинейные системы не могут исследоваться методом наложения (суперпозиции). Происходящие в них процессы описываются дифференциальными уравнениями, в которых зависимые переменные (параметры режима) и их производные возведены в степень выше первой или входят в виде произведений. В случаях, когда параметры системы являются функцией независимой переменной (времени, пространства), система и ее уравнение остаются линейными с переменными параметрами. Эвристические модели формируются при помощи моделей технических и биологических средств, имитирующих разумное поведение. Например, для моделирования процесса формирования новых идей используют группу лиц, перед которыми ставится определенная задача и работа которых организуется по определенной программе. К этому виду относят и так называемые живые модели, позволяющие в упрощенной форме имитировать сложный процесс. Смешанные модели содержат комбинации указанных подклассов.

Схема классификации моделей по полноте подобия (рис. 1.5) включает три основных подкласса: полностью подобные, приближенные и не полностью подобные. Модели не могут с абсолютной полнотой воспроизводить все детали изучаемых явлений. Абсолютное подобие означает тождество и замену одного объекта или явления другим, точно таким же. При решении научных и технических задач моделирование может быть полным, неполным и приближенным.

При полном моделировании обеспечивается подобие движения материи в основных формах ее существования (во времени и пространстве). Процессы, характеризующие изучаемые явления, подобно изменяются и во времени, и в пространстве.

При неполном моделировании основные процес-

сы, характеризующие изучаемое явление, подобны частично: или только во времени, или только в пространстве. Подобие устанавливается между некоторыми функциями или обобщенными характеристиками, между которыми в модели и в оригинале имеется определенное соответствие.

При приближенном моделировании некоторые факторы, не оказывающие решающего влияния на протекание процесса, моделируются приближенно или не моделируются.

По воспроизводимым свойствам оригинала модели (рис. 1.5) подразделяют на структурные, функциональные и комбинированные.

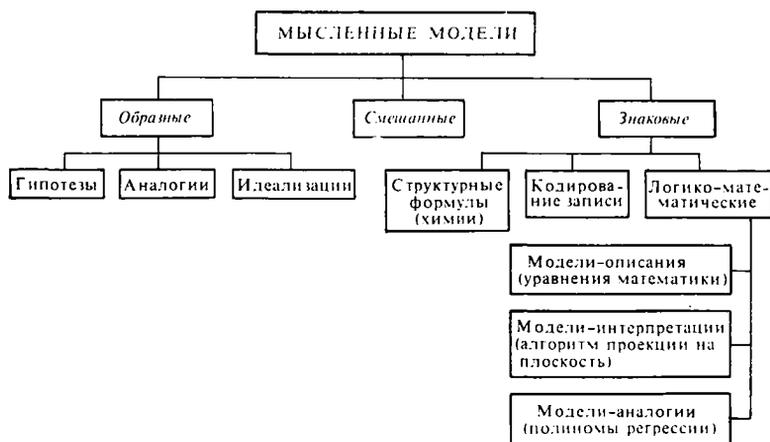


Рис. 1.6. Классификация мысленных моделей по способам построения и составу

Структурная модель имитирует структуру оригинала статической или динамической системы. Функциональные модели имитируют работу оригинала. Примером такой функциональной модели является «черный ящик» — объект, функционирование которого определяется состоянием его выхода y в зависимости от состояния входа x в различные моменты времени.

По физической природе все модели подразделяют на два основных подкласса: мысленные и материальные. Каждый подкласс в свою очередь может быть классифицирован по способу построения и составу. В зависимости от способа построения и от средств моделирования модели разделяют на два класса: 1) мысленные (воображаемые и 2) материальные (действующие, вещественные). Воображаемые модели неразрывно связаны с материальными, так как прежде, чем построить модель из каких-либо материалов, ее мысленно представляют, теоретически обосновывают, рассчитывают.

Мысленные модели (рис. 1.6) подразделяют на образные (иколические), знаковые (символические) и смешанные (образно-знаковые). В этой группе моделей наибольшее распространение получили

знаковые логико-математические модели. Они представляют собой описание объектов с использованием математических понятий. Математические модели делят на: модели-описания (уравнения), модели-интерпретации (алгоритм построения прямоугольной проекции на плоскость) и модели-анalogии (интерполяционные полиномы и др.). Например, многочисленные эмпирические зависимости для определения сопротивлений резанию, копанию (см. далее табл. III.4) можно рассматривать как модели-анalogии. Теоретико-эмпирические зависимости, разработанные для тех же целей, следует рассматривать в качестве комбинированных моделей-описаний и моделей-анalogий. Аналитические зависимости, предложенные для расчета указанных сопротивлений (см. далее табл. III.3), следует рассматривать как модели-описания.

Логико-математическая модель рассматриваемого типа в общем случае определяется как система математических отношений, связывающих характеристики состояний процесса с его параметрами, исходной информацией и начальными условиями. Реализация логико-математической модели на ЭВМ определяется как предметно-математическая модель. Для этого логико-математическую модель необходимо представить в форме модели-описания, затем моделирующего алгоритма и наконец в виде программы. Последняя по отношению к алгоритму является моделью-анalogией. Программу и алгоритм по отношению к математической структуре модели-описания можно рассматривать как математические модели-интерпретации.

Материальные модели широко используют для решения вопросов исследования и анализа рабочих процессов дорожно-строительных машин и комплексов. Материальные модели (рис. I.7) подразделя-

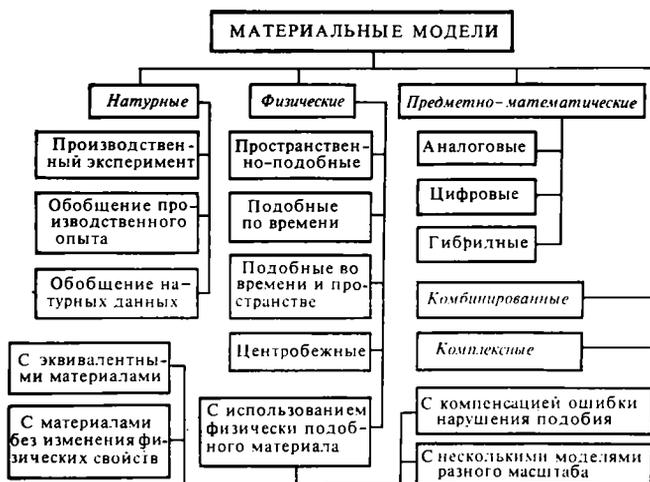


Рис. I.7. Классификация материальных моделей по способам построения и составу

ются на пять подгрупп: натурные, физические, предметно-математические, комбинированные, комплексные.

Первая подгруппа включает объекты как естественного происхождения, так и продукт деятельности человека. Каждый из объектов рассматривается как модель совокупности подобных объектов.

Физические модели, составляющие вторую подгруппу, представляют одну из важных подгрупп материальных моделей. Эти модели имеют физическую природу, в основном соответствующую оригиналу, и отличаются от него масштабами параметров и величин, их характеризующих, а также видом моделирующих свойств. Физические модели могут отражать только пространственное подобие объекта. Такие модели представляют сооружения, создаваемые для воспроизведения или отображения пространственных свойств объекта. В этом случае они характеризуются геометрическим подобием как обязательным условием. Это различные макеты (например, макеты установок, машин, объектов дорожного строительства и др.), компоновки (расположение оборудования в цехах завода), пространственные модели молекул, кристаллов в химии и др. Физические модели, подобные во времени, создаются для исследования динамики изучаемых процессов и получения зависимостей и закономерных связей структуры и, следовательно, параметров и характеристик, выражающих различное содержание и сущность изучаемых явлений. Основой при этом является физическое подобие модели и объекта, предполагающее идентичность или сходство физической природы и тождественность законов движения.

В этом виде моделей получили распространение центробежные модели [23] и модели на базе использования эквивалентных материалов [17]; разновидностью последних являются и масштабные модели, геометрически подобные оригиналу, испытание которых осуществляют без изменения свойств среды с внесением поправок на несоблюдение ряда определяющих критериев подобия.

Предметно-математические модели являются важнейшей подгруппой моделей. К таким материальным моделям относятся системы, не обладающие с объектом одной и той же физической природой и не имеющие с ним физического и геометрического подобия. В этом случае отношение между моделью и реальным объектом можно рассматривать как аналогию. Аналогия может быть структурной (изоморфизм) или функциональной (изофункционализм). Это находит свое выражение в наличии одинаковой системы уравнений и выражений, которыми описывается поведение объекта.

Предметно-математические модели в отличие от мысленных (абстрактных) логико-математических моделей при реализации требуют соответствующего материального воплощения. Они формируются в виде материальных объектов, так же как и физические модели. В отличие от последних предметно-математические модели создаются из элементов иной физической природы, чем оригинал, но описываются так же, как и оригинал, системой математических зависимостей. Различают предметно-математические модели прямой и непрямой аналогии. По характеру представления переменных в матема-

тических моделях различают модели аналоговые — вычислительные машины непрерывного действия (АВМ) и цифровые — машины дискретного действия (ЭВМ). Существуют также и комбинированные аналого-цифровые вычислительные машины.

Логико-математические модели по отношению к предметно-математическим моделям являются моделями-описаниями, и наоборот,

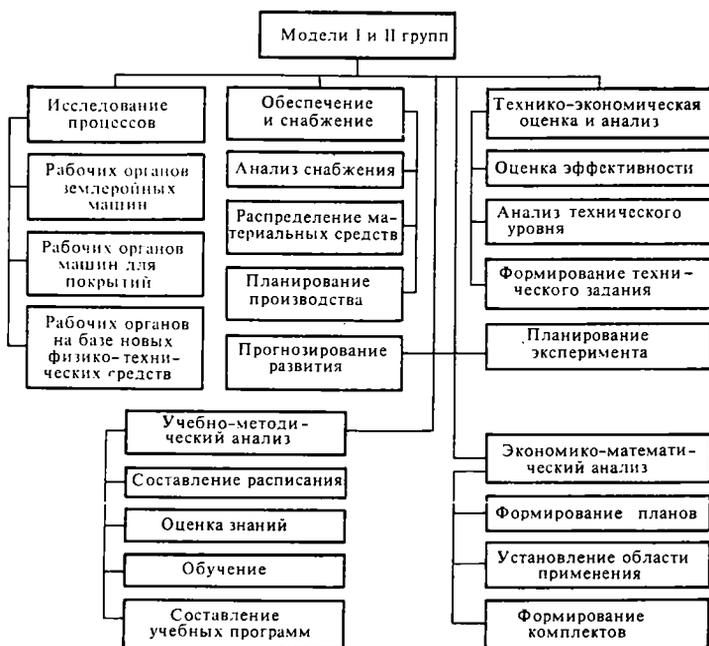


Рис. 1.8. Классификация моделей по видам решаемых задач

предметно-математические модели можно представить в качестве предметных интерпретаций логико-математических.

Классификация моделей по видам решаемых задач приведена на рис. 1.8.

Моделирование является методом изучения реального объекта и основано на применении вспомогательного (промежуточного) искусственного или естественного объекта-модели, который: объективно соответствует изучаемому оригиналу; заменяет оригинал на некоторых этапах исследования; дает определенную информацию об изучаемом оригинале.

Всякий правильно поставленный эксперимент предполагает использование модели. Полученные результаты характеризуют не только данное единичное явление в данном единичном опыте, но и другие явления этого класса. Модель выполняет в эксперименте двойную роль: одновременно является и объектом изучения, так как замещает подлинный объект, и экспериментальным средством, так как она служит средством познания этого объекта.

Для модельного эксперимента характерны следующие основные операции: переход от объекта к модели — построение модели (моделирование в собственном смысле слова); экспериментальное исследование модели; переход от модели к объекту, состоящий в перенесении результатов, полученных при исследовании, на этот объект (рис. 1.9). Важно, что модель входит в эксперимент, замещая не только объект исследования, но и условия, в которых он изучается. При моделировании усиливается роль теоретической стороны исследования. Теория является звеном, связывающим постановку опыта и его результаты с объектом исследования.

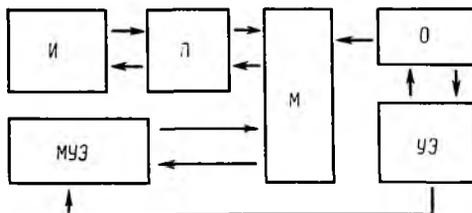


Рис. 1.9. Схема проведения исследований на модели объекта:

И — исследователь; П — прибор; М — модель объекта; МУЭ — модель условий эксплуатации; О — натуральный объект; УЭ — действующие условия эксплуатации объекта

§ 1.3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ, КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ

Создание и использование средств моделирования рабочих процессов дорожно-строительных машин и их систем — физических, математических и комбинированных моделей — базируется на теории подобия. Положения теории подобия позволяют правильно ставить эксперимент, распространять результаты единичного опыта на другие системы, создавать модели подсистем и систем, выбирать параметры модели так, чтобы получать моделируемые процессы, подобные процессам в системе-оригинале.

Путь научно-технического развития идет от наблюдения и эксперимента к теоретическому мышлению и завершается специально организованным производственным процессом. Методы теории подобия и моделирования позволяют повысить темпы получения соответствующих экспериментальных материалов.

Моделирование заключается в исследовании моделируемого объекта на специально сформированной модели, которая подобна оригиналу, и включает следующие этапы: построение модели; изучение модели; перенос полученных сведений на моделируемый объект.

Научно-методической основой формирования моделей является теория подобия, которая дает возможность установить наличие подобия и позволяет разработать способы его получения.

Подобие объектов заключается во взаимно-однозначном соответствии между двумя объектами, при котором функции перехода от параметров, характеризующих один из объектов, к соответствующим параметрам другого известны, а математические описания этих объектов могут быть преобразованы в тождественные. Подобными являются такие физические системы, у которых подобны все характе-

ризующие параметры, т. е. все векторные величины геометрически подобны, а все скалярные величины пропорциональны в соответствующих точках пространства и соответствующие моменты времени. Подобие явлений характеризуется пропорциональностью всех величин, определяющих качественную и количественную стороны изу-

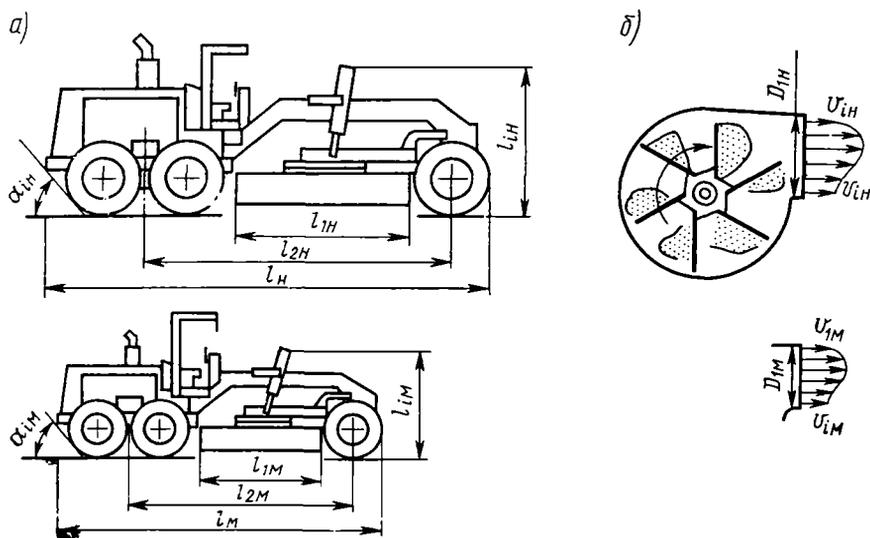


Рис. 1.10. Примеры геометрического (а) и кинематического (б) подобия объектов дорожно-строительной техники

чаемого явления. При решении технических задач физическое подобие рассматривают как совокупность подобия частных характеристик явления.

Геометрическое подобие выражается равенством всех соответственных углов α и пропорциональностью всех линейных размеров l (рис. 1.10, а):

$$\frac{l_{1н}}{l_{1м}} = \frac{l_{2н}}{l_{2м}} = \dots = \frac{l_{iн}}{l_{iм}} = k_l = \text{const};*$$

$$\alpha_{1н} = \alpha_{1м}; \quad \alpha_{2н} = \alpha_{2м}; \quad \dots; \quad \alpha_{iн} = \alpha_{iм}$$

Кинематическое подобие системы определяется тождественностью направления и пропорциональностью величин времени, действующих скоростей v и ускорений (рис. 1.10, б):

$$\frac{v_{1н}}{v_{1м}} = \frac{v_{2н}}{v_{2м}} = \dots = \frac{v_{iн}}{v_{iм}} = k_v = \text{const.}$$

Здесь и далее индекс «н» относится к параметрам оригинала (натуры), индекс «м» — к параметрам модели.

Динамическое подобие системы определяется тождественностью направления действия и пропорциональностью вектора сил G или напряжений σ (рис. I.11, а):

$$\frac{G_{1Н}}{G_{1М}} = \frac{G_{2Н}}{G_{2М}} = \dots = \frac{G_{iН}}{G_{iМ}} = k_G = \text{const};$$

$$\frac{\sigma_{1Н}}{\sigma_{1М}} = \frac{\sigma_{2Н}}{\sigma_{2М}} = \dots = \frac{\sigma_{iН}}{\sigma_{iМ}} = k_\sigma = \text{const}.$$

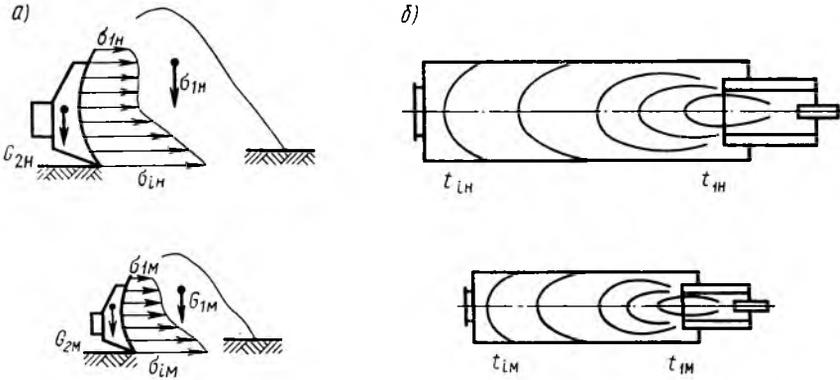


Рис. I.11. Примеры динамического (а) и термического (б) подобия объектов дорожно-строительной техники

Температурное подобие и подобие тепловых потоков (рис. I.11, б) определяется соответственным геометрическим подобием температурных полей и пропорциональностью всех температур:

$$\frac{t_{1Н}}{t_{1М}} = \frac{t_{2Н}}{t_{2М}} = \dots = \frac{t_{iН}}{t_{iМ}} = k_t = \text{const}.$$

При моделировании физических явлений масштабы k_l , k_v , k_σ и другие называют *масштабами модели*.

В соответствии со свойствами пропорции из соотношения

$$\frac{l_{2Н} - l_{1Н}}{l_{2М} - l_{1М}} = \frac{\Delta l_{Н}}{\Delta l_{М}} = k_l = \text{const}$$

следует правило замещения:

$$\lim \left(\frac{\Delta l_{Н}}{\Delta l_{М}} \right)_{\Delta l \rightarrow 0} = \frac{dl_{Н}}{dl_{М}} = k_l = \text{const},$$

из которого ясно, что при установлении физического подобия явлений вместо производных (и подынтегральных выражений) от характерных величин можно рассматривать соответствующие соотношения их конечных значений, которые называются *интегральными аналогами*. Последнее следует из положения, что предел постоянной величины равняется самой величине.

Методы установления подобия явлений и процессов, протекающих при взаимодействии рабочего оборудования дорожно-строительных машин с обрабатываемой средой и, в частности, при механическом разрушении грунтов рабочими органами землеройно-транспортных машин, так же как и при изучении явлений и процессов другой физической природы, базируются на трех основных теоремах подобия и дополнительных положениях.

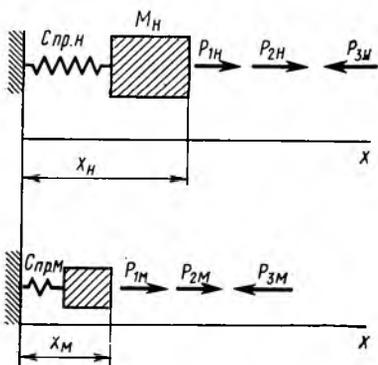


Рис. 1.12. Схема динамических систем, иллюстрирующая основные положения теории подобия: а — оригинал — моделируемая система; б — модель — моделирующая система; P_1 , P_2 , P_3 — действующие силы M — масса; C — приведенная жесткость

Первая теорема подобия рассматривает условия, следующие из подобия явлений, и формулируется следующим образом: *подобные объекты (явления, процессы, системы, знаковые образования и др.) имеют индикаторы подобия, равные единице, и численно одинаковые критерии подобия.* Для подобных объектов (рис. 1.12), один из которых является оригиналом, а другой моделью, описывающихся уравнениями

$$P_{1н} + P_{2н} - P_{3н} = 0,$$

$$P_{1м} + P_{2м} - P_{3м} = 0,$$

между отношениями масштабов, называемыми *индикаторами подобия*, выполняются равенства:

$$k_{P_1}/k_{P_2} = 1; \quad k_{P_3}/k_{P_2} = 1,$$

а отношение соответствующих членов уравнения является инвариантным и не зависящим от масштаба параметров:

$$(P_1/P_2)_{н} = (P_1/P_2)_{м} = \text{idem};$$

$$(P_3/P_2)_{н} = (P_3/P_2)_{м} = \text{idem}.$$

Действительно, так как явления подобны, то должно иметь место равенство уравнений

$$P_{1н} + P_{2н} - P_{3н} = k_{P_1} P_{2м} + k_{P_2} P_{2м} - k_{P_3} P_{3м},$$

где $k_{P_1} = P_{1н}/P_{1м}$; $k_{P_2} = P_{2н}/P_{2м}$; $k_{P_3} = P_{3н}/P_{3м}$ — масштабы (коэффициенты) величин; P_i — параметры, характеризующие систему, например имеющие природу сил, действующих на систему.

Для соблюдения неизменности по отношению к подобным преобразованиям членов уравнения необходимо, чтобы коэффициенты уравнения k_{P_1} , k_{P_2} и k_{P_3} были равны друг другу. Так как k_{P_1} , k_{P_2} и k_{P_3} являются масштабами величин, то их равенство соблюдается в случае, если отношения

$$(P_1/P_2)_{н} = (P_1/P_2)_{м} = \text{idem};$$

$$(P_3/P_2)_{н} = (P_3/P_2)_{м} = \text{idem}$$

будут оставаться неизменными для подобных преобразований. Соответствующие отношения размерных величин, которые остаются неизменными при подобных преобразованиях, являются критериями (инвариантами) подобия и обозначаются π или Π . Аргументы трансцендентных функций являются критериями подобия.

Определение параметров оригинала на основании формул подобия. Следствием рассмотренного положения является получение соотношений, позволяющих определить параметры объекта по известным параметрам модели. Если имеют место

$$P_1/P_2 = \text{idem}; \quad P_3/P_2 = \text{idem},$$

$$P_1 = k_{P_{10}} P_2; \quad P_3 = k_{P_{30}} P_2,$$

где $k_{P_{10}} = (P_1/P_2)_M$; $k_{P_{30}} = (P_3/P_2)_M$ — коэффициенты, определяемые на основании объекта, принятого за модель.

Свойства критериев подобия. Исходные уравнения являются гомогенными, так как все их члены имеют одинаковую размерность. Полученные критерии подобия являются безразмерными образованиями. Они определяют среднюю меру отношений между физическими эффектами, существенными для данного процесса.

Критерии можно преобразовывать в критерии другой формы и получать новые критерии путем операций деления и перемножения, полученных первоначально, а также умножением или делением их на постоянную безразмерную величину. Однако общее количество критериев при этом должно оставаться без изменения. Так, если $\Pi_K = \text{idem}$; $\Pi_{K+i} = \text{idem}$, то и $\Pi_K \Pi_{K+i} = \text{idem}$; $\Pi_K / \Pi_{K+i} = \text{idem}$. Аналогично $1/\Pi_K = \text{idem}$; $k\Pi_K = \text{idem}$, где k — постоянная безразмерная величина.

Вторая теорема подобия (π -теорема) дает возможность замены уравнения между физическими величинами зависимостью между критериями подобия и формулируется так: *всякое уравнение физического процесса, объединяющее между собой n величин, $x_1 = f(x_2, x_3, \dots, x_n)$, среди которых t величин обладают независимыми размерностями, можно преобразовать к критериальному уравнению, которое связывает $n - t$ критериев подобия:*

$$\Pi_1 = \varphi(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-t}),$$

где $\Pi_{1,2,3}$ — безразмерные величины, составленные по определенному закону из n величин (переменных и параметров), влияющих на ход процесса; t — число физических величин, имеющих независимые размерности (число основных единиц измерения должно быть больше или равно t).

Вторая теорема подобия определяет необходимое и достаточное число критериев подобия k , определяющих процесс: $k = n - t$. Теорема позволяет заменить переменные, сократив их число с n размерных величин до $n - t$ безразмерных величин. Это упрощает обработку экспериментов при отыскании аналитической зависимости в виде регрессионного полинома, полученного в критериальной форме.

Принято называть комплексы Π_2, Π_3, Π_{n-m} *определяющими критериями подобия*. Такие безразмерные комплексы содержат независимые переменные величины и величины, входящие в условия однозначности. *Определяемыми критериями подобия* называют комплексы Π_1 , которые содержат зависимую переменную как искомую величину.

Существенное значение л-теоремы заключается в возможности распространения результатов экспериментального или аналитического исследования по изучению конкретного явления на ряд подобных явлений. При этом важно иметь в виду ограничения на пределы существенности и постоянства критериев подобия, определяющих протекание исследуемого явления при формировании такого заключения. Важным фактором, который следует из л-теоремы, является возможность нахождения критериального уравнения, не имея математической модели процесса, основываясь только на анализе известных величин, определяющих процесс, и их размерности.

Третья теорема подобия. *Необходимым и достаточным условием подобия двух объектов (явлений, процессов, систем и др.) является пропорциональность сходственных параметров, входящих в условия однозначности, и равенство определяющих критериев подобия.*

Под условиями однозначности понимают геометрическую характеристику пространственной области (при соблюдении геометрического подобия), значения физических постоянных, начальные и граничные условия.

Действительно, если для систем, приведенных на рис. I.12, имеют место равенства критериев подобия:

$$P_1/P_2 = \text{idem}; \quad P_3/P_2 = \text{idem}$$

и

$$k_{P_1}/k_{P_2} = 1; \quad k_{P_3}/k_{P_2} = 1,$$

то

$$P_{1н} \mp P_{2н} \mp P_{3н} = k_{P_1} P_{1м} \quad k_{P_2} P_{2м} \mp k_{P_3} P_{3м}$$

или

$$P_{1н} \mp P_{2н} \mp P_{3н} = P_{1м} \mp P_{2м} \mp P_{3м},$$

что указывает на подобие рассматриваемых объектов.

Из условий однозначности при $t = 0, P = P_0, v = v_0, t = t_1, P = P_1, v = v_1$ следуют критерии-симплексы $P_0/P = \text{idem}, v_0/v = \text{idem}$.

Для создания модели, в которой процесс протекал бы подобно процессу в оригинале, необходимо: 1) выбрать параметры модели из условий теории подобия и обеспечить тождественность уравнений природы и модели, что достигается при равенстве определяющих критериев подобия; 2) добавить к определяющим критериям подобия подобные для природы и модели граничные и начальные условия. Переход от параметров, установленных в процессе моделирования, к параметрам оригинала в порядке прогнозирования поведения оригинала осуществляют простым пересчетом по формулам:

$$P_{1н} = k_{P_1} P_{1м}; \quad P_{2н} = k_{P_2} P_{2м}; \quad P_{3н} = k_{P_3} P_{3м},$$

где k_{P_1} , k_{P_2} , k_{P_3} — соответствующие масштабы величин; P_{1M} , P_{2M} , P_{3M} — величины, характеризующие процессы, зафиксированные при моделировании.

Для подобия явлений необходимо, чтобы они описывались одинаковыми математическими зависимостями. Однако это условие не является достаточным. При различных соотношениях численных коэффициентов и разных краевых условиях результаты решения одного и того же уравнения оказываются неодинаковыми. Условия однозначности должны быть аналогичными в модели и оригинале. Отличаться они могут лишь численными значениями величин.

Дополнительные положения теории подобия рассматривают вопросы подобия сложных систем и сложных явлений. Подобие сложных явлений устанавливают на основании рассмотрения трех теорем подобия и дополнительных положений о подобии нелинейных анизотропных и неоднородных систем, сформулированных проф. В. А. Венниковым.

Сложные объекты, явления, процессы, системы, составленные из нескольких подсистем, соответственно подобных в отдельности, подобны и в целом, если подобны условия однозначности на границах между подсистемами или равны критерии подобия, составленные из параметров, общих для подобных подсистем. Условия подобия, справедливые для линейных систем, могут быть распространены и на нелинейные системы, при этом должно быть соблюдено дополнительное условие: совпадение относительных характеристик переменных параметров, т. е. их зависимостей от переменных величин, заданных с учетом динамики происходящих явлений. Условия подобия, справедливые для изотропных и однородных систем, могут быть распространены и на анизотропные и неоднородные системы, если только соответственные относительные анизотропии и неоднородности в сравниваемых системах одинаковы.

Понятие об аддитивном подобии систем расширяет представление о видах подобия и свидетельствует о многообразии подобия. Так, для процессов взаимодействия рабочего оборудования со средой, для определяющих компонентов которого справедливо условие суперпозиции, подобие в ряде случаев целесообразно устанавливать на базе положений аддитивности. Аддитивно подобными называют также тела, которые можно расположить так, что границы тел будут совпадать всеми своими точками в результате равномерной деформации.

Для классической мультипликативной теории подобия связь между параметрами систем определяют выражения типа $x_{ni} = k_{xi}x_{mi}$.

Если физические системы аддитивно подобны, то характеризующие их величины преобразуются по формуле $x_{ni} = x_{mi} + c_i$, где c_i — аддитивная константа подобия.

Между значениями k_{xi} и c_i существует соотношение $c_i = x_{mi}(k_{xi} - 1)$.

В природе нет полностью сходных явлений. При решении конкретных технических задач имеет место приближенное подобие. Последнее обусловлено наличием упрощающих допущений, которые в даль-

нейшем оцениваются на основании экспериментальных и аналитических исследований. Приближенное моделирование характеризуется различной степенью приближения к полному подобию.

Определение критериев подобия. Безразмерные соотношения, постоянство которых для рассматриваемого явления или процесса является признаком их подобия и которые называются критериями подобия, могут быть установлены несколькими способами. Применительно к установлению подобия явлений и процессов, протекающих при взаимодействии рабочего оборудования дорожно-строительных машин с рабочей средой и, в частности, рабочих органов землеройно-транспортных машин с грунтом, следует отметить два наиболее распространенных метода получения критериев подобия: на основании анализа размерностей величин, определяющих протекание процесса; на основании анализа системы дифференциальных уравнений, описывающей процесс, и условий однозначности, определяющих механизм взаимодействия рабочего оборудования со средой.

Второй способ получения критериев подобия заключается в приведении уравнений, описывающих процесс механического разрушения грунта, к безразмерному виду. Анализ системы дифференциальных уравнений дает возможность использовать для вывода критериев подобия один из трех способов, получивших наибольшее распространение: подобных преобразований; интегральных аналогов; приведения уравнений к безразмерному виду.

Анализ размерностей позволяет отыскать критерии подобия, основываясь на общих законах, на которых построена система единиц измерения величин. Преимущество заключается в возможности получения критериев подобия без знания математической зависимости между физическими величинами изучаемого процесса. Однако в ряде случаев такой метод может привести к ошибочным результатам, если неправильно определено число и вид величин, характеризующих процесс. При математическом моделировании применяют метод анализа уравнений, так как в этом случае уравнения известны. При физическом моделировании можно использовать оба метода.

Допустим, что для систем, изображенных на рис. 1.12, значения слагаемых уравнения определяются следующим образом:

$$P_1 = M \frac{d^2x}{dt^2}; \quad P_2 = cx; \quad P_3 = W$$

Общее количество физических величин, характеризующих процессы, протекающие в системах, равно пяти: M — масса; c — жесткость; x — линейный размер; t — время; W — сопротивление.

Для рассматриваемой системы число независимых единиц измерения равно трем (например, для величин P, l, t m^{-3}). Применяя π -теорему, находят число критериев $k = n - m = 5 - 3 = 2$. Так как размерности всех n физических величин известны, то, составив из них два (так как $n - m = 2$) безразмерных комплекса, получают критерии подобия без написания функциональной зависимости. Критериальное уравнение имеет вид $\Pi_1 = \varphi(\Pi_2)$.

Порядок составления безразмерных комплексов критериев подобия методом анализа размерностей [1] следующий: 1) составляют перечень параметров, определяющих процесс (M, c, l, t, W и т. д.); 2) устанавливают формулы размерностей каждого из параметров; 3) заменяют в формулах основные единицы измерения соответствующими физическими величинами: $M = Wl^2/t$; $c = Wl$ и т. д.; 4) делят соответствующую величину на полученные выражения и получают искомые критерии подобия: $\Pi_1 = Ml/(Wt^2)$; $\Pi_2 = cl/W$ и т. д.; 5) составляют критериальное уравнение: $\Pi_1 = \varphi(\Pi_2)$.

Анализ уравнений позволяет получить критерии подобия на основании положения, что у подобных явлений описывающие их уравнения тождественно равны. Полагая, что для систем, приведенных на рис. 1.12, справедливы уравнения $P_1 = M \frac{d^2x}{dt^2}$; $P_2 = cx$; $P_3 = W$, получаем для каждой системы:

$$M_{\text{н}} = \frac{d^2x_{\text{н}}}{dt_{\text{н}}^2} + c_{\text{н}}x_{\text{н}} = W_{\text{н}}; \quad M_{\text{м}} = \frac{d^2x_{\text{м}}}{dt_{\text{м}}^2} + c_{\text{м}}x_{\text{м}} = W_{\text{м}}.$$

Так как процессы в оригинале и модели подобны, то отношения всех характеризующих их величин должны выражаться с помощью масштабов подобия:

$$\frac{M_{\text{н}}}{M_{\text{м}}} = k_{\text{м}}; \quad \frac{x_{\text{н}}}{x_{\text{м}}} = k_l; \quad \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{м}}} = k_t; \quad \frac{c_{\text{н}}}{c_{\text{м}}} = k_c; \quad \frac{W_{\text{н}}}{W_{\text{м}}} = k_W.$$

Введя выражение k_W, k_l в уравнение для модели и разделив все члены уравнения на $k_W, kW_{\text{м}}$, получают уравнение в безразмерной форме записи:

$$\frac{k_{\text{м}}k_l}{k_W k_t^2} \frac{M_{\text{м}}}{W_{\text{м}}} \frac{d^2x_{\text{м}}}{dt_{\text{м}}^2} + \frac{k_c k_l}{k_W} \frac{c_{\text{м}}x_{\text{м}}}{W_{\text{м}}} = 1.$$

Тождественность полученных уравнений следует из равенства индикаторов подобия единице:

$$И_1 = \frac{k_{\text{м}}k_l}{k_W k_t^2} = 1; \quad И_2 = \frac{k_c k_l}{k_W} = 1.$$

Из совместного анализа выражений получают:

$$\Pi_1 = Ml/(Wt^2); \quad \Pi_2 = cl/W$$

Метод интегральных аналогов заключается в следующем: 1) уравнение приводят к безразмерному виду делением всех членов на один из них:

$$\frac{Md^2x}{Wdt^2} + \frac{cx}{W} = 1;$$

2) опускают знаки дифференцирования и интегрирования, а знаки соотношения между членами заменяют на знаки пропорциональности:

$$Ml, (Wt^2) \sim cl, W \sim 1;$$

3) полученные безразмерные комплексы, составленные из переменных величин и параметров, являются критериями подобия:

$$\Pi_1 = Ml/(Wt^2); \quad \Pi_2 = cl/W$$

4) для лучшего выявления физического смысла критериев делят и умножают некоторые из них друг на друга или на одну и ту же величину:

$$\Pi_1 = \frac{Ml}{Wt^2}; \quad \Pi_2' = \frac{\Pi_2}{\Pi_1} = \frac{cl^2}{M}; \quad \Pi_1' = \frac{Ml}{Wt^2} \frac{l}{l} = \frac{Mv^2}{Wl} \text{ и т. д.}$$

5) записывают один из критериев как функцию $n - m$ критериев, получая критериальное уравнение:

$$\frac{Ml}{Wt^2} = \Phi_1 \left(\frac{cl}{W} \right) \text{ или } \frac{Mv^2}{Wl} = \Phi_2 \left(\frac{cl^2}{M} \right) \text{ и т. д.}$$

Следствия, вытекающие из основных теорем подобия и дополнительных положений, имеют важное значение для прогнозирования характеристик технических систем по соответствующим характеристикам подобных моделей, а также для формирования зависимостей перехода от модели к оригиналу и ряда эмпирических моделей. Рассмотрим наиболее важные положения.

С л е д с т в и е I. Если явления, процессы, объекты подобны, то уравнения связи между параметрами оригинала могут быть установлены через соответствующие параметры модели по формулам подобия.

Из первой теоремы следует, что если объекты, например приведенные на рис. 1.12, подобны, то они описываются одинаковыми уравнениями:

$$P_{1н} + P_{2н} - P_{3н} = 0, \quad P_{1м} + P_{2м} - P_{3м} = 0$$

и имеют соответственно тождественные критерии подобия

$$P_1/P_2 = \text{idem}; \quad P_3/P_2 = \text{idem}.$$

Равенство соответствующих критериев позволяет получить связи между параметрами объекта в виде следующих соотношений:

$$P_{1н} = a_1 P_{2н}; \quad P_{2н} = a_2 P_{3н}; \quad P_{3н} = a_3 P_{2н} \text{ и т. д.},$$

где a_1, a_2, a_3 , — соответствующие коэффициенты подобия, которые определяются через параметры модели:

$$a_1 = \frac{P_{1м}}{P_{2м}} \quad a_2 = \frac{P_{2м}}{P_{3м}}; \quad a_3 = \frac{P_{3м}}{P_{2м}};$$

Выражая через полученные соотношения параметры модели и подставляя в уравнение для модели, получаем:

$$P_{1н} \frac{P_{2м}}{P_{2н}} + P_{2н} \frac{P_{3м}}{P_{2н}} - P_{3н} \frac{P_{2м}}{P_{2н}} = 0.$$

Так как отношения типа $P_{2н}/P_{2м}$, являются масштабами соответствующих параметров, можно записать:

$$\frac{P_{1н}}{k_{P_2}} + \frac{P_{2н}}{k_{P_3}} - \frac{P_{3н}}{k_{P_2}} = 0.$$

Так как системы подобны, то коэффициенты $1/k_{P_2} = 1/k_{P_3} = 1/k_{P_2}$, и, следовательно, получаем тождество уравнений модели и оригинала.

Таким образом, если для системы известны критерии подобия и соответствующие параметры модели, то связь между параметрами оригинала можно определить по формулам подобия (рис. 1.13):

$$P_{iн} = a_i P_{jн}.$$

Экспериментальный коэффициент a_i определяется через параметры модели:

$$a_i = P_{iм}/P_{jм}.$$

С л е д с т в и е II. Параметры оригинала могут быть определены через соответствующие параметры модели в условиях сохранения качественного подобия системы и несоблюдения критериев подобия с соответствующей компенсацией ошибки поправочным коэффициентом.

Подобные объекты (см. рис. 1.12) описываются одинаковыми уравнениями:

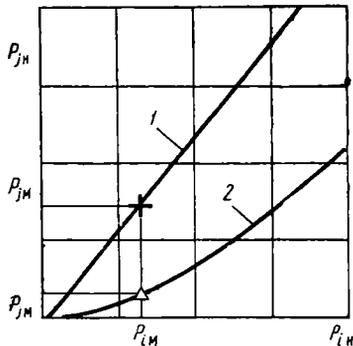


Рис. 1.13. Характер связи между разными параметрами объекта в условиях подобия:
 1 — $P_{jн} = P_{iн} k_{j/i}$; $k_{j/i} = P_{jм}/P_{iм}$;
 2 — $P_{jн} = P_{iн}^2 k_{j/i_2}$; $k_{j/i_2} = P_{jм}^2/P_{iм}^2$

$$P_{1н} + P_{2н} - P_{3н} = 0,$$

$$P_{1м} + P_{2м} - P_{3м} = 0$$

и имеют соответствующие критерии подобия:

$$P_1/P_2 \simeq idem; \quad P_3/P_2 \simeq idem \text{ при } k_{P_1} \neq k_{P_2} \neq k_{P_3}.$$

Из уравнений, описывающих процесс, следует:

$$P_{1н} = P_{1м} \left(\frac{P_{3н} - P_{2н}}{P_{3м} - P_{2м}} \right).$$

Величины $P_{3н}$ и $P_{2н}$ можно выразить через параметры модели и соответствующие масштабные коэффициенты:

$$P_{1н} = P_{1м} \frac{P_{3м} k_{P_3} - P_{2м} k_{P_2}}{P_{3м} - P_{2м}},$$

где $k_{P_3} = P_{3н}/P_{3м}$, $k_{P_2} = P_{2н}/P_{2м}$
 при $k_{P_3} \neq k_{P_2}$.

В этих формулах величины с индексом «м» определяются экспериментально при исследовании модели, масштабы k_{P_i} предполагаются известными.

Важным этапом расчета является определение коэффициента перехода с поправкой на несоблюдение критериев подобия:

$$k_P = \frac{P_{3M}k_{P_3} - P_{2M}k_{P_2}}{P_{3M} - P_{2M}}$$

Здесь важно правильно выбрать математическую модель расчета коэффициенту k_P . При определении коэффициента учитывают следующее: если объекты, процессы приблизительно подобны, то для выявления соответствующих теоретических моделей, необходимых для расчета поправочного коэффициента, можно воспользоваться методами оценки соответствия плотностей распределения вероятностей относительных величин, полученных при испытании двух моделей разного масштаба. Большую из моделей принимают за оригинал и в процессе эксперимента получают распределение вероятностей величины:

$$\tilde{P}_{in} = P_{in} / \bar{P}_{in},$$

где \bar{P}_{in} — среднее значение величины серии экспериментов; P_{in} — случайная величина.

На основании испытаний второй модели среднее значение величины \bar{P}_{in} из условий приближенного подобия определяется через средние величины, зафиксированные в опытах (рис. I.14) по формуле

$$\bar{P}_{in} = \bar{P}_{im}k_{P_j},$$

где k_{P_j} — коэффициент, рассчитываемый на основании принятой теоретической модели.

Относительные величины P_{in}/\bar{P}_{in} и $P_{in}/(\bar{P}_{im}k_{P_j})$ в случае полного подобия должны быть тождественно равны. В условиях приближенного подобия это равенство нарушается как следствие случайности измеряемых величин P_{in} и P_{im} , а также из-за несоответствия исследуемого процесса математической модели, принятой для расчета коэффициента k_{P_j} .

Для выбора соответствующей гипотезы расчеты выполняют на базе нескольких возможных гипотез, а эксперименты осуществляют с двумя моделями разного масштаба. Полученные для моделей кривые распределения определяющих величин (рис. I.15) оценивают по критериям согласия теории вероятности. Гипотезу, дающую наиболее близкое соответствие, принимают за основу для расчета коэффициента перехода от модели к оригиналу.

С л е д с т в и е III вытекает из первой теоремы подобия. Процесс может быть описан несколькими видами математических моделей, подобными по форме и составу. Теоремы подобия в данном случае берут за основу при анализе математических моделей разного

вида, например, теоретических логико-математических моделей-описаний и регрессионных математических моделей-аналогий. Так как оба уравнения описывают одно и то же явление, то указанные модели должны быть подобны и, как следует из первой теоремы подобия, форма и структура их математического представления должны быть тождественны.

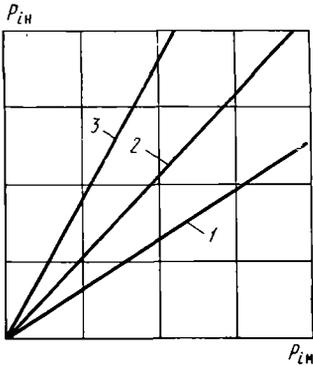


Рис. 1.14. Характер связи между одинаковыми параметрами природы и модели в условиях подобия:

$$\begin{aligned}
 1 - P_{iH} &= P_{iM} k_{P_1}; & 2 - P_{iH} &= \\
 &= P_{iM} k_{P_2}; & 3 - P_{iH} &= P_{iM} k_{P_3}; \\
 k_{P_1} &= P_{iH} / P_{iM}; & k_{P_1} &< k_{P_2} < k_{P_3}
 \end{aligned}$$

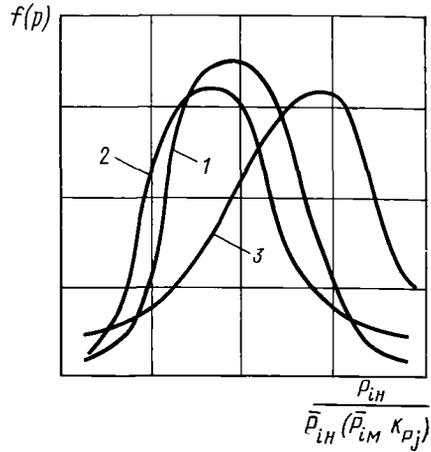


Рис. 1.15. Изменение плотности вероятностей относительных величин в условиях приближенного подобия по результатам экспериментов с двумя моделями и различными математическими моделями определения коэффициента перехода от модели к оригиналу:

$$\begin{aligned}
 1 - f_1 \left(\frac{P_{iH}}{P_{iM}} \right); & 2 - f_2 \left(\frac{P_{iH}}{P_{iM} k_{P_j}} \right) \\
 3 - f_3 \left(\frac{P_{iH}}{P_{iM} k_{P_q}} \right)
 \end{aligned}$$

Если реальный объект описывается уравнением $P_{1H} + P_{2H} - P_{3H} = 0$, то всегда может быть получена логико-математическая модель-описание подобного объекта в виде уравнения

$$a_1 k_1 + a_2 k_2 - a_3 k_3 = 0,$$

где $a_1 = P_{1M}$; $a_2 = P_{2M}$; $a_3 = P_{3M}$; $k_1 = P_{1H} / P_{1M}$; $k_2 = P_{2H} / P_{2M}$; $k_3 = P_{3H} / P_{3M}$.

Так как по условиям подобия критерии подобия $P_{1H} / P_{2H} = P_{1M} / P_{2M}$; $P_{3H} / P_{2H} = P_{3M} / P_{2M}$, то уравнения оригинала и модели тождественны:

$$a_1 k_1 + a_2 k_2 - a_3 k_3 = P_{1H} + P_{2H} - P_{3H} = 0.$$

Если в процессе эксперимента получена регрессионная модель, где аргументами выбраны масштабы величин, например, при испытании физических моделей разного масштаба, машин или оборудования разного размера, то на полученную регрессионную модель может быть наложено ограничение, следующее из анализа теоретической модели как следствие первой теоремы подобия.

Регрессионное уравнение вида $b_1 k_1' + b_2 k_2' - b_3 k_3' = 0$ имеет соответственно тождественные аргументы $k_1' = k_1$; $k_2' = k_2$; $k_3' = k_3$, что следует из характера отыскиваемой зависимости, а также соответственно равные коэффициенты: $a_1 = b_1$; $a_2 = b_2$; $a_3 = b_3$, что следует из условия подобия моделей. Следовательно,

$$a_1 k_1 + a_2 k_2 - a_3 k_3 = P_{1н} + P_{2н} - P_{3н};$$

$$b_1 k_1' + b_2 k_2' - b_3 k_3' = P_{1н} + P_{2н} - P_{3н}.$$

Поэтому при отыскании эмпирических моделей на моделирующий полином могут быть наложены ограничения, следующие из анализа теоретической модели гипотезы, и наоборот, полученная регрессионная модель накладывает ограничение на форму и структуру соответствующей теоретической модели.

С л е д с т в и е IV касается относительной оценки эффективности нового технического решения. Оно заключается в следующем. Если процессы подобны, то эффективность протекания каждого из них по сравнению с традиционным, принятым за эталон по относительному показателю эффективности, может быть определена на основании анализа моделирующей системы.

Пусть процессы, описываемые уравнениями

$$P_{1н} + P_{2н} - P_{3н} = 0, \quad P_{1м} + P_{2м} - P_{3м} = 0,$$

подобны и имеют равные критерии подобия:

$$P_1/P_2 = \text{idem}; \quad P_3/P_2 = \text{idem}.$$

Пусть эффективность нового исследуемого процесса оценивается по отношению к традиционному по формуле

$$k_{\text{эф.н}} = P_{3н.\text{нов}}/P_{3н.\text{трад}}, \quad \text{где } P_{3н.\text{нов}} = (P_{1н} + P_{2н})_{\text{нов}}; \quad P_{3н.\text{трад}} = (P_{1н} + P_{2н})_{\text{трад}}.$$

При исследовании процессов на модели имеем:

$$k_{\text{эф.м}} = P_{3м.\text{нов}}/P_{3м.\text{трад}},$$

$$\text{где } P_{3м.\text{нов}} = (P_{1м} + P_{2м})_{\text{нов}}; \quad P_{3м.\text{трад}} = (P_{1м} + P_{2м})_{\text{трад}}.$$

Из равенства критериев подобия следует:

$$P_{3м} = P_{3н}/k_{P_3}; \quad P_{2м} = P_{2н}/k_{P_2}; \quad P_{1м} = P_{1н}/k_{P_1}$$

Так как явления подобны, то $1/k_{P_2} = 1/k_{P_1}$.

Выполняя аналогичные преобразования соответственно для каждого из изучаемых процессов, получаем: $k_{\text{эф.м}} = k_{\text{эф.н}}$. Откуда следует, что относительная оценка эффективности протекания процесса в оригинале равна соответствующей эффективности, зафиксирован-

ной на установке, моделирующей процесс, с точностью до подобия моделирующей системы.

В заключение можно сказать:

1. Моделирование в системном анализе является важной методологической основой, позволяющей решать широкий спектр задач различной степени сложности и обеспечивающей повышение темпов поиска новых решений при минимизации материальных затрат. Модели используют на всех этапах системного анализа путем моделирования всей системы и отдельных ее частей, таких, как вход, процесс, выход и обратная связь, показатели оценки эффективности создаваемых объектов техники и др.

2. Многообразие видов моделей, что иллюстрируется их классификацией, обусловлено многообразием рассматриваемых явлений и процессов. Наибольшее распространение в научной и инженерной практике получили математические и предметно-математические модели и комплексные моделирующие системы (ЭВМ, САПР и др.), приближенные регрессионные эмпирические модели-анalogии, а также физические модели, природа которых соответствует природе оригинала.

3. Теория подобия является основой моделирования систем, базой постановки и обработки экспериментов, а также обобщения результатов на широкий класс явлений. Важные результаты дает теория подобия при решении задач по определению основных параметров объектов техники в подобных условиях эксплуатации, а также для получения зависимостей, определяющих связь между основными техническими параметрами образцов техники различных типоразмерных групп согласно следствиям, вытекающим из основных теорем подобия.

Глава II

МОДЕЛИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ, МАШИН И КОМПЛЕКСОВ

§ II.1. ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО УРОВНЯ

Обоснованный анализ эффективности и технического уровня дорожно-строительных машин практически не может быть осуществлен без установления взаимосвязи системы показателей машины с показателями эффективности их функционирования, эффективности их подсистем, узлов, деталей и элементов рабочих органов.

Разработку современной дорожно-строительной техники может успешно осуществлять специалист, способный мыслить не только техническими категориями, но и хорошо знать современную технологию производства дорожных, аэродромных, мостовых и других объектов промышленного и жилищного строительства. Поэтому формирование показателей оценки эффективности облегчает рассмотрение системной классификации (дорожно-строительных машин, классификации технологических процессов и операций строительного производства (рис. II.1).

При формировании показателя эффективности необходимо принимать во внимание, что показатель должен обеспечивать: а) выявление влияния на эффективность машины всего многообразия определяющих факторов технических параметров, условий производства, эксплуатации и др.; б) получение обоснованных рекомендаций для выбора рациональных технических параметров машины, совокупность которых определяет ее технико-экономическую эффективность; в) определение технико-экономической целесообразности применения объекта в группе машин разного типоразмера с учетом условий эксплуатации производства, потребностей и/перспектив развития народного хозяйства. Кроме того, показатель должен удовлетворять следующим требованиям: иметь технико-экономическую основу соответствовать цели, достигаемой в результате применения оборудования; иметь иерархическую структуру, т. е. включать частные показатели в более общие.

Установление связей между отдельными критериями эффективности осуществляют на основании анализа интегральных показателей. В качестве интегрального показателя используют зависимость для расчета приведенных удельных затрат, руб/ед. прод.

$$Z_y = Z/\Pi,$$

где Z — приведенные затраты, руб/ч; Π — эксплуатационная произ-

водительность, м³ ч. Величину Z определяют в соответствии с отраслевой инструкцией:

$$Z = U + Z_k(P + E_{II}) + E_{II}k_3,$$

где U — текущие затраты потребителя, связанные с выполнением технологического процесса без учета отчислений на реновацию техники, руб/ч; Z_k — капитальные затраты, связанные с созданием, производством, доставкой и монтажом техники, руб/ч; P — отчисления

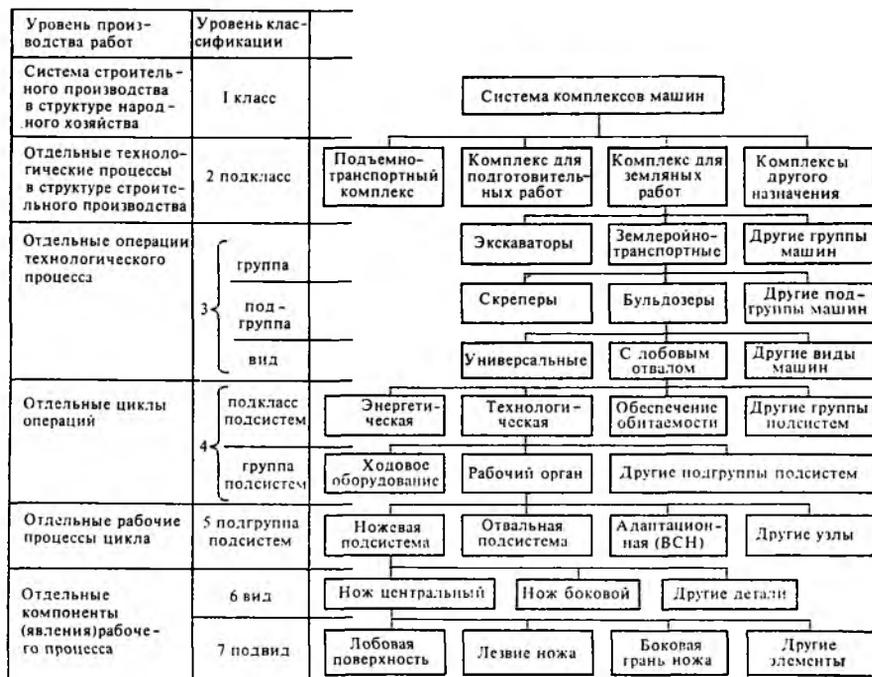


Рис. II.1. Классификация дорожно-строительных машин по характеру производства работ, назначению и конструкции

на реновацию от капитальных затрат, руб/ч; E_{II} — нормативный коэффициент эффективности ($E_{II} = 0,15$); k_3 — сопутствующие капитальные вложения потребителя на эксплуатацию техники, руб/ч.

На этапе разработки новой техники эффективность последней целесообразно устанавливать по приближенным зависимостям, основу формирования которых составляет системный анализ оцениваемого объекта. Системная классификация объекта, соответствующая уровню основных групп подсистем машины (рис. II.1), позволяет рассматривать приведенные затраты в виде суммы, каждое из слагаемых которой характеризует определенную группу подсистем машины: 1) затраты на создание энергетической подсистемы, величина которых в первом приближении пропорциональна величине

мощности установленного двигателя N ; 2) затраты на создание технологической или функциональной подсистемы машины, которые определяются ее конструктивным исполнением (рабочие органы, трансмиссии, ходовое оборудование, рама, автоматизация и др.), пропорциональные массе (силе тяжести) машины G ; 3) затраты, пропорциональные эргономическим показателям; для всех типоразмеров эти свойства примерно одинаковы. Такую подсистему можно назвать подсистемой обитания (кабина, оборудование управления и др.). Величина этих затрат не изменяется существенно от роста мощности и массы машины.

Регрессивные модели, определяющие зависимость приведенных затрат (руб/ч) от мощности (кВт) и массы машины (т)

Бульдозеры гусеничные	$Z = 4 + 0,07N + 0,38G$
Бульдозеры колесные	$Z = 9 + 0,05N + 0,41G$
Скреперы самоходные	$Z = 3,75 + 0,11N + 0,57G$
Погрузчики одноковшовые фронтальные пневмоколесные	$Z = 9,20 + 0,13N + 0,49G$
Погрузчики одноковшовые фронтальные на гусеничных тракторах	$Z = 5,25 + 0,12N + 0,51G$
Автогрейдеры	$Z = 1,43 + 0,09N + 0,83G$
Катки пневмоколесные	$Z = 5,25 + 0,06N + 0,38G$
Катки статические с металлическими вальцами	$Z = 2 + 0,04N + 0,18G$

Величину Z можно представить в виде следующей суммы:

$$Z = b'_0 + b_1N + b_2G,$$

где b'_0 — составляющая приведенных затрат, величина которой обусловлена влиянием конструктивных параметров и экономических факторов, не зависящих от мощности и массы машины, руб./ч; b_1 , b_2 — коэффициенты, определяющие приведенные капитальные и эксплуатационные затраты, приходящиеся соответственно на единицу мощности двигателя и массы машины, отнесенные к часу работы, руб. (кВт·ч) и руб. (т·ч).

Возможность представления приведенных затрат Z в виде предложенной теоретической модели подтверждается результатами анализа статистической информации. Выражение для определения приведенных затрат рассматривается как целевая функция, а мощность и масса как определяющие факторы.

Получение соответствующих регрессионных моделей иллюстрируется анализом технико-экономических показателей бульдозеров на колесном и гусеничном ходу, фронтальных погрузчиков, самоходных скреперов, автогрейдеров, катков, выпускаемых в СССР, США, Японии, Франции и Италии. Формирование стоимости машинно-часа по анализируемым машинам и последующий переход от нее к приведенным затратам осуществлен на базе изучения показателей арендной платы, данных по эксплуатационным расходам, заработной плате обслуживающего персонала и капитальным вложениям. Показатели приведены к стоимости в рублях. Установлено, что влияние капитальных вложений, отнесенных к количеству часов в году, в величине приведенных затрат не превышает 6%. Уравнения

регрессии приведены на стр. 34. Соответствующий графический материал приведен на рис. II.2.

Значения коэффициентов парной корреляции в пределах от 0,8 до 0,9 показывают тесную связь между приведенными затратами Z , мощностью N и массой машины G , близкую к функциональной. Влияние указанных двух факторов на величину приведенных затрат по коэффициенту корреляции составило 92,3 — 98,8%. Ошибка аппроксимации для разных групп машин 13,3 — 27,8%. Анализ приведенного материала показывает, что на величину приведенных за-

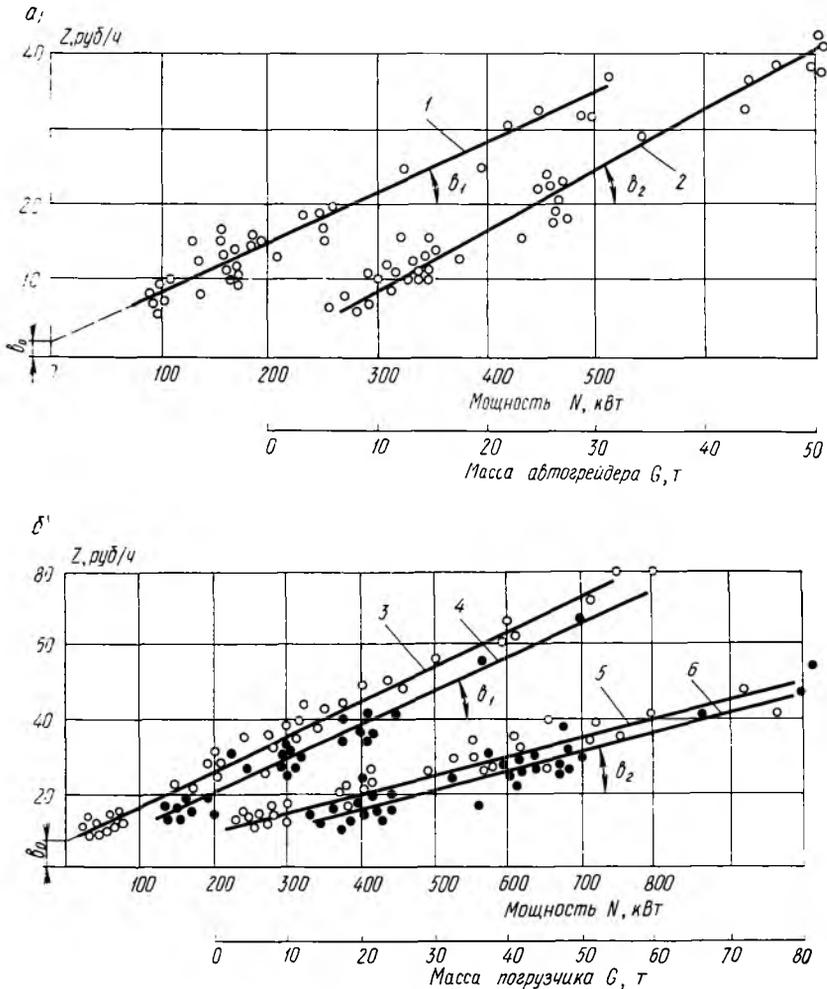


Рис. II.2. Зависимость приведенных затрат от мощности двигателя и массы:

a — для автогрейдеров; b — для ковшевых фронтальных погрузчиков; 1 — $Z = 1,25 + 0,09N$; 2 — $Z = 1,6 + 0,83G$; 3 — колесные $Z = 7,4 + 0,13N$; 4 — гусеничные $Z = 4 + 0,12N$; 5 — колесные $Z = 11 + 0,49G$; 6 — гусеничные $Z = 6,5 + 0,51G$

трат бульдозеров прежде всего влияет мощность двигателя до 50% и масса машины до 45%. Влияние конструктивных особенностей по обеспечению эргономических условий и других факторов не превышает 21%. Заметим, что значения коэффициентов b_i не зависят от размеров машины, а определяются только их конструкцией и назначением. При сравнении групп машин различного назначения между собой величины коэффициентов b_i будут оказывать существенное влияние особенно на результаты выявления области рационального использования машины.

Оценка эффективности и технического уровня на основании приведенных удельных затрат требует предварительного установления значения коэффициентов b_0 , b_1 и b_2 . Это усложняет процесс оценки. Анализ полученных регрессивных моделей, как следует из графиков, указывает, что для ряда групп машин эти коэффициенты остаются неизменными при изменении мощности и массы. Для ориентировочной оценки на этапе составления технического задания на проектирование можно воспользоваться обобщенными показателями, которые не содержат указанных коэффициентов и позволяют оценить уровень объекта по информации только о технических параметрах, имеющихся в каталогах и проспектах. Последнее следует из представления величины Z_y ; после деления величины Z на Π и выноса за скобки величин $N_{уд}$ и $G_{уд}$ получим Z_y , руб./ед. прод.

$$Z_y = k_{b_0} k_{b_1 b_2} \frac{N_{уд}}{\Pi_{т.уд}},$$

$$\text{где } k_{b_0} = \left(1 + \frac{b_0}{b_1 N_{уд} + b_2 G_{уд}} \right); \quad k_{b_1 b_2} = \frac{b_1}{G_{уд}} + \frac{b_2}{N_{уд}}; \quad b_0 = \frac{b'_0}{\Pi_t}$$

Обобщенный показатель эквивалентен двум показателям — энергоемкости и материалоемкости. Для группы машин, имеющих постоянное значение коэффициентов b_0 , b_1 и b_2 , эффективность и технический уровень системы можно оценить по обобщенному показателю $\Pi_{NG} = N_{уд}/\Pi_{т.уд}$.

Обобщенный показатель представляет отношение удельной энергоемкости N/Π_t к удельной производительности Π_t/G . Уменьшение значения показателя Π_{NG} указывает на повышение эффективности системы. Из соотношения могут быть выделены частные показатели более низкого уровня: удельные энергоемкость $N_{уд}$, материалоемкость $G_{уд}$ и производительность Π_t .

Показатель Π_{NG} можно преобразовать к виду $\Pi_{NG} = NG \Pi_t^{-2}$.

Следовательно, эффективность системы по обобщенному показателю зависит от квадрата производительности. Производительность является одним из наиболее важных показателей оценки технического уровня. В настоящее время сформированы работоспособные теоретические модели технической производительности ряда машин, которые учитывают большое количество определяющих конструктивных параметров, величин, характеризующих взаимодействие двигателя и рабочего органа с грунтом, а также параметров, определяющих технологические условия выполнения работ.

Эффективность одной машины по сравнению с другими объективно можно установить при их анализе в одинаковых эксплуатационных условиях. Показатель P_{NG} дает возможность оценить машины, принадлежащие в основном к одной типоразмерной группе в диапазоне ограниченного изменения главного параметра. Для машин, принадлежащих к разной размерной группе, необходимо предварительно привести объекты к одинаковым условиям эксплуатации по объемам выполняемых работ. В этом случае вместо величины технической производительности P_T в показателе P_{NG} следует использовать относительную величину P'_T , для определения которой служит формула

$$P'_T = P_T/n_V,$$

где $n_V = V_\Sigma/q_i$ при $V_\Sigma \geq q_{i\max}$; V_Σ — общий объем работы, m^3 ; q_i — объем продукта, разрабатываемого или перемещаемого машиной за рабочий цикл, m^3 .

На более высоком уровне оценки эффективность необходимо определять с учетом анализа величин коэффициентов b_1 и b_2 . Состояние $b_1 > b_2$ указывает на необходимость акцентировать внимание на анализе показателя $N_{уд}$. При $b_2 > b_1$ внимание следует уделить в первую очередь анализу показателя $G_{уд}$. Система показателей оценки эффективности и технического уровня дорожно-строительных машин и комплексов, которые могут быть использованы на этапах проектирования и эксплуатации, приведена в табл. II.1.

Количественные характеристики степени достигнутого эффекта по соответствующему показателю получают на основании анализа величин коэффициентов эффективности

$$k_{\text{эф}i} = 1 - \frac{\partial_{i2}}{\partial_{i1}},$$

где ∂_i — соответствующий показатель эффективности, например, величины Z_Y , P_{NG} , $N_{уд}$, P_T и др. (табл. II.1).

Учет влияния эксплуатации на оценку уровня машины, предназначенной для выполнения работ в широком спектре условий эксплуатации, ведут по средним значениям показателей и коэффициентов эффективности:

$$k_{\text{эф.ср}} = \sum_1^n k_{\text{эф}i} p_i,$$

где $k_{\text{эф}i}$ — коэффициент (показатель) эффективности, рассчитанный для соответствующих условий эксплуатации; p_i — вероятность появления соответствующих условий.

По назначению все показатели, приведенные в табл. II.1, можно отнести к соответствующему уровню классификации. Показатель I — интегральный — целесообразен для оценки комплексов систем и машин, если известно, что коэффициенты b_i удельных приведенных затрат для объекта при его модернизации или при его разработке изменяются существенным образом. Этот показатель оценивает технико-экономический уровень объекта.

Система моделей для оценки эффективности и оптимизации параметров машин

Уровень оценки	Наименование показателя	Общая форма записи показателя		Связи между параметрами и ограничения	Условия оптимизации	Условия применения показателей
		Оценка с учетом условий эксплуатации	Среднее значение с учетом вероятности условий эксплуатации			
1	2	3	4	5	6	7
I	Приведенные удельные затраты $Z_{пр.уд}$	$C_{уд} + EK_{уд} = (b_0 + b_1 N_{уд} + b_2 G_{уд})$	$Z_{пр.уд.ср} = \sum_1^n Z_{пр.уд i} p_i$	$b_0 = f(G, \dots)$ $b_1 = f(N, \dots)$ $b_2 = f(G, \dots)$	$Z_{пр.уд} \rightarrow \min$	Установление областей оптимального применения при известных b_0, b_1, b_2
	Коэффициент относительной эффективности $k_{Z_{пр.уд}}$ по $Z_{пр.уд}$	$1 - \frac{Z_{пр.уд(j+1)}}{Z_{пр.уд(i)}}$ при $Z_{пр.уд(j+1)} < Z_{пр.уд j}$	$k_{Z_{пр.уд}} = \sum_1^n k_{Zi} p_i$	—	$k_{Z_{пр.уд}} \rightarrow \max$	
II	Обобщенный показатель энергоемкости и металлоемкости Π_{NG}	$\frac{N_{уд}}{\Pi_{уд}}$	$\Pi_{NGср} = \sum_1^n \Pi_{NGi} p_i$	$b_0 = \text{const};$ $b_1 = \text{const};$ $b_2 = \text{const}$	$\Pi_{NGср} \rightarrow \min$	Анализ технических параметров при неизвестных b_0, b_1, b_2
	Коэффициент относительной эффективности $k_{\Pi_{NG}}$ по Π_{NG}	$1 - \frac{\Pi_{NG(j+1)}}{\Pi_{NG(i)}}$ при $\Pi_{NG(j+1)} < \Pi_{NG(i)}$	$k_{\Pi_{NGср}} = \sum_1^n k_{\Pi_{NGi}} p_i$	$\Pi = f(N, G, T, l_{гр}, \dots)$	$k_{\Pi_{NG}} \rightarrow \max$	

III	Металлое. G_y	$\frac{G}{\Pi}$	$G_{\text{ср.уд}} = \sum_1^n G_{\text{уд}i} p_i$
	Коэффициент относительной эффективности $k_{G_{\text{уд}}}$ по G_y	$1 - \frac{G_{\text{уд}(j+1)}}{G_{\text{уд}(j)}}$ при $G_{\text{уд}(j+1)} < G_{\text{уд}(j)}$	$k_{G_{\text{ср.уд}}} = \sum_1^n k_{G_{\text{уд}i}} p_i$
IV	Энергосмкость $N_{\text{уд}}$	$\frac{N}{\Pi}$	$N_{\text{ср.уд}} = \sum_1^n N_{\text{уд}i} p_i$
	Коэффициент относительной эффективности $k_{N_{\text{уд}}}$ по N_y	$1 - \frac{N_{\text{уд}(j+1)}}{N_{\text{уд}(j)}}$ при $N_{\text{уд}(j+1)} < N_{\text{уд}(j)}$	$k_{N_{\text{ср.уд}}} = \sum_1^n k_{N_{\text{уд}i}} p_i$
V	Производительность (выработка на одного работающего и т. п.) Π	$\frac{q}{t_{\text{ц}}}$; Fv	$\Pi_{\text{ср}} = \sum_1^n \Pi_i p_i$
	Коэффициент относительной эффективности k_{Π} по Π	$1 - \frac{\Pi_{(j)}}{\Pi_{(j+1)}}$ при $\Pi_{(j+1)} > \Pi_{(j)}$	$k_{\Pi_{\text{ср}}} = \sum_1^n k_{\Pi_i} p_i$
	Время цикла $t_{\text{ц}}$	$t_{\text{ц}} = \sum t_i$	$t_{\text{ц.ср}} = \sum_1^n t_{\text{ц}i} p_i$

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \text{const}; \\
 b_1 &= \text{const}; \\
 b_2 &= \text{const}; \\
 \Pi &= f(N, G, \\
 T, t_{\text{тр}}, \dots)
 \end{aligned}$$

$$G_{\text{уд}} \rightarrow \min$$

$$k_{G_{\text{уд}}} \rightarrow \max$$

$$N_{\text{уд}} \rightarrow \min$$

$$k_{N_{\text{уд}}} \rightarrow \max$$

$$\begin{aligned}
 t_{\text{II}} &= f(N, G, T, \\
 t_{\text{тр}}, \dots)
 \end{aligned}$$

$$\Pi \rightarrow \max$$

$$k_{\Pi} \rightarrow \max$$

$$\begin{aligned}
 v &= f(N, G, T, \\
 \varphi_{\text{сн}}, \dots)
 \end{aligned}$$

$$t_{\text{II}} \rightarrow \min$$

Анализ технических параметров при постоянных параметрах, входящих в показатели предыдущего уровня

Уровень оценки	Наименование показателя	Общая форма записи показателя		Связи между параметрами и ограничения	Условия опти-ции	Условия приме-нения показателей
		Оценка с учетом условий эксплуатации	Среднее значение с учетом вероятности условий эксплуа-тации			
1	2	3	4	5	6	7
VI	Коэффициент относительной эффективности $k_{t_{ц}}$ по $t_{ц}$	$1 - \frac{t_{ц(j+1)}}{t_{ц(j)}}$ при $t_{ц(j+1)} < t_{ц(j)}$	$k_{t_{ц} \text{ ср}} = \sum_1^n k_{t_{ц} i} p_i$		$k_{t_{ц}} \rightarrow \max$	
VII	Удельные сопротивления $k_{отп}$ и другие относительные величины	$\frac{N}{G}; \frac{A_i}{V_i}; \eta; \delta; k_{нд}; k_{п}$	$k_{отп \text{ ср}} = \sum_1^n k_i p_i$	$P_{к} = f(h, B, c_{\omega}, \gamma, \dots)$	$k_{отп} \rightarrow \min$ \max	
	Коэффициент относительной эффективности $k_{k_{отп}}$ по удельным показателям	$1 - \frac{k_{отп(j+1)}}{k_{отп(i)}}$ при $k_{отп(j+1)} < k_{отп(i)}$	$k_{k_{отп} \text{ ср}} = \sum_1^n k_{k_{отп} i} p_i$		$k_{k_{отп}} \rightarrow \max$	
VIII	Отдельные параметры P_i	N, T, A, G, v	$P_i \text{ ср} = \sum_1^n P_i p_i$	—	$P_i \rightarrow \min$ \max	
	Коэффициент изменения параметра k_{P_i}	$\frac{P_{i(j+1)}}{P_{i(j)}}$ при $P_{i(j+1)} \geq P_{i(j)}$	$k_{P_i \text{ ср}} = \sum_1^n k_{P_i i} p_i$		$k_{P_i} \rightarrow \max$	

Примечание. Анализ показателей всех уровней осуществляется посредством: а) производственного эксперимента; б) моделирования на ЭВМ; в) моделирования физического и комбинированного.

Показатель II имеет аналогичное значение, но его целесообразно использовать при условии, что для нового объекта коэффициенты приведенных удельных расходов b_i не изменяются существенным образом. Синтез этого показателя с коэффициентами качественных показателей целевого и ограничительного назначения позволяет получить достаточно полный показатель оценки системы.

Показатели III и IV могут быть использованы для оценки основных подсистем машин или комплексов энергетического и технологического назначения. Показатели V и VI предназначаются для оценки производительности комплексов и машин с учетом показателей надежности систем. Показатели, составляющие VII и VIII группы, могут быть использованы для оценки уровня системы или отдельных частей при неизменных коэффициентах b_i .

Анализ системы показателей позволяет более четко указать область действия каждого. Показатель N/G (где N — мощность машины и G — сила тяжести машины) широко используют для оценки объекта. Характер изменения удельных показателей энергоемкости (N/Π) и материалоемкости (G/Π) (где Π — производительность) указывает, что лучшему объекту соответствует меньшая каждой из двух величин. Это приводит к справедливости следующих соотношений:

$$\frac{N}{G} \frac{G}{\Pi} \rightarrow \min; \quad \frac{G}{N} \frac{N}{\Pi} \rightarrow \min.$$

При фиксации удельной материалоемкости G/Π величина N/G с повышением технического уровня машины должна уменьшаться [$(N/G) \rightarrow \min$]. При фиксации удельной энергоемкости N/Π необходимо увеличивать [$(N/G) \rightarrow \max$].

Следует заметить, что для однотипных машин достаточно полное отражение технико-экономических характеристик объекта в первом приближении дает обобщенный показатель Π_{NG} . Последний можно использовать для оптимизации технических параметров машины с учетом надежности условий эксплуатации и вероятности появления влияющих факторов.

Зависимости для расчета оценки производительности основных видов землеройно-транспортных машин в зависимости от условий эксплуатации имеют вид:

для бульдозера

$$\frac{D_1 k_{\Pi} k_{\Pi Д} N}{k_{рз} k_{дон} \left[\frac{k_{\Pi} k_{\Pi}}{k_{рз} \gamma (1 - \delta_{\Pi}) \left(1 - \frac{f \pm i}{k_{сц} \gamma_{сц}} \right)} + \frac{k_{\Pi} (f \pm i) G_{т.бл.тр}}{\gamma (1 - \delta_{ср}) q_{\Pi}} \right]};$$

для скрепера

$$\frac{D_1 k_{\Pi} k_{\Pi Д} N}{k_{рз} k_{дон} \left[\frac{k_{\Pi} k_{\Pi}}{\gamma (1 - \delta_{\Pi}) \left(1 - \frac{f \pm i}{k_{сц} \gamma_{сц}} \right)} + \frac{k_{\Pi} (f \pm i) G_{ск.тр}}{\gamma (1 - \delta_{ср}) q} \right]};$$

для автогрейдера

$$k_{\text{доп}} \left[\frac{D_1 k_{\text{нд}} N}{\eta (1 - \delta_{\text{к}}) \left(1 - \frac{f \pm i}{k_{\text{сц}} \varphi_{\text{сц}}} \right)} + \frac{2lT}{\eta (1 - \delta_{\text{п}}) LH^2} \right];$$

для рыхлителя

$$k_{\text{рх}} k_{\text{доп}} \left[\frac{D_1 k_{\text{нд}} N}{\eta (1 - \delta_{\text{рх}} T_{\text{св}})} + \frac{T_{\text{х}}}{\eta (1 - \delta_{\text{х}}) T_{\text{св}}} \right]$$

В формулах приняты обозначения:

$D_1 = 3,6 \text{ МН} \cdot \text{м} / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$ — коэффициент пропорциональности; $k_{\text{н}}$ — коэффициент наполнения; $k_{\text{нд}}$ — коэффициент, учитывающий надежность; N — мощность двигателя, кВт; $k_{\text{рх}}$ — коэффициент рыхления; η — механический КПД трансмиссии; $\delta_{\text{к.ср}}$ — коэффициент буксования при копании и транспортировке; $k_{\text{цр}} = 2 + G_{\text{цр}}/G_{\text{б}}$ — коэффициент влияния призмы волочения; f — коэффициент сопротивления передвижению; i — уклон местности; $G_{\text{т.б}}$ — сила тяжести бульдозера, МН; $k_{\text{сц}}$ — коэффициент сцепного веса; q — емкость призмы или ковша, м^3 ; $k_{\text{г}} = 2 + G_{\text{г}}/G_{\text{ск}}$ — коэффициент влияния грунта в ковше; $G_{\text{ск}}$ — сила веса скрепера, МН; $l_{\text{тр}}$ — дальность транспортировки, м; $k_{\text{доп}}$ — коэффициент дополнительных операций; $k_{\text{н}}$, $k_{\text{рх}}$ — коэффициент сопротивления копанию и рыхлению, МПа; l — длина участка работы, м; T — тяговое усилие на соответствующем этапе цикла, МН; $\delta_{\text{п}}$ — коэффициент буксования при планировке и перемещении грунта; L , H — длина и высота отвала, м; $T_{\text{рх}}$, $T_{\text{х}}$ — тяговое усилие при рыхлении и холостом ходе, МН; $\delta_{\text{рх}}$, $\delta_{\text{х}}$ — коэффициенты буксования при рыхлении и холостом ходе; $T_{\text{св}} \approx G[k_{\text{сц}}\varphi_{\text{сц}} - (f \pm i)]$ — тяговое усилие, расходуемое на копание грунта, МН.

Производительность машины при формировании показателей эффективности является одним из важнейших факторов. Наличие теоретически и экспериментально обоснованной функциональной зависимости позволяет аргументированно подходить к формированию показателей различного уровня и назначения. Это следует, во-первых, из того, что формула для производительности объединяет технико-экономические параметры машины и условия ее эксплуатации; во-вторых, указанная формула для дорожно-строительных машин является источником информации о функциональном назначении и полезности машины, а также информации, позволяющей оценить влияние на эффективность машины уровня организации работ, квалификации, физического и психического состояния оператора; в-третьих, анализ ряда технико-экономических показателей различного уровня, таких, как рентабельность, приведенные удельные затраты, энергоемкость, металлоемкость и др., не может быть выполнен в отрыве от параметров, определяющих производительность машины.

Важно отметить, что структура модели для расчета производи-

тельности определяется условиями эксплуатации и характером организации работ. Ниже приводятся модели для расчета и оценки производительности землеройно-транспортных машин. Общий анализ моделей указывает на возможность оптимизации системы по мощности двигателя при анализе производительности и времени рабочего цикла машины. Рассмотренные выше зависимости соответствуют наиболее характерной для землеройно-транспортных машин организации работ.

Приведенные на стр. 41, 42 формулы должны быть в конкретных ситуациях дополнены ограничениями. В частности, изменение производительности с увеличением мощности двигателя при постоянстве остальных параметров соответствует полученной закономерности в том случае, если с увеличением мощности обеспечивается возможность путем автоматизации управления рабочим органом, улучшения качеств подвески ходовой части и других мероприятий, соответствующего повышения скоростей рабочих и холостых операций процесса. Зависимости могут быть дополнены формулами подобия (см. далее табл. II.9).

Для теоретического анализа с учетом основных факторов, влияющих на характер протекания процесса разработки грунта, целесообразно использовать аналитические зависимости (модели) с минимальным числом коэффициентов. Такие модели могут быть получены путем упрощения математических моделей, приведенных на стр. 41, 42.

При $k_{II} = 1$; $k_{нд} = 1$; $k_{доп} = 1$; $k_{рз} = 1$; $\eta \leq 1$; $\delta_{к} \simeq \delta_{ср} \simeq 0$;

$$\frac{f \pm i}{k_{сц} \varphi_{сц}} \ll 1; \quad k_{нд} (f \pm i) G_{т.б} \simeq T \quad \text{получаем: } \Pi = \frac{13,6N}{k_{к} + T l_{тр}/q_{нр}}$$

На основании анализа конструктивного подобия бульдозеров методом теории подобия с использованием соответствующих формул и коэффициентов подобия по основным техническим параметрам (см. далее табл. II.9) производительность машин может быть выражена через главные параметры машины. Для бульдозеров это T — номинальное тяговое усилие: $N = k_1 T^{7,6}$; $k_1 = N_0 / T_0^{7,6}$; $q = k_{14} T$; $k_{14} = q_0 / T_0$.

Подставляем зависимости в полученную модель:

$$\Pi = \frac{270 T^{7,6} k_1}{k_{к} + \frac{l_{тр}}{k_{14}}}$$

Тяговое усилие бульдозера меняется в широких пределах в зависимости от грунтовых условий и состояния ходового оборудования и других факторов. Целесообразно для ориентировочных расчетов производительность выразить через такой параметр, как G — силу тяжести: $N = k_2 G^{7,6}$; $k_2 = N_0 / G_0^{7,6}$; $T = k_6 G$; $k_6 = T_0 / G_0$; $q = k_{15} G$; $k_{15} = q_0 / G_0$.

Тогда

$$\Pi = \frac{270 G^{7,6} k_2}{k_{к} + \frac{k_6 l_{тр}}{k_{15}}}$$

В полученных моделях для каждого конкретного случая необходимо учесть вариацию k_k — удельного сопротивления копания. Последнюю определяют обычно экспериментальным путем. Для ориентировочных расчетов ниже приводятся значения k_k .

Тип грунта	k_k , МПа
Песок, супесь, суглинки мягкий	0,20—0,25
Суглинок без включений, гравий мелкий и средний, глина мягкая	0,25—0,34
Суглинок крепкий, глина средней крепости	0,32—0,40
Суглинок крепкий со щебнем или галькой, глина крепкая или очень крепкая	0,40—0,48

Примечание. Минимальные значения k_k для бульдозеров большей мощности; максимальные — для бульдозеров малой мощности.

Аналогичные выражения могут быть получены на базе других технических параметров машины. Модели для определения производительности через основные технические параметры, которые могут быть использованы при формировании системных математических моделей более высокого уровня, приведены на стр. 45. Проверка полученных моделей выполнена на основании экспериментальных материалов, по техническим параметрам и характеристикам промышленных бульдозеров. Результаты сопоставления приведены на рис. 11.3.

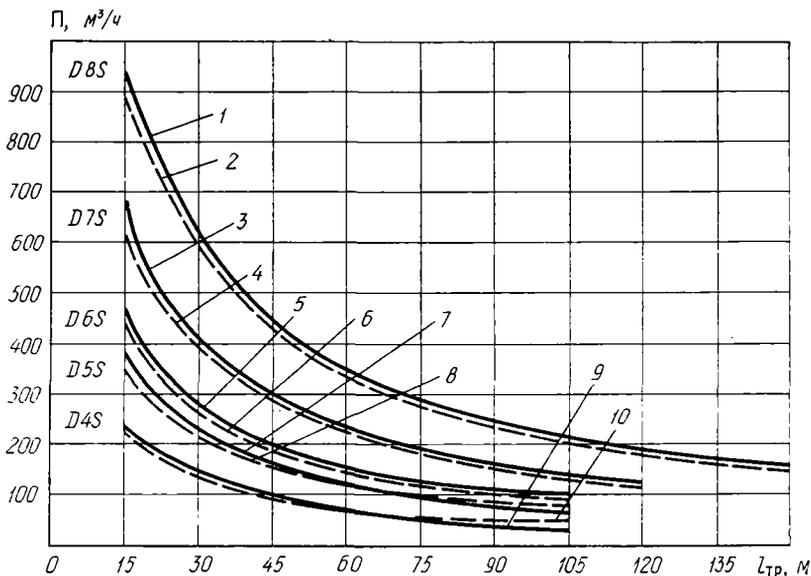


Рис. 11.3. Производительность бульдозеров фирмы «Катерпиллер», оборудованных стандартным отвалом:

1 — D8S (270 л. с.); 3 — D7S (180 л. с.); 5 — D6S (140 л. с.); 7 — D5S (105 л. с.); 9 — D4S (74 л. с.); 2, 4, 6, 8, 10 — зависимость, построенные по теоретическим моделям, приведенным в табл. 11.2

Рассмотренные положения позволяют сделать вывод, что для теоретического анализа с учетом основных определяющих факторов целесообразно использовать упрощенные модели, определяющие производительность через главный параметр машины. Такие математические модели для определения производительности землеройно-транспортных машин циклического действия через основные технические параметры приведены в табл. II.2.

Таблица II.2

Определяющий параметр	Форма записи модели для расчета производительности	Значения коэффициентов k_i^*
Тяговое усилие T , МН	$\Pi = \frac{3,6 T^{7/6} k_1}{k_K \mp l_{TP} / k_{11}}$	$k_1 = N_0 / T_0^{7/6};$ $k_{11} = q_0 / T_0$
Сила тяжести машины G , МН	$\Pi = \frac{3,6 G^{7/6} k_2}{k_K \mp k_6 l_{TP} / k_{15}}$	$k_2 = N_0 / G_0^{7/6};$ $k_6 = T_0 / G_0;$ $k_{15} = q_0 / G_0$
Вместимость ковша (призмы) q , м ³	$\Pi = \frac{3,6 k_3 q^{7/6}}{k_K \mp k_7 l_{TP}}$	$k_3 = N_0 / q_0^{7/6};$ $k_7 = T_0 / q_0$
Мощность N , кВт	$\Pi = \frac{3,6 N}{k_K \mp k_5 l_{TP} / k_{13}}$	$k_5 = T_0 / N_0^{8/7};$ $k_{13} = q_0 / N_0^{8/7}$

* Коэффициенты подобия k_i устанавливаются по параметрам машины, принятой за эталон. Индекс «0» относится к параметрам такой машины.

§ II.2. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ПАРАМЕТРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН

Проектирование, расчет, оптимизацию параметров и режимов работы дорожно-строительных машин нельзя рассматривать вне связи машины и рабочего оборудования с внешней средой и другими факторами, определяющими условия их эксплуатации. При этом необходимо учитывать случайный характер факторов воздействия.

Анализ рассмотренных моделей показывает, что в качестве основных величин, определяющих условия эксплуатации и имеющих стохастический характер, следует рассматривать физико-механические и прочностные характеристики грунта (тип грунта, сцепление, угол трения и др.), величины, определяющие тягово-сцепные свойства (коэффициенты сопротивления передвижению, сцепления и др.), параметры рельефа местности, а также параметры строительного объекта (объемы работ, дальность транспортировки грунта и др.). От значения указанных параметров зависит значение показателя эф-

фективности системы. Для статистического моделирования необходимо установить плотности вероятностей изменения влияющих параметров путем анализа соответствующих условий эксплуатации.

Важным результатом такого анализа является, в частности, выявление наиболее вероятных грунтов и их свойств для обоснования физической модели грунта. Обработка статистических данных осуществляется в следующей последовательности. На первом этапе определяют относительные величины, характеризующие статистические вероятности параметров, затем строят гистограммы и путем выравнивания эмпирических распределений устанавливают теоретические законы распределения и соответствующие статистические характеристики (математическое ожидание, дисперсию и моменты высшего порядка: эксцесс, асимметрию и др.).

Статистические свойства среды особенно важны при формировании соответствующих физических эквивалентов при физическом моделировании рабочих процессов и машин.

Вероятные типы грунтов. Анализ материалов по грунтоведению и почвоведению позволяет установить статистические вероятности появления грунтов в 2—3 м поверхностной толщине пород на территории СССР. Данные представляют в виде таблиц и гистограмм. На оси абс-

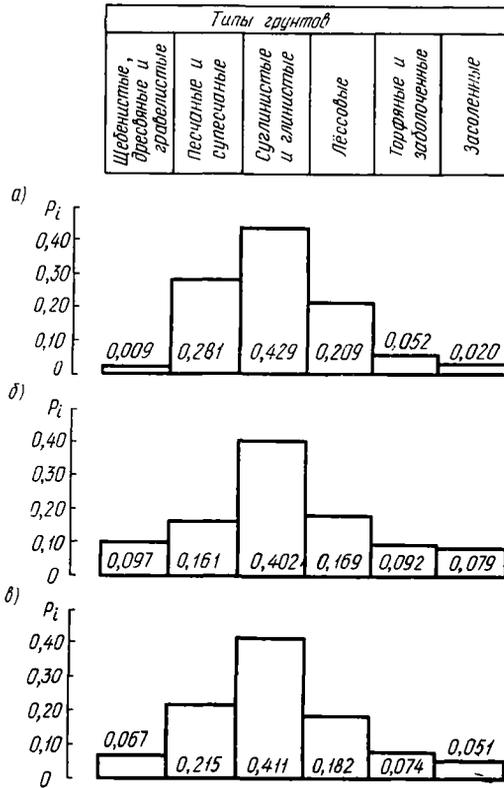


Рис. 11.4. Гистограммы вероятности появления грунтов различного типа по европейской части (а), по азиатской части (б) и по территории СССР в целом (в)

цисс откладывают равные разряды, определяющие грунт по качественному признаку, например по типу или механическому составу; по оси ординат — относительные частоты появления p_i соответствующих признаков. Последние определяют по формуле

$$p_i = n_i/N,$$

где n_i — число, характеризующее появление соответствующего признака; N — число, характеризующее общую совокупность призна-

ков. Вероятность появления грунтов различного типа по территории СССР для I—IV почвенно-географических зон приведена на рис. II.4. На территории СССР преобладают суглинистые и глинистые грунты, вероятность появления которых составляет 0,4, а также песчаные и супесчаные с вероятностью 0,2. Для получения более четких количественных показателей пород, определяющих их прочностные свойства, используют метод оценки трудности разработки грунтов по числу ударов плотномера $C_{уд}$.

Следует иметь в виду, что оценка грунтов по числу C на какой-то конкретный момент времени еще не представляет реальную картину его прочностных свойств, так как они изменяются в течение года в зависимости от влажности грунтового массива. Методика установления вероятностной модели грунтового фона по обобщенному показателю прочности — числу C с учетом сезонного колебания влажности почв приведена на рис. II.5.

Методика позволяет осуществлять прогноз статистической модели прочности грунта на требуемый период строительства. Для этого необходимо иметь данные метеорологического прогноза по тенденции изменения влажности на требуемую перспективу.

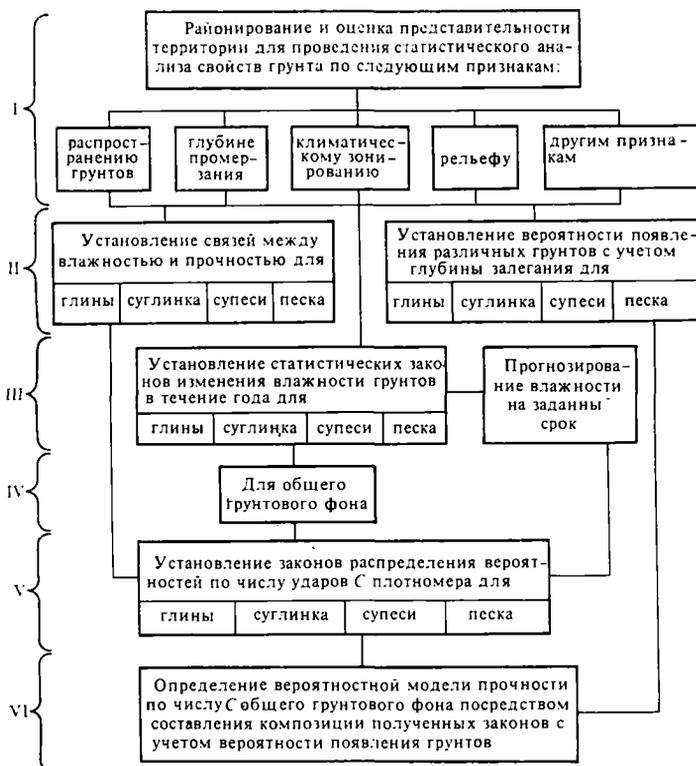


Рис. II.5. Формирование статистических моделей параметров, определяющих прочностные свойства грунтов

Первый этап методики включает работы по выявлению районов залегания грунтов по видам объектов строительства, климатическим зонам, рельефу, административному делению и др. На этом этапе производят оценку представительности района по известным критериям согласия. На втором этапе устанавливают количественные характеристики гистограмм вероятностей появления грунтов разных типов и зависимости числа ударов S от влажности для каждого типа грунта. Третий этап заключается в установлении теоретических законов распределения влажности для выделенных типов грунтов. На этом же этапе при необходимости составляют прогноз изменения влажности грунтов района на заданный период времени. На четвертом этапе устанавливают закон распределения влажности для всех типов грунтов района; на пятом этапе составляют работы по формированию законов распределения числа ударов $S_{уд}$ для каждого из типов грунтов. На шестом этапе устанавливают распределение вероятности числа ударов $S_{уд}$ для всего массива грунта. При необходимости прогноза указанной характеристики на заданный период времени соответствующие расчеты ведут на базе данных прогноза по влажности.

Вероятная влажность грунтов. Определение годового режима влажности грунтов осуществляют на базе статистических данных агрометеорологических станций за несколько лет. В качестве примера формирования соответствующих моделей влажности возьмем территорию IV и V климатических зон (Казахская ССР). Проба грунтов на весовую влажность соответствовала каждому 10 см до глубины 1,0—1,5 м на 96 опытных участках, равномерно расположенных по территории республики. Обработка данных позволила получить следующие законы распределения влажности:

для общего грунтового фона и для супеси — распределение Вейбула $f(\omega) = n\mu^n \omega_i^{n-1} l^{-n} \omega_i^n$;

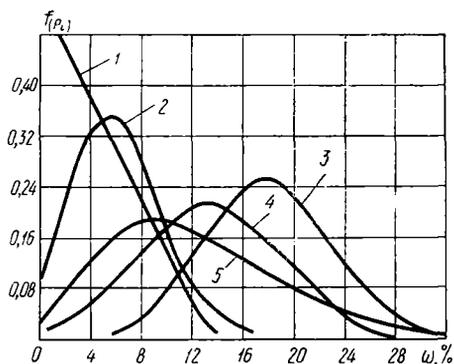


Рис. 11.6. Плотности распределения вероятности влажности для грунтов различного типа по всему массиву в среднем за год:

1 — песок; 2 — супесь; 3 — суглинок; 4 — глина;
5 — по всему массиву грунтов (композиция)

для глины и суглинка — нормальное распределение;

для песка — распределение вида $f(\omega) = E\omega_i + D$, где ω_i — случайное значение влажности; n , μ , E , D — параметры законов распределений.

Значения математических ожиданий, моды и среднеквадратичного отклонения влажности «среднего» грунта равны соответственно 11,7; 9,2; 6,3%. Параметры распределений имеют следующие значения: $n = 1,93$ и $\mu = 0,76$. Аналогично для супеси $n = 2,0$; $\mu = 0,14$ и песка $E = -0,042$; $D = 0,55$. Среднее значение распределения влажности глины 17,6%, сред-

неквадратическое отклонение 4,8%, суглинка соответственно 13,1 и 5,6%, супеси 6,3 и 3,3%, песка 4,9. Вид полученных распределений представлен на рис. II.6.

Вероятностная модель показателя прочности грунтов устанавливается на базе полученных законов распределения влажности отдельных типов грунтов и существующих корреляционных зависимостей между числом C и влажностью ω . Такие зависимости получены [24] в виде следующих функций:

$$C_{yди} = ae^{-b\omega}$$

a и b — эмпирические коэффициенты, зависящие от типа грунта (для глины $a = 118,6$ и $b = 0,11$; для суглинка соответственно $a = 50,2$, $b = 0,12$ и супеси 28,6 и 0,13).

Указанная закономерность позволяет установить распределения величины $C_{yд}$ по заданной функции $C_{yд} = f(\omega)$ и закону распределения аргумента ω . Полученные законы плотности распределения вероятностей величин $C_{yд}$ приведены в табл. II.3.

Таблица II.3

Статистические модели показаний числа ударов плотномера $C_{yд}$ для некоторых районов СССР

Наименование	Вид распределения $\varepsilon(C_{yд})$	Числовые характеристики
Центральная часть РСФСР, УССР, Сибирь, Северный Кавказ	$\frac{1}{C_{yди} \sigma_C \ln C_{yди}} \frac{1}{2\pi} \exp \left[-\frac{(\ln C_{yди} - \ln \bar{C}_{yд})^2}{2\sigma_C^2 (\ln C_{yд})} \right]$	$C_{yд} = 9,13$ $\sigma_C = 0,68$
Ленинградская, Астраханская, Кзыл-Ордынская области	$\frac{1}{C_{yди} \sigma_C} \frac{1}{2\pi} \exp \left[-\frac{(\ln C_{yди} - \mu)^2}{2\sigma_C^2} \right]$	$\mu = 2,41$ $\sigma_C = 0,47$ $\mu = 2,25$ $\sigma_C = 0,76$ $\mu = 1,8$ $\sigma_C = 0,44$
Казахская ССР	$n \mu^n C_{yди}^{n-1} \exp(-\mu^n C_{yди})$	$\mu = 0,069$ $n = 1,45$ $C_{yд} = 13,1$ $\sigma_C = 9,16$
Узбекская ССР	$\lambda \exp(-\lambda C_{yди})$	$\lambda = 1,24$ $C_{yд} = 8,1$
Общий фон по СССР	$n \mu^n C_{yди}^{n-1} \exp(-\mu^n C_{yди})$	$\mu = 0,082$ $n = 1,38$ $C_{yд} = 11,17$ $\sigma_C = 8,19$

Формирование статистической модели прочности грунтов по числу ударов динамического плотномера $C_{уд}$ для всей территории страны выполняют на основании анализа частных статистических моделей для определенных регионов с учетом доли региона по отношению ко всей площади. Композицию законов устанавливают по формуле

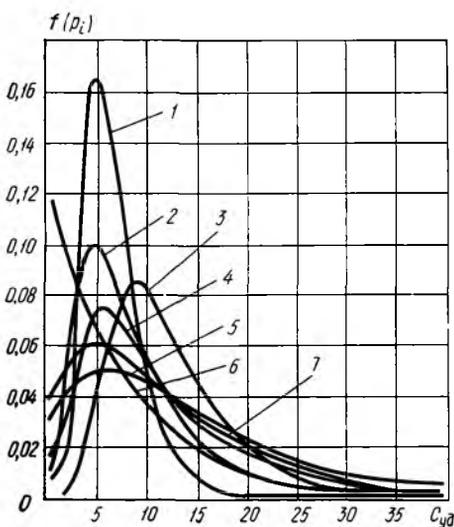


Рис. 11.7. Статистические модели распределения показаний числа ударов плотномера $C_{уд}$ для некоторых районов СССР:

1, 3, 4 — Ленинградская, Астраханская и Кзыл-Ординская области (по З. Е. Гарбузову); 2 — центральные части РСФСР, УССР, Западной и Восточной Сибири, Урала, Северного Кавказа (по И. А. Недорезову); 5 — КазССР (по Р. К. Кудайбергенову); 6 — УзССР (по З. А. Файзиёву); 7 — грунтовый фон территории СССР. Математические модели приведены в табл. 11.3

ности разработки. Математическое ожидание числа ударов плотномера составляет $C_{уд} = 11,2$ при среднеквадратическом отклонении $\sigma_{C_{уд}} = 8,2$.

Классификация грунтов по числу ударов плотномера и вероятность появления соответствующих категорий грунтов по трудности разработки приведена в табл. 11.4.

Моделирующий грунт при физическом моделировании рабочих процессов землеройных машин должен формироваться с учетом рассмотренного статистического анализа. Такой анализ позволяет выявить наиболее вероятные величины основных физико-механических характеристик основных типов грунтов и дать соответствующие величины прочностных показателей «среднего» грунта, разрабатываемого землеройной машиной в условиях дорожного и аэродромного строительства, при мелиоративных работах, возведении объектов

$$f(C_{уд}) = \sum_{j=1}^n p_j f_j(C_{уд}),$$

где $f_j(C_{уд})$ — распределение вероятностей числа ударов плотномера для j -го района; p_j — вероятность появления j -го района.

Закон, полученный по композиции частных распределений, аппроксимируют теоретической кривой. Выполненный анализ позволяет сделать вывод, что распределение грунтов по трудности разработки на основании числа ударов динамического плотномера $C_{уд}$ по всей территории СССР подчиняется закону Вейбула (рис. 11.7).

$$f(C_{уд}) = n\mu^n C_{уд}^{n-1} \exp(-\mu^n C_{уд}^n),$$

где $n = 1,38$; $\mu = 0,082$.

Следовательно, наиболее распространенными грунтами являются грунты с числом ударов плотномера $C_{уд} = 5 \div 16$. Это грунты типа тяжелая супесь, суглинок, принадлежащие к II и частично III категории трудности

Таблица 11.4

Категории грунта по трудности разработки	I	II	III	IV	V
$C_{уд}$	1—4	5—8	9—15	16—35	—
p_i	0,2	0,48	0,2	0,11	0,01

Таблица 11.5

Усредненные значения физико-механических свойств основных типов грунтов и вероятности их появления

Наименование параметра	Тип грунта				
	песчаный	супесчаный	суглинистый	тяжелый суглинок, глина	средний грунт
Вероятность появления p_i	0,21	0,11	0,38	0,26	—
Сцепление c_w , МПа	0,0001	0,01	0,03	0,06	0,03
Число ударов $C_{уд}$	1	6	12	16	12—13
Угол внутреннего трения ρ_t , град	29	27	25	23	26
Угол внешнего трения, град	18	25	21	22	21
Объемная масса:					
в плотном теле γ , т/м ³	1,8	2,0	2,1	2,1	2
в рыхлом состоянии γ_r , т/м ³	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8
Коэффициент сцепления движителя:					
гусеничного	1,0—0,7	1,05—1,00		1,0—0,9	
колясного	1,00—0,85	1,0—0,9		1,0—0,8	
Коэффициент сопротивления передвижению движителя:					
гусеничного	0,12	0,08—0,06		0,08	
колясного	0,18—0,09	0,12—0,08		0,1	

Таблица 11.6

Гранулометрический состав основных типов грунтов

Размер частиц,	Тип грунта		
		супесчаный	суглинистый, песчаный и пылеватый

Возможное содержание частиц во фракциях,

1	4	3	2—0	—
1—0,25	48	38	20—4	2—0,5
0,25—0,05	39	36	30—14	18—10
0,05—0,01	6	10	18—45	35—30
0,01—0,005	2	8	10—9	8—12
0,005—0,001	3	4	8—10	12—15
0,001 и менее	9	20	46—54	70—93

гражданского и индустриального строительства и др. Соответствующие характеристики грунтов приведены в табл. II.5 и II.6. Данные таблиц являются исходными величинами при формировании моделирующих грунтов соответствующих моделей рабочих процессов и машин.

Модели-анalogии, связывающие основные прочностные характеристики грунтов, имеют важное значение для формирования моделирующих грунт эквивалентных материалов и моделей более высокого уровня для оценки эффективности машин, указывают на корреляционные связи основных показателей физико-механических свойств грунта с показателем числа ударов $C_{уд}$ при достаточно высоких коэффициентах корреляции 0,75 — 0,85. Для временного сопротивления одноосного сжатия $\sigma_{сж}$ и удельного сцепления c_{ω} соответствующие зависимости приведены в табл. II.7. Одна из моделей,

Таблица II.7

Модели связи между основными показателями прочности для пластичных грунтов

Наименование показателя	Вид модели	Коэффициент корреляции
Сопротивление резанию эталонным ножом k_p при $\tau_p = 45^\circ$	$k_p = 0,53 C_{уд}$ $k_p = 3,03 c_{\omega}^* + 1,0$ $k_p = 0,85 \sigma_{сж}^*$	0,89 0,96 0,84
Сопротивление копанию k_K	$k_K = 0,16 C_{уд}$ $k_K = 0,9 c_{\omega}^* + 0,5$ $k_K = 0,29 \sigma_{сж}^* - 0,45$	0,83 0,9 0,8
Сцепление c_{ω}	$c_{\omega} = 0,155 C_{уд}$ $c_{\omega} = 0,29 \sigma_{сж}^* - 0,5$ $c_{\omega} = (0,04 \div 0,08) C_{уд}$	0,9 0,84 —
Сопротивление одноосному сжатию $\sigma_{сж}$	$= 0,33 C_{уд}$	—
Сопротивление сдвигу $\tau_{сд}$ Сопротивление разрыву τ_p	$\tau_p = 0,04 C_{уд} + 0,0001 C_{уд}^2$	—

* $\tau_{сж}^*$ — показатель вдавливания конусного плотномера ТМ-1.

показывающая зависимость удельного сопротивления резанию ковшами скрепера от влияющих на этот показатель параметров, имеет вид

$$k_p \simeq C_{уд} \left(\frac{2,6}{B} + 0,07 \right),$$

где B — ширина резания, см.

Вероятные значения параметров, характеризующих тягово-сцепные свойства самоходной машины, выявляют по характеру изменения коэффициента сопротивления передвижению и сцепления для соответствующих типов грунтов в зависимости от влажности и других факторов (см. табл. II.5).

Параметры строительного объекта (объемы земляных работ, дальности перемещения грунта и т. д.), описываемые статистическими моделями, для ориентировочных расчетов можно установить на базе статистического анализа параметров строящихся и проектируемых объектов. Модели некоторых параметров получены статистическим анализом объектов дорожного строительства Казахстана как наиболее типичного района. Это позволяет экстраполировать результаты частного статистического исследования. Объем земляных работ, выполняемых скреперами, составляет около 30% от общего объема земляных работ. Наиболее вероятная дальность транспортирования грунта $l = 300$ м достигает при p_i 0,91. Объем экскаваторных работ с автомобильной перевозкой составляет 9,4% от общего объема земляных работ. Вероятная дальность перевозки не превышает 5000 м при $p_i = 0,87$. Наибольший объем земляных работ (45,2%) при строительстве автомобильных дорог приходится на долю бульдозеров. Дальности перемещения грунта составляют: $l = 20$ м с вероятностью $p_i = 0,39$ и $l = 40 \div 50$ м с вероятностью $p_i = 0,34$.

Грунты, на которые должны рассчитываться оптимальные технические параметры универсальных землеройных машин, используемых при строительстве автомобильных дорог, являются грунтами II категории трудности. Вероятность их разработки $p_i = 0,63$. Вероятность разработки грунтов II и III категории $p_i = 0,92$.

§ II.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ПАРАМЕТРОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН МЕТОДАМИ ПОДОБИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Определение технического уровня машин с учетом вероятностного характера фона эксплуатации. Оценку технического уровня машины осуществляют на базе появления соответствующих характеристик, определяющих условия эксплуатации. Результаты статистического анализа представляют в виде таблиц, в которых указывают статистические вероятности p_1, p_2, \dots, p_i появления качественных и количественных характеристик условий эксплуатации. Для ориентировочной оценки соответствующий показатель приводят к виду

$$\bar{E}_{\text{ср}} = \sum E_i p_i,$$

где E_i — показатель эффективности (например, приведенные удельные затраты в конкретных условиях эксплуатации Z_y); p_i — статистическая вероятность соответствующих условий эксплуатации.

Для качественных и количественных характеристик значения p_i определяют на основании статистического анализа соответственно

по формулам:

$$p_i = n_i/N; \quad p_i = \int_a^b f(x) dx,$$

где n_i — значение, характеризующее конкретные условия эксплуатации системы; N — величина, характеризующая общий фонд эксплуатации системы; $f(x)$ — плотность вероятности искомой величины; a, b — пределы изменения величины, определяющей условия эксплуатации.

При сопоставлении машин по показателю Z_y производится сравнение двух значений соответствующих величин:

$$Z_{y1} < Z_{y2}.$$

Как следует из анализа графиков на рис. II.2, при постоянстве величин b_0, b_1, b_2 рассматриваемому условию соответствует условие $\Pi_{NG_1} < \Pi_{NG_2}$. Это позволяет произвести оценку технического уровня машин по показателю Π_{NG} , который можно назвать обобщенным показателем технического уровня машины. На основе такого показателя разрабатывают методику выявления машины-эталона и оценки научно-технического уровня машины на стадии ее создания. Важно подчеркнуть, что предлагаемый показатель дает возможность учитывать предполагаемые условия эксплуатации объекта в соответствии с их вероятностным характером проявления.

Оценку объекта необходимо выполнять с учетом разброса характеристик оцениваемых машин. Разброс параметров является следствием конъюнктуры производств и спроса, а также необходимостью создания объекта для требуемых условий эксплуатации. Оценку осуществляют для машин одной типоразмерной группы (рис. II.8) и заданных условий эксплуатации. Для каждого технического объекта и соответствующих условий эксплуатации вычисляют показатель эффективности, например Π_{NG_i} .

Выявление машины эталона осуществляют по анализу расчетных величин показателей, расположенных в ранжированный ряд $\Pi_{NG \min} < \dots < \Pi_{NG(k-1)} < \dots < \Pi_{NG_k} < \dots < \Pi_{NG_i}$.

Минимальное значение показателя указывает на машину-эталон. Такому показателю присваивается индекс базового или нормативного: $\Pi_{NG \min} = \Pi_{NG_0}$.

Исходными данными для решения вопросов оценки технического уровня машины являются: зависимости, определяющие характер изменения величин от технических параметров, условий производства и эксплу-

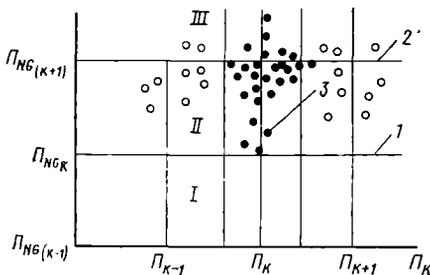


Рис. II.8. Определение коэффициента научно-технического уровня нового технического объекта на этапе разработки в заданной типоразмерной группе:

$$1 - \Pi_{NG_0}; \quad 2 - \Pi_{NG_{\text{ср}}}; \quad 3 - \Pi_{NG_i}$$

атации; заданные значения $f, \varphi_{сц}, i; k_k$ или характер его изменения в зависимости от емкости ковша; значение дальности транспортирования $l_{тp}$; значение КПД агрегатов. Определение машины-эталона включает следующие основные этапы: систематизацию исходной технической информации, содержащейся, например, в каталогах, проспектах; табулирование данных; установление на основании анализа объектов эксплуатации требуемых значений сопротивления копанью, дальностей транспортирования грунта, сопротивлений передвижению и т. п. расчет технической производительности машины по зависимости Π_T ; расчет соответствующего показателя эффективности, например по значению Π_{NG} ; разделение всех машин по значению Π_T на типоразмерные группы; установление в каждой типоразмерной группе машины-эталона по условию, следующему из табл. II.1, например $\Pi_{NG} \rightarrow \min$. Графическая иллюстрация такого расчета дана на рис. II.8.

Определение научно-технического уровня новой разработки осуществляют на основании: известных характеристик объекта, которые содержатся в каталогах, проспектах, отчетах и др.; заданных условий эксплуатации (тип грунта, объемы и виды работ и др.) и расчетных значений коэффициентов $k_{сp}$ и $k_{нты}$. Для учета разброса величин (рис. II.8) определяют показатель, характеризующий средний уровень машины в данной типоразмерной группе и условий эксплуатации:

$$\Pi_{NG_{сp}} = \sum_i^n \Pi_{NG_i} / n,$$

где Π_{NG_i} — значение показателя для i -го объекта; n — число объектов, составляющих группу.

Статистический разброс учитывается расчетом вспомогательного коэффициента

$$k_{сp} = \Pi_{NG_0} / \Pi_{NG_{сp}},$$

где Π_{NG_0} — минимальное значение показателя, соответствующее базовому нормативному показателю в рассматриваемой статистической совокупности объектов.

Научно-технический уровень разрабатываемой системы определяют по величине коэффициента научно-технического уровня

$$k_{нтыi} = \Pi_{NG_0} / \Pi_{NG_i},$$

где Π_{NG_i} — значение обобщенного показателя для i -го варианта разработки и соответствующих условий эксплуатации.

Расчет коэффициентов включает следующие этапы. На основании данных каталогов по техническим характеристикам машин строят исходные графики для средних наиболее вероятных условий эксплуатации, характеризуемых значениями k_k и $l_{тp}$ (рис. II.8). Кривая 2, построенная по средним точкам совокупности, определяет для данных условий группу машин среднего уровня. На графике можно указать

зоны II и III, которые характеризуют машины, имеющие технический уровень соответственно выше и ниже среднего. Машины, которые по совокупности основных технических параметров находятся на уровне лучших современных образцов, характеризуются линией I. Перспективным образцам техники соответствует зона I. Статистические характеристики, определяющие указанные границы, можно установить на основании общих положений теории вероятностей.

Система оценки содержит возможные варианты оценки, приведенные в табл. II.8. При $k_{нтг} < k_{ср}$ машина не соответствует средне-

Т а б л и ц а II.8

Коэффициенты оценки технического уровня дорожно-строительных машин

Соотношения между коэффициентами и их значения	Оценка машины	Перспективность машины
$k_{нтг} < k_{ср}$ $k_{нтг} = k_{ср}$	Ниже среднего уровня Соответствует среднему уровню	Не перспективна »
$k_{ср} < k_{нтг} < 1$ $k_{нтг} = 1$	Выше среднего уровня Соответствует лучшим образцам	» Перспективна
$k_{нтг} > 1$	Выше лучших образцов	

му уровню, достигнутому на рассматриваемый период времени. При $k_{ср} < k_{нтг} < 1$ создаваемый объект оценивается как имеющий уровень выше среднего. При $k_{нтг} = 1$ образец соответствует лучшему объекту техники, который определен в качестве эталона или базового уровня и для которого показатель равен Π_{NG_0} . При $k_{нтг} > 1$ создаваемый образец является лучшим из существующих, включая и машину-эталон, и характеризуется в качестве перспективного.

В заключение следует отметить, что для оценки технического уровня машин, особенно на стадии их разработки, можно использовать показатель Π_{NG} , который дает достаточно полное отражение технико-экономических характеристик машин с учетом условий эксплуатации и вероятности их появления. Величины b_0, b_1, b_2 при ориентировочных оценках можно считать не зависящими от величины главного параметра и они обусловлены в основном конструктивным типом машины. Численным критерием, характеризующим уровень разработок, является показатель $k_{нтг}$, определяющий уровень конкретной разработки по сравнению с нормативными объектами данного типа эталона. Величина $k_{нтг}$ должна быть соотнесена к соответствующим условиям эксплуатации. Полученные зависимости позволяют сочетать детерминированный и вероятностный пути оценки конкретных объектов. Анализ характера изменения обобщенных показателей указывает возможные направления совершенствования машины: во-первых, улучшая параметры традиционных машин, которые должны соответствовать точкам огибающей, что связано с созданием машин

большого типоразмера; во-вторых, перехода в зону I, что связано с созданием машин, в которых используются новые принципы работы.

Определение технических параметров машин. Зависимости для определения технических параметров машин, получаемые на базе регрессионных моделей, не позволяют в ряде случаев получить их с учетом требуемых ограничений, следующих из условий эксплуатации. Причиной является: отсутствие достаточно полной информации о количественных и качественных характеристиках объектов техники, подвергаемых статистическому анализу. Нет сведений о серийности машин, не указывается в ряде случаев назначение машины. Такой анализ приводит часто к нарушению положения, что математическое ожидание функции не является для нелинейных связей функцией математических ожиданий случайных аргументов.

Определение рациональных технических параметров на основании закономерностей подобия по машине-эталону позволяет учесть особенности рассматриваемых систем и более обоснованно устанавливать технические параметры машины. Конструктивно подобные машины в подобных условиях эксплуатации имеют соответственно равные критерии подобия и пропорциональные параметры, определяющие условия однозначности. Для получения требуемых зависимостей необходимо получить критерии подобия системы и условий однозначности. Если функционирование объекта базируется на методах взаимодействия со средой, имеющаяся информация о которой позволяет представить объект в виде многомассовой динамической системы, то критерии подобия устанавливают на базе анализа логико-математических моделей движения и условий однозначности. В качестве примера рассмотрим землеройно-транспортные машины (бульдозер, скрепер, автогрейдер и др.).

Формирование рационального комплекса технических параметров машины по заданному главному параметру или производительности и условиям эксплуатации осуществляется в несколько этапов. На первом этапе анализируют техническую информацию по существующим машинам, оценивают машины, выпускающиеся промышленностью, и устанавливают машину-эталон в каждой типоразмерной группе. Методика выполнения этого этапа рассмотрена выше. Второй этап включает установление связей между основными техническими параметрами, определяющими процесс, на основании зависимостей подобия машин, входящих в различные типоразмерные группы. Для соотношений, в которых закономерности подобия нарушаются, используют регрессионные модели. На третьем этапе на основании соответствующих связей получают моделирующий алгоритм в виде функции искомого параметра, ориентируясь на параметры машины-эталона как рациональные в требуемых условиях эксплуатации. Коэффициенты пропорциональности в зависимостях подобия должны уточняться для каждой типоразмерной группы машин. Четвертый этап заключается в построении номограмм или машинных программ для расчета основных технических параметров объекта.

Установление зависимостей между основными техническими параметрами осуществляют на базе анализа теоретической модели объ-

екта. Соответствующий механический эквивалент объекта, например, как одномассовой динамической системы составляют на основании априорной информации об объектах подобного типа. Силы, действующие на систему, учитываются на этапе формирования уравнений движения в виде векторных величин (см. рис. 1.12). Соответствующие уравнения и условия однозначности формируют для каждого специфического рабочего режима машины.

Для установившегося режима копания, пренебрегая для упрощения упругостью системы, имеем следующие уравнения связи:

$$T = W + P_{к1}; \quad W = Gf_{ср}; \quad P_{к1} = k_{к}bh; \quad T = G\varphi_{сц};$$

$$G = G_{м} + G_{гп}; \quad G_{гп} = q\gamma_{гп}; \quad q \simeq l^3,$$

где l — обобщенный линейный размер системы.

Обобщенный линейный размер — это важный вспомогательный параметр. Для ковшовых и отвальных машин $l \simeq \sqrt[3]{q}$, где q — заданный объем грунта, перемещаемого за один рабочий ход.

Для транспортного режима в условиях неустановившегося движения уравнения имеют вид:

$$P_{н} = T - W; \quad P_{н} \simeq m(v/t_{п}); \quad m = G/g; \quad T = G\varphi_{сц}$$

при

$$t = t_0, \quad v = v_{к}; \quad l = l_{к}, \quad G = G_{м} + G_{гп};$$

$$t = t_1, \quad v = v_{тп}; \quad l = l_{т}, \quad G = G_{м}.$$

Используя метод интегральных аналогов для режима копания $T \sim W \sim P_{к1}$, получают следующие критерии: W/T ; $P_{к1}/T$

В соответствии с принятой моделью пластической среды величина $P_{к1} \simeq k_{к}bh$ от скорости не зависит.

Для режима транспортирования, используя аналогичный прием ($P_{н} \sim T \sim W$), получаем критерии подобия в виде $P_{н}/W$; T/W

Критерии, следующие из условий однозначности, получают на основании анализа различных видов однозначности.

Условия однозначности, определяющие геометрические формы объекта и частично топологию, важны для формирования образа машины как системы. В случае традиционного объекта техники условия однозначности геометрического образа представляют в виде чертежа, включающего необходимое число проекций и сечений (рис. 1.9), к которому прилагают спецификацию соответствующих геометрических параметров системы в виде таблицы. На основании этого материала получают критерии-симплексы вида $l, H; H/B; B/K; B/B; l_i, l_j; \alpha_p; \alpha_{сн}; \alpha_i$ и др.

Условия однозначности, определяющие физическую природу объекта, составляют в виде перечня величин, определяющих физические константы технической системы и параметры условий эксплуатации, виды и объемы работ, типы грунтов, дорожные и климатические условия: $S_{y,д}$ — число ударов плотнера; γ — объемная масса грунта; ρ — угол внешнего трения грунта; L — дальность транспортирования; i — уклон мягкости и др.

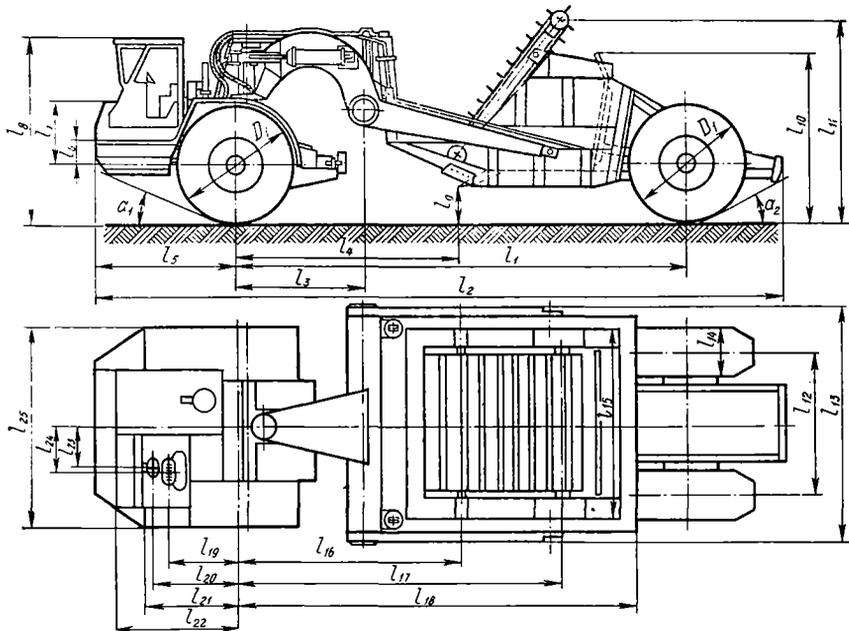


Рис. 11.9. Схема скрепера, характеризующая геометрические размеры, входящие в условия однозначности объекта

Начальные и граничные условия однозначности сводятся обычно к следующим ограничениям: при $t = t_0$ $v = v_K$; при $t = t_1$ $v = v_K$; при $l = l_0$ $P_{K1} = P_{K1 \min}$; $q = q_0$; при $l = l_K$ $P_{K1} = P_{K1 \max}$; $\tau = \text{tg} \delta \sigma$; $\tau = \text{tg} \delta \sigma$; $\alpha_i = \alpha_p$; $q = q_{\max}$.

Критерии подобия представляют в виде следующих соотношений:

$$\frac{l_K}{l_T}; \frac{t_0}{t_1}; \frac{P_{K1 \max}}{P_{K1 \min}}; \frac{v_K}{v_{ГР}}; \frac{G_M}{G}; \frac{G_{ГР}}{G_M}; \frac{q_0}{q_{\max}}$$

Система критериев подобия, полученных в виде рассмотренных выше соотношений, анализируется с целью получения зависимостей, удобных для последующего составления искомого моделирующего алгоритма.

Учитывая принятые ограничения и критерии условий однозначности, имеем следующую систему критериев подобия:

1) для режима копания

$$\frac{P_{K1}}{T}; \frac{P_{K1}}{\gamma l^3}; \frac{P_{K1}}{k_K l^2}; \frac{P_{K1}}{k_K b h}; \frac{G}{G_{ГР}}; \Phi_{сц}; f_{сц}; \rho; \delta; x_p; \frac{q}{l^3}$$

Здесь особый интерес представляет критерий $\Pi_{K1} = P_{K1}'(\gamma l^3)$; $\Pi_K = P_{K1}(k_K l^2)$;

2) для режима транспортировки систему дополняют следующими критериями: T/G ; G/G_M ; $G_M/G_{ГР}$; $G_{ГР}/(q\gamma_{ГР})$; $v^2(gl)$.

Полагая рассматриваемые объекты подобными, связывают уравнениями масштабы параметров:

1) для режима копания $k_P = k_T$; $k_P = k_\gamma k_l^3$; $k_G = k_{G_{ГР}}$; $k_{\text{эцц}} = 1$; $k_f = 1$; $k_o = 1$; $k_8 = 1$; $k_z = 1$; $k_q = k_l^3$;

2) для режима транспортировки $k_T = k_G$; $k_G = k_{G_M}$; $k_{G_M} = k_{G_{ГР}}$; $k_{G_{ГР}} = k_q k_\gamma$; $k_v^2 = k_g k_l$.

В рассматриваемом случае для режима транспортировки масштаб скорости связан с масштабом линейных размеров системы. При $k_g = 1$ $k_v = k_l^{1/2}$. Для режима копания анализ принятой модели взаимодействия машины со средой указывает, что масштаб скорости от линейных размеров системы не зависит, т. е. $k_v = k_l^0$; $k_v = 1$.

Рассмотренные соотношения позволяют выразить масштабы искоемых производных величин. Масштаб мощности $k_N = k_T k_v$.

Если $k_T = k_\gamma k_l^3$, то $k_N = k_\gamma k_v k_l^3$. Для режима копания при $k_v = 1$ $k_N = k_\gamma k_l^3$. Для режима транспортировки при $k_v = k_l^{0.5}$ $k_N = k_\gamma k_l^{3.5}$.

В естественных условиях эксплуатации для машин разного типоразмера при изменении их линейных размеров ряд основных критериев подобия соблюдается автоматически. Некоторые критерии не зависят от линейных размеров системы или изменяются незначительно в пределах разброса. Ряд критериев имеет значение только при неустановившихся режимах работы системы.

Особо важным является критерий режима копания Π_K . При изменении типоразмера машины (обобщенного линейного размера) его соблюдение требует изменения прочностных параметров грунта, характеризуемых, например, параметром k_K . В естественных условиях соблюдение равенства этого критерия за счет изменения параметра k_K осуществить практически невозможно. В ряде случаев соблюдается приближенное подобие процесса по рассматриваемому критерию и в естественных условиях эксплуатации. Этому способствует то, что, во-первых, прочностные показатели грунтов c_w , $C_{\text{пл}}$, τ и другие при незначительном изменении физических параметров ρ , γ , $\varphi_{\text{сц}}$, g колеблются в широких пределах (в восемь раз и более). Таким образом, система с уменьшенными линейными размерами в некоторых случаях может работать в грунтах с прочностными характеристиками, обеспечивающими соблюдение критерия Π_K . Во-вторых, приближенного подобия достигают за счет искажения масштаба глубины резания. Для обеспечения приближенного подобия в процессе копания систем разного типоразмера необходимо соблюдение следующих равенств: $k_P = k_\gamma k_l^3$; $k_P = k_K k_l^2$.

Одновременное соблюдение указанных соотношений возможно при определенных ограничениях. В том случае, если при изменении k_l масштаб $k_K = 1$, необходимо изменение масштаба k_γ . Изменение последнего в k_l^{-1} раз обеспечивает соблюдение рассматриваемых условий, так как $k_P = k_\gamma k_l^3$, где $k_\gamma = k_K k_l^{-1}$; $k_K = 1$.

Однако значительное изменение масштаба k_γ возможно в основном при центробежном моделировании.

Если масштаб $k_\gamma = 1$ не изменяется, то совместное выполнение рассмотренных условий требует равенства масштабов $k_R k_l, k_P = = k_R k_b^2 l$, где $k_R = k_\gamma k_l$; $k_\gamma = 1$.

Последнее требует реализации условий моделирования методом эквивалентных материалов, что на практике, принимая во внимание рассмотренное выше, не всегда выполнимо.

Наиболее реальным в условиях эксплуатации является случай, характеризуемый соотношениями: $k_\gamma = 1$; $k_R = 1$.

Реализация приближенного моделирования при этом следует из введения разного линейного масштаба для глубины k_h и ширины резания k_b . При $k_l^3 = k_q$, принимая, что масштаб линейных размеров ковша или призмы волочения не зависит от масштаба глубины резания, что имеет место в действительности, из соотношения $k_\gamma k_q = = k_R k_b k_h$ имеем $k_h = k_q / k_b$.

Следовательно, при разработке грунтов одной и той же категории при $k_\gamma = 1$; $k_R = 1$ реализация приближенного подобия рабочих процессов машин возможна при условии, что соотношение между масштабами глубины резания k_h , вместимость ковша k_q и ширину резания k_b определяет полученная зависимость. Машины в реальных условиях имеют возможность изменять глубину резания в широких пределах независимо от других линейных размеров системы. Это позволяет в ряде случаев обеспечивать соблюдение условия подобия, которое следует из критерия $P_{к1}/(\gamma l^3)$ и $P_{к1}/(k_R l^2)$. Кроме того, необходимо учитывать, что транспортный режим машины, занимающий основную долю рабочего цикла, не имеет ограничения по указанному критерию.

Зависимости между параметрами формируют на базе полученных критериев и масштабных соотношений. Между тяговым усилием малой машины, емкостью ковша, мощностью и линейными размерами зависимости устанавливают следующим образом.

Для тягового усилия T , силы тяжести машины G искомая зависимость следует из равенства $T_H G_H = T_M G_M$, откуда $T_H = k G_H$, где $k = T_M / G_M$.

Тяговое усилие определяется через вместимость ковша; при $k_\gamma = = 1$ $T_H = k q_H$, где $k = T_M / q_M$.

Зависимость T от обобщенного линейного размера системы определяет выражение $T_H = k l_H^3$, где $k = T_M / l_M^3$. Тяговое усилие через мощность определяют для транспортного режима на основании следующих соотношений: $N_H = T_H v_H$; $k_T = k_\gamma k_l^3$; $k_v = k_g k_l'$ откуда получаем $N_H = N_M k_l^7$ $T_H = T_M k_l^3$ или $T_H = k N_H^{3/7}$ где $k = T_M / N_M^{3/7}$.

Для режима копания связь между тяговым усилием и мощностью определяется соотношениями: $k_T = k_\gamma k_l^3$; $k_\gamma = k_g k_l^0$ при $k_g = 1$; $k_v = 1$. Следовательно, $T_H = k N_H$, где $k = T_M / N_M$.

В общем случае рассматриваемое соотношение можно записать в

виде формулы $T_H = k N_H^{\frac{\alpha}{n+\alpha}}$ где $k = \frac{T_M}{N_M^{\frac{\alpha}{n+\alpha}}}$.

Здесь α показатель степени, зависящий от доминирования сил, определяющих характер их изменения от скорости движения системы (инерционные, вязкостные). Величина n определяется характером действия сил, зависящих от линейных размеров системы (массовые, силы сцепления и др.).

При доминировании сил тяжести $n = 3$, при доминировании сил сцепления $n = 2$. При разработке пластичных грунтов $\alpha = 0$; взаимодействие с вязкопластической средой характеризуется $\alpha = 1$, для процесса неустановившегося движения $\alpha = 1,2$.

Графики (рис. II.10), построенные на базе анализа статистической информации о технических параметрах существующих землеройно-транспортных машин, подтверждают положения о наличии связей подобия для систем рассматриваемого типа.

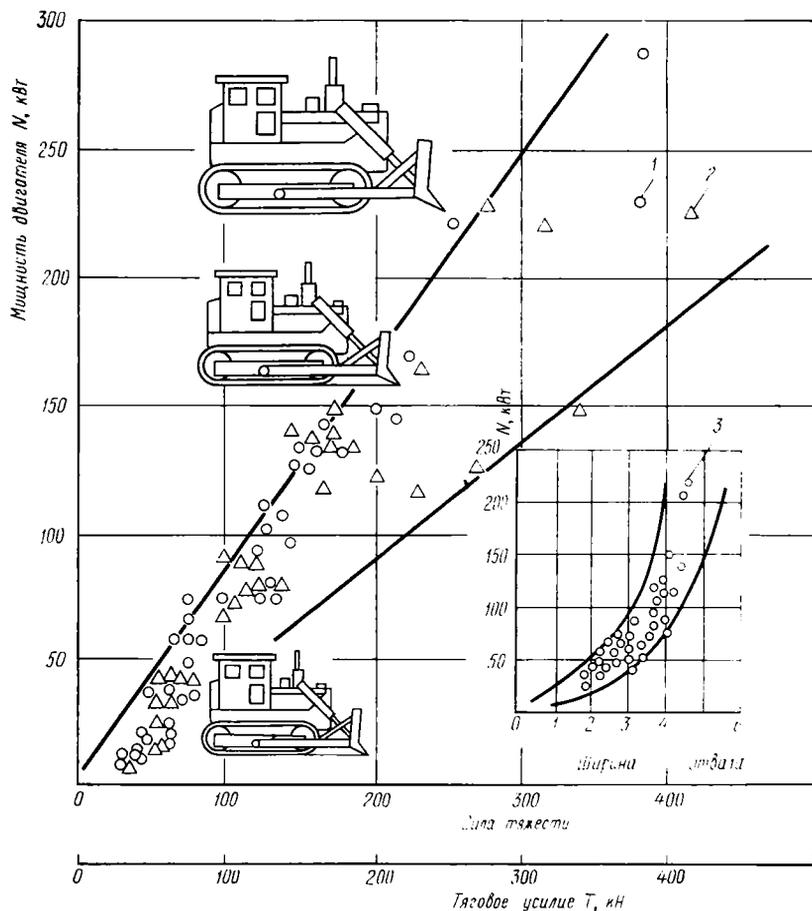


Рис. II.10. Модели, иллюстрирующие характер связей подобия между основными техническими параметрами для гусеничных бульдозеров:

$$1 - N = (4,7 \div 8,2) G^{2/3} \quad 2 - N = (3,4 \div 8,2) T^{2/3}; \quad 3 - N = (1,06 \div 2,10) B^{2/3}$$

Для землеройных, землеройно-транспортных и самоходных дорожных машин соответствующие формулы связи между параметрами приведены в табл. II.9 и II.10. Коэффициент подобия k_i устанавливают по параметрам машины, принятой за эталон для соответствующей

Таблица II.9

Формулы подобия скреперов, бульдозеров, автогрейдеров и других дорожных машин по основным техническим параметрам

Рассчитываемый параметр	Определяющий параметр				
	N	T	G	q	B
Мощность двигателя	—	$k_1 T^{7/6}$	$k_2 G^{7/6}$	$k_3 q^{7/6}$	$k_4 B^{7/2}$
Тяговое усилие	$k_5 N^{6/7}$	—	$k_6 G$	$k_7 q$	$k_8 B^3$
Вес скрепера, бульдозера, автогрейдера и др.	$k_9 N^{6/7}$	$k_{10} T$	—	$k_{11} q$	$k_{12} B^3$
Емкость ковша (призмы)	$k_{13} N^6$	$k_{14} T$	$k_{15} G$	—	$k_{16} B^3$
Ширина ковша (отвала)	$k_{17} N^{2,7}$	$k_{18} T^{1/3}$	$k_{19} G^{1,3}$	$k_{20} q^{1/3}$	—
Скорость движения машины: в транспортном режиме в рабочем режиме при $v \leq 1,5$ м/с (копание)	$k_{21} N^{1/7}$ $k_{26} = \text{const}$	$k_{22} T^{1,6}$	$k_{23} G^{1,6}$	$k_{24} q^{1/6}$ $k_{26} = \text{const}$	$k_{25} B^{1/2}$

Таблица II.10

Значение коэффициента подобия для скреперов, бульдозеров, автогрейдеров и других дорожных машин (устанавливается по машине-эталону)

Коэффициент	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}
Определяющая зависимость	$\frac{N_0}{T_0^{7/6}}$	$\frac{N_0}{G_0^{7/6}}$	$\frac{N_0}{q_0^{7/6}}$	$\frac{N_0}{B_0^{7/2}}$	$\frac{T_0}{N_0^{6/7}}$	$\frac{N_0}{G_0}$	$\frac{T_0}{q_0}$	$\frac{T_0}{B_0^3}$	$\frac{G_0}{N_0^{6/7}}$	$\frac{G_0}{T_0}$

Продолжение табл. II.10

Коэффициент	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{15}	k_{16}	k_{17}	k_{18}	k_{19}	k_{20}
Определяющая зависимость	$\frac{G_0}{q_0}$	$\frac{G_0}{B_0^3}$	$\frac{q_0}{N_0^{6/7}}$	$\frac{q_0}{T_0}$	$\frac{q_0}{G_0}$	$\frac{q_0}{B_0^3}$	$\frac{B_0}{N_0^{2/7}}$	$\frac{B_0}{T_0^{1/3}}$	$\frac{B_0}{G_0^3}$	$\frac{B_0}{q_0^{1/3}}$

Продолжение табл. II.10

Коэффициент	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{25}	k_{26}
Определяющая зависимость	$\frac{N_0^{6/7}}{T_0}$	$\frac{N_0}{T_0^{7/6}}$	$\frac{N_0}{T_0 G_0^{1,6}}$	$\frac{N_0}{T_0 q_0^{1,6}}$	$\frac{N_0}{T_0 B_0^{1/2}}$	$\frac{N_0}{T_0}$

щих условий эксплуатации или для их усредненных значений. Численные значения ряда коэффициентов подобия для основных типов землеройно-транспортных машин для усредненных условий эксплуатации приведены в табл. II.10. Рассмотренные положения позволяют построить номограммы для определения параметров конструктивно подобных машин, работающих в одинаковых условиях эксплуатации по заданному главному параметру или производительности. Исходными в этом случае являются: график огибающей $\Pi_{NG} = f(\Pi_T)$, график зависимости $\Pi_T = f(N, l_{TP}, k_K)$ и зависимости между параметрами, полученные на основании теории подобия. Номограммы можно построить двумя методами: на основании огибающей минимальных значений Π_{NG} и на основании машины-эталона и формул подобия.

Аналогичные построения выполняют и для других условий эксплуатации, отличающихся от усредненных. Полученные номограммы позволяют определить рациональные параметры машин для работы в соответствующих условиях эксплуатации.

В том случае, если анализ статистической информации не позволяет установить оптимальные связи между параметрами или требуется уточнить полученные отношения, необходимо использовать методы физического или математического моделирования. По результатам анализа моделирующей системы в соответствии с условиями моделирования прогнозируют поведение системы и полученные на модели результаты на реальные условия эксплуатации.

Скорость движения машины также зависит от ее основных технических параметров. Для конструктивно и динамически подобных машин на базе соотношений подобия можно получить зависимости, основные из которых представлены в табл. II.9 и II.10. Необходимо подчеркнуть, что на форму математической модели существенное влияние оказывает вид рабочей операции и свойства среды, с которой взаимодействует машина. Это является следствием доминирования на различных этапах рабочего процесса определенных критериев подобия. Последнее обуславливает различный характер изменения скорости от линейных размеров системы.

Для режима транспортирования с многочисленными операциями разгона и торможения $v_H = v_M k_l'$ для операций взаимодействия рабочих органов с вязкой ньютоновской средой $v_H = v_M k_l$; для невязких грунтов $v_H = v_M k_l^0$ (рис. II.11).

Материал представляет обработку статистической информации по основным видам бульдозеров, выпускаемых в настоящее время в в СССР и за рубежом.

На завершающем этапе составляется перечень определяющих параметров машины как системы «среда — рабочий орган — движитель — среда». Основу перечня составляют параметры, характеризующие технический образ машины, и определяющие их формулы. Форма представлена в табл. II.11.

В заключение можно сказать, что зависимости между основными техническими параметрами машин, их геометрическими размерами, производительностью с учетом условий эксплуатации и других огра-

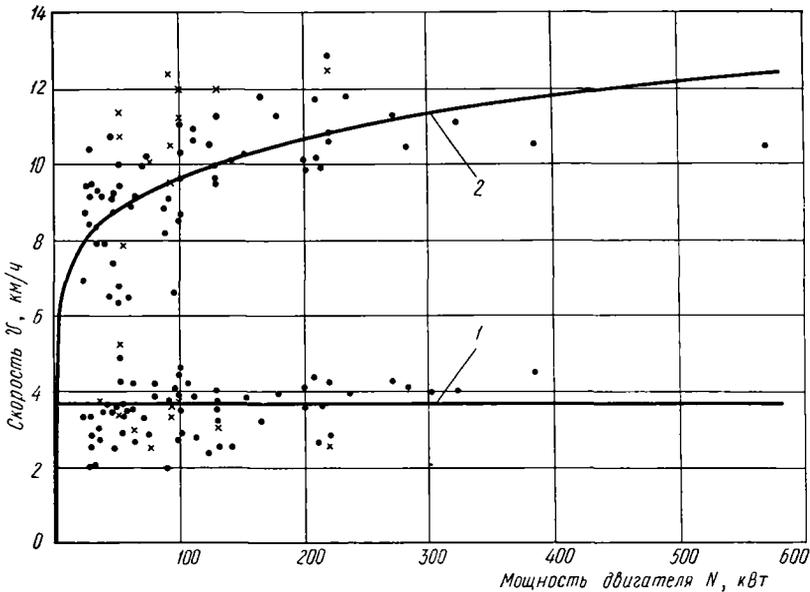


Рис. II.11. Изменение скоростей движения v гусеничного бульдозера с лобовым отвалом в зависимости от мощности N двигателя:
 1 — рабочая скорость при копании $v_p = 3,65 - \text{const}$; 2 — транспортная скорость $v_{тр} = 2,9v^{1,7}$ точки соответствуют параметрам бульдозерных агрегатов отечественного и зарубежного производства

Т а б л и ц а II.11

Параметры, характеризующие технический образ машины, и определяющие их формулы

Наименование	Значение параметра машины-эталона	Формула для расчета параметра через главный	Значение коэффициента подобия	Дополнительные ограничения
<i>Основные технические параметры машины</i>				
Главный параметр q	8 м ³	—	—	—
Другие параметры N	200 кВт	$N = k_N q^{7/6}$	$k_N = N_0/q_0^{7/6}$	—
<i>Геометрические параметры</i>				
Размеры рабочего органа B	2 м	$B = k_B q^{1/3}$	$k_B = B_0/q_0^{1/3}$	$B < 3$ м
Другие размеры l_i	—	—	—	—
<i>Основные параметры условий эксплуатации</i>				
Режим работы $v_{тр}$	15 м/с	$v_{тр} = k_v q^{1/6}$	$k_v = v_0/q_0^{1/6}$	—
Тяговое усилие T	200 Н	$T = k_T q$	$k_T = T_0/q_0$	—
Другие параметры	—	—	—	—

ничений могут быть установлены в первом приближении на основании рассмотренных соотношений подобия.

Линейные размеры рабочего оборудования можно принимать в качестве исходных величин для получения масштабов, посредством которых устанавливаются зависимости между другими основными техническими параметрами машины. Соблюдение подобия по линейным размерам нарушается для групп машин малого размера. Это связано с ростом влияния доли элементов кабины и управления в общей массе машины, так как элементы кабины практически не меняются с увеличением типоразмера.

Коэффициенты подобия k_i справедливы для некоторой области изменения типоразмера. Для другой области изменения типоразмера коэффициент подобия следует рассчитывать по соответствующей машине-эталону, принадлежащей этой же группе.

Синтез технических параметров машин, включая и определение их размеров по заданной производительности и условиям эксплуатации, включает следующие основные этапы: выявление машины-эталона заданных условий эксплуатации; установление по машине-эталону формул подобия между основными техническими параметрами и выражение последних через главный параметр машины; получение зависимости производительности от основных технических параметров системы; построение номограмм или программы машинного расчета параметров, определяющих образ машины.

Совокупность установленных технико-экономических характеристик системы представляет образ первого приближения. Далее величины определяющих параметров корректируются на основании традиционных методов расчета и оптимизации методами технико-экономического моделирования.

Определение областей рационального использования машин. На объектах строительства получают широкое применение машины разных типов и размеров: прицепные и самоходные двух- и трехосные скреперы, работающие с толчками; двухдвигательные агрегаты со всеми ведущими мостами; скреперы с мотор-колесами, а также скреперы с элеваторной загрузкой; многоковшовые скреперные агрегаты и др. Наиболее эффективным землеройным агрегатом, обеспечивающим разработку и перемещение грунтов, различной категории трудности является скрепер-толкач.

Для соответствующих видов землеройно-транспортных машин и оборудования, имеющих различное конструктивное исполнение, разную емкость ковша и мощность двигателя существуют области эксплуатации, где их использование обеспечивает достижение максимального технико-экономического эффекта. Область рационального применения машин различного конструктивного исполнения с учетом фона эксплуатации целесообразно определять по анализу выражений для оценки усредненных показателей эффективности:

$$\left(\sum_1^n \mathcal{E}_i \rho_i \right)_{j_1} = \left(\sum_1^n \mathcal{E}_i \rho_i \right)_{j_2}$$

где \mathcal{E}_i — обобщенный показатель эффективности (Z_j и др.).

Области рационального применения скреперов можно установить по соответствующему показателю Z_y , представленному в виде функции ряда определяющих процесс параметров. Границы рационального использования скреперов, прицепляемых к гусеничному трактору, скреперов на одноосных тягачах с загрузкой толкачом и скреперов с элеваторной загрузкой или другим типом активного заполнения в зависимости от сопротивления передвижению, категории грунта и дальности транспортирования приведены на рис. II.12. Для более точного расчета условий оптимального использования машин необходимо применение методов стохастического моделирования систем. В зависимости от значений b_1 и b_2 , f_i , $\varphi_{сц}$, которые определяют характер изменения капитальных и эксплуатационных затрат и грунтовых условий, эти границы изменяются.

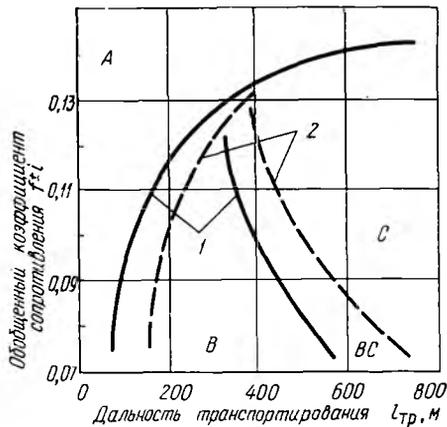


Рис. II.12. Области рационального применения скреперов:

А — прицепных к тракторам; В — с элеваторной загрузкой; С — самоходных с толкачом; ВС — равной эффективности при $i = 0,5$, $\varphi_{ср} = 0,1$; $1 - k_k = 0,12$ МПа; $2 - k_k = 0,16$ МПа

Области рационального применения бульдозеров с гусеничным и колесным двигателем могут быть установлены аналогично. По анализу соответствующих функций, приведенных удельных затрат, решая равенства, представляющие функцию параметров машины, грунта и условий эксплуатации, относительно коэффициентов сопротивления движению, общего сопротивления W/G получают графики, определяющие области рационального применения машин. Анализ уравнений равной эффективности показывает, что гусеничные бульдозеры и скреперы, прицепляемые к гусеничному трактору, экономичны при перемещении грунта на короткие расстояния. По мере увеличения общего удельного сопротивления передвижению машин увеличивается экономически оправданная дальность транспортировки грунта. Модели равной эффективности в сочетании с методами физического и физико-математического моделирования позволяют прогнозировать области оптимального применения новых систем.

Рациональный типоразмер машины с учетом условий эксплуатации устанавливается анализом целевой функции, в качестве которой используют развернутую формулу для показателя Z_y . При этом необходимо установить связи между параметрами, характеризующими экономические категории системы, с ее техническими и эксплуатационными параметрами, а также соответствующие ограничения (табл. II.12).

Модели, определяющие характер зависимости основных параметров машин традиционной концепции от масштаба линейных размеров

Наим	Форма записи модели	Ограничения	
		параметров	показателей степени и коэффициентов
Объем перерабатываемой среды,	$q = q_0 k_L^{n_1}$	$q_0 < q$	$n_1 = 3$
Сопротивление (нагрузка), П	$P = P_0 k_L^{n_2}$	$P_0 < P$	$n_2 \approx 2 \div 3$
Масса,	$G = G_0 k_L^{n_1}$	$G_0 < G$	$n_3 \approx \frac{n_1}{2} \div 3$ $n_3 \leq n_1$
Мощность, кВт	$N = N_0 k_L^{n_2 + \alpha}$	$N_0 < N$	$\alpha = 0; \frac{1}{2}; 1$
Производительность, м ³ /ч	$\Pi = \Pi_0 k_L^{n_1 + 1}$	$\Pi_0 < \Pi$	$n_1 + \alpha \geq 0$
Энергоемкость, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3}$	$N_{y.} = N_{y.0} k_L^{n_2 - \alpha}$	$N_{y.0} > N_{y.}$	$n_2 \leq n_1$
Материалоемкость, $\frac{\text{т} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3}$	$G_{y.} = G_{y.0} k_L^{n_3 - (n_1 + \alpha)}$	$G_{y.0} > G_{y.}$	$n_3 \leq \alpha$
Обобщенный показатель	$\Pi_{NG} = \Pi_{NG_0} k_L^{n_2 + n_3 - (2n_1 + \alpha)}$	$\Pi_{NG_0} > \Pi_{NG}$	$n_2 + n_3 \leq 2 n_1 - \alpha$
Приведенные удельные затраты, руб/м ³	$Z_y = b_0 + (b_1 N_{y.0}) k_L^{n_2 + n_1 + n_4} + (b_2 G_{y.0}) k_L^{n_3 + n_5 - (n_1 + \alpha)}$	$Z_{y0} > Z_y$	$n_4 = 0; b_1 = b_{10} k_L^{n_1}$ $n_5 \leq 0; b_2 = b_{20} k_L^{n_5}$ $b_0 = \text{const}$

Примечание. Масштаб линейного размера k_L определяется через обобщенный показатель, например емкость рабочего органа $k_L = \sqrt[3]{\frac{q}{k_q}}$. Параметры с индексом «0» определяются по характеристике машины-эталона.

Прогнозирование потенциала технического уровня по значению возможной эффективности. Эффективность применения научно-технического предложения целесообразно оценить посредством анализа такой целевой функции, которая определяет возможность повышения эффективности новой системы по отношению к старой традиционной. В частном случае такие показатели рассчитывают на базе моделей, приведенных в табл. II.1, например, по значению приведенных удельных затрат. Модели дополняют параметрами, которые выявляют на основании изучения научно-технических предложений на стенде для физического моделирования. Такой анализ позволяет прогнозировать возможную эффективность новых предложений по сравнению с традиционными и обосновать пути совершенствования дорожно-строительной техники. Одна из моделей такого показателя может быть представлена в виде следующей зависимости:

$$k_{эф} = 1 - \frac{\partial_{2н}}{\partial_{1т}}$$

Значения величин, входящих в формулу, даны в табл. II.1.

Потенциальные возможности отдельных направлений совершенствования можно оценить на основании приближенных выражений. Для направлений, характеризующих традиционные и новые методы взаимодействия рабочих органов со средой,

$$k_{эф} \simeq 1 - \frac{b_{2г}G_{уд2}}{b_{21}G_{уд1}}$$

Для направлений, определяющихся повышением показателей надежности, совершенствованием методов технического обслуживания и организации работ,

$$k_{эф} \simeq 1 - \frac{k_{b1}p_2}{k_{b2}p_2}$$

где k_{b1} , k_{b2} — коэффициенты использования машины по времени; p_2 — трудоемкость технического обслуживания, чел-ч.

Ориентировочная оценка системы в зависимости от изменения анализируемого параметра может быть выполнена на основе преобразования уравнения (при $b_0 \ll 1$)

$$Z_y \simeq b_1 N_{уд} + b_2 G_{уд}$$

и дополнения его соотношениями, связывающими параметры системы:

$$b_1 = d_1 N^{n_1}; \quad G = d_3 \Gamma^{n_3};$$

$$b_2 = d_2 N^{n_2}; \quad \Gamma_T = d_4 \Lambda^{n_4},$$

где d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , n_1 , n_2 , n_3 , n_4 — эмпирические коэффициенты; N — анализируемый параметр системы, в данном случае мощность двигателя.

Вид зависимости и коэффициенты устанавливают на основе анализа экспериментальных исследований на моделях, положений тео-

рии подобия и материалов статистического анализа. Полученные соотношения позволяют записать целевую функцию следующим образом:

$$Z_y = D_1 N^{m_1} + D_2 N^{m_2},$$

где $D_1 = d_1/d_4$; $D_2 = d_2 d_3/d_4$; $m_1 = 1 + n_1 - n_4$; $m_2 = n_2 + n_3 - n_4$.

При $D_1 > 0$, $D_2 > 0$ характер изменения Z_y зависит от значений m_1 и m_2 . Если $m_1 > 0$ и $m_2 > 0$, то Z_y повышается с ростом параметра N ; при $m_1 < 0$ и $m_2 < 0$ значение Z_y уменьшается. Если $m_1 > 0$, $m_2 < 0$ или $m_1 < 0$, $m_2 > 0$, то анализируемая функция имеет минимум при определенном значении параметра N .

Эффективность нового оборудования по сравнению с традиционным в зависимости от изменения параметра N оценивают по характеру изменения отношения Z_{y1}/Z_{y2} :

$$k_{Z_y} = 1 - \frac{D_{21}}{D_{22}} N^{m_{21} - m_{22}} \frac{\left(\frac{D_{11}}{D_{21}} N^{m_{11} m_{21}} + 1 \right)}{\left(\frac{D_{12}}{D_{22}} N^{m_{12} - m_{22}} + 1 \right)}.$$

Индексы «1» и «2» соответствуют традиционной и новой системам. Условия целесообразного применения последней характеризуют интервал, на котором $k_{Z_y} > 1$.

Прогнозирование тенденций развития машин по анализу критериев подобия с учетом тенденций изменения фона эксплуатации. Прогнозы на 10—15 лет строятся на основе данных и закономерностей, уже известных в технике. Дополнительно следует анализировать изменение во времени обобщающих показателей системы: экономичности, эффективности, производительности и др. «Сглаживание» кривых такого показателя во времени указывает на исчерпывание внутренних возможностей развития системы. Важно прогнозировать на основе известных фундаментальных закономерностей, которые определяют наиболее общие законы функционирования прогнозируемых систем, выявлять физическую сущность явлений и причинно-следственные отношения между отдельными параметрами, определяющими эффективность системы.

Метод прогнозирования по изменению критерия функционального подобия заключается в анализе изменения во времени плотности распределения вероятностей критерия подобия технических систем, рассчитанного по обобщенному показателю эффективности. Характер функционирования системы определяют рядом параметров: x_1, x_2, \dots, x_i , где x_1 — параметр системы, определяющий ее технико-экономическую эффективность.

Подобие такой системы внутри некоторой статистической совокупности определяется следующими критериями: $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_k$, где $\Pi_1 = f_1(x_1, x_2, \dots)$, $\Pi_2 = f_2(x_1, x_2, \dots)$; $\Pi_k = f_k(x_1, x_2, \dots)$.

Критерии подобия $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_k$ включают параметры, определяющие физические и экономические эффекты, существенные для рассматриваемой системы. Системы статистически подобны в том случае,

если плотности вероятностей соответствующих критериев подобия тождественно равны: $f_1(\Pi_1)_M = f_1(\Pi_1)_H$; $f_k(\Pi_k)_M = f_k(\Pi_k)_H$, где $f_1(\Pi_1), \dots, f_k(\Pi_k)$ — плотность распределения вероятностей соответствующих критериев подобия.

Степень нарушения подобия систем, а также допустимые колебания значений соответствующих критериев подобия можно оценить известными в теории вероятностей методами, основанными на анализе критериев согласия. Являясь методом обобщения, теория подобия, однако, не определяет степени эффективности системы в соответствующих условиях эксплуатации. Для такой оценки объекта необходим анализ дополнительных показателей, которые позволяли бы оценить полезность системы по совокупности ряда технико-экономических параметров. Предположим, что для рассматриваемого класса систем показатель эффективности известен и определяется зависимостью $\Theta = f(x_1, x_2, \dots, x_i)$.

В качестве такого показателя целесообразно использовать прежде всего интегральные технико-экономические показатели: приведенные удельные затраты, народнохозяйственную эффективность и др. Для частных случаев возможно применять технико-экономические показатели низшего уровня: КПД, энергоемкость, металлоемкость и др. (см. табл. II.1).

Для объектов техники одного назначения и различного типоразмера в качестве критерия функционального подобия, определяющего подобие системы по обобщенному показателю технико-экономической эффективности, можно использовать критерий, получаемый делением показателя эффективности Θ_i на соответствующее математическое ожидание или среднее значение $\bar{\Theta}_i$:

$$P_{\Theta\phi} = \Theta_i / \bar{\Theta}_i.$$

Среднее значение $\bar{\Theta}$ целесообразно устанавливать по значениям Θ_{0i} , определяемым огибающей:

$$\bar{\Theta} = \sum_1^n \frac{\Theta_{0i}}{n},$$

где Θ_{0i} — наименьшее значение показателя эффективности в каждой типоразмерной группе; n — общее число типоразмерных групп в совокупности.

Для функционального подобия систем различного типоразмера и назначения необходимо соблюдение равенства плотностей распределения вероятностей критерия подобия:

$$f(\Theta_i/\Theta_0)_M = f(\Theta_i/\Theta_0)_H.$$

Развитие во времени совокупности технических объектов определяется следующим выражением:

$$f_1(\Theta_i/\Theta_0) \neq f_2(\Theta_i/\Theta_0) \neq \dots \neq f_k(\Theta_i/\Theta_0),$$

где $1, 2, \dots, k$ — индексы отрезка времени, для которого рассчитан соответствующий критерий подобия.

Плотность распределения вероятностей по обобщенному критерию изменяется и подобие, рассчитанное по информации о первоначальном состоянии системы, нарушается. По степени нарушения подобия можно установить основные тенденции развития систем во времени. Для этого могут быть использованы критерии согласия, по которым оценивают вид и характер распределения.

В соответствии с предложенной методикой вершина плотности распределения вероятностей является обобщенным показателем тенденций развития системы. Вершина кривой $f(\Pi_{эф})$ в координатах трехмерного пространства, в котором одна из осей является осью времени, в общем случае описывает сложную кривую, вид которой определяется характером изменения комплекса технических, экономических и социальных факторов, включенных в обобщенный показатель эффективности. В частном случае кривая, описываемая вершиной, имеет параметры, рассчитываемые на основании статистического анализа.

Установленные тенденции развития в дальнейшем могут быть оценены на основании анализа их причинно-следственного механизма, что осуществляется анализом полученных вариантов по коэффициенту эффективности и изучением влияния на характер изменения систем частных критериев. Это позволяет устанавливать законы развития и управлять ими путем последовательного рассмотрения влияния изменения конструкции и принципов действия отдельных узлов, элементов и деталей сложных технических объектов.

Аналогичную методику можно использовать при рассмотрении тенденций развития сложных комплексных систем, состоящих из объектов различного назначения, а также различных технологических схем производства. Необходимой предпосылкой прогнозирования по изменению во времени плотности распределения вероятностей обобщающего критерия подобия является разработка объективного показателя, определяющего эффективность функционирования рассматриваемых систем.

Для установления тенденции развития строят графики изменения основных статистических характеристик $\Pi_{эф k}$ (среднее значение, асимметрия, эксцесс и др.) во времени:

$$f(\Pi_{эф k}) = \varphi_f(t_k); \quad \rho_{a\Pi_{эф k}} = \varphi_r(t_k); \quad E_{\Pi_{эф k}} = \varphi_E(t_k),$$

где t_k — соответствующий период времени, год.

Затем выполняют экстраполяцию значений:

$$\rho_{a\Pi_{эф k},} = \varphi_r\left(t_k + \frac{t}{2}\right); \quad E_{\Pi_{эф k}} = \varphi_E\left(t_k + \frac{t}{2}\right)$$

Экстраполяция делает необходимым четкое представление о возможных сроках прогноза. Срок прогноза равен $1/3$ исходного ряда времени $t_{np} \leq \frac{1}{3}(t_k - t_1)$, где t_1 — время начала отсчета.

Структура рассмотренных выше показателей такова, что с изменением удельных сопротивлений копанию, дальностей транспортирования, объемов работ и других величин, определяющих воз-

действие на машину со стороны внешней среды, численное значение показателя оценки изменяется. При этом может быть установлена тенденция изменения эффективности машин в зависимости от условий производства и эксплуатации. В определенных условиях эксплуатации эффективна машина определенного типоразмера, для других условий эта машина не будет рациональной.

Тенденции развития машины в зависимости от условий эксплуатации можно определить путем анализа изменения обобщенного показателя как функции величин k_k и $l_{тр}$. В общем случае это определение сводится к рассмотрению следующих вопросов: 1) ретроспективный анализ условий эксплуатации машин для установления средних значений соответствующих величин (в данном случае параметров $\bar{k}_{к.о}$ и $\bar{l}_{тр.о}$); 2) анализ объектов будущего применения машин для выявления тенденции развития во времени соответствующих величин (например, $f_k = f(t_k)$; $l_{тр} = f(t_k)$ и др.) и установление пределов изменения этих величин в будущем; 3) определение значений показателя эффективности $ПНГ_n$ для совокупности машин данного периода выпуска в зависимости от значений k_k , $l_{тр}$; 4) установление критерия функционального подобия $\Pi_{эф} = \Pi_{NG_i} / \Pi_{NG_0}$ (при этом значение Π_{NG_0} рассчитывают по значениям $k_{к.о}$, $l_{тр.о}$, характеризующим условия начала отсчета); 5) расчет статистических характеристик и их экстраполяция во времени.

Завершая вторую главу, необходимо подчеркнуть следующие основные положения.

1. Эффективность и научно-технический уровень объектов техники при проектировании на этапе научных исследований и опытно-конструкторских разработок (НИОКР) можно оценить на базе математических и предметно-математических моделей с широким использованием моделей-описаний и моделей-аналогий на основании зависимостей по определению приведенных удельных затрат. Последние являются основой формирования системы показателей эффективности и коэффициентов научно-технического уровня различного назначения. Следствие из теорем подобия позволяет использовать систему показателей на этапе физического моделирования процессов, основу которых составляют новые методы взаимодействия инструмента со средой.

2. Вероятностный характер условий эксплуатации при формировании моделирующих алгоритмов учитывается статистическими моделями параметров, характеризующих эти условия в моделях оценки технического уровня.

3. Моделирующий алгоритм определения технических параметров конструктивно-размерно-подобной машины на этапе формирования чертежей эскизного проекта в системах автоматизированного проектирования (САПР) может быть сформирован на базе следствий, вытекающих из основных теорем подобия.

Глава III

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СО СРЕДОЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

§ III.1. СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ КАК ПРИБЛИЖЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА СО СРЕДОЙ

Система уравнений, моделирующая процесс взаимодействия инструмента со средой, определяется видом, свойствами среды и характером действия инструмента. Рабочая среда, в которой происходит движение машины и исполнительного рабочего органа, накладывает на движение машины геометрические и кинематические ограничения. Неоднородность среды по прочностным характеристикам, а также неровность поверхности, по которой движется машина, обуславливают нестационарность связей, накладываемых на систему. Неголономность связей обусловлена, например, неинтегрируемостью дифференциальных уравнений связи при качении колеса без дифференциальных уравнений движения машины. Кроме того, система характеризуется нелинейными силами сопротивления, действующими со стороны разрабатываемой среды, а также нелинейностью упругих и демпфирующих характеристик ходового оборудования и металлоконструкций.

Аналитические исследования рабочего процесса по определению силовых и энергетических параметров, оптимальных размеров и формы рабочего органа при учете всех особенностей системы «среда — рабочее оборудование — движитель — среда» ведутся длительное время.

Расчетная схема процесса взаимодействия рабочего органа машины (бульдозер, скрепер, ковш, лопасть бетоносмесителя и др.) с учетом рассмотренных выше явлений может быть приближенно представлена в виде схемы, приведенной на рис.

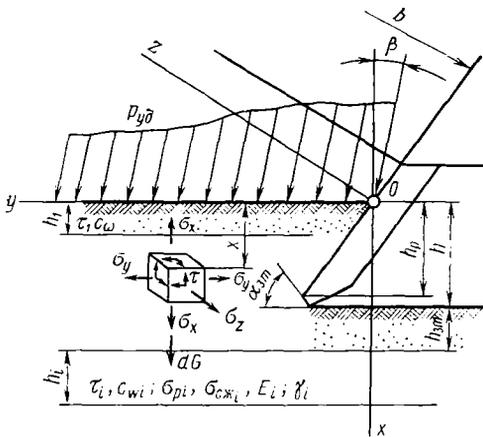


Рис. III.1. Схема взаимодействия рабочего органа машины со средой

III.1. На массив действует инструмент, нож, лопасть и др. Над системой «грунт — инструмент» расположен массив материала, который был предварительно разрушен инструментом (призма волочения грунта и др.). Поверхности скольжения, по которым происходит отделение элемента среды от массива, в каждом случае имеют форму, соответствующую направлению движения с наименьшим сопротивлением. В частном случае, это может быть цилиндрическая поверхность с постоянным радиусом кривизны. Среда, отделяемая инструментом, проходит далее через массив в направлении наименьшего сопротивления. Ее представляют в виде массы, обладающей свойствами сыпучей среды без сцепления или со сцеплением, а также в виде линейно-деформируемой вязкопластической среды. При необходимости среду представляют слоистой. В последнем случае среда, на которую воздействует инструмент, может рассматриваться как сыпучая со сцеплением или пластичная, а среда, из которой составлены слои, лежащие выше, — как сыпучая.

Система уравнений, описывающая напряженное состояние некоторого объема среды, находящейся перед рабочим органом, может быть составлена по аналогии с известными задачами теории упругости и пластичности [26]. При составлении уравнений предполагается, что процесс является пространственным и массив в пределах рассматриваемого объема представляется в виде изотропной среды, обладающей свойствами линейно-деформируемого и вязкопластического тела. При любой степени развития пластических деформаций напряженное состояние может быть представлено соответствующими уравнениями смешанной задачи теории линейно-деформируемой среды и предельного состояния вязкопластической среды. В настоящее время эта задача имеет ряд частных решений, которые не могут быть в полной мере применены к изучению процессов взаимодействия инструмента дорожной машины со средой. Однако общие уравнения можно использовать для установлений условий моделирования среды, обеспечивающих подобие напряженного состояния оригинала и модели в границах принятой схематизации процесса. Полную систему исходных дифференциальных уравнений составляют из уравнений: 1) равновесия, которые имеют место для напряженного состояния как в упругой, так и в пластической областях развития деформаций; 2) сплошности; 3) состояния для соответствующих областей развития деформации.

Полученную систему уравнений дополняют условиями однозначности. Последние в части составления граничных условий могут быть сформулированы для рассматриваемого процесса лишь частично. Однако при соблюдении критериев подобия, полученных на базе анализа уравнений, в ряде случаев косвенно моделируются и некоторые параметры, определяющие условия на границах системы, например характер распределения нагрузки, форма поверхностей контакта, напряжения на поверхностях разрыва. Поэтому неполнота сведений об условиях на границах моделирующего объекта не является существенным препятствием для формирования условий при-

лиженного подобия при физическом моделировании процесса.

В данном случае уравнения для элементарного объема грунта с размерами ребер dx , dy , dz (рис. III.1) составляются в предположении, что на выделенный объем действуют силы тяжести, поверхностные силы и силы вязкого трения. Искомые уравнения в общем виде записываются следующим образом:

$$\sum P_{x, y, z} = m \frac{d^2 l_{x, y, z}}{dt^2};$$

$$\sum M_{x, y, z} = J \frac{d^2 \omega_{x, y, z}}{dt^2},$$

где m — масса элемента, г; J — момент инерции массы элемента; $\omega_{x, y, z}$ — проекция углового перемещения элемента, c^{-1} .

Для областей развития упругих деформаций сумма проекций сил на ось x имеет вид

$$\left(\sigma_x - \frac{\partial \tau_x}{\partial x} dt \right) dydz - \sigma_x dydz + \left(\tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy \right) dx dz - \tau_{xy} dx dz - \\ + \left(\tau_{xz} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dz \right) dydz - \tau_{xz} dydz + dG = \rho dx dy dz \frac{dv_x}{dt},$$

где σ_x — проекция компонентов напряжения на ось x ; dG — проекция силы тяжести на ось x ; ρ — плотность среды; $\frac{dv_x}{dt}$ — проекция на ось x полной производной вектора скорости.

Полная производная по времени проекции вектора скорости с учетом локального и конвективного изменения вектора скорости записывается следующим образом:

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z}.$$

После подстановки полученных выражений и выполнения соответствующих сокращений можно записать следующее выражение:

$$\frac{\partial \tau_x}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dx dy dz + g \rho dx dy dz + \eta \\ \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} + \frac{1}{3 \partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] dx dy dz = \\ = \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) dx dy dz.$$

Относя слагаемые к единице объема и принимая во внимание, что $\rho g = \gamma$, уравнение суммы проекций на ось x можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial \tau_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \gamma + \gamma_1 \left[\frac{g^2 v_x}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial^2 z} + \right. \\ \left. + \frac{1}{3 \partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] = \frac{\gamma}{g} \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \right. \\ \left. + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right)$$

Аналогично составляют два уравнения, представляющие сумму проекций сил на оси y и z .

Сумма моментов сил относительно осей, проходящих через центр тяжести элементарного объема, приводит, как известно, к группе уравнений, устанавливающих закон сопряженности касательных напряжений:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}; \quad \tau_{zx} = \tau_{xz}$$

Применительно к явлению деформирования грунта уравнение непрерывности может быть получено на основании известного в механике сплошной среды закона сохранения материи. В этом случае считают, что разность между массой, которая вошла в элементарный объем dx, dy, dz за время dt , и массой, которая вышла из него за тот же промежуток времени, должна равняться изменению массы рассматриваемого объема вследствие изменения его плотности.

При деформации некоторой области среды в направлении x в элементарный объем dV со скоростью v_x поступает масса, равная

$$m_x = \frac{\gamma}{g} v_x dydzdt,$$

и соответственно в направлении y и z

$$m_y = \frac{\gamma}{g} v_y dx dz dt,$$

$$m_z = \frac{\gamma}{g} v_z dx dy dt.$$

Элементарные массы, которые выходят за это же время через противоположные грани рассматриваемого объема, можно выразить в виде следующих соотношений:

$$m_x + \frac{\partial m_x}{\partial x} dx; \quad m_y + \frac{\partial m_y}{\partial y} dy; \quad m_z + \frac{\partial m_z}{\partial z} dz.$$

Это следует из допущения, что функция изменения массы является непрерывной и раскладывается в ряд Тейлора, а члены второго и высших порядков малости отбрасываются.

Таким образом, разность между массами поступающего и выходящего грунта можно записать следующим образом:

$$dm = (m_x + m_y + m_z) - \left[\left(m_x + \frac{\partial m_x}{\partial x} dx \right) + \left(m_y + \frac{\partial m_y}{\partial y} dy \right) + \left(m_z + \frac{\partial m_z}{\partial z} dz \right) \right]$$

или

$$dm = - \left(\frac{\partial m_x}{\partial x} dx + \frac{\partial m_y}{\partial y} dy + \frac{\partial m_z}{\partial z} dz \right)$$

После подстановки значения входящих масс получаем

$$dm = - \frac{\partial V}{g} dt \left(\frac{\partial (\gamma v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\gamma v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\gamma v_z)}{\partial z} \right)$$

Этот излишек среды в соответствии с законом сохранения материи должен равняться изменению массы за счет изменения плотности (объемного веса):

$$dm = \frac{\partial m}{\partial t} dt; \quad dm = \frac{\partial \gamma}{\partial t} \frac{dV}{g} dt.$$

Следовательно,

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} \frac{dV}{g} dt = - \frac{dV}{g} dt \left(\frac{\partial (\gamma v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\gamma v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\gamma v_z)}{\partial z} \right)$$

После сокращения и разворачивания частных производных получаем условия неразрывности деформации при неустановившемся движении в следующем виде:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \gamma \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + v_x \frac{\partial \gamma}{\partial x} + v_y \frac{\partial \gamma}{\partial y} + v_z \frac{\partial \gamma}{\partial z} = 0.$$

Уравнения состояния среды как линейно-деформируемого тела с вязкопластическими свойствами записывают отдельно для областей упругого и пластического состояний.

Для зоны упругих и линейных деформаций:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \lambda \varepsilon + 2G_1 \varepsilon_x; & \sigma_y &= \lambda \varepsilon + 2G_1 \varepsilon_y; & \sigma_z &= \lambda \varepsilon + 2G_1 \varepsilon_z; \\ &= G_1 \tilde{\gamma}_{xy}; & &= G_1 \tilde{\gamma}_{yz}; & \tau_{zx} &= G_1 \tilde{\gamma}_{zx}, \end{aligned}$$

где $\lambda = \frac{E}{3(1-2\mu)} - \frac{2}{3} G_1$; $G_1 = \frac{E}{2(1+\mu)}$; μ — коэффициент Пуассона; E — модуль линейной деформации.

Относительное изменение объема ε определяется в виде следующей суммы:

$$\varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z,$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ — относительные удлинения в направлениях осей x, y, z .

Последние можно представить так:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z},$$

где ∂u_x , ∂u_y , ∂u_z — проекции линейного перемещения при деформации на оси координат.

Величины относительных угловых деформаций можно записать следующим образом:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}$$

При составлении уравнений состояния среды для областей предельного состояния предполагается существование общей зависимости для выражения интенсивности касательных напряжений

$$T = (H_0 + \sigma_1) \operatorname{tg} \psi + \eta S,$$

где H_0 — связность; σ_1 — среднее нормальное напряжение; $\operatorname{tg} \psi$ — коэффициент трения (по октаэдрической плоскости); S — интенсивность скоростей деформации сдвига; η — коэффициент динамической вязкости.

Эта зависимость позволяет записать механические уравнения состояния вязкопластического течения среды с учетом ее сжимаемости. В дальнейшем в качестве первого приближения можно принять:

$$H_0 \simeq c_\omega \operatorname{ctg} \rho; \quad \operatorname{tg} \psi \simeq \operatorname{tg} \rho;$$

$$\sigma_1 = k_1 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right),$$

где k_1 — модуль объемной вязкости.

Интенсивность скоростей деформации сдвига определяется зависимостью вида

$$S = \sqrt{2/3} \left[(\varphi_{xy}^2 + \varphi_{yz}^2 + \varphi_{zx}^2) + \frac{3}{2} (\eta_{1xy}^2 + \eta_{1yz}^2 + \eta_{1zx}^2) \right]^{1/2}$$

где $\varphi_{xy}^2 = \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2$, $\varphi_{yz}^2 = \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2$, $\varphi_{zx}^2 = \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2$

Величины η_{1xy} , η_{1yz} , η_{1zx} определяют угловые скорости деформации сдвига и записываются следующим образом:

$$\eta_{1xy} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}; \quad \eta_{1yz} = \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y}; \quad \eta_{1zx} = \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z}.$$

Граничные условия на контуре в данном случае могут быть сформулированы следующим образом. На поверхностях, где проявляются силы трения в соответствии с законом Кулона, т. е. касатель-

ные напряжения пропорциональны нормальным, граничные условия выражаются в виде $\tau = f(x, y, z, \sigma, \rho, \dots)$ или, например, $\tau = \sigma \operatorname{tg} \rho + c_{\omega}$.

На участках контактной поверхности, где закон Кулона не применяется, граничные условия имеют вид $\tau = f_2(x, y, z, c_{\omega}, \dots)$ или, например, $\tau = c_{\omega}$.

На поверхностях, отделяющих область предельных состояний от области, где они отсутствуют, должны выполняться граничные условия, заключающиеся в равенстве нормальных, касательных к поверхности напряжений. Условия на границах раздела в данном случае не формулируются. При этом принимается во внимание положение, заключающееся в том, что при соблюдении критериев подобия, полученных на базе анализа основных уравнений процесса, выдерживается подобие процесса по ряду параметров, определяющих условия на границах системы и, в частности, на поверхностях развития предельного состояния.

Такие параметры процесса, как диаметр d_b и масса m_b отдельных включений, которые не вошли в систему рассмотренных уравнений при определении соответствующих критериев подобия, могут быть введены в систему из анализа общего уравнения энергетического баланса при сдвиге и анализа размерностей. Без учета массы частицы и сил вязкого трения имеем

$$\frac{c_{\omega}}{\sigma} = \frac{d_b}{(a + d_b/2)} \left(1 + \operatorname{tg} \rho \frac{k_6}{2} \right),$$

где d_b — средний диаметр частицы; a — расстояние между частицами; k_6 — коэффициент бокового давления.

Внедрение инструмента в среду можно рассматривать как пространственную задачу по внедрению штампа произвольной формы в полубесконечное пространство (рис. III.1). Уравнения равновесия, состояния и непрерывности могут быть записаны по аналогии с системой уравнений, рассмотренных выше. Граничные условия на контуре затупленного лезвия при внедрении в среду имеют вид $\tau = f(x, y, z, \sigma_{c.m}, \delta, \dots)$, например $\tau = \sigma_{c.m} \operatorname{tg} \delta + c_{\omega}$, или $\tau = \tau_0 f(x, y, z)$, например $\tau_0 = c_{\omega}$.

§ III.2. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОДСИСТЕМЫ «РАБОЧИЙ ОРГАН МАШИНЫ — СРЕДА»

Наглядное представление о характере изменения напряжений и деформаций среды в зависимости от вариаций определяющих ее физико-механических свойств при механическом воздействии дают реологические модели. Последние представляют среду в виде упрощенных механических моделей, составленных из механических элементов, каждый из которых или их сочетание дают представление об основных свойствах среды и характере напряженно-деформированного состояния под действием внешних нагрузок.

Реологические модели широко применяют для изучения явлений релаксации, ползучести и длительной прочности грунтов [10]. В строительной механике под реологическими понимают явления изменения деформации во времени. В реологических моделях механические характеристики среды определяются основными (фундаментальными) свойствами: упругостью, пластичностью и вязкостью. Все другие механические свойства являются производными от фундаментальных констант — постоянных коэффициентов, которые не могут быть вычислены исходя из других характеристик данного структурного уровня.

Простейшие реологические модели могут быть использованы при изучении общих закономерностей процессов взаимодействия рабочих органов со средой и при составлении критериев подобия. Обычно они используются как вспомогательное средство, облегчающее представление о поведении материала под внешним воздействием, характер изменения которого трудно представить на основании рассмотрения сложной математической модели.

Идеальную среду, представляемую в виде реологической модели, называют *реологической*, и ей присваивается имя ученого, исследовавшего впервые характер изменения напряженно-деформированного состояния такого материала под нагрузкой.

Реологическая модель упругого материала обозначается символом (*y*) и называется по имени ученого *моделью Гука*. Такую модель (табл. III.1) представляют в виде пружины, которая характеризует свойства упругости. График зависимости напряжения от деформации при нагружении и снятии нагрузки имеет прямолинейный вид и определяется известным законом:

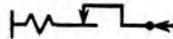
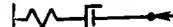
$$\sigma = E\varepsilon.$$

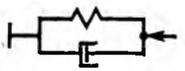
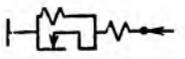
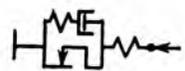
Модель идеально пластического или жесткопластического материала представляют в виде ползуна с сухим кулоновым трением (табл. III.1). Такую модель называют *моделью Сен-Венана* и обозначают символом (*ж*). Материал такого типа под действием внешней нагрузки не деформируется до тех пор, пока напряжение не превзойдет определенного предела пластичности $[\tau_{п.л}]$. Условие наступления пластической деформации как остаточной деформации сдвига определяется соотношением τ $[\tau_{п.л}]$.

Пластический материал с упрочнением условно представляют в виде набора подобных единичных моделей, соединенных стержнями. По мере сдвига в работу последовательно включается каждая из моделей. Соотношение между напряжением и деформацией, которое не зависит от скорости нагружения, приведено в табл. III.1.

Модель идеально вязкого тела представляют в виде поршня с достаточно тонкими отверстиями, движущегося в цилиндре, заполненном жидкостью. Такую модель называют *Ньютоновой* и обозначают символом (*в*). Работа внешних сил, затрачиваемая на преодоление сил вязкого (жидкостного) трения, превращается в теплоту и является необратимой.

Основные виды реологических моделей

Моделируемая среда	Реологическая модель		Наименование модели
	форма		
Упругая		$\sigma = \varepsilon E; \tau = \gamma G$	Гука
Пластическая		$\tau = \tau_{пл}$	Сен-Венана
Вязкая		$\tau = \eta \frac{dv}{dz}$	Ньютона
Упругопластическая		$\tau = \tau_{пл}; \tau = \gamma G$	Прандтля
Упруговязкая; с релаксацией напряжения		$\tau = \tau_1 \frac{dv}{dz}; \tau = \gamma G$	Максвелла

Моделируемая среда	Реологическая модель		Наименование модели
	аппаратная форма		
с запаздыванием деформаций		$\tau = \gamma G + \gamma_1 \frac{dv}{dz}$	Фойгта
с явлением ползучести		$\tau = \gamma G; \tau = \gamma_1 G_1 + \gamma_1 \frac{dv}{dz}$	Кельвина
Упруговязкопластическая		$\tau = \gamma G; \tau = \gamma_1 G_1 + \tau_{пл}$	Бингама
Упруговязкопластическая релаксирующая		$\tau = \gamma G; \tau = \gamma_1 G_1 + \tau_{пл};$ $\tau = \tau_{пл} + \gamma_1 \frac{dv}{dz}$	Шведова
Грунт в процессе сдвиговой деформации		$\tau = \gamma G; \tau = \gamma_1 G_1 + \gamma_1 \frac{dv}{dz};$ $\tau = \tau_{пл} + \gamma_1 \frac{dv}{dz}$	Комбинированная Кельвина и Шведова

Напряжение в вязкой модели пропорционально градиенту скорости приложения нагрузки:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dz},$$

где η — коэффициент динамической вязкости; v — скорость перемещения; z — расстояние.

Сложные реологические модели в виде механического сочетания простых моделей позволяют с большим приближением описывать свойства реальных сред. Они составляются путем параллельного или последовательного соединения простых реологических моделей. Модели упругопластической среды (Прандтля), упруговязкой релаксирующей среды (Максвелла), вязкоупругой среды с запаздыванием (среда Фойгта), упруговязкой среды с явлением ползучести (Кельвина), упруговязкопластической среды (Бингама), упруговязкопластической релаксирующей среды (Шведова) и соответствующие описывающие их уравнения приведены в табл. III. 1.

Общее реологическое уравнение, пригодное для рассмотрения различных реологических моделей, записывают в виде следующей аддитивной функции:

$$\tau - \tau_T = G\dot{\gamma} + \eta\dot{\gamma} - T_p\tau = G(\dot{\gamma} + T_p\dot{\gamma}) - T_p\tau,$$

где τ — напряжение; τ_T — предел текучести; $\dot{\gamma}$ — скорость деформирования; γ — деформация сдвига; G — модуль сдвига; T_p — время релаксации ($T_p = \eta/G$).

Модели Кельвина, Бингама и Шведова более, чем простейшие модели, соответствуют реальным грунтовым средам. Для наиболее точного моделирования свойств грунта прибегают к построению усложненных реологических моделей. Такие модели представляют сочетание множества элементарных упруговязких моделей, каждая из которых имеет свои реологические коэффициенты. Модели такого вида называют *спектральными*.

Модель, хорошо отражающая процесс резания и последующего сдвига вязкого грунта, представляет собой спектральную модель в виде последовательного соединения моделей Кельвина и Шведова (табл. III. 1).

Пружина (y_1) имитирует упругую мгновенную деформацию. Следующий за пружиной составной элемент из пружины (y_2) и демфера (v_1) представляет модель Фойгта и имитирует длительную упруговязкую деформацию. При достижении предела текучести [τ_T], что имитирует элемент (ж), произойдет мгновенная остаточная деформация за счет смещения элемента (л), который имитирует зазор в системе. После этого наступает длительная необратимая деформация. Она моделируется системой, состоящей из элементов (y_3) и (v_2), которые представляют упругопластическую релаксирующую модель (Прандтля).

Напряжение в модели под действием нагрузки определяется системой уравнений:

$$\begin{aligned} \tau_{y_1} &= \tau_{y_2} + \tau_{v_2} = \tau_T(\text{ж}), \\ \tau_{T(\text{ж})} &= \tau_{y_3} = \tau_{v_2}. \end{aligned}$$

Для деформаций системы имеем:

$$\tilde{\gamma}_y = \tilde{\gamma}_{y_1} + \tilde{\gamma}_{y_2} \quad \tilde{\gamma}_{ж},$$

$$\tilde{\gamma}_y = \tilde{\gamma}_{y_1} - \tilde{\gamma}_{v_1} - \tilde{\gamma}_n + \tilde{\gamma}_{y_3} + \gamma_{v_2}$$

Здесь и далее приняты обозначения: τ_{y_i} , γ_{y_i} — напряжения и деформации упругих элементов модели (y_1), (y_2), (y_3); $\tau_{ж_i}$, $\gamma_{ж_i}$ — пределы пластичности и деформации жесткопластических элементов; τ_{v_i} , γ_{v_i} — пределы текучести и деформация вязких элементов модели (v_1), (v_2).

При фиксации деформации система способна релаксировать. Часть действующего напряжения, равная $\tau - \tau_r$, будет релаксировать до величины τ_r .

Рассмотренные реологические модели могут быть использованы для описания процессов, протекающих при взаимодействии рабочих органов дорожных машин со средой различного вида.

Реологическую модель процесса резания в упрощенном варианте, пригодном для приближенного анализа и получения критериев подобия, можно представить в виде рассмотренной модели, имитирующей процесс сдвига грунта со сцеплением. Для этапа резания с заглублением одна из возможных моделей приведена на рис. III. 2, а. Для моделирования горизонтальной $P_{к1}$ и вертикальной $P_{к2}$ составляющих сопротивления копанью используются две структурно одинаковые модели, отличающиеся количественно по величинам составляющих модель элементов. Более простой вариант модели рассматриваемого процесса дан на рис. III. 2, б. В этом случае модель процесса составлена из двух сложных реологических упруговязкопластических моделей (Бингама), различающихся величинами коэффициентов, характеризующих элементы каждой из моделей.

Процесс копания (рыхления) грунта при послойном снятии струж-

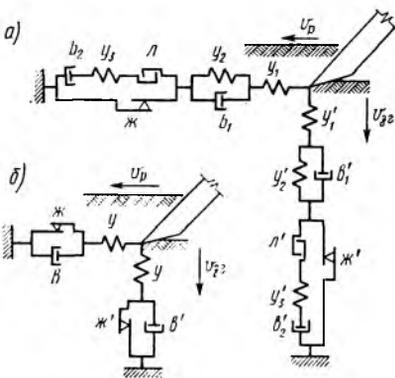


Рис. III.2. Реологическая модель процесса резания грунта:

а — комбинация моделей Кельвина и Шведва; б — Кельвина и Бингама

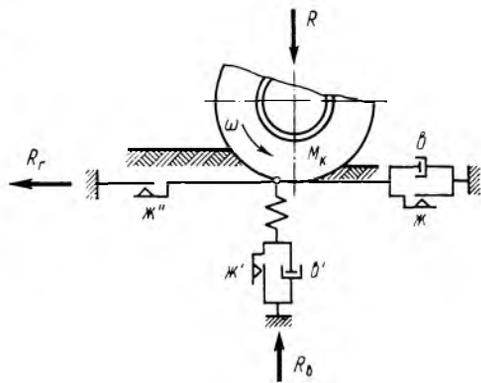


Рис. III.3. Вариант реологической модели системы «колесный движитель — грунт»

ки и перемещении перед рабочим органом призмы волочения можно представить сложной реологической моделью. Первая модель (ж_1) является пластической моделью (Сен-Венана) и имитирует призму, вторая — состоящая из набора элементов (ж_2), (γ), (β), представляет собой упруговязкопластическую модель (Бингама). Она имитирует процесс отделения грунта от массива.

Напряжение в такой системе определяется зависимостью

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{\gamma} + \tau_{\text{т.ж}_1} = \tau_{\text{т.ж}_2} + \tau_{\text{т.в}}$$

Деформация системы описывается уравнением $\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\gamma} + \gamma_{\text{т.ж}_2} = \gamma_{\text{т.ж}}$.

Процесс взаимодействия движителя с грунтом можно представить одним из вариантов реологической модели, приведенной на рис. III. 3. Реактивная горизонтальная составляющая колеса (R_r) имитируется вязкопластической моделью (ж) (β), представляющей модель Бингама без упругого элемента. Вертикальная реакция на колесо (R_v) представляется упруговязкопластической моделью (Бингама). Напряжение в горизонтальном элементе под действием сдвигающих нагрузок под влиянием окружной силы на обод колеса определяется уравнением $\tau_{\Sigma} = \tau_{\text{т.ж}} + \tau_{\text{т.в}}$.

Соответствующая деформация определяется соотношением $\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\text{т.ж}} = \gamma_{\text{т.в}}$.

Напряжение под действием вертикальной нагрузки $\tau_{\Sigma} = \tau_{\gamma} = \tau_{\text{т.ж}'} + \tau_{\text{т.в}'}$. Для соответствующей деформации $\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\gamma} + \gamma_{\text{т.ж}'} = \gamma_{\gamma} + \gamma_{\text{т.в}'}$. На этапе получения общих критериев подобия процесса дробления последний также можно представить в виде упруговязко-

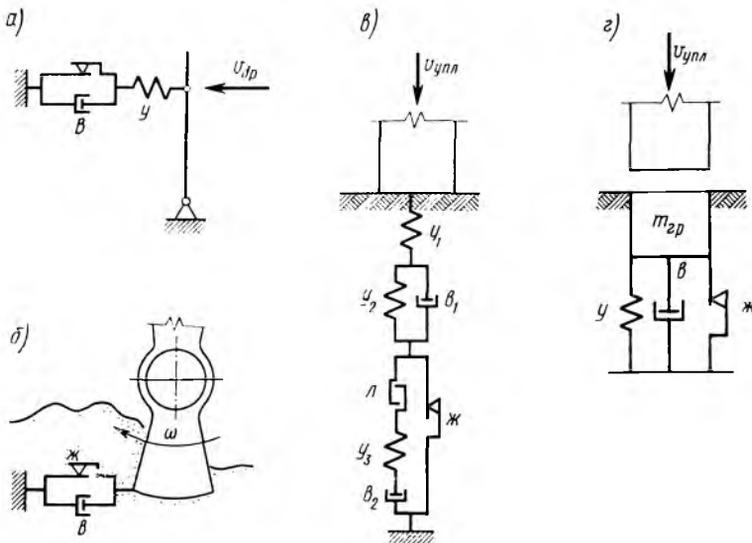


Рис. III.4. Варианты реологического моделирования процессов: а — дробления; б — перемешивания; в, г — уплотнения

пластической модели (рис. III. 4, а). Элемент (у) имитирует мгновенную упругую деформацию материала под нагрузкой. Элементы (в) и (ж) моделируют проявление жесткопластических и вязких свойств материала. Для хрупких материалов модель преобразуется в жесткопластическую путем изъятия из системы демпфирующего элемента (в). Напряжение в системе $\tau_y = \tau_u = \tau_{т.ж} + \tau_{т.в}$.

Деформация материала под действием нагрузки в соответствии с функционированием модели $\gamma_y = \gamma_u + \gamma_{т.в} = \gamma_u + \gamma_{т.ж}$.

Перемешивание строительных материалов можно представить схематично на базе реологической модели, приведенной на рис. III. 4, б. Реологическая модель процесса перемешивания содержит жесткопластический элемент (ж) и вязкий (в), соединенные параллельно. Напряжение в системе $\tau_y = \tau_{т.ж} + \tau_{т.в}$. Для определения деформаций имеем: $\gamma_y = \gamma_{т.ж} = \gamma_{т.в}$.

Процесс уплотнения можно представить одной из моделей, имитирующих протекание сдвиговых деформаций под действием статистической нагрузки (рис. III. 4, в, г). Модель состоит из двух сложных моделей, характер действия которых описан ранее.

В заключение следует сказать, что реологические модели используют в основном для качественной характеристики объекта. Это возможная, но не единственная модель. При формировании физических моделей они являются простой исходной базой для установления критериев подобия. Такие модели важны на первоначальных этапах анализа, когда подобие процессов взаимодействия рабочих органов со средой, обладающей широким спектром физико-механических свойств, устанавливаются в условиях ограниченной информации. На последующих этапах исследования на основании анализа информации о приближенных моделях переходят к созданию и анализу математических моделей более высокого уровня.

§ III.3. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ ТИПА «СРЕДА — РАБОЧИЙ ОРГАН — ДВИЖИТЕЛЬ — СРЕДА»

Модели логико-математического типа для описания рабочих процессов и режимов транспортных операций самоходных дорожно-строительных машин составляют на основании уравнений движения машины как многомассовой динамической системы с соответствующим числом степеней свободы.

Сопротивления рабочей среды, возникающие при эксплуатации машины, определяются в виде соответствующих частных моделей процессов взаимодействия рабочего органа со средой, которые формируют на основании теории предельного состояния сплошной среды, реологических моделей, а также регрессионных математических моделей-описаний, получаемых в результате обработки данных экспериментальных исследований. Составление некоторых частных теоретических моделей было рассмотрено в предыдущих разделах. Получение возможных вариантов теоретических моделей дорожно-строительных машин как сложных динамических систем рассматривается на примере формирования моделей землеройно-транспортных машин.

Основные подсистемы машины испытывают динамические нагрузки

ки как в период неустановившегося движения, так и при «установившемся» рабочем процессе, например при резании или транспортировании грунта. Сопrotивление резанию, действующее со стороны грунта на рабочее оборудование машины, является некоторой аperiodической функцией во времени. Неровности дороги, ее микропрофиль, являются причиной возникновения значительных динамических нагрузок в транспортном режиме.

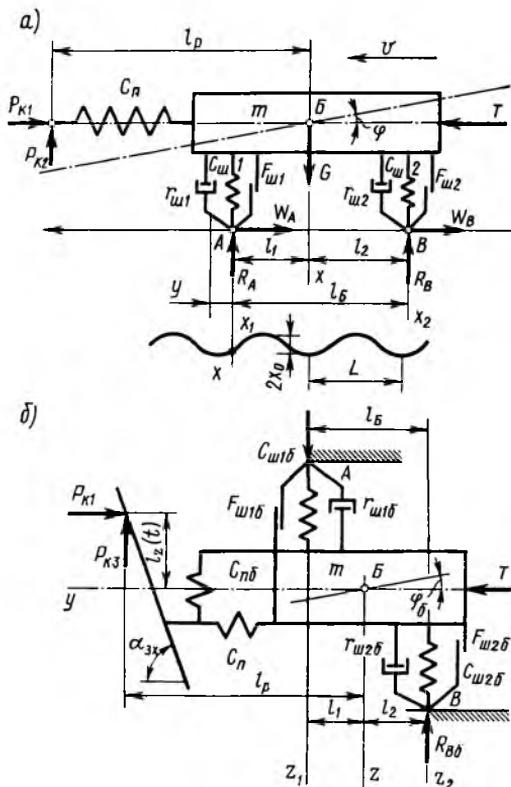


Рис. 11.5. Механическая одномассовая модель пневмоколесного бульдозера (фронтального погрузчика):

а — схема сил в вертикальной плоскости; б — схема сил в горизонтальной плоскости

III. 6, в). На систему действуют следующие внешние силы: тяговое усилие T , сопротивление движению W , горизонтальная P_{K1} , боковая P_{K3} и вертикальная P_{K2} составляющие сопротивления копанью и реакции грунта на ходовое оборудование. Пневматическое ходовое оборудование обладает жесткостью $C_{ш}$, коэффициентом вязкого трения $r_{ш}$ и сухим трением $F_{ш}$.

В целях упрощения системы уравнений внешние силы, действующие на систему T , W и P_{K1} , условно приложены к центру тяжести соответствующих элементов системы. Необходимо отметить, что это

Условия, в которых работает машина, определяют разнообразие как расчетных схем в виде механических эквивалентов рассматриваемой системы, так и соответствующих математических моделей (рис. III. 5 и III. 6).

Бульдозер с пневмоколесным ходовым оборудованием, ковшовый фронтальный погрузчик и другие подобные объекты на этапе копания в зависимости от степени детализации системы могут быть представлены одномассовой системой с пятью степенями свободы, с тремя степенями свободы и учетом неровностей дороги.

Скрепер на одноосном тягаче в ряде случаев представляют в виде двухмассовой системы с шестью степенями свободы (рис. III. 6, а, б), а скреперный поезд с двумя ковшами имитируется трехмассовой системой с девятью степенями свободы (рис.

упрощение не приводит к существенным неточностям при последующем анализе системы методами теории подобия.

Составляющие сопротивления копанию, являющиеся функцией времени $P_{к1}(t)$, $P_{к2}(t)$, $P_{к3}(t)$, как усредненные величины определяются системой уравнений, описывающих процесс взаимодействия рабочего оборудования с грунтом. При анализе предельных статических нагрузок можно использовать частные модели, полученные на основании анализа уравнений теории предельного состояния сыпучей среды со

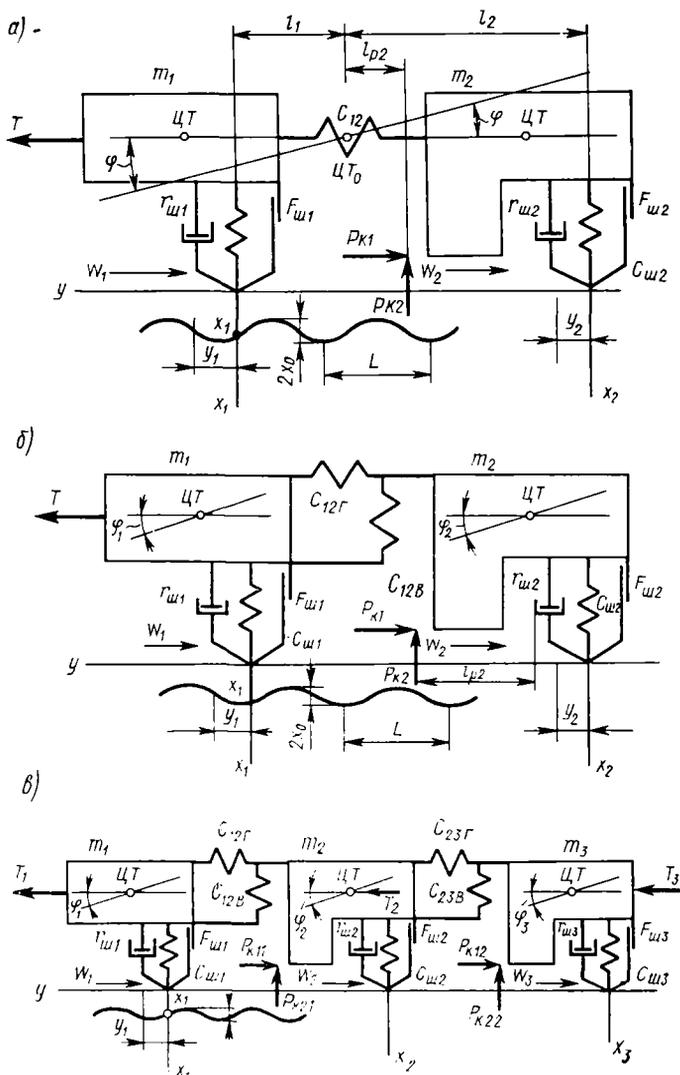


Рис. III.6. Механическая многомассовая модель:
 а, б — скрепера на одноосном тягаче; в — скреперного поезда с дву-
 шасси

сцеплением. Для динамических процессов в качестве уравнений описаний феноменологического типа могут быть использованы реологические модели различного вида.

Тяговое усилие определяется закономерностями взаимодействия ходового оборудования с основанием, в частном случае с грунтом. Вариант, когда движущей силой является тяговое усилие по пределу сцепления, является наиболее простым. Динамику машины можно рассматривать без учета влияния процессов, протекающих в системе «двигатель — ходовое оборудование». Движение на пределе сцепления движителя с грунтом характеризуется тяговым усилием в виде постоянной величины:

$$T = k_{\text{сц}} \varphi_{\text{сц}} G,$$

где $k_{\text{сц}}$ — коэффициент сцепного веса; $\varphi_{\text{сц}}$ — коэффициент сцепления; G — вес машины, тс.

При необходимости можно рассмотреть более сложные зависимости, определяющие характер взаимодействия движителя с грунтом, элементов трансмиссии и привода и др. Например, величину тяги при наличии буксования можно определить по величине относительного буксования δ_{δ_i} :

$$R_i = G_i f(\delta_{\delta_i}),$$

где $f(\delta_{\delta_i})$ — безразмерная функция относительного буксования, изменяющаяся от 0 до 1.

Тягу в режиме буксования можно задавать в виде линейной зависимости

$$R_i = R_{0i} + k_{\delta} \delta_{\delta_i},$$

где R_{0i} — величина тяги, определяемая моментом срыва в буксовании; k_{δ} — эмпирический коэффициент кривой буксования.

Относительное буксование

$$\delta_{\delta_i} = 1 - \frac{iv}{\omega_{\text{д}} r},$$

где i — передаточное отношение от колеса к валу двигателя; r — радиус качания колеса; v — поступательная скорость; $\omega_{\text{д}}$ — угловая скорость двигателя.

При введении в уравнение движения этого условия, моделирующая система уравнений движения машины составляется с учетом движения вращающихся элементов системы. Если при составлении моделирующей системы уравнений преследуется цель получения на их базе системы критериев подобия, процесс взаимодействия движителя с грунтом можно описать в виде реологических моделей различной сложности.

Одномассовая система с пятью степенями свободы при движении по ровной твердой поверхности представляется в виде расчетной схемы, приведенной на рис. III. 5. Уравнения движения системы составляют в форме уравнений Лагранжа на основании разворачивания выражений для кинетической и потенциальной энергии системы с учетом характе-

ра действующих сил. Уравнения движения массы m в направлении оси x (см. рис. III. 5, а), в направлении оси y , а также при повороте массы вокруг центра тяжести в плоскости чертежа составляются по известной методике. Ординаты точек А, Б, В соответственно обозначают x_1, x_2, x_3 , а угол поворота вокруг центра тяжести φ .

В третьем измерении (см. рис. III. 5, б) при движении вдоль оси z и повороте вокруг центра массы в горизонтальной плоскости координаты точек А, Б, В по оси z соответственно обозначаются z_1, z_2, z_3 , а угол поворота вокруг центра массы — φ_0 .

Кинетическая энергия системы в соответствии с принятой схемой определяется на основании методических положений. Потенциальная энергия системы устанавливается как потенциальная энергия машины в поле силы тяжести и потенциальная энергия деформированных элементов.

Вертикальная координата (по оси x) и горизонтальная координата (по оси z) некоторой точки системы под передней осью (А) и соответствующие координаты под задней осью (В) могут быть выражены через координаты центра массы (Б) и углов φ, φ_0 следующим образом:

$$\begin{aligned}x_1 &= x - l_1\varphi; & z_1 &= z - l_1\varphi_0; \\x_2 &= x + l_2\varphi; & z_2 &= z + l_2\varphi_0.\end{aligned}$$

В форме, удобной для последующего анализа теории методами подобия с целью получения критериев подобия, систему уравнений можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}m \frac{d^2y}{dt^2} - C_{ny}y &= T - (P_{\kappa 1} + W); \\m \frac{d^2x}{dt^2} + C_{w1}(x - l_1\varphi) - C_{w2}(x + l_2\varphi) + C_{w1}\varphi^2(x - l_1\varphi) &+ C_{w2}\varphi^2(x + l_2\varphi) = G - P_{\kappa 2} - r_{w1} \frac{dx_1}{dt} - r_{w2} \frac{dx_2}{dt} - \\&- F_{w1} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt} - F_{w2} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \\J \frac{d^2\varphi}{dt^2} - C_{w1}l_1(x - l_1\varphi) + C_{w2}l_2(x + l_2\varphi) + C_{w1}\varphi(x^2 - 3xl_1\varphi) &+ 2l_1^2\varphi^2 + C_{w2}\varphi(x^2 + 3xl_2\varphi + 2l_2^2\varphi^2) = P_{\kappa 2}l_p + r_{w1} + \\&+ l_1 \frac{dx_1}{dt} - r_{w1}l_2 \frac{dx_2}{dt} - F_{w1}l_1 \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt} - F_{w2}l_2 \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \\m \frac{d^2z}{dt^2} + C_{m0}z + C_{w10}(z - l_1\varphi_0)(1 + \varphi_0^2) + C_{w20}(z + l_2\varphi_0)(1 - \varphi_0^2) &= \\&= P_{\kappa 3} - r_{w10} \frac{dz}{dt} + r_{w20} \frac{dz_2}{dt} - F_{w10} \operatorname{sign} \frac{dz_1}{dt} + F_{w20} \operatorname{sign} \frac{dz_2}{dt}; \\J_0 \frac{d^2\varphi_0}{dt^2} - C_{w10}l_1(z - l_1\varphi_0) + C_{w20}l_2(z + l_2\varphi_0) + C_{w10}\varphi_0[(x - l_1\varphi_0)^2 -\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - l_1 \varphi_0 (z - l_1 \varphi_0) + C_{ш_2} \varphi_0 [(x + l_2 \varphi_0)^2 + l_2 \varphi_0 (z + l_2 \varphi_0)] = P_{к_3} l_p + \\
 & + P_{к_1} l_z(t) - r_{ш_1} \delta l_1 \frac{dz_1}{dt} + r_{ш_2} \delta l_2 \frac{dz_2}{dt} - F_{ш_1} \delta l_1 \operatorname{sign} \frac{dz_1}{dt} + \\
 & + F_{ш_2} \delta l_2 \operatorname{sign} \frac{dz_2}{dt},
 \end{aligned}$$

где m — масса машины; $C_{п}$ — приведенная жесткость металлоконструкции системы; $C_{ш_1}$ — жесткость передних пневматиков; $C_{ш_2}$ — жесткость задних пневматиков; G — вес машины; $r_{ш_1}$ — коэффициент вязкого трения передних пневматиков; $r_{ш_2}$ — то же, задних пневматиков; J — момент инерции машины относительно центра тяжести; $F_{ш_1}$ — сила сухого трения в передних пневматиках; $F_{ш_2}$ — то же, в задних пневматиках; l_1, l_2, l_p, l_z — геометрические размеры системы в соответствии с принятой расчетной схемой (см. рис. III. 5).

Остальные обозначения приведены выше. Индекс «б» означает, что данный параметр определяет движение машины в горизонтальной плоскости.

Силы $P_{к1}, P_{к2}, P_{к3}$, входящие в уравнения, являются функцией параметров, определяющих процесс взаимодействия рабочего оборудования с грунтом в соответствии с системой уравнений, рассмотренных ранее.

Одномассовая система с тремя степенями свободы при движении по дороге, имеющей неровности, описывается аналогичной системой уравнений. Влияние неровностей учитывает зависимость, определяющую величину деформации пневматиков (точки А, В).

Для деформации в точке А имеем

$$x_1 = x_{ц.т} - l_1 \varphi - x_1(t),$$

соответственно для точки В

$$x_2 = x_{ц.т} + l_2 \varphi - x_2(t),$$

где $x_i(t)$ — произвольная функция времени.

В том случае, если неровности имеют синусоидальный профиль,

$$x_i(t) = x_{0i} \sin \frac{2\pi v}{Z_i} - vt,$$

где x_{0i} — максимальная высота неровностей, м; Z_i — длина периода (расстояние между точками максимума функции), м; v — скорость движения машины, м/с; t — время, с.

Выражение $2\pi v/Z_i$ является угловой частотой возмущающих воздействий пути на опорные элементы ходового оборудования.

Число колебаний в единицах времени

$$n_v = v/Z_i.$$

Период колебания как обратная величина n_v определяет выражение

$$T = Z_i/v.$$

Система уравнений в форме, удобной для последующего анализа методами теории подобия, включает наряду с полученными уравнениями, описывающими взаимодействие рабочего оборудования с грунтом, и условия однозначности. Определение сил сопротивления, динамических нагрузок, упругих перемещений и других величин аналитическим путем сводится в общем случае к решению рассмотренной системы дифференциальных уравнений, ряд из которых составлен из частных производных с нелинейными коэффициентами m_r , C_p , $C_{ш}$, c_{ω} , $r_{ш}$, η и др.

Систему рассмотренных уравнений используют в качестве базы для установления критериев подобия и получения решения в общей критериальной форме посредством прямого эксперимента с моделями. Для определения реактивных сил сопротивлений, возникающих при взаимодействии рабочих органов движителей, смесительных лопастей $R_{к1к2}$, $R_{в.г}$ и других со средой, необходимо принимать во внимание назначение модели.

Математические модели, формируемые для последующего их анализа методами теории подобия, получения критериев подобия и формирования физических моделей, допускают для представления величин $R_{к1к2к3}$; $R_{в.г}$; $R_{г.в}$ и других применение различных логико-математических моделей, полученных на основе анализа предельного состояния сыпучей среды со сцеплением соответствующих реологических моделей и т. п.

Математические модели, составляемые в целях получения моделирующих алгоритмов программ и машинных решений на предметно-математических моделях, допускают для представления $R_{к1к2к3}$; $R_{в.г}$; $R_{г.в}$ и других применение моделей с более широким спектром свойств. Возможно применение математических моделей-аналогий типа экспериментально обоснованных эмпирических формул, например, приведенных далее в табл. III.4.

§ III.4. ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН С ГРУНТОМ И МОДЕЛИ ИХ ОПИСАНИЯ

Взаимодействие ковшовых и отвальных рабочих органов землеройных машин с грунтом исследовано наиболее полно. Отвалы неповоротного и поворотного типов являются одним из наиболее распространенных видов землеройного рабочего оборудования. Характер протекания процесса воздействия на грунт отвала бульдозера по экспериментальным материалам на различных этапах копания показан на рис. III. 7 и III. 8. Отделяемая от массива стружка на первоначальном этапе (рис. III. 7, а) под действием отпора грунта продвигается вверх по отвалу. В верхней части отвала стружка разрушается на отдельные куски, которые падают вниз на вновь вырезаемые слои грунта и образуют призму волочения (рис. III. 7, б, в).

Величина давления стружки на отвал зависит от физико-механических свойств грунта, величины призмы и формы профиля отвала. Характер распределения давлений грунта на отвал показан далее на рис. III. 16. Исследования взаимодействия с грунтом отвалов в произ-

водственных условиях подтверждают рассмотренный характер движения грунта (рис. III. 7). Выделяют три зоны, характеризующие процесс взаимодействия отвала с грунтом. Зона формирования стружки *a* располагается у режущей кромки отвала. Зона *б* характеризуется движением пласта по отвалу. В сыпучих грунтах эта зона отсутствует.

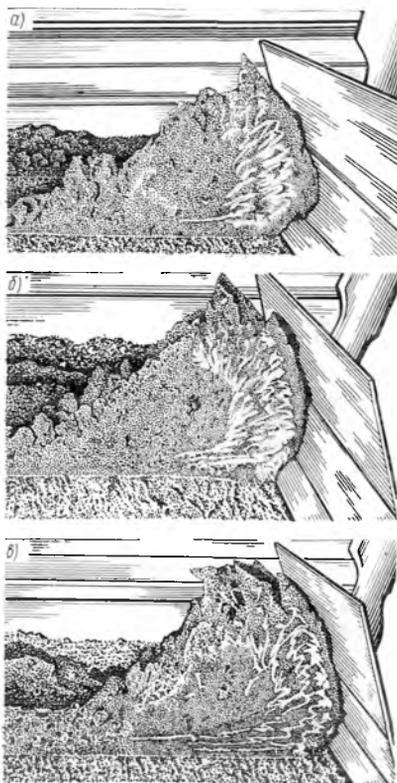


Рис. III.7. Фотограммы развития процесса взаимодействия отвала бульдозера с грунтом при угле опрокидывания $\beta = 15^\circ$:

a — начало процесса; *б* — промежуточный этап; *в* — завершение процесса; $\alpha^p = 30^\circ$
 $h = 15$ мм; $C_{уд. м} = 5 - 6$

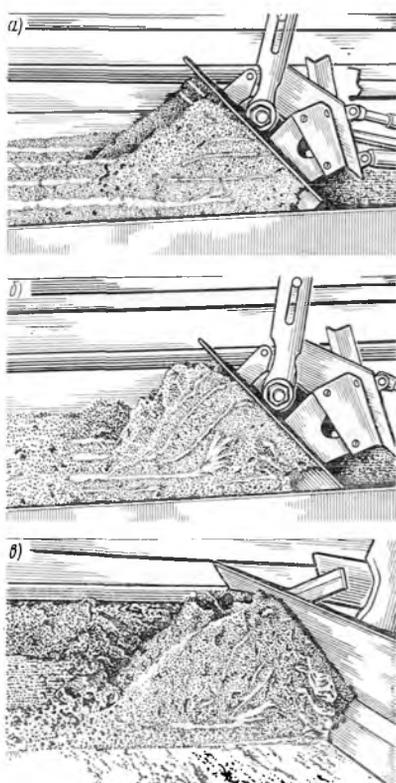


Рис. III.8. Фотограммы развития процесса взаимодействия отвала бульдозера с грунтом при угле опрокидывания $\beta = 45^\circ$:

a — начало; *б* — промежуточный этап; *в* — завершение; $\alpha = 55^\circ$ $h = 15$ мм, $C_{уд. м} = 6$

Третья зона *в* определяется как зона разрушения пласта и образования призмы волочения.

Взаимодействие ковшовых рабочих органов землеройных машин с грунтом в общих чертах имеет аналогичный характер. На рис. III. 9 приведены фотографии, иллюстрирующие процесс движения пласта в ковше при различном характере заполнения ковша. Интерес представляет конечный этап заполнения скрепера как наиболее энергоемкий.

На конечном этапе поступление грунта в ковш происходит в виде четко выраженного потока между двумя зонами неподвижного грунта (рис. III. 9, в). Поток грунта движется по направлению наименьшего сопротивления, которое меняется на каждом этапе заполнения и зависит как от параметров ковша и характера заполнения, так и от параметров грунта и стружки. Толщина движущегося потока увеличивается по мере роста высоты грунта в ковше. На входе в ковш толщина потока зависит от величины входной щели, которая образуется ножом и кромкой заслонки. При заслонке, поднятой на высоту, превышающую толщину вырезаемой стружки, с увеличением грунта в ковше и ростом сопротивления угол сдвига грунта уменьшается, что приводит к увеличению толщины пласта в ковше и способствует более интенсивному прохождению стружки в ковш. Это позволяет рассматривать подсистему «ковш — грунт» как автоматически настраиваемую на преодоление возрастающих по мере заполнения ковша грунтом сопротивлений.

Процесс взаимодействия ковша скрепера с грунтом на конечном этапе наполнения также характеризуется выделением трех зон. В первой зоне (рис. III. 9, а), которая располагается у ножа, происходит отделение грунта от массива и формирование пласта. Вторая зона (рис. III. 9, б) характеризуется протеканием интенсивных движений грунта внутри ковша. Она может быть представлена в виде движущегося пласта, который вытесняется из нижней части ковша в верхнюю двумя неподвижными участками грунта. Поток грунта меняет свое направление, двигаясь по пути наименьшего сопротивления. Третья зона (рис. III. 9, в) включает неподвижные участки грунта, которые располагаются по обе стороны движущегося пласта у задней стенки ковша и у заслонки. Неподвижные участки состоят из грунта, поступившего в ковш на начальных этапах заполнения, и грунта, оставшегося после разрушения верхних участков подвижного пласта.

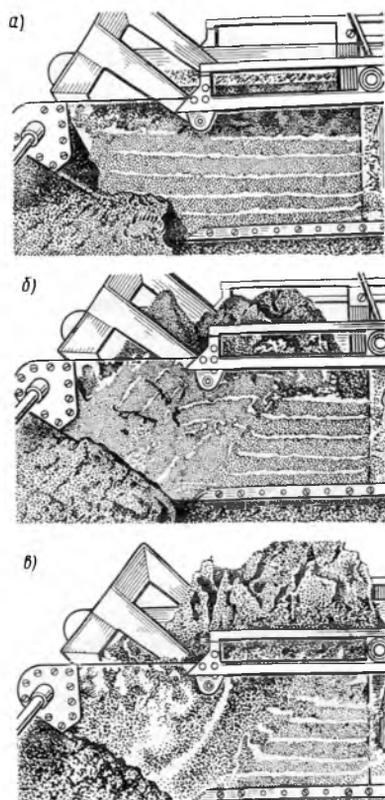


Рис. III.9. Фотограммы развития процесса взаимодействия ковша скрепера с грунтом:
а — начало; б — промежуточный этап; в — завершение

Движение грунта в ковше без заслонки, что соответствует, например, работе ковша, протекает аналогично. Одна из поверхностей сдвига, располагающаяся у задней стенки ковша, не меняет своего положения по сравнению с ковшом, имеющим заслонку. Средние участки в пласте движутся более интенсивно, чем у краев; у стенок ковша движение грунта замедленно.

Из сказанного следует, что расчетные схемы формирования математических моделей должны отражать характер явлений, протекающих при взаимодействии рабочего органа с грунтом. Это положение важно учитывать не только при анализе машин и рабочих органов нового типа. Для традиционных землеройных машин уточнение расчетной схемы позволяет более обоснованно подходить к определению и оптимизации их основных параметров. Ряд математических моделей-аналогий, приведенных далее в табл. III. 4, содержит набор экспериментальных коэффициентов, таких, как удельное сопротивление копанию, коэффициент продольного сжатия грунта, удельное сопротивление сжатию и др. Эмпирические зависимости дают достаточно точные результаты для условий, в которых они были получены. Экспериментально-теоретические методы расчета процесса копания, насыщения эмпирическими коэффициентами, не удовлетворяют требованиям перспективного проектирования рабочих органов землеройных машин, принцип работы которых основан на новых положениях.

Логико-математические модели-описания, разработанные на базе аналитической теории резания грунтов, имеют большое научное и практическое значение. Приближенные модели процесса разрушения грунтов при скоростях резания до 1,5—2 м/с могут быть созданы на основе теории предельного состояния сыпучей среды со сцеплением и пластической среды.

Система уравнений теории предельного состояния сплошной среды как приближенная математическая модель процесса взаимодействия рабочего органа со средой. Теория предельного равновесия грунтов изучает: 1) напряженные состояния, при которых небольшое изменение объемных или поверхностных сил еще не вызывает нарушение равновесия; 2) напряженные состояния, при которых некоторое, даже малое изменение объемных и поверхностных сил приводит к потере равновесия. В последнем случае наступает разрушение грунта. Для составления модели процесса резания грунтов основное значение имеют напряженные состояния второго типа. Взаимодействие рабочего органа землеройных машин с грунтом рассматривается с точки зрения тех положений теории предельного равновесия, которые связаны с определением пассивного давления грунта на подпорные стенки [26].

Основные положения теории предельного равновесия грунтов применительно к определению пассивного давления на подпорные стенки заключается в следующем. При нарушении равновесия сопротивление сдвигу для среды с малой связностью представляется в виде следующей зависимости:

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c_w,$$

где τ_n — касательное напряжение в рассматриваемой точке сыпучей

среды; σ_n — нормальное напряжение; ρ — угол внутреннего трения; c_w — коэффициент сцепления.

Среду, в которой отсутствует сцепление ($c_w = 0$), называют *идеально сыпучей*; среду с большим сцеплением, в которой отсутствует трение между частицами ($\rho = 0$, а $c_w \neq 0$), называют *идеально связной*. Общие результаты решения задачи о нахождении давления грунта на

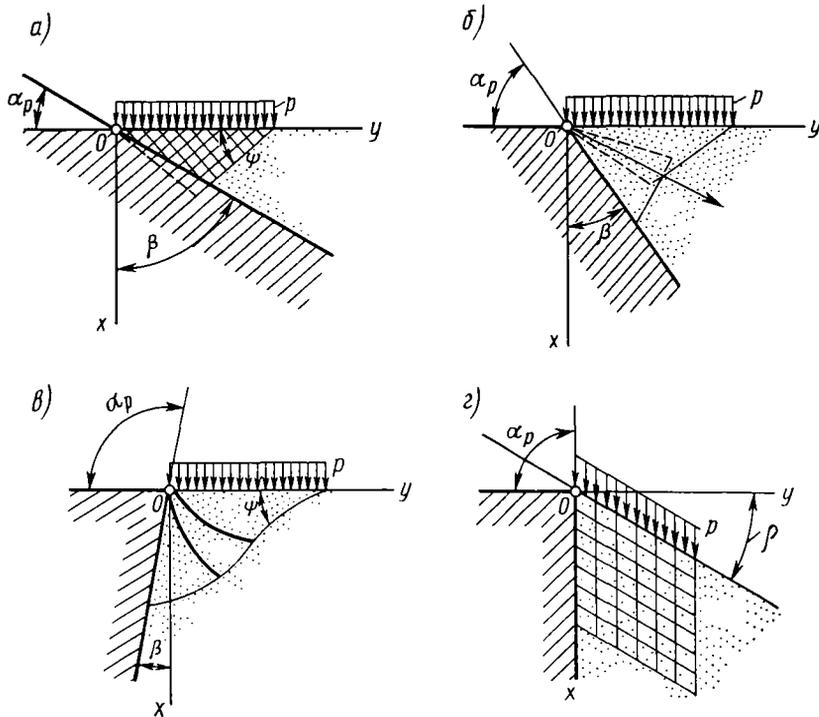


Рис. III.10. Основные схемы предельного состояния сыпучей среды со сцеплением по В.В. Соколовскому

подпорную стенку можно коротко сформулировать следующим образом [26]. Предельное напряженное состояние среды в зависимости от угла наклона стенки к горизонту и угла внешнего трения грунта при $\rho > \delta$ может быть трех видов.

1. Для пологих подпорных стенок (рис. III. 10, а), величина угла наклона которых к горизонту α_p определяется неравенством

$$\alpha_p \leq \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \delta}{\sin \rho} - \frac{\delta}{2},$$

возможны непрерывные предельные состояния.

2. Для промежуточных подпорных стенок (рис. III. 10, б) существуют предельные состояния, имеющие линии разрыва. Угол наклона промежуточных стенок к горизонту находится в следующих пределах:

$$\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \delta}{\sin \rho} > \alpha_p > \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \delta}{\sin \rho} - \frac{\delta}{2}.$$

3. Для крутых подпорных стенок (рис. III. 10, в) могут быть непрерывные предельные состояния всюду, кроме точки *O*. Угол наклона крутых подпорных стенок к горизонту определяется соотношением

$$\alpha_p \geq \frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \delta}{\sin \rho}.$$

При известных внешних условиях на контуре могут быть определены искомые давления грунта на подпорную стенку для каждого из рассматриваемых случаев. Среда, оказывающая давление на стенку, занимает полуплоскость и ограничена осью *y*, вдоль которой равномерно распределено нормальное давление *p*.

При малых углах наклона стенки к горизонту (пологие стенки) (рис. III. 10, а) формулы для определения нормальных и касательных напряжений на поверхности стенки, соприкасающейся с грунтом, имеют следующий вид:

$$\sigma_n = A_1 [\gamma_x + c_w \operatorname{ctg} \rho (1 - 1/A_1) + p];$$

$$\tau_n = A_2 [\gamma_x + c_w \operatorname{ctg} \rho (1 - 1/A_2) + p];$$

$$A_1 = \frac{1 - \sin \rho \cos 2\alpha_p}{1 - \sin \rho};$$

$$A_2 = \frac{\sin \rho \sin 2\alpha_p}{1 - \sin \rho},$$

где α_p — угол наклона стенки, контактирующей со средой в поверхности к горизонту; γ — объемная масса среды; c_w — коэффициент сцепления грунта; p — внешнее давление, равномерно распределенное по внешней поверхности грунта; x — текущая координата по вертикали.

Для крутых и промежуточных наклонных стенок формулы для определения нормальных напряжений в замкнутой форме получены для невесомой среды:

$$\sigma_n = A_3 [c_w \operatorname{ctg} \rho (1 - 1/A_3) + p];$$

$$\tau_n = A_4 [c_w \operatorname{ctg} \rho (1 - 1/A_4) + p];$$

$$A_3 = \frac{\cos \delta (\cos \delta + \sqrt{\sin^2 \rho - \sin^2 \delta})}{1 - \sin \rho} \exp \left(2\alpha_p - \pi + \dots \right. \\ \left. + \arcsin \frac{\sin \delta}{\sin \rho} \right) \operatorname{tg} \rho;$$

$$A_4 = \frac{\sin \delta (\cos \delta + \sqrt{\sin^2 \rho - \sin^2 \delta})}{1 - \sin \rho} \exp \left(2\alpha_p - \pi + \delta + \dots \right. \\ \left. + \arcsin \frac{\sin \delta}{\sin \rho} \right) \operatorname{tg} \rho.$$

В этом диапазоне углов наклона стенок при приближенном анализе вес среды может быть учтен введением условной величины p :

$$p \simeq p_4 + \gamma x.$$

Для глубин резания, имеющих место при работе землеройных машин, эта формула может быть использована для приближенных расчетов.

Для частного случая (рис. III. 10, з), когда ($\alpha_p = 90^\circ$), масса грунта ограничена по контуру прямой, наклоненной к горизонту под углом

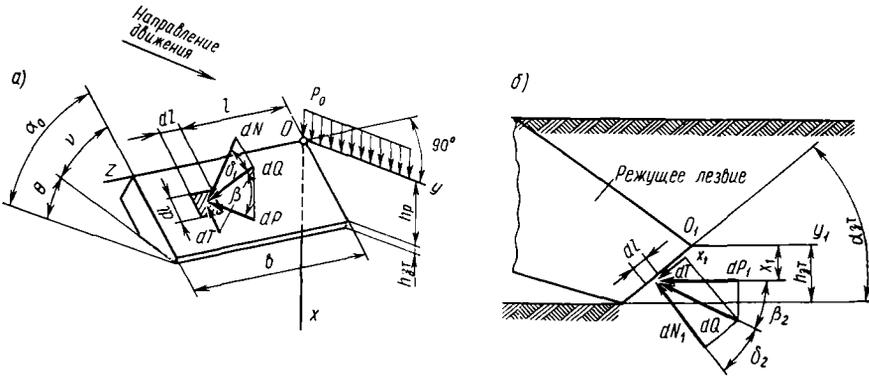


Рис. III.11. Схема резания грунта плоским ножом (а) и область затупления (б)

внутреннего трения ρ , $\delta \leq \rho$. Формулы для определения напряжений на поверхность стенки имеют вид:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \cos^2 \rho \gamma x + p; \\ &= \sin \rho \cos \rho \gamma x + (p + c_{\text{н}} \operatorname{ctg} \rho) \operatorname{tg} \rho. \end{aligned}$$

Сопrotивление резанию плоским ножом без затупления определяется на основании схемы, приведенной на рис. III. 11, а. Горизонтальная составляющая при $\alpha_{z,x} = 90^\circ$ определяется по формуле

$$P_{p_4} = \iint dP(x, z),$$

где $dP(x, z)$ — элементарная горизонтальная составляющая сопротивления резанию, действующая на выделенный элемент поверхности ножа.

Значение $dP(x, z)$ можно установить через соответствующие напряжения, считая, что закон изменения последних на поверхности контакта ножа с грунтом известен.

Нормальная составляющая и результирующая элементарной силы сопротивления определяются следующим образом:

$$dN = \sigma_n dl dz; \quad dQ = \frac{dN}{\cos \delta_1},$$

где $dl = \frac{dx}{\sin \alpha_p}$; δ_1 — угол трения грунта о поверхность ножа, град.

Горизонтальная составляющая силы сопротивления резанию

$$dP_{p1} = dQ \cos \beta_1,$$

где $\beta_1 = 90^\circ - (\alpha_p + \delta_1)$.

На основании изложенного имеем

$$dP_{p1} = \frac{\cos \beta_1}{\sin \alpha_p \cos \delta_1} \sigma_n dx dz,$$

где α_p — угол резания.

Так как $\cos \beta_1 = \sin(\alpha_p + \delta_1)$, получаем

$$dP_{p1} = (1 + \operatorname{ctg} \alpha_p \operatorname{tg} \delta_1) \sigma_n dx dz.$$

Величина P определяется характером функции $\sigma_n = f(x)$. Вид последней устанавливают экспериментальным путем или на основании теоретического анализа, например, на базе теории предельного состояния сплошной среды.

Экспериментальную математическую модель-описание устанавливают в виде степенного полинома путем реализации плана многофакторного эксперимента. Такая регрессионная модель имеет вид

$$\sigma_n = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 +$$

Наиболее часто имеют место случаи: 1) $a_2 = 0$; 2) $a_1 = 0$; 3) $a_0 = 0$; $a_2 = 0$; 4) $a_0 = 0$; $a_1 = 0$. В качестве простой теоретической модели используют решение плоской задачи предельного состояния сыпучей среды со сцеплением:

$$\sigma_n = a_0 + a_1 x.$$

При $a_1 = A_1 \gamma$; $a_0 = A_1 (1 - \frac{1}{A_1}) c_w \operatorname{ctg} \rho$ уравнение принимает вид зависимости, которая следует из теории предельного состояния сыпучей среды со сцеплением. Значения коэффициентов определяют из рассмотренных выше уравнений. При $A_i = A_1$ имеем

$$\sigma_n = A_1 [\gamma x + c_w \operatorname{ctg} \rho (1 - 1/A_1)].$$

Влияние краевого эффекта в первом приближении определяют величиной, эквивалентной усилиям, действующим на часть ножа шириной, равной удвоенной глубине резания, т. е. $b = B + 2h$.

Интегрируем:

$$P_{p1} = (1 + \operatorname{ctg} \alpha_p \operatorname{tg} \delta_1 A_1) \int_0^{B+2h} \left\{ \int_0^h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \times \right. \right. \\ \left. \left. \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) \right] dx \right\} dz$$

или

$$P_{p1} = A_z A_1 (B + 2h) h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_z} \right) \right],$$

где $A_z = (1 + \operatorname{ctg} \alpha_p \operatorname{tg} \delta_1)$.

При равномерно распределенной нагрузке p вдоль оси y , например, от призмы волочения, имеем:

$$P_{p1} = A_z A_1 (B + 2h) h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_z} \right) + p \right]$$

Если высота проекции лезвия на вертикаль меньше глубины резания ($h_n < h$), то при $h_n < h$, $p_{п.п} = p_0 + k_\rho \gamma (h - l_n \sin \alpha_p)$ величина P_{p1} в первом приближении может быть установлена по формуле

$$P_{p1} = A_z A_1 B l_n \sin \alpha_p \left[\frac{\gamma l_n \sin \alpha_p}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_z} \right) + p_{п.п} \right],$$

где l_n — ширина ножа в поперечном сечении; p_0 — заданная внешняя нагрузка;

$$k_\rho = \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho}$$

Для расчетной схемы, приведенной на рис. III. 11, а, при $c_w = 0$ формула имеет вид

$$P_{p1} = A_z A_1 \frac{\gamma b' h^2}{2} [1 + k_\rho (1 + H_1/h)],$$

где H_1 — величина выступающей над грунтом части ножа, м.

Полученные зависимости дают достаточно точные результаты при $(h/b) \leq 0,3$. С увеличением глубины резания при $b = \operatorname{const}$ возрастает влияние краевого эффекта.

Сопrotивление резанию плоским ножом с затуплением определяется аналогично с учетом явлений, протекающих на поверхности затупления (рис. III. 11, б). Горизонтальную составляющую определяют на основании общей зависимости:

$$P_{p1} = \iint dP_{p1n}(x, z) + \iiint dP_{зт}(x_1, z_1),$$

где $dP_{p1n}(x, z)$ — горизонтальная составляющая, действующая на выделенный элемент поверхности ножа (ее определяют как величину P_{p1n}); $dP_{зт}(x_1, z_1)$ — горизонтальная составляющая, действующая на выделенный элемент поверхности затупления ($dP_{зт}(x_1, z_1)$ определяют по аналогии с расчетом $dP(x, z)$ на основании схемы сил, действующих на элемент поверхности затупления).

Нормальная составляющая и результирующее сопротивление, действующие на элемент поверхности затупления, равны:

$$dN_1 = \sigma_{п1} dl_1 dz_1; \quad dQ_1 = \frac{dN_1}{\cos \delta_2},$$

где δ_2 — угол внешнего трения грунта о поверхность затупления ножа.

ляет грунт от массива, но и перемещает его при определенных условиях в поперечном направлении. Направление движения вырезаемой стружки не совпадает с плоскостью, перпендикулярной к режущей кромке, и зависит от угла наклона режущей плоскости к направлению движения, от сил трения между грунтом и поверхностью ножа, физико-механических свойств грунта, наличия и величины призмы и ряда факторов.

Зависимость между углом резания α_p и углом захвата α_{zx} устанавливается на основании приведенной расчетной схемы, где приняты следующие обозначения углов: β — угол между режущей кромкой ножа AB и направлением вектора скорости $\underline{v}_{стр}$ движения стружки; α_{pN} — угол резания, измеряемый в плоскости, нормальной к передней поверхности ножа; α_{zx} — угол захвата; α_p — действительный угол резания между направлением вектора скорости \underline{v}_p резания при движениях ножа и направлением вектора скорости $\underline{v}_{стр}$ движения стружки.

Из рассмотренных треугольников AO_1K , AO_1E , AOK и AOE следует:

$$\cos \beta_p = \sin \alpha_{zx} \sin \beta \cos \alpha_{pN} + \cos \beta \cos \alpha_{zx}.$$

При малой скорости резания, что имеет место при разработке грунта рабочими органами землеройно-транспортных машин, можно принять $\alpha_{zx} \simeq \beta$, следовательно,

$$\cos \alpha_p = \sin^2 \alpha_{zx} \cos \alpha_{pN} + \cos^2 \alpha_{zx}.$$

Сила dN , действующая на выделенный элемент ножа, определяется как рассмотрено выше:

$$dN = \sigma_n \frac{dx dz}{\sin \alpha_p}.$$

Горизонтальная составляющая силы (рис. III. 12)

$$dP = dN \cos(90^\circ - \alpha_{pN}) \sin \alpha_{zx} + dT \cos \alpha_p.$$

Определяя σ_n по рассмотренным формулам, полную величину $P_{к1}$ при косом резании можно в первом приближении установить по формуле

$$P_{к1} = A_{\alpha_{zx}} A_1 L h_n \left[\frac{\gamma h}{2} + c_m \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) + p \right],$$

где $p = (h_p - h_n) k_p \gamma$; $k_p = \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho}$ $A_{\alpha_{zx}} = \sin \alpha_x \times$
 $\times \left[1 + \operatorname{tg} \delta \frac{\sin \alpha_{zx}}{\sin \alpha_{pN}} (\cos \alpha_{pN} + \operatorname{ctg}^2 \alpha_{zx}) \right]$

При наличии призмы волочения

$$p \simeq \frac{k_p \gamma}{2} (H - h_p).$$

С уменьшением угла захвата призма волочения, накапливаясь перед отвалом, уменьшается. Изменение объема призма волочения может быть принято пропорциональным изменению высоты призма:

$$H = \frac{H_0}{1 + \sqrt{\cos \alpha_{3x}}},$$

где H_0 — высота призма волочения при $\alpha_{3x} = 90^\circ$, $H_0 \approx H$.

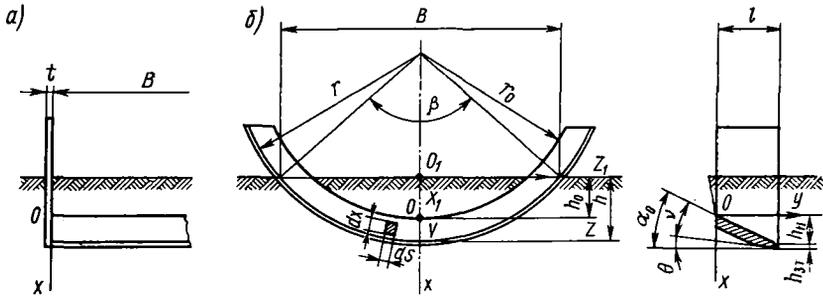


Рис. III.13. Схема резания грунта периметрами различной формы:
а — прямоугольным; б — с изогнутым лезвием

Характер изменения сопротивления резанию $P_{кл} = f(\alpha_{3x})$ от угла захвата α_{3x} при $b = \text{const}$ подтверждается экспериментально.

На базе теории предельного состояния могут быть приближенно решены задачи по определению сопротивлений резанию для сложных форм режущего элемента, например для прямоугольного периметра и ножей криволинейной формы.

Сопротивление резанию ножами прямоугольной формы определяется в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис. III.13,а. Прямоугольный периметр составлен из горизонтального плоского ножа и двух вертикальных профилей. Рассмотрим случай, когда вырезаемый грунт свободно проходит между вертикальными профилями. Общее сопротивление при движении такого периметра в грунте может быть определено на основании следующей зависимости:

$$P_{Д1} = \iint dP_{Д11}(x, z) + \iint dP_{Д2}(x_1, z_1) + \iint dP_2(x_2, z_2) + \iint dP_3(x_3, z_3),$$

где $dP_{Д11}(x, z)$ — горизонтальная составляющая элементарной силы сопротивления резанию на поверхности ножа; $dP_{Д2}(x_1, z_1)$ — горизонтальная составляющая сопротивления на поверхности затупления; $dP_2(x_2, z_2)$ — горизонтальная составляющая сопротивления на передней поверхности вертикальных ножей; $dP_3(x_3, z_3)$ — составляющая сил трения на боковых поверхностях вертикальных ножей.

Первые два слагаемых определяются в соответствии с зависимостями, методика получения которых рассмотрена выше. Горизонтальная

составляющая элементарной силы сопротивления на передней поверхности боковых ножей в первом приближении определяется следующим образом:

$$dP_2(x_2, z_2) = 2\sigma_{n2}dx_2dz_2.$$

Нормальное напряжение на передней поверхности вертикальных ножей при $\alpha_p = \pi/2$

$$\sigma_{n2} = A_3 [\gamma x_2 + c_w \operatorname{ctg} \rho (1 - 1/A_3) + p_B].$$

Следовательно,

$$dP_2 = 2A_3 [\gamma x_2 + c_w \operatorname{ctg} \rho (1 - 1/A_3) + p_B] dx_2 dz_2.$$

Составляющие сил трения на боковых поверхностях вертикальных ножей

$$dP_3 = 4 \operatorname{tg} \delta \sigma_{n3} dx_3 dy_3.$$

Нормальное напряжение на боковых поверхностях вертикальных ножей и периметра при $\alpha_p = \pi/2$ ориентировочно:

$$\sigma_{n3} = A_4 [\gamma x_3 + c_w \operatorname{ctg} \rho (1 - 1/A_4) + p_0].$$

Следовательно,

$$dP_3 = 4 \operatorname{tg} \delta A_4 [\gamma x_3 + c_w \operatorname{ctg} \rho (1 - 1/A_4) + p_0] dx_3 dy_3.$$

Коэффициенты A_3 и A_4 определяют аналитически. Для их определения используют следующие упрощенные зависимости:

$$A_3 = A_4 = \frac{\cos \delta (\cos \delta + \sqrt{\sin^2 \rho - \sin^2 \delta})}{1 - \sin \rho} \times \\ \times \exp \left(\delta + \operatorname{arc} \sin \frac{\sin \delta}{\sin \rho} \right) \operatorname{tg} \rho.$$

Принятые обозначения указаны ранее.

Для случая, когда $h_n < h$, где h_n — проекция лезвия ножа на вертикальную ось, имеем:

$$P_2 = 2A_3 t h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_3} \right) + p_B \right];$$

$$P_3 = 4 \operatorname{tg} \delta A_4 l_6 h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_4} \right) + p_0 \right],$$

где $p = p_0 + k\rho\gamma(h - h_n)$; p_0 — внешнее давление на грунт; в данной схеме $p_0 = 0$.

В рассматриваемых зависимостях первый член обусловлен процессами, протекающими на передней грани горизонтального ножа, второй — на грани затупления, третий — на передних гранях боковых вертикальных профилей и четвертый — трением на боковых поверхностях вертикальных профилей.

Сопротивление резанию ножами криволинейной формы. Схема взаимодействия изогнутого ножа с грунтом приведена на рис. III. 13, б.

Нож изогнут по дуге: режущая кромка его расположена в плоскости, перпендикулярной к направлению резания. Для этого случая сопротивление резанию

$$P_{D1} = \iint dP(r, S).$$

Горизонтальная составляющая сопротивления резанию, действующая на элемент поверхности лезвия,

$$dP = A_x \sigma_n dr dS,$$

где dr — высота элементарной площадки ножа; dS — длина элементарной площадки;

$$dS = \sqrt{1 + |f'(z_1)|^2} dz_1$$

На основании условной расчетной схемы при спрямлении лезвия сопротивление резанию можно определить в виде двойного интеграла по поверхности ножа, находящегося во взаимодействии с грунтом:

$$P_{D1} = A_x A_1 h_n \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) + \rho \right] \times \\ \times 2 \int_0^{b/2} \sqrt{1 + |f'(z_1)|^2} dz_1$$

Анализ показывает, что сопротивление резанию для изогнутого периметра при прочих равных условиях определяется величиной интеграла, удвоенное значение которого представляет длину режущего лезвия, погруженного в грунт. Эта задача относится к задачам вариационного типа. Рассмотрение последней зависимости приводит к получению искомой функции, как первое приближение, в виде дуги окружности с центром на оси симметрии лезвия.

Следовательно, в частном случае имеем:

$$P_{D1} = \frac{2\pi}{180} A_x A_1 h_n \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) + \rho \right] r \operatorname{arc} \sin \frac{B}{2r},$$

где h_n — высота лезвия в радиальной плоскости; r — радиус режущей кромки лезвия.

Аналогично можно определить сопротивление резанию для изогнутого лезвия с учетом затупления, которое имеет вид площадки толщиной t по всему периметру:

$$P_{D13T} = P_{D1} + \frac{\pi}{90} A_{x3T} A_{3T} t \left[\frac{\gamma t}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_{3T}} \right) + \rho_{3T} \right] \\ \times r_{3T} \operatorname{arc} \sin \frac{B}{2r_{3T}},$$

где t — проекция площадки затупления на вертикаль; r_{3T} — радиус внешней кромки затупления: $(\rho_{3T} = \rho_0 + k_p \gamma h_{cp})$; h_{cp} — средняя

глубина резания m ;

$$h_{\text{ср}} = \frac{2}{B} \int_0^{b/2} f(z_1) dz_1.$$

Удельное сопротивление резанию является показателем для определения оптимальных параметров рабочего органа и режимов резания. Этот параметр позволяет оценить энергетическую эффективность изучаемого процесса. Разработка аналитического метода определения удельных сопротивлений позволит с большим обоснованием назначать тяговое усилие, основные параметры и режимы работы проектируемых машин.

Удельное сопротивление резанию характеризует протекание основного и наиболее энергоемкого процесса копания — процесса отделения грунта от массива. Численная величина удельного сопротивления резанию определяется в настоящее время экспериментально. Выполненные исследования позволяют рассматривать удельное сопротивление резанию не только в качестве показателя степени трудности разработки грунта, но и как критерий совершенства конструкции и оптимальности основных параметров рабочего органа [12], [9]. В качестве примера определим удельное сопротивление резанию для прямоугольного периметра и для изогнутого лезвия. Оно равно отношению силы сопротивления к площади вырезаемой стружки, т. е. $k = P/(Bh)$.

Для прямоугольного периметра k определяется на основании уравнений, полученных выше. Эта величина является одним из критериев (см. табл. II. 1), которые позволяют оптимизировать размеры рабочего органа и режим резания. В настоящее время эта величина определяется экспериментально. Приводящиеся в литературе значения удельного сопротивления грунта резанию при расчетах рассматриваются как постоянные величины, не зависящие от конфигурации лезвия, его геометрических параметров, площади вырезаемой стружки и способа резания.

Для изогнутого лезвия без затупления на основании определения $k = P/F$ удельное сопротивление

$$k = \frac{\frac{\pi}{90} A_x A_1 h_n \left[\frac{\gamma h_n}{2} + c_w \operatorname{ctg} \varphi \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) + p \right] r \operatorname{arc} \sin \frac{B}{2r}}{\frac{r^2}{2} \left(\frac{\pi}{90} \operatorname{arc} \sin \frac{B}{2r} - \sin 2 \operatorname{arc} \sin \frac{B}{2r} \right)}$$

Следовательно, удельное сопротивление для изогнутого периметра при оптимальном значении α_p зависит от толщины h и ширины b вырезаемой стружки, высоты лезвия h_n , радиуса кривизны лезвия r , величины площадки затупления t и свойств грунта. Изогнутый периметр при оптимальном $\alpha_p = 15\text{—}25^\circ$ должен иметь минимально возможную высоту h_n лезвия. Процесс резания изогнутым лезвием наиболее эффективно будет протекать при определенном соотношении h/r . При малой ширине рабочего органа ($B \leq 0,5$ м) целесообразно работать с параметрами $1 \geq (h/r) \geq 0,5$. При $B > 0,6$ м параметры могут

быть назначены в пределах $1 \geq (h/r) \geq 0,2$. Эффективность изогнутых лезвий по сравнению с прямоугольными периметрами при неизменной площади вырезаемой стружки падает с уменьшением глубины резания, повышением радиуса кривизны и увеличением высоты лезвия $h_{л}$. При $B = 5$ м и более влияние ширины резания на удельное сопротивление незначительно. Такая методика определения удельного сопро-

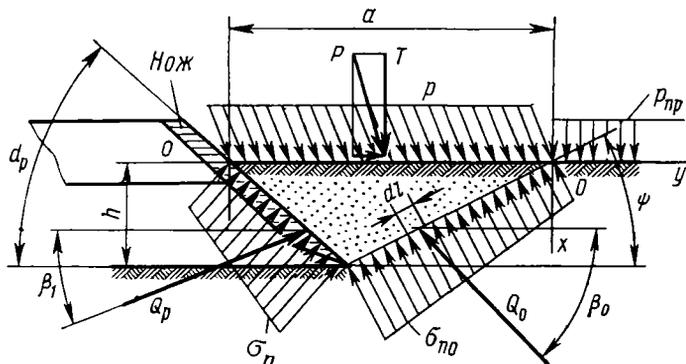


Рис. III.14. Механическая модель сил, действующих на элемент стружки, отделяемой от массива

тивления может быть применена для рассмотрения ряда конкретных схем взаимодействия с грунтом рабочих органов скрепера, бульдозера и др.

Движение пласта между двумя неподвижными зонами грунта при копании обусловлено проявлением сил отпора вырезаемой из массива стружки. Величина сил отпора зависит от физико-механических свойств грунта, от параметров вырезаемой стружки и наличия призмы волочения.

Условная схема сил, действующих на элемент стружки, приведена на рис. III. 14. Рассматриваемый объем грунта находится под действием сил: отпора грунта, давления со стороны поверхности ножа и сопротивления вышележащих слоев грунта, представленных здесь в виде распределенной нагрузки p . В случае, если сопротивление движению вырезаемого пласта будет превышать силы отпора грунта, движение стружки в заданном направлении прекратится. Новое направление потока будет соответствовать направлению наименьшего сопротивления. Это в ряде случаев может неблагоприятно сказаться на работе ковша скрепера, так как направление движения не будет соответствовать расположению отверстия под заслонкой. Вырезаемый грунт будет скапливаться перед ковшом в виде призмы волочения и уходить в сторону.

Силу сопротивления отпора выражают через напряжения, возникающие на условной плоскости скольжения вырезаемого объема грунта, и на основании анализа действующих сил устанавливают условия рационального протекания процесса.

Для связных грунтов ($c_w \neq 0$) это условие определяется неравенством

$$(1 + \operatorname{ctg} \psi \operatorname{tg} \rho) A_0 B h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_0} \right) \right] \geq \\ \geq A_a A_1 B h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) \right] + T \operatorname{tg} \rho.$$

Для несвязных грунтов ($c_w = 0$)

$$(1 + \operatorname{ctg} \psi \operatorname{tg} \rho) A_0 \gamma \frac{B h^2}{2} \geq A_a A_1 B h \left(\frac{\gamma h}{2} + p \right) + T \operatorname{tg} \rho.$$

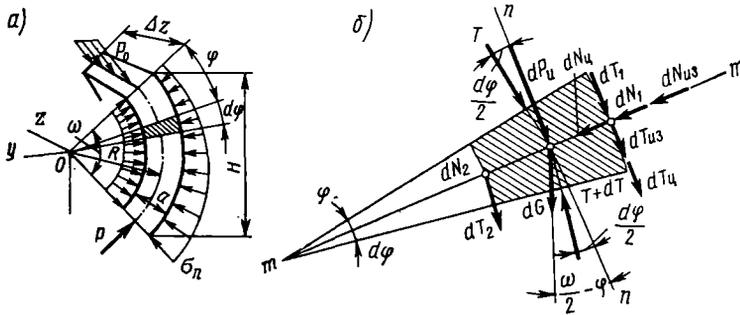


Рис. III.15. Схема движения стружки по криволинейной поверхности скольжения (а); схема сил, действующих на элемент стружки (б)

Сопrotивление призмы волочения. Для призмы, располагающейся перед криволинейной поверхностью с постоянным радиусом кривизны (рис. III. 15), горизонтальная составляющая сопротивления перемещению, действующая на элемент поверхности скольжения, определяется по формуле

$$dP_{\pi} = \sigma_n \cos(\omega/2 - \varphi) dl dz,$$

где σ_n — нормальное напряжение, возникающее на рассматриваемой поверхности; ω — центральный угол цилиндрической поверхности; φ — угол, определяющий положение элемента на поверхности; $dl = R d\varphi$, R — радиус кривизны поверхности.

Для данного случая $\sigma_n = \cos^2 \rho x + p$, тогда $dP = \gamma_p \cos^2 \rho (x + H/2) R \cos(\omega/2 - \varphi) d\varphi dz$, где $x = R \sin(\varphi - \omega/2)$.

Полная величина горизонтальной составляющей сопротивления призмы волочения после интегрирования в пределах от 0 до B и от 0 до ω определяется по формуле

$$P_{\text{пр}} = \gamma_p \cos^2 \rho \frac{B H^2}{2},$$

где B — ширина резания; H — высота, на которую поднимается грунт по поверхности скольжения.

Сопротивление призмы волочению и сопротивление движению грунта внутри рабочего органа достигают значительной величины на конечном этапе копания.

Математическая модель — описание процесса движения вырезанного пласта по отвалу или в плоскости ковша. Сопротивление резанию и энергоемкость процесса разработки грунта рабочим органом землеройно-транспортных машин в значительной степени определяются явлениями, протекающими при движении вырезанной из массива стружки грунта по поверхности рабочего органа или в полости ковша. Математическое выражение процесса движения пласта для этого случая составляется в соответствии с расчетной схемой, показанной на рис. III.15, а. Схема разработана на базе анализа существующих экспериментальных материалов. Предполагается, что грунт, составляющий пласт, является несжимаемым, так что в процессе движения претерпевает изменение только форма пласта. Размеры пласта на этом этапе анализа предполагаются известными. Элементарный объем движущегося пласта и силы, действующие на него, приведены на рис. III. 15, б.

Вырезанный элемент находится под действием следующих сил: силы тяжести dG , силы давления dN_{12} со стороны окружающего пласт грунта, силы инерции dP_{II} (касательная и нормальная составляющие), сил трения dT_{12} и сопротивления dN_{13} , являющихся следствием изгиба пласта. Запишем действующие силы в проекциях на радиальное и нормальное направление (рис. III. 15, б).

Сумма проекций сил на радиальное направление

$$dN_2 + (T + dT) \sin \frac{d\varphi}{2} + T \sin \frac{d\varphi}{2} - dN_{II} - dN_1 - \\ - dN_{13} + dG \sin \left(\varphi - \frac{\omega}{2} \right) = 0.$$

Учитывая, что $dN_1 \simeq dN_2$; $\sin \frac{d\varphi}{2} \simeq \frac{d\varphi}{2}$,

имеем:

$$dN_{\Sigma} = dN_{II} + dN_{13} = Td\varphi + dG \sin (\varphi - \omega/2).$$

Нормальное давление пласта на поверхность скольжения в первом приближении может быть установлено на основании следующего соотношения:

$$\sigma_{n1} = dN_{\Sigma} / (dF),$$

где $dF = d\varphi RB$.

Подставляя значение dN_{Σ} , при $dG \simeq 0$ получаем: $\sigma_{n1} = T / (RB)$.

Сумма проекций сил на направление нормали к радиусу имеет вид

$$dT_2 + dT_1 - dT_{II} + dT_{II} + T \cos \frac{d\varphi}{2} + dP_{II} + \\ + dG \cos \left(\varphi - \frac{\omega}{2} \right) - (T + dT) \cos \frac{d\varphi}{2} = 0.$$

Так как $\cos d\varphi/2 \simeq 1$ и полагая в первом приближении, что $dT_1 \simeq dT_2 \simeq dT_\tau$, получаем:

$$2dT_\tau + dT_{из} + dT_4 + T + dP_{II} + dG(\varphi - \omega/2) - T - dT = 0,$$

откуда

$$2dT_\tau + dT_{из} + dT_{ц} + dP_{II} + dG(\varphi - \omega/2) - dT = 0.$$

Сумма касательных сил трения от действия сил, изгибающих пласт, и центробежной силы инерции может быть представлена следующим образом:

$$dT_{из} + dT_{ц} = \operatorname{tg} \delta (dN_{из} + dN_{ц}).$$

На основании выражения $(dN_{ц})$ имеем:

$$dT_{из} + dT_{ц} = T \operatorname{tg} \delta d\varphi + dG \operatorname{tg} \delta \sin(\varphi - \omega/2).$$

Подставляя полученное выражение, получаем:

$$2dT_\tau + [Td\varphi + dG \sin(\varphi - \omega/2)] \operatorname{tg} \delta + dP_{II} + dG \cos\left(\varphi - \frac{\omega}{2}\right) - dT = 0.$$

В этом выражении масса элементарного объема dG представляется следующим образом:

$$dG = \gamma_{рз} a R d\varphi \Delta z,$$

где $\gamma_{рз}$ — объемный вес грунта в стружке; R — радиус кривизны поверхности скольжения; a — толщина стружки; Δz — ширина стружки.

В общем случае величина R является некоторой функцией от φ . Касательная составляющая силы инерции

$$dP_{II} = \frac{\gamma_{рз}}{g} a R \frac{dv}{dt} d\varphi \Delta z,$$

где v — скорость движения стружки по поверхности скольжения, м/с.

Величину dT_τ можно записать в форме функций от касательных напряжений

$$dT_\tau = 2\tau_n R d\varphi \Delta z,$$

где τ_n — касательное напряжение в плоскости сдвига.

После подстановки этих выражений в итоговое и деления членов на $d\varphi$ получаем:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{d\varphi} - T \operatorname{tg} \delta &= 2\tau_n R \Delta z - \gamma_{рз} a R \operatorname{tg} \delta \sin\left(\varphi - \frac{\omega}{2}\right) \Delta z + \\ &+ \frac{\gamma_{рз}}{g} a R \frac{dv}{dt} \Delta z + \gamma_{рз} a R \cos\left(\varphi - \frac{\omega}{2}\right) \Delta z. \end{aligned}$$

Принимая во внимание основные положения теории предельного состояния грунтов [26], уравнения состояния пласта в первом приближении запишутся следующим образом:

$$\tau_n \simeq \sin \rho \cos \rho \gamma_{рз} \left[\frac{H}{2} + R \sin\left(\varphi - \frac{\omega}{2}\right) \right] + c_{\omega\rho};$$

$$\sigma_n \simeq \cos^2 \rho \gamma_{p3} \left[\frac{H}{2} + R \sin \left(\varphi - \frac{\omega}{2} \right) \right] + c_{\omega p} \operatorname{ctg} \rho.$$

Следовательно, уравнение равновесия будет:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{d\varphi} - T \operatorname{tg} \delta = 2R \sin \rho \cos \rho \gamma_{p3} \left(\frac{H}{2} + R \sin \left(\varphi - \frac{\omega}{2} \right) \right) \Delta z + \\ + 2R c_{\omega p} \Delta z - \gamma_{p3} a R \operatorname{tg} \delta \sin \left(\varphi - \frac{\omega}{2} \right) \Delta z + \frac{\gamma_{p3}}{g} a R \frac{dv}{dt} \Delta z + \\ + \gamma_{p3} a R \cos \left(\varphi - \frac{\omega}{2} \right) \Delta z, \end{aligned}$$

где T — сила сопротивления движению стружки по отвалу или в плоскости ковша; ω — центральный угол поверхности скольжения.

Уравнение неразрывности движущегося пласта составляют по аналогии с рассмотрением процесса движения ножа в грунте:

$$\frac{\partial \gamma_{p3}}{\partial t} + \gamma_{p3} \frac{\partial v}{\partial l} + v \frac{\partial \gamma_{p3}}{\partial l} = 0,$$

где v — скорость движения стружки, м/с.

Граничные условия на поверхностях скольжения стружки по грунту и металлу имеют вид:

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \rho + c_{\omega p}; \quad \tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \delta + c_{\omega p_2}$$

При $\varphi = 0$ $T = P_0$; при $\varphi = \omega$ $T = T_{\max}$; при $t = 0$ $v = v_0$; при $t = t_1$ $v = v_1$.

Величина сопротивления движению пласта T , форма поверхности скольжения, значение радиуса кривизны отвала R и ряд других параметров могут быть установлены при упрощении приведенного уравнения.

Расчетная схема (рис. III. 15) соответствует движению пласта снизу вверх. В этом случае пласт находится под действием внешнего давления σ_{n1} , σ_{n2} , распределенного по поверхности скольжения силы P_0 , препятствующей движению пласта, и силы P , действие которой обуславливает движение пласта в указанном направлении и которую требуется определить. Остальные параметры, характеризующие протекание процесса: физико-механические свойства грунта, закон распределения давлений σ_n , сила P_0 и размеры пласта, известны. Принимаем, что сцепление между частицами грунта на поверхностях скольжения отсутствует, характер распределения давления призмы на отвал соответствует давлению на подпорную стенку по теории предельного состояния сыпучей среды: весом пласта пренебрегаем. Характер изменения давления грунта, составляющего призмы, на поверхность отвала автогрейдера и бульдозера при копании показан на рис. III. 16. Изменение давления на поверхность отвала устанавливаются на базе теоретической модели:

$$\sigma_n = A_i [\gamma_{p2} x + c_{\omega p} \operatorname{ctg} \rho (1 - 1/A_i) + p].$$

Величину p определяют так:

$$p = k_p \frac{\gamma_{p3} h}{2} \left(1 + \frac{H}{h} \right),$$

где H — высота призмы грунта перед отвалом, равная высоте последнего. Остальные обозначения приведены ранее.

Сделанные допущения позволяют записать исходное уравнение в следующем виде:

$$\frac{dT}{d\varphi} = T \operatorname{tg} \delta = \\ = \sigma_n RB (\operatorname{tg} \delta - \operatorname{tg} \rho).$$

Решение уравнения определяется видом функции изменения нормального давления σ_n в зависимости от x или текущего угла φ .

Если $\sigma_n = A_2 x$, то для практических расчетов можно рекомендовать формулу

$$P_{п.л} = (\operatorname{tg} \delta - \operatorname{tg} \rho) A_2 B H^2 k \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k} \left(1 + \operatorname{tg} \delta \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k} \right) + \\ P_0 \left(1 - 2 \operatorname{tg} \delta \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k} \right)$$

С учетом веса движущегося пласта формула имеет вид

$$P_{п.л} = (\operatorname{tg} \delta - \operatorname{tg} \rho) A_2 B H^2 k \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k} \left(1 + \operatorname{tg} \delta \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k} \right) + \\ P_0 \left(1 - 2 \operatorname{tg} \delta \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k} \right) - \gamma_{p3} B a H,$$

где γ_{p3} — объемная масса грунта, составляющего пласт.

Анализ графика, приведенного на рис. III. 17, позволяет сделать вывод, что при $k = \frac{R}{H} \geq 0,9 \div 1,1$ влияние кривизны поверхности скольжения на сопротивление движению пласта по отвалу не велико. В этом случае формула для сопротивления движения пласта по поверхности скольжения упрощается.

Для $\sigma_n = A_2 x$ при $R = H$; $A_2 = \gamma_{p3} \cos^2 \rho$

$$P_{п.л} = (\operatorname{tg} \delta - \operatorname{tg} \rho) A_2 \frac{B H^2}{2} + P_0.$$

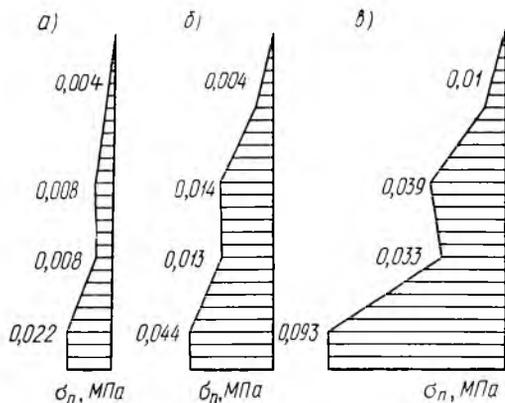


Рис. III.16. Распределение давления грунта на поверхности отвала бульдозера по результатам экспериментов в суглинке:

$\alpha_p = 45^\circ$ $a - h = 3$ см; $b - h = 6$ см; $e - h = 12$ см; $C_{y.л} = 5$

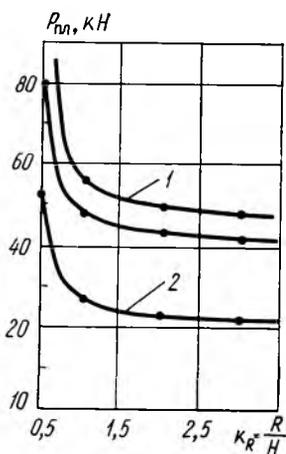


Рис. III.17. Зависимость сопротивления $P_{пл}$ движению стружки по отвалу от радиуса $R = (0,9 \div 1,2) H$ кривизны поверхности скольжения:

1 — $\tau_n = \text{const}$; 2 — $\tau_n = Ax$

С учетом веса пласта при $P_0 = 0$

$$P_{пл} = (\text{tg } \delta + \text{tg } \rho) A_2 \frac{BH^2}{2} + \gamma_{рз} BaH.$$

Полученные зависимости позволяют выбрать форму поверхности скольжения в целях получения минимального сопротивления. Для поверхности с кривизной внизу сопротивление движению пласта может быть определено на основании следующей зависимости (рис. III. 18):

$$P_{пл} = 2(\text{tg } \delta + \text{tg } \rho) BH_i k_i \arcsin \frac{1}{2k_i} \left(1 + \text{tg } \delta \arcsin \frac{1}{2k_i} \right) \left(A_3 + A_4 \frac{H_i}{2} \right) + P_0 \left(1 + 2 \text{tg } \delta \arcsin \frac{1}{2k_i} \right),$$

где $A_3 = A_2(H - H_i \cos \gamma)$; $A_4 = A_2$.

Величина P_0 определяется следующим образом:

$$P_0 = (\text{tg } \delta + \text{tg } \rho) \frac{A_2 B}{\cos \beta} \int_0^{H - H_i \cos \gamma} x dx$$

или

$$P_0 = \frac{(\text{tg } \delta + \text{tg } \rho)}{2 \cos \beta} A_2 B (H - H_i \cos \gamma)^2,$$

где $k_i = R_i/H_i$; H_i — хорда, оттягивающая дугу изогнутого участка поверхности скольжения; R_i — радиус кривизны изогнутого участка; H — общая высота поверхности скольжения.

Параметры H_i , R_i , k_i , γ , которые могут быть выражены через угол β и центральный угол ω_0 , определяют предельную дугу поверхности скольжения l . Общая длина линии скольжения изменяется при этом:

$$l = H \left[\frac{1}{\cos \beta} + \frac{\sin \beta}{\sin \left(\frac{\omega_0}{4} + \frac{\beta}{2} \right)} \left[\frac{\frac{\omega_0}{2} + \beta}{2 \sin \left(\frac{\omega_0}{4} + \frac{\beta}{2} \right)} - \frac{\cos \left(\frac{\omega_0}{4} - \frac{\beta}{2} \right)}{\cos \beta} \right] \right]$$

Для плоской поверхности $\beta = 0$; $l = H$.

Для цилиндрической поверхности с хордой H и центральным углом ω_0 при $\beta = \omega_0/2$

$$l = H \frac{\omega_0}{2 \sin \frac{\omega_0}{2}}$$

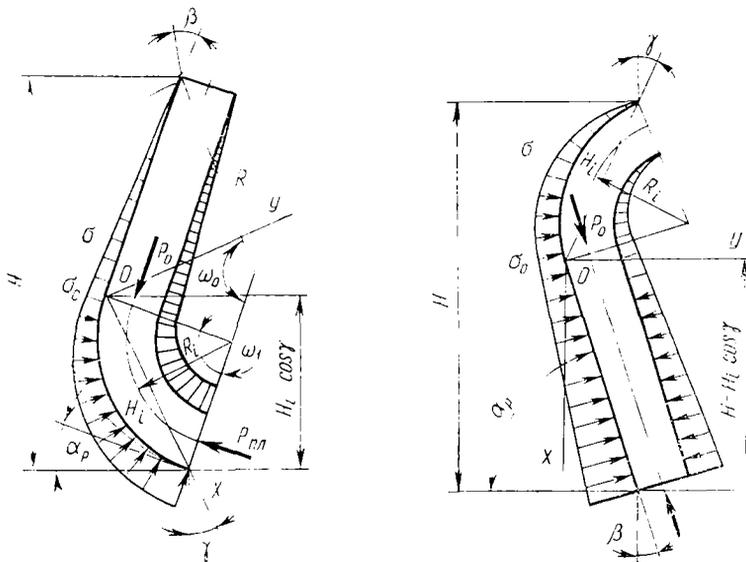


Рис. 11.18. Расчетные схемы для определения влияния формы поверхности отвала на величину сопротивления копанью

Так как $R = \frac{H}{2 \sin \frac{\alpha_0}{2}}$, то $l = R \sin \alpha_0$.

При анализе схемы с кривизной сверху

$$P_{н.} = \frac{(\operatorname{tg} \delta - \operatorname{tg} \varphi)}{\cos} B \int_{H_i \cos}^H (A_3 - A_4 x) dx - P_0,$$

то $(\operatorname{tg} \delta - \operatorname{tg} \varphi) A_2 k_1 B H_i^2 \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k_i} \left(1 - \operatorname{tg} \delta \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k_i} \right)$

Для цилиндрического отвала в соответствии с приведенной расчетной схемой сопротивление движению пласта определяется по аналогичной формуле. При $P_0 = 0$

$$P_{н.} = (\operatorname{tg} \delta - \operatorname{tg} \varphi) A_2 B H^2 k \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k} \left(1 - \operatorname{tg} \delta \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k} \right).$$

Рассмотренные положения в первом приближении позволяют осуществить анализ влияния формы поверхности отвала на сопротивление движению пласта по отвалу ($P_{н.1}$) и на горизонтальную составляющую сопротивления копанью $P_{н.1}$. Графики зависимости силы сопротивления движению пласта от формы линий скольжения без учета влияния сопротивления резанию приведены на рис. 11.19, а.

Из рассмотрения материалов следует, что с увеличением длины линии скольжения и коэффициентов трения сопротивление движению

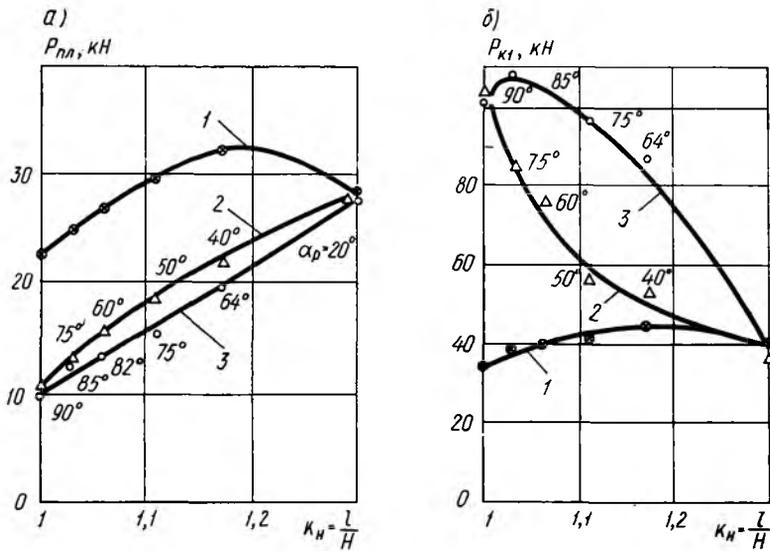


Рис. III.19. Зависимость сопротивлений движению стружки по отвалу (а) и сопротивления копанью (б) от формы поверхности скольжения и угла резания:

- кривизна вниз; $\alpha_p = 20^\circ$; 2 — цилиндрическая поверхность; α_p — переменный;
- кривизна вниз; α_p — переменный; 1 — длина дуги; H — хорда, стягивающая дугу

возрастает. Для отвалов с кривизной вниз максимальное сопротивление скольжения грунта по отвалу наблюдается при определенной длине линии скольжения, величина которой обусловлена радиусом кривизны, углом α_p и центральным углом ω_i искривленного участка. Наибольшее сопротивление движению для $\alpha_p = 20^\circ$ при $R_i/H_i = 0,59$; если $\alpha_p = 60^\circ$, максимальное сопротивление при $R_i/H_i = 1,28$.

Процесс резания оказывает существенное влияние на характер взаимодействия отвала с грунтом и форму поверхности отвала. В этом случае в формуле для определения $P_{кп}$ величину $P_{пл}$ устанавливают в соответствии с анализируемой формой поверхности скольжения. Характер изменения $P_{кп}$ для бульдозера в зависимости от формы отвала иллюстрируется рис. III. 19, б. Анализ графиков приводит к выводу, что минимальное сопротивление копанью в связных грунтах ($c_w \neq 0$) имеют отвалы с кривизной вниз, а также цилиндрические отвалы при $l/H \geq 1,15$ с углом резания $\alpha_p = 45^\circ$, где l — длина дуги; H — ее хорда. Это объясняется снижением сопротивления резанию с уменьшением угла резания.

Рассмотренные положения указывают на общность явлений, протекающих при взаимодействии рабочих органов ножевых, отвальных и ковшовых рабочих органов с грунтом. Как при работе бульдозера, так и при работе скрепера в общем процессе взаимодействия грунта с рабочим органом могут быть условно выделены три фазы: 1) от-

деления стружки от массива и формирования пласта; 2) движения пласта; 3) образования призмы перед рабочим органом или внутри ковша. Это открывает возможность рассчитывать основные параметры процесса копания на основе общей расчетной схемы единой методики.

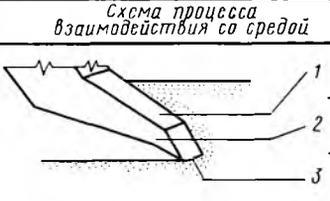
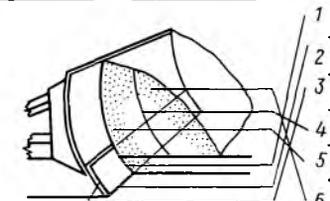
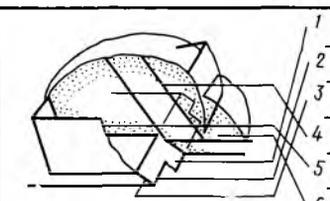
Совместный анализ экспериментальных исследований механизма взаимодействия рабочих органов землеройных машин и классификационной матрицы, приведенной на рис. II. 1, и рассмотрение процесса как подсистемы «рабочий орган — грунт» позволяют систематизировать ее общие элементы (табл. III. 2).

Подсистемы «ножевидный или зубообразный рабочие органы — грунт» могут быть составлены из трех основных элементов: 1) лобовая поверхность; 2) лезвие; 3) правая и левая боковые грани.

Подсистема «рабочий орган отвального типа — грунт» имеет в общем случае набор следующих основных элементов: 1) лобовую поверхность ножа; 2) лезвие ножа; 3) правую и левую боковые грани ножа; 4) поверхность сдвига по грунту; 5) поверхность сдвига по металлу отвала; 6) призму грунта перед отвалом.

Таблица III.2

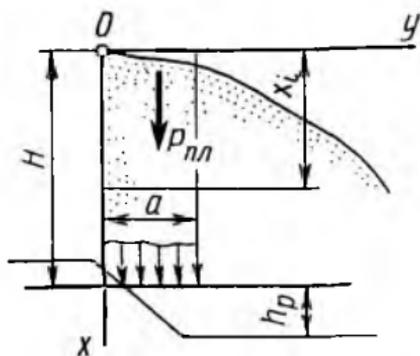
Классификация сопротивлений копанью по виду элемента подсистемы «грунт — рабочий орган»

Тип рабочего органа	Схема процесса взаимодействия со средой	Элементы подсистемы «грунт-рабочий орган»	Составляющие сопротивления копанью
Зуб		1 Лобовая поверхность ножа	1 Сопротивление лобовой поверхности ножа 2 Сопротивление внедрению лезвия
		2 Лезвие ножа	
		3 Боковая грань ножа	
Отвальный		1 Лобовая поверхность ножа	3 Сопротивление от трения боковой грани ножа о грунт 4 Сопротивление от трения пласта о призму
		2 Лезвие ножа	
		3 Боковая грань ножа	
		4 Поверхность сдвига по грунту	
		5 Сдвиг по металлу отвала	
		6 Призма грунта	
Ковшовый		1 Лобовая поверхность ножа	5 Сопротивление от трения пласта по металлу 6 Сопротивления призмы валочению
		2 Лезвие ножа	
		3 Боковая грань ножа	
		4 Поверхность сдвига по грунту	
		5 Сдвиг по боковой стенке ковша	
		6 Призма грунта	

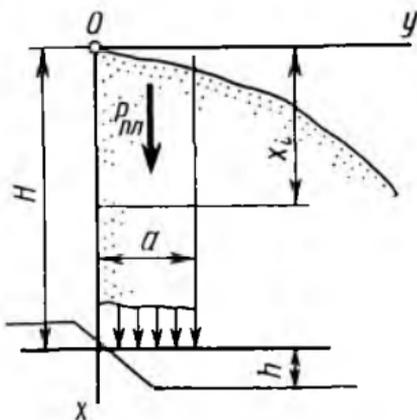
Система приближенных математических моделей для определения составляющих сопротивления копанью

Составляющая сопротивления	Расчетная схема	Расчетная формула	Об
Сопротивление лобовой поверхности ножа при отделении грунта от массива		$P_{к1} = (1 + \operatorname{ctg} \alpha_p \operatorname{tg} \delta) A_1 B h \left(\frac{\gamma h}{2} + \right.$ $\left. + c_m \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) + p_{пл} \right);$ $p_{пл} = P_{пл} / B a$	$\rho > \delta$ <p>при $\alpha_p \leq \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \delta}{\sin \rho} - \frac{\delta}{2}$;</p> $A_1 = \frac{1 - \sin \rho \cos 2\alpha_p}{1 - \sin \rho}$
Сопротивление внедрению лезвия при паличии затупления		$P_{к} = (1 + \operatorname{ctg} \alpha_p \operatorname{tg} \delta) A_2 B h_3 \left(\frac{\gamma h_3}{2} + \right.$ $\left. + c_m \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_2} \right) + p_{пл} \right)$	<p>При α_p больше указанной величины</p> $A_1 = \frac{\cos \delta}{1 - \sin \rho} (\cos \delta +$ $+ \sqrt{\sin^2 \rho - \sin^2 \delta}) \times$ $\times \exp (2\alpha_p - \pi + \delta +$ $+ \arcsin \frac{\sin \delta}{\sin \rho}) \operatorname{tg} \rho$
Сопротивление от сил трения боковой грани ножа зуба о грунт		$P_{б} = \operatorname{tg} \delta A_4 \left(\frac{\gamma h}{2} + c_m \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \right.$ $\left. - \frac{1}{A_4} \right) + p_{пл} \right)$	$a = \frac{\operatorname{tg} \alpha_p + \operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \alpha_p \operatorname{tg} \psi};$ $\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}$

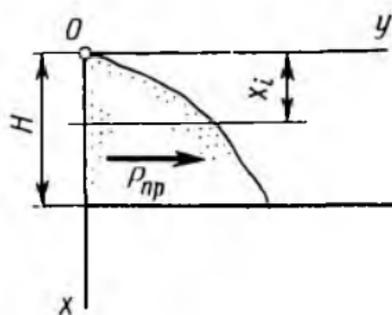
Сопротивление от сил трения пласта о грунт



Сопротивление от сил трения пласта о металлическую поверхность



Сопротивление призмы волочения



Плоская поверхность

$$P_{пл} = \operatorname{tg} \rho \cos^2 \rho \gamma_p BH^2 + \gamma_p a BH.$$

Цилиндрическая поверхность

$$P_{пл} = 2 \operatorname{tg} \rho \cos^2 \rho \gamma_p BH^2 k \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k} \times \\ \times \left(1 + \operatorname{tg} \delta \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k} \right) + \gamma_p a BH$$

$$A_2 = \frac{\cos \delta}{1 - \sin \rho} (\cos \delta + \\ + \sqrt{\sin^2 \rho - \sin^2 \delta}) \times \\ \times \exp \left(\pi - 2\alpha_3 + \delta + \right. \\ \left. + \operatorname{arc} \sin \frac{\sin \delta}{\sin \rho} \right) \operatorname{tg} \rho$$

Плоская поверхность

$$P_{пл} = \operatorname{tg} \delta \cos^2 \rho \gamma_p BH^2 + \gamma_p a BH$$

Цилиндрическая поверхность

$$P_{пл} = 2 \operatorname{tg} \delta \cos^2 \rho \gamma_p BH^2 \times \\ \times k \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k} \left(1 + \operatorname{tg} \delta \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k} \right) + \\ + \gamma_p a BH$$

$$A_4 = \frac{\cos \delta}{1 - \sin \rho} (\cos \delta + \\ + \sqrt{\sin^2 \rho - \sin^2 \delta}) \times \\ \times \exp \left(\delta + \operatorname{arc} \sin \frac{\sin \delta}{\sin \rho} \right) \operatorname{tg} \rho$$

$$P_{цпр} \approx \gamma_p \cos^2 \rho \frac{BH^2}{2}$$

Примечание.

$k = R/H$,

R — радиус кривизны поверхности скольжения

Подсистема «ковшовый рабочий орган — грунт» может быть составлена из следующих основных элементов: 1) лобовой поверхности ножа; 2) лезвия ножа; 3) боковых граней ножа; 4) поверхностей сдвига по грунту; 5) сдвига по боковой поверхности ковша (металлу); 6) призмы грунта.

Каждый из рассмотренных рабочих органов можно составить из типового набора элементов: лобовой поверхности ножа, лезвия, боковых граней инструмента, поверхности трения по металлу и грунту и призмы грунта перед рабочим органом.

Процесс взаимодействия элемента со средой может быть описан системой логико-математических моделей различного вида. Рассматриваемые традиционные элементы можно описать одним из вариантов

моделей, основу которых составляют уравнения предельного состояния сыпучей среды со сцеплением (табл. III.3), где каждому элементу подсистемы «рабочий орган — грунт» соответствует определенная математическая модель в упрощенной интерпретации.

Сопоставление зависимостей, полученных на базе плоской задачи, при $h \leq 0,3 b$, теории предельного состояния сыпучей среды со сцеплением с материалами,

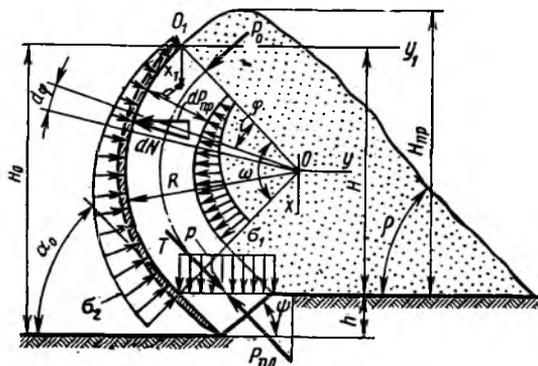


Рис. III.20. Расчетная схема к формированию модели для определения сопротивления копанью отвалом бульдозера

экспериментов, показывает хорошую, в условиях опытов, сходимость расчетных и экспериментальных данных.

Полученные модели можно рекомендовать для относительной оценки эффективности новых методов воздействия на среду по сравнению с рабочим инструментом традиционного принципа действия, принятым за эталон.

Сопротивление копанью отвалом бульдозера определяют для наиболее тяжелого конечного этапа, когда процесс разработки грунта сопровождается перемещением призмы волочения максимального объема. Результирующее сопротивление копанью в общем случае включает следующие виды сопротивлений: 1) резанию с учетом сопротивлений движению пласта по отвалу и сопротивления боковых ножей; 2) призмы волочению; 3) горизонтальную составляющую сопротивления подъему пласта по отвалу; 4) горизонтальную составляющую сил, изгибающих пласт.

Для бульдозера с неповоротным отвалом условная схема действия сил, соответствующая конечному этапу копания, приведена на рис. III.20. Горизонтальная составляющая сопротивления копанью для

плоского ножа с цилиндрическим отвалом постоянной кривизны на основании принятой расчетной схемы в общем виде определяется формулой

$$P_{к1} = P_p + P_{пр} + P_{гор},$$

где P_p — сопротивление резанию с учетом сопротивления движению пласта по отвалу и сопротивления боковых ножей; $P_{пр}$ — сопротивление призмы волочению с учетом влияния горизонтальной составляющей сил, изгибающих пласт (последней пренебрегают); $P_{гор}$ — горизонтальная составляющая сопротивления подъему пласта.

Величины P_p , $P_{пр}$, $P_{гор}$ определяют на основании рассмотренных выше формул (табл. III. 3). При $k = \frac{R}{h} \geq 0,9 \div 1,1$ рядом величин можно пренебречь. Тогда

$$P_{к1} = A_\alpha A_1 B h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) + \frac{(\operatorname{tg} \delta + \operatorname{tg} \rho) \sin \alpha_p}{k_p} \gamma_p \cos^2 \rho \frac{H^2}{2} k \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k} \left(1 + \operatorname{tg} \delta \operatorname{arc} \sin \frac{1}{2k} \right) + \gamma_p H \right] + \gamma_p \cos^2 \rho \frac{B H^2}{2} + 2 \operatorname{tg} \delta A_4 I_6 h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) \right],$$

где A_1 , A_4 — коэффициенты, определяемые по формулам, рассмотренным ранее; B — ширина резания для неповоротного бульдозера, равная длине отвала; h — глубина резания; c_w — сцепление грунта с ненарушенной структурой; ρ — угол внутреннего трения разрабатываемого грунта; δ — угол внешнего трения; α_p — угол резания, град; H — высота призмы перед отвалом, равная высоте отвальной поверхности. Остальные обозначения указаны выше.

Направление движения пласта на конечном этапе не всегда будет проходить по поверхности отвала. Оно определится величиной сопротивлений, возникающих на пути возможного продвижения, а также прочностными свойствами вырезаемой стружки.

Представляя поверхность скольжения в виде криволинейной поверхности с достаточно большим радиусом кривизны, упрощаем формулу для определения $P_{к1}$:

$$P_{к1} = A_\alpha A_1 B h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) + \operatorname{tg} \rho \frac{\gamma_p \cos^2 \rho H^2}{k_p h} + \gamma_p H \right] + \gamma_p \cos^2 \rho \frac{B H^2}{2}$$

Анализ зависимости указывает, что удельное сопротивление уменьшается с увеличением ширины резания. Для получения минимального значения удельного сопротивления копанию предельная ширина ре-

зания, очевидно, не должна быть меньше 3—5 м. Общая высота отвала и глубина резания для обеспечения заполнения отвала грунтом на всю высоту должны иметь вполне определенную величину.

Радиус кривизны цилиндрических отвалов неповоротного типа можно определять из следующего отношения:

$$R \geq (0,9 \div 1,1)H,$$

где H — высота отвальной части рабочего органа, м.

При этом значении R влияние сопротивлений, обусловленных кривизной отвала, незначительно.

Снижения сопротивления копанью достигают: 1) применением отвалов рациональной формы; 2) надлежащим выбором соотношения между высотой отвала и радиусом кривизны; 3) уменьшением коэффициента трения грунта по отвалу. Целесообразно активизировать процесс газовой смазки, покрывать поверхность отвала специальными износостойкими материалами с минимальным коэффициентом трения о грунт, которые так же, как и отвалы с газовой смазкой, позволяют избежать явлений налипания грунта. Механические активаторы значительно усложняют конструкцию, не решая проблемы полностью.

Сопротивление копанью грунта скрепером. Схема взаимодействия ковша с грунтом на конечном этапе копания приведена на рис. III. 21, г. Этап характеризуется сопротивлениями: 1) резанию и наполнению ковша с учетом сопротивлений боковых подрезающих ножей; 2) призма волочению; 3) передвижению скрепера с грунтом. Сумма первых двух сопротивлений может быть определена как сопротивление копанью.

Сопротивление копанью для скрепера с плоским ножом определяют на основании ранее полученных зависимостей. Влиянием кривизны поверхностей скольжения пренебрегают. Горизонтальную составляющую сопротивления копанью при $h_n > h$ в общем виде без учета затупления определяют по формуле

$$P_{к1} = A_\alpha A_1 B h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_\omega \operatorname{ctg} \varphi \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) + p_{пл} \right] + \\ + 2A_3 t h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_\omega \operatorname{ctg} \varphi \left(1 - \frac{1}{A_3} \right) \right] + \gamma_D \cos^2 \varphi \frac{BH_{np}^2}{2},$$

где A_1 и A_3 — коэффициенты, которые определяют по формулам, приведенным выше; B — ширина резания, равная ширине ковша; h — глубина резания; c_ω — сцепление грунта с неразрушенной структурой; $p_{пл}$ — удельное сопротивление движению грунта в ковше; t — толщина боковых подрезающих ножей; H_{np} — высота призмы волочения.

В приведенной зависимости первый член обусловлен явлениями резания и наполнения, второй — сопротивлением боковых подрезающих ножей, третий учитывает наличие призмы волочения.

Важной составляющей частью является величина $p_{п.л}$, характеризующая сопротивление движению пласта внутри рабочего органа

$$p_{п.л} = P_{п.л}/Ba.$$

Раскрывая соотношение, получаем:

$$P_{п.л} = k_{тp} \gamma_p \cos^2 \rho \operatorname{tg} \rho \frac{H^2}{k_\psi h} + \gamma_D H,$$

где $k_{тp}$ — коэффициент, учитывающий влияние сопротивлений на боковых поверхностях пласта (например, трение о стенки ковша);

$$k_\psi = \frac{\operatorname{tg} \alpha_p + \operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \alpha_p \operatorname{tg} \psi}; \quad \psi = \frac{\alpha}{4} - \frac{\rho}{2}; \quad k_{тp} = 1 + k_r \frac{h}{B};$$

H — высота ковша.

Использование математических моделей (формул) для расчета силовых и энергетических характеристик рабочих процессов землеройно-транспортных машин (бульдозеров, скреперов и др.) встречает определенные трудности, что обусловлено наличием большого разнообразия формул. Для четких рекомендаций, касающихся их области применения, целесообразно каждую из предложенных формул рассматривать и анализировать как некоторую возможную, но не единственную математическую модель. Область действия моделей определяется задачами исследования, свойствами разрушаемой среды, методом воздействия на нее и конструкцией рабочего органа.

Для расчета горизонтальной составляющей сопротивления резания и копания грунтов рабочими органами землеройных машин рекомендуются формулы, предложенные Н. Г. Домбровским, А. Н. Зелениным, Ю. А. Ветровым, К. А. Артемьевым, Д. И. Федоровым. Ряд таких моделей, приведенных в табл. III. 4, иллюстрирует многообразие методов формирования и видов моделей, различие в отражении механизма моделируемого процесса, полноту учета в моделях прочностных параметров среды и степени их зависимости от размеров и конструкции рабочего органа. Последнее положение важно подчеркнуть, так как достаточная инвариантность по отношению к размерам инструмента, параметров, определяющих прочность грунта, делает модель более универсальной и расширяет спектр ее применения.

Модели различаются структурой, видом и характером использования параметров, определяющих прочностные свойства грунтов: сдвиговые характеристики, число ударов динамического плотномера $C_{уд}$ и различные интерпретации удельного сопротивления грунта резанию k_p и копанию k_k .

Широкую известность получила формула В. П. Горячкина — основателя отечественной школы прикладной механики:

$$P = kbh + \varepsilon qv^2,$$

которая рекомендована для расчета сопротивлений, возникающих при

Таблица III.4

Примеры логико-математических моделей-аналогий и описаний
в виде формул, предложенных для определения сопротивлений
резанию и копанью грунтов

Номер модели и автор	Вид сопротивления	Форма записи модели (без сопротивления передвижению)	Относительная погрешность	Область применения и ограничения
1. Домбровский Н. Г.	Резание	$P_p = k_p b h$	17—70	Приближенный расчет. Наличие опытных коэффициентов
	Копание	$P_k = k_k b h$		
2. Зеленин А. Н.	Резание	$P_p = C \delta h^{1,35} (1 + 2,6b) \times (1 + 0,0075\alpha) (1 + 0,03t) \rho \mu$	17—25	Уточненный расчет для традиционных рабочих органов. Наличие опытных коэффициентов, неизвестных для рабочих органов нового типа; $v \leq 1,5$ м/с
	Наполнение ковша	$P_{\text{нап}} = R_{\text{сж}} F + 2bH \lambda \gamma_p \operatorname{tg} \rho$	17—25	
	Призма волочения	$P_{\text{пр}} = V_{\text{пр}} \gamma_p \operatorname{tg} \rho$	17—25	
3. Ветров Ю. А.	Резание	$P_p = \varphi m_{\text{ср}} b h + 2m \delta h^2 + 2m \delta_{\text{ср}} h$	6—20	Уточненный расчет для традиционных рабочих органов. Наличие опытных коэффициентов; $v \leq 1,5$ м/с
	Наполнение ковша	$P_{\text{нап}} = (1 + \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \delta) A_1 b h \times \left[\gamma_p \sin \rho \cdot \cos^2 \rho H^2 + \frac{(1 + \sin \rho + \cos \rho \cos \alpha) h}{\operatorname{tg} \rho} + \gamma_p H \right]$		
	Призма волочения	$P_{\text{пр}} = \gamma_p b A_1 \frac{H_{\text{пр}}^2}{2} \times (\sin \alpha_3 + \operatorname{tg} \delta \cos \alpha_3)$		
4. Артемьев К. А.	Копание	$P_k = (b + 2\gamma_1 / \xi) t M_3 \times \left[k_1 \left(\frac{\gamma h^2}{2} + h q + h c_w \operatorname{ctg} \rho \right) - h c_w \operatorname{ctg} \rho \right] + 2c_w F_1 \cos \rho$	18—50	Уточненный расчет для традиционных рабочих органов; для грунтов при $c_w < 0,05$ МПа, $v \leq 1,5$ м/с
	Призма волочения	$P_{\text{пр}} = \frac{\gamma_p b}{2} \left[(H_y^2 - H_3^2) \cos \rho + \right]$		

Номер модели и автор	Вид сопротивления	Форма записи модели (без сопротивления передвижению)	Относительная погрешность	Область применения и ограничения
	Призма волочения	$+ \left(H_3^2 - H_1^2 \right) \times \frac{\cos^2 \alpha (\rho - \varepsilon)}{\cos^2 \alpha (-\varepsilon) \cos (\varepsilon - \rho)}$		
5. Баловнев В. И.	Резание	$P_p = \left(1 + \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \delta \right) A_1 b h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) \right]$	4—25	Оценка относительной эффективности рабочих органов различного типа; при $\rho > \delta$ $v \leq 1,5$ м/с
	Наполнение ковша	$P_{\text{нап}} = \left(1 + \operatorname{ctg} \alpha \times \operatorname{tg} \delta \right) A_1 b h \times \left(\gamma_p H + \frac{k_{\text{тр}}}{k_{\text{д}}} \times \gamma_p \cos^2 \rho \times \operatorname{tg} \rho \frac{H^2}{h} \right)$		
	Призма волочения	$P_{\text{пр}} \approx \gamma_p \cos^2 \rho \frac{b H_{\text{пр}}^2}{2}$		
6. Федоров Д. И.	Резание	$P_p = \sigma_0 (\delta_{\text{сж}} b k_{\text{пр}} + \delta_{\text{изн}} b k_{\text{Гпр}} \mu) + l_{\text{сд}} b \frac{\tau^2}{2G} + \frac{2w}{L_{\text{н}}} \sigma_{\text{из}} \times (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) + L_{\text{нс}} \gamma (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) \cos \alpha$	10—25	Расчет ковшевых рабочих органов с полукруглой кромкой. Наличие опытных коэффициентов; $v \leq 1,5$ м/с
	Наполнение ковша	$P_{\text{нап}} = b h H \gamma + \frac{\sin \rho}{2} b H^2 \gamma$		

взаимодействию сельскохозяйственных плугов с почвой. Она иллюстрирует структуру первоначальной аддитивной многочленной модели, которая была затем развита в работах других исследователей. Первое слагаемое модели характеризует сопротивление резанию, второе было введено для учета сопротивлений на отбрасывание вырезанного пласта грунта. Применительно к рабочим органам землеройных машин второе

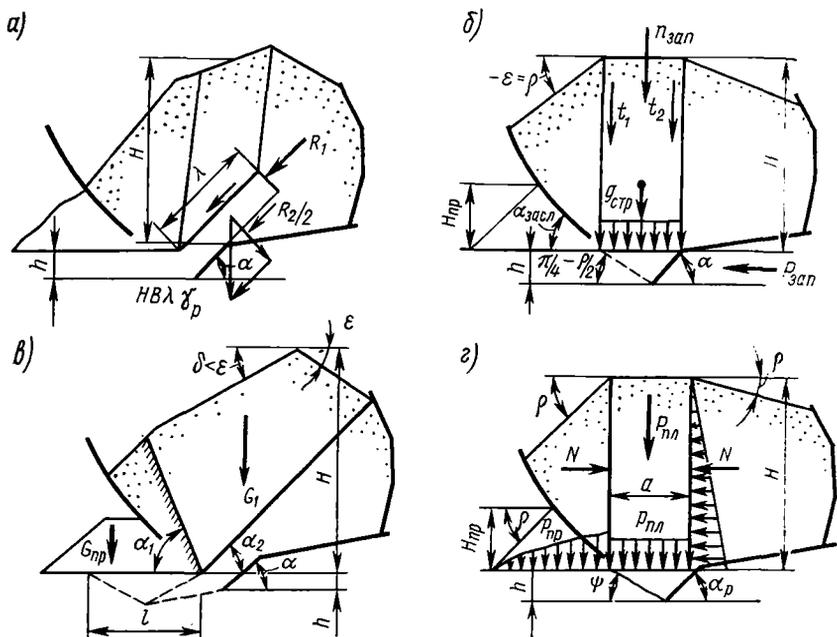


Рис. III.21. Расчетные схемы, используемые при формировании моделей для определения сопротивления копанью скрепера, предложенные:

а — А. Н. Зелениным; б — Ю. А. Ветровым; в — К. А. Артемьевым; г — В. И. Баловневым

слагаемое в дальнейшем было преобразовано к виду, позволяющему учесть сопротивление призмы волочения перед отвалом или ковшом.

Анализ развития процесса копания грунта ковшом (см. рис. III. 9) позволяет оценить соответствие эксперименту расчетных схем, лежащих в основе рассматриваемых моделей (рис. III. 21).

Модель 1 (см. табл. III. 4) не связана с анализом механизма движения грунта внутри ковша. Она отражает только характер изменения силовых параметров процесса наполнения ковша с точки зрения разработки минимального сечения стружки. Рекомендуемые значения удельных сопротивлений не имеют четких связей с емкостью ковша, числом ударов плотномера и сдвиговыми характеристиками. Экспериментальное значение коэффициентов требует уточнения применительно к соответствующим типам рабочих органов, емкости ковшей и другим факторам [9].

Модель 2 имеет в основном эмпирический характер. Она учитывает сопротивление разрушению грунта ножом, сопротивление вдавливаю, трение стружки и сдвиг призмы волочения. Расчетная схема процесса копания, особенно на заключительном этапе, не отражает действительный механизм протекания процесса. Положительным качеством модели является возможность определения сопротивления через такой обобщенный показатель прочности, как число ударов динамического плотномера [20].

Модели 3 и 5 позволяют рассчитать все силы, действующие на рабочий орган со стороны отделяемой стружки, включая силы от вертикально поднимающегося подвижного пласта, ширина которого определяется углами скола стружки и резания. Такая схема полнее отражает действительный процесс. Различие между моделями состоит в том, что в модели 5 сопротивление резанию боковыми и нижним ножом с учетом затупления последнего определяется через сцепление грунта и силы трения пласта о стенки ковша, а в модели 3 силы разрушения грунта определяются через эмпирический коэффициент удельного сопротивления резанию. Последний зависит от размеров стружки, угла установки и величины площадки затупления ножа. Обе модели достаточно полно отражают действительный механизм протекания процесса заключительного этапа наполнения ковша. Используемые в моделях 3 и 5 сдвиговые характеристики не увязаны с обобщенным показателем прочности — числом ударов динамического плотномера и удельным сопротивлением грунта резанию. На углы трения накладывается ограничение $\rho > \delta$ [9].

Модель 4 отражает процесс скола стружки под комбинированным воздействием на нее грунта, находящегося в ковше, и ножа [12]. Угол скола зависит от свойств грунта, толщины и высоты наполнения ковша. Эти факторы определяют величину коэффициента k_4 , а через него и значение сопротивления. Подвижный пласт представлен расширяющейся кверху призмой. Положительным качеством модели 4 является учет снижения величины угла скола по мере заполнения ковша, однако диапазон изменения угла скола завышен по сравнению с наблюдавшимся в эксперименте.

Распространенная расчетная схема Е. Р. Петерса не отражает действительный механизм процесса и ошибочно трактует учет вертикально действующих сопротивлений в проекции на горизонтальную ось.

Модель 6 разработана на базе анализа рабочего процесса ковша драглайна, но может быть с определенными уточнениями использована для расчета сопротивлений копанью ковшом скрепера. Модель имеет полуэмпирический характер и дает достаточно точные результаты для ковшей с полукруглой режущей кромкой. Наличие ряда эмпирических величин, например напряжения сжатия $\sigma_{сж}$, значение которых зависит от конструкции рабочего органа и схемы его взаимодействия с грунтом, затрудняет использование модели для анализа новых рабочих органов за пределами рекомендуемых значений указанных величин [27].

Для простейших моделей, базирующихся на удельных показателях, важно увеличить точность определения последних. Удельное сопротивление резанию и другие коэффициенты, рекомендуемые авторами, изменяются в широких пределах, что отрицательно сказывается на точности расчетов. Целесообразно удельное сопротивление копанью k_k определять через число ударов динамического плотномера, что позволит получить более точные значения показателя k_k' для различных грунтов и рабочих органов.

Для определения сопротивления копанью ковшом скрепера предложена упрощенная формула

$$P_{к1} = k'_k k_h B h,$$

где k'_k — коэффициент; рекомендуется принимать

$$k'_k C_{уд} \left(\frac{16 - 0,5 C_{уд}}{B} + 0,43 \right);$$

k_h — коэффициент, отражающий влияние толщины стружки на сопротивление копанию.

При минимальной толщине стружки, обеспечивающей заданную высоту H наполнения ковша, $h_{\min}/H = 0,06 \div 0,9$ (большие значения для менее связных грунтов), $k_h = 1$. Если разрабатываемая стружка в 1,5 раза и более превышает эту толщину ($h > 1,5 h_{\min}$), то $k_h = 0,7$. Зависимость дает относительную погрешность, не превышающую $16 \div 20\%$.

Анализ рассмотренного позволяет сделать ряд выводов.

Сопротивления копанию рабочих органов землеройных машин целесообразно базировать на системе моделей трех видов: для ориентировочных расчетов, для уточненных расчетов традиционного оборудования и для сравнительного анализа рабочих органов, основу которых составляют новые методы взаимодействия со средой.

Ориентировочные расчеты следует вести на простейших моделях типа 1 (см. табл. III. 4). Результаты анализа моделей такого типа должны систематически уточняться на базе дифференцированных по числу ударов динамического плотномера значений удельных сопротивлений. Для широкого использования моделей такого типа необходимо разработать нормативные таблицы значений удельных сопротивлений для различных грунтов и рабочих органов.

Уточненные расчеты целесообразно вести на основании модели 3, наиболее обоснованной по отражению механизма явления и уточнению эмпирических коэффициентов для различных условий. Для ковшовых рабочих органов может быть рекомендована модель 6. Модель 4 может быть использована для расчета скреперов при разработке слабо-связных грунтов, а модель 2 в тех же случаях — при разработке грунтов тонкими стружками.

Сравнительный анализ новых рабочих органов по отношению к традиционным целесообразно вести с использованием моделей типа 5, основу которых составляют положения механики сплошной среды, характеризующейся параметрами, не зависящими существенно от формы и типа рабочего инструмента. Такие модели хорошо адаптируются к инструментам нетрадиционной формы, по которым отсутствуют эмпирические коэффициенты.

§ III.5. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА С ГРУНТОМ, ОСНОВАННЫЕ НА ПОЛОЖЕНИЯХ ТЕОРИИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ

Аналитические зависимости для определения силовых энергетических параметров процессов можно рассматривать лишь в качестве приближенных логико-математических моделей-описаний. При форми-

ровании на их основе соответствующих показателей эффективности целесообразно в качестве показателя оценки использовать отношение разности соответствующих функций, характеризующих процесс без и при наличии эффекта, к функции без наличия последнего.

Для оценки эффективности новых рабочих органов землеройных машин по сравнению с традиционными в качестве показателя (см. табл. II. 1), например по величине сопротивления копанью, можно использовать соотношение $k_{эф} = \Delta P / P_T$, если $\Delta P = P_T - P_{нов}$, то $k_{эф} = 1 - (P_{нов} / P_T)$, где P_T — функция, определяющая параметр процесса, например сопротивление копанью, без наличия интенсифицирующего эффекта; $P_{нов}$ — функция, определяющая параметр процесса, например сопротивление копанью, при наличии интенсифицирующего эффекта. Обозначим отношение $P_{нов} / P_T$ через δ_p , тогда $k_{эф} = 1 - \delta_p$.

Оценка эффективности на базе такой математической модели, как относительная величина функций, приближенно описывающих процесс, позволяет с большой степенью достоверности определить предполагаемую эффективность разрабатываемого объекта.

Для землеройных машин это четко проявляется при оценке эффективности по величине сопротивления копанью. Абсолютное значение величин сопротивления копанью, рассчитанных на базе теорий прочности, например на основе статике сыпучей среды со сцеплением, в ряде случаев отличается от соответствующих величин, полученных экспериментально. Однако установлено [9], что в большом диапазоне изменения величины влияющих параметров качественный характер изменения сопротивлений соответствует экспериментальному и вынесенные на график кривые располагаются эквидистантно. Следовательно, в относительной интерпретации такая величина в определенном диапазоне изменения параметров может дать более обоснованное представление об эффективности протекания процесса.

Оценка эффективности разработки грунта бульдозерными отвалами с выступающим средним ножом может быть выполнена путем представления взаимодействия такого оборудования с грунтом на основе теоретических положений предельного состояния грунтов.

Схема взаимодействия отвала с грунтом дана на рис. III. 22. Приведенная в табл. III. 3 классификация действующих сопротивлений и

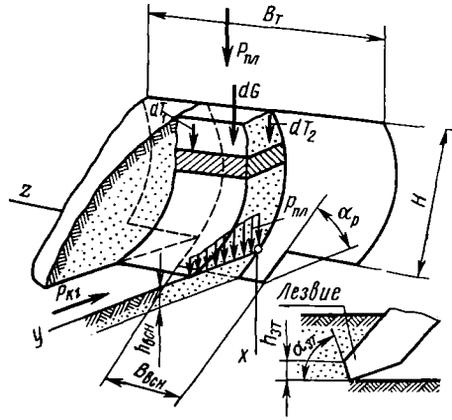


Рис. III. 22. Схема, моделирующая процесс взаимодействия с грунтом отвала бульдозера с выступающим средним ножом (всн)

их аналитическая интерпретация позволяют представить зависимость для расчета горизонтальной составляющей сопротивления копанью бульдозерным отвалом в виде суммы ряда величин, определяющих процесс:

$$P_{кит} = \sum_1^n P_i,$$

где в общем случае $n \geq 6$.

Приближенная модель для расчета горизонтальной составляющей сопротивлению копанью отвалом без выступающего среднего ножа представляется в виде суммы трех составляющих:

$$P_{кит} \simeq P_{01н} + P_{01з} + P_{пр},$$

где $P_{01н}$ — определяет сопротивление, возникающее на лобовой поверхности ножа при резании с учетом пригрузки пласта и призмы волочения; $P_{01з}$ — определяет сопротивление внедрению лезвия при наличии затупления; $P_{пр}$ — сопротивление призмы волочению. Расчет соответствующих составляющих выполняют на основании приближенных зависимостей, приведенных в табл. III. 3.

В выражении для определения $P_{01н}$ удельное давление пласта и призмы на вырезаемую стружку $p_{пл}$ рассчитывают по формуле

$$p_{пл} = P_{пл}/(2B_T h_T),$$

где $P_{пл}$ — сопротивление подъему пласта от сил трения по поверхностям скольжения и веса пласта; определяется по приведенным в табл. III. 3 зависимостям. При $(R/H) > 1$ (где R — радиус кривизны поверхности отвала; H — высота отвала) величина $P_{пл}$ определяется на основании следующего выражения:

$$P_{пл} = (\operatorname{tg} \delta + \operatorname{tg} \rho) \gamma_p \frac{\cos^2 \rho}{2} B_T H_T^2 + \gamma_p a B_T H_T,$$

где $a = 2h_T$.

На основании полученных выражений

$$P_{пл} = (\operatorname{tg} \delta + \operatorname{tg} \rho) \gamma_p \frac{\cos^2 \rho}{2} \frac{H_T^2}{h_T} + \gamma_p H_T.$$

Формируя общую модель, упрощая и вводя новые обозначения, получаем:

$$P_{кит} \simeq D_1 B_T h_T \left[\frac{\gamma h_T}{2} + c_m \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) + D_2 \frac{H_T^2}{h_T} + \right. \\ \left. + \gamma_p H_T \right] - D_3 B_T h_T c_m \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_2} \right) + D_4 B_T H_T^2,$$

где $D_1 = (1 + \operatorname{ctg} \alpha_p \operatorname{tg} \delta) A_1$; $D_3 = (1 + \operatorname{ctg} \alpha_{зт} \operatorname{tg} \delta) A_2$;

$$D_2 = (\operatorname{tg} \rho + \operatorname{tg} \delta) \frac{\gamma_p \cos^2 \rho}{4}; \quad D_4 = \gamma_p \frac{\cos^2 \rho}{2}.$$

Определим логико-математическую модель процесса при наличии

выступающего ножа. Величина горизонтальной составляющей сопротивления копанью рассчитывается аналогично по общей зависимости. Однако соответствующие слагаемые необходимо определять с учетом эффекта действия выступающего среднего ножа. Важно также выполнить условие тождественности процесса копания по объему перемещаемого за рабочий цикл грунта. Для этого необходимо, чтобы площади вырезанной стружки для традиционного отвала и с выступающим средним ножом были равны друг другу:

$$F_T = B_T h_T; \quad F_{ВСН} = B_{ВСН} h_{ВСН}; \quad F_T = F_{ВСН}.$$

Анализ процесса копания при положении указанного ограничения приводит к равенству объемов призм волочения:

$$V_T \simeq V_{ВСН} = V.$$

Между шириной режущей части и глубиной копания в этом случае имеют место следующие соотношения:

$$B_{ВСН} = B_T / k_{ВСН}; \quad h_{ВСН} = h_T k_{ВСН}$$

Для упрощения предполагаем, что высота отвала и затупление лезвия у каждого из сравниваемых отвалов имеют одну и ту же величину:

$$H_T = H_{ВСН} = H; \quad h_{зТ} = h_{з, ВСН}.$$

Модель для описания горизонтальной составляющей сопротивления копанью бульдозером с отвалом, оснащенным выступающим средним ножом, имеет вид

$$P_{к\ ВСН} = D_1 F \left[\frac{\gamma h_T k_{ВСН}}{2} + c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_2} \right) + \frac{D_2 H^2}{h_T k_{ВСН}} + \gamma_D H \right] \\ + D_3 h_{зТ} \frac{B_T}{k_{ВСН}} c_w \operatorname{ctg} \rho \left(1 - \frac{1}{A_2} \right) - D_4 B_T H^2.$$

Принятые обозначения даны выше. На основании полученных выражений и составляется функция для моделирования процесса оценки эффективности. Последняя определяет характер изменения сопротивлений копанью в зависимости от основных влияющих факторов:

$$k_{э,р} = 1 - (P_{к\ ВСН} / P_{к\ Т}).$$

Это позволяет сделать ряд выводов: 1) эффект по снижению сопротивления грунта копанью отвалом с выступающим средним ножом наблюдается только в определенном диапазоне значений величин выступающей части ножа; 2) эффект существенным образом зависит от глубины резания; 3) величина эффекта зависит от типа грунта.

Оценка эффективности применения рабочих органов с новыми методами воздействия на среду (бульдозеров и скреперов с газозвдушной смазкой поверхностей, контактирующих с грунтом, рабочих органов с газодинамическим воздействием на среду и др.).

Оценка может быть выполнена с учетом влияния условий эксплуатации на базе анализа целевой функции, представленной в виде отношения разности величин, характеризующих процесс без и при нали-

ции эффекта к одной из соответствующих величин. Рационально целевую функцию сформировать таким образом, чтобы при увеличении эффекта ее величина стремилась к максимальному значению и наоборот. Функции такого типа, как показано выше, широко используются в практике анализа и оценки эффективности процессов и приведены в табл. II. 1. Соответствующий анализ зависимостей такого типа, рассчитанных с учетом вероятностного характера изменения влияющих на процесс параметров, определяющих условия эксплуатации, позволяет определить стратегию поиска наиболее перспективной конструкции оборудования и установить область его применения. Достоверность получаемой оценки эффективности определяется полнотой и степенью достоверности отражения математической моделью характера протекания оцениваемого процесса.

Применительно к оценке эффективности процессов взаимодействия рабочего оборудования с грунтом целесообразно использовать целевую функцию, сформированную в виде теоретических моделей, полученных на базе статистики сыпучей среды со сцеплением, классификация которых приведена в табл. III. 3. Рассмотренные выше при оценке бульдозера с ВСН положения позволяют сформулировать основные этапы методики оценки эффективности и определения перспективного направления совершенствования оборудования и выявить области применения нового оборудования.

Исходной информацией для решения задачи являются типы грунтов, вероятность их появления и соответствующие прочностные характеристики грунтов. Алгоритм расчета состоит в следующем.

1. Формируют соответствующие типы грунтов, которые предполагается разрабатывать оборудованием.

2. Разрабатывают конструктивные схемы оборудования и формируют возможные схемы их взаимодействия с грунтом на основании выявленной гипотезы, определяющей принцип действия оборудования.

Рабочее оборудование с интенсификацией процесса разработки грунта энергией сжатого газа представляет сложную систему, состоящую из двух основных подсистем: механической } — «отвальное ножевое оборудование — грунт» и газодинамической — «поток сжатого газа — грунт». В процессе воздействия на среду взаимодействуют два вида энергии: механическая, которая для самоходной машины передается через трансмиссию и движитель на рабочий орган, и энергия сжатого газа высокого давления. В зависимости от характера использования каждой из подсистем взаимодействие со средой можно осуществлять различным образом.

Так, изучение возможностей использования газовоздушной смазки для интенсификации процесса копания грунта бульдозером связана с анализом и сравнением друг с другом не менее семи различных конструктивных вариантов соответствующего оборудования. Анализ применения газовоздушной смазки для интенсификации рабочего процесса скрепера связан с рассмотрением более семи вариантов конструктивных схем. Оценка газодинамических методов воздействия на грунт требует рассмотрения не менее четырех возможных конструктивных схем. Для каждой из схем формируются модели, характеризующиеся

назначением интенсификатора и достигаемым от его применения эффектом.

3. Формируют моделирующие алгоритмы для предварительной оценки влияния воздействия интенсификатора на снижение усилий, энергии и других показателей для выявленных конструктивных вариантов. Здесь можно использовать модели, основанные на закономерностях предельного состояния сыпучей среды со сцеплением с учетом результатов специальных экспериментальных исследований. Так, учет влияния газодинамического воздействия на снижение усилия копания обусловлен гипотезой, что под действием газодинамических импульсов осуществляется активное рыхление грунта и изменяются его характеристики: сцепление и углы внутреннего и внешнего трения. Для этого в теоретическую модель вводят ограничения, учитывающие изменение характеристик грунта. Математическое моделирование в сопоставлении с результатами последующего физического эксперимента позволяет определить количественное изменение указанных величин.

Методика формирования модели и структура разработанного моделирующего алгоритма позволяют использовать частные модели конкретных прочностных параметров в виде различных функций. Экспериментально установлено, что для предварительных расчетов с достаточной степенью точности в моделях могут быть использованы выражения линейной аппроксимации.

При формировании конкретных моделей важно обоснованно наложить ограничения, характеризующие грунтовые условия в соответствии с вариантами взаимодействия рабочего органа с грунтом и ожидаемого их изменения под влиянием интенсификатора. Величины $c_{\omega B}$, ρ_B , δ_B , γ_B , подставляемые в теоретические модели и характеризующие эффект интенсификатора (газовоздушной смазки) на грунт, рекомендуется рассчитывать по моделям-аналогиям. Наиболее простыми являются соотношения вида

$$c_{\omega B} = k_c c_{\omega}; \quad \rho_B = k_\rho \rho; \quad \delta_B = k_\delta \delta; \quad \gamma_B = k_\gamma \gamma,$$

где $c_{\omega B}$, ρ_B , δ_B , γ_B — соответственно сцепление, угол внутреннего трения, угол внешнего трения и объемный вес грунта при воздействии интенсификатора; k_c , k_ρ , k_δ , k_γ — соответствующие эмпирические коэффициенты.

Диапазон изменения величин $c_{\omega B}$, ρ_B , δ_B , γ_B устанавливает методом математического моделирования при варьировании в широких пределах коэффициентов k_c , k_ρ , k_δ , k_γ и сопротивления с результатами экспериментов на физических моделях. Возможные пределы изменения указанных коэффициентов характеризуются следующими величинами:

$$\begin{aligned} k_c &= 0,2 \div 0,6; & k_\delta &= 0,2 \div 0,8; \\ k_\rho &= 0,2 \div 0,8; & k_\gamma &= 0,6 \div 0,9. \end{aligned}$$

Соответствующие зависимости являются основой для составления моделирующего алгоритма и программы расчета на ЭВМ.

На следующем этапе рассчитывают величину каждого из коэффициентов эффективности по выделенным конструктивным группам оборудования последовательно для каждого из типов грунтов с соответствующими значениями и характером изменения параметров, определяющих их прочностные свойства под действием интенсификаторов.

4. Для каждой из выделенных групп определяют среднее значение коэффициента эффективности по всему спектру типов грунтов с учетом вероятности появления каждого из типов.

Искомая величина эффекта по снижению сопротивления копанью определяется по формуле

$$k_{эфP_{кл} ср} = \sum_1^n k_{эфP_{кл} i} p_i,$$

где $k_{эфP_{кл} i}$ — коэффициент эффективности, рассчитанный для соответствующего типа грунта; p_i — вероятность появления грунта соответствующего типа.

Основные параметры, определяющие прочностные характеристики грунтов и значение вероятностей появления грунтов соответствующих типов, приведены в табл. II. 5.



Рис. III.23. Блок-схема использования логико-математических моделей описаний для оценки эффективности новых методов воздействия на грунт

5. На следующем этапе осуществляют сопоставление средних значений коэффициентов эффективности между собой. Оптимальное значение определяется большим из полученных величин коэффициента эффективности.

Рассмотренные положения касаются вопросов оптимизации по коэффициентам эффективности, установленным по математическим моделям-описаниям, определяющим изменение величины как силовой характеристики процесса от влияющих на его протекание параметров, так и на базе анализа коэффициентов эффективности, рассчитанных по моделям более высокого уровня энергоемкости, материалоемкости, приведенным затратам и др. (см. табл. II.1). Конкретные рекомендации по режимам работы и ожидаемой эффективности могут быть получены на основании анализа целевых функций в широком диапазоне влияющих параметров. Такой анализ целесообразно осуществлять на базе предметно-математического моделирования на основе ЭВМ. Процесс такого анализа приведен на рис. III.23.

В заключение третьей главы можно подчеркнуть следующее:

1. Математический аппарат механики сплошной среды и, как частный случай, теория предельного состояния сыпучей среды со сцеплением являются основой формирования математических моделей-описаний для анализа процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин, включая изучение процессов резания, копания, рыхления, дробления, уплотнения и перемешивания различных строительных материалов и грунтов. Последующий анализ полученных на этой основе моделирующих алгоритмов осуществляется на предметно-математических моделях. Развитие и уточнение моделей такого типа является одним из основных направлений формирования аналитической теории процессов взаимодействия инструмента дорожно-строительных машин различного типа со средой.

2. Модели, основу которых составляют закономерности механики предельного состояния сыпучей среды со сцеплением, являются базой для качественного анализа рабочих процессов машин отвального и ковшового типов, а также могут быть использованы для приближенного анализа ряда процессов, основанных на новых методах воздействия на среду.

3. Многообразие изучаемых процессов, инструментов различного конструктивного оформления и видов решаемых задач соответствует многообразию форм и видов моделей (формул), описывающих исследуемый процесс. Многочисленные виды регрессионных математических моделей-аналогий и различного вида эмпирические формулы, наиболее известные из которых приведены в табл. III.4, применимы для расчетов действующих на инструмент нагрузок и режимов работы в условиях эксплуатации, для которых установлены значения входящих в формулы эмпирических коэффициентов.

4. Математические модели реологического типа и модели-описания широко используются в качестве базы для получения критериев подобия и последующего построения физических моделей различного уровня подобия и назначения.

Глава IV

МЕТОДЫ ПРИБЛИЖЕННОГО ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

§ IV.1. УСЛОВИЕ ПРИБЛИЖЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СО СРЕДОЙ

Моделирование процессов взаимодействия инструмента со сплошной средой (например, грунт и др.) базируют на анализе системы основных уравнений, описывающих напряженно-деформативное состояние сплошной среды при внешнем воздействии с учетом начальных и граничных условий процесса (см. рис. III.7). При составлении системы уравнений и расчетной схемы принимают следующие допущения: среда — линейно-деформируемая, вязкопластическая, слоистая; рабочий орган — твердое тело, характеризуемое линейными размерами и углами; поверхности скольжения при деформировании образуются в условиях всестороннего сжатия.

Уравнение равновесия составляют в предположении, что на выделенный объем действуют силы: тяжести, инерции, поверхностные и вязкого трения.

Сумма моментов сил относительно осей, проходящих через центр тяжести элементарного объема, приводится к группе уравнений, устанавливающих закон сопряженностей касательных напряжений.

Ряд критериев, следующих из анализа приведенных выше уравнений, может быть ограничен четырьмя независимыми критериями подобия: τ/σ ; $\rho g l'/\sigma$; $\rho v^2/\sigma$; $\eta/(\sigma l)$.

Уравнение сплошности приводит к получению критерия $v t/l$.

Уравнения состояния в зоне развития деформаций грунта как линейно-деформируемого тела и в области предельного состояния после преобразований и отбрасывания одинаковых соотношений приводят к системе критериев E_i/σ ; G_i/σ ; τ_i/σ ; H_0/σ ; φ ; $\tau_i v/(\sigma l)$.

Условия однозначности в общем случае выражают пропорциональность величин, определяющих начальные и граничные условия, геометрических параметров и физических констант системы, которая составлена из некоторого числа однородных изотропных слоев с изменяющимися от слоя к слою параметрами прочности и рабочего органа с определенными линейными и угловыми параметрами.

Для слоев системы при условии $(h_i/H)_n = (h_i/H)_m$; $(h/l)_n = (h/l)_m, \dots$ для параметров τ ; σ ; η ; E , G выполняются отношения $(\tau_1/\tau_i)_n = (\tau_1/\tau_i)_m$; $(E_1/E_i)_n = (E_1/E_i)_m$ и т. д., где $i = 1, 2, \dots$. На поверхностях, отделяющих область предельных состояний от области, где они отсутствуют, условия однозначности не формулируются. Принимается во внимание, что при соблюдении критериев подобия, полученных из основных уравнений процесса, выдерживается подобие процесса по

ряду параметров, определяющих условия на этих поверхностях. Граничные условия на поверхностях, где проявляются силы трения в соответствии с законом Кулона, выражены в виде $\tau = \sigma \operatorname{tg} \delta - c_{\omega}$; $\tau = \sigma \operatorname{tg} \delta$ (где δ — угол трения; c_{ω} — сцепление между частицами среды).

Из условия однозначности следует ряд дополнительных критериев подобия

$$\frac{l_i}{l_j}; \alpha_i; \frac{h_i}{H}; \frac{\tau_i}{\tau_j}; \frac{\sigma_i}{\sigma_j}; \frac{\eta_i}{\eta_j}; \frac{E_i}{E_j}; \frac{G_i}{G_j}; \frac{\varphi_i}{\varphi_j}$$

Критерии подобия процесса получают путем исключения одинаковых комплексов из системы критериев, рассмотренных выше. Для процесса деформирования сплошной среды рабочим органом машины

$$\frac{\rho g l}{\sigma}; \frac{\rho v^2}{\sigma}; \frac{\eta v}{\sigma l}; \frac{\tau}{\sigma}; \frac{E}{\sigma}; \frac{G}{\sigma}; \varphi; \delta; \frac{vt}{l};$$

$$\alpha_i; \frac{l_i}{l_j}; \frac{\tau_i}{\tau_j}; \frac{\eta_i}{\eta_j}; \frac{E_i}{E_j}; \frac{G_i}{G_j}; \frac{\varphi_i}{\varphi_j}; \frac{\delta_i}{\delta_j}.$$

Ряд критериев выражает условия геометрического подобия системы «среда — рабочий орган». Критерий vt/l выражает условие гомохронности. Критерий $\rho g l / \sigma$ определяет отношение веса, приходящегося на единичную площадку, к силовой характеристике состояния этой единичной площадки в натуре и в модели. Параметр σ обозначает соответствующие предельные напряжения, характерные для процесса: предел сцепления, предел прочности грунта на разрыв, предел прочности на сжатие, сдвиг, а также характеристики линейной деформируемости материала. Критерий $\rho v^2 / \sigma$ выражает отношение силы инерции масс к силовой характеристике состояния.

При изучении упругих тел под параметром v следует понимать скорость распространения упругих колебаний. Отношения сопротивлений вязкости и сопротивлений сдвигу к величине σ представлены критериями $\eta v / (\sigma l)$ и τ / σ . Критерии G / σ и E / σ характеризуют поперечную и продольную деформируемость грунта. Критерии φ и δ выражают отношение касательных сил к нормальным на тех контактных поверхностях, где проявляется закон Кулона.

Полученная общая система критериев подобия может быть положена в основу при определении условий подобия для различных случаев приближенного физического моделирования процессов взаимодействия сплошной среды рабочим оборудованием машин соответствующего назначения (табл. IV 1).

Уравнения связи между масштабами параметров подобных систем «среда — рабочее оборудование» имеют вид:

$$\frac{k_v k_t}{k_l} = 1; \quad \frac{k_p k_g k_l}{k_s} = 1; \quad \frac{k_p k_v^2}{k_s} = 1;$$

$$\frac{k_{\eta} k_v}{k_s k_l} = 1; \quad \frac{k_{\tau}}{k_s} = 1; \quad \frac{k_E}{k_s} = 1; \quad \frac{k_G}{k_s} = 1; \quad k_{\varphi} = 1;$$

Таблица IV.1

Критерии подобия системы «грунт — рабочее оборудование — двигатель — грунт»

Система	Обозначение критерия и запись	Наименование критерия
«Грунт — рабочее оборудование»	$\frac{c_{\omega}}{\gamma l}; \frac{C_{уд}}{\gamma l}; \frac{\tau l^2}{G}$	Отношение сил сопротивления сдвигу (отрыву) к весу грунта
	$\tau v / \gamma l^2; \tau v \sigma l$	Отношение сил вязкого трения к весу грунта
	$v^2 / (gl)$	Отношение сил инерции к весу грунта
	ρ	Отношение сил сухого трения грунта по грунту к действующей силе
	δ	Отношение сил сухого трения грунта по металлу к действующей силе
	α_i	Углы резания, заострения и др.
	l_i / l	Отношение длин сходственных сторон
«Рабочее оборудование — двигатель — грунт»	$\frac{\gamma l^3}{G}; \frac{G^2}{G}; \frac{\gamma_2}{\gamma}$	Отношение веса грунта к весу машины
	$f_{ср}; W/G$	Отношение сопротивления передвижению к весу машины
	$\zeta_{сц}; T/G$	Отношение силы тяги к весу машины
	$C_{уп} / (\gamma l^2)$	Отношение сил упругости к весу машины
	$C_{ш} / (\gamma l^2)$	Отношение сил упругости пневматических колес к весу машины
	$r_{ш} v_i (\gamma l^3)$	Отношение сил трения в пневматических колесах, пропорциональных скорости, к весу машины

$$k_{\sigma} = 1; \quad \frac{k_{l_i}}{k_{l_j}} = 1; \quad \frac{k_{\gamma_i}}{k_{\gamma_j}} = 1; \quad \frac{k_{z_i}}{k_{z_j}} = 1;$$

$$\frac{k_{\sigma_i}}{k_{\sigma_j}} = 1; \quad \frac{k_{G_i}}{k_{G_j}} = 1; \quad \frac{k_{\varphi_i}}{k_{\varphi_j}} = 1; \quad \frac{k_{\delta_i}}{k_{\delta_j}} = 1,$$

где k_{ij} — масштаб параметра i, j .

Для определения параметров модели варьируют любые независимые параметры, входящие в комплексные критерии. При моделировании методом эквивалентных материалов получают пять вариантов независимого выбора масштабов параметров: $k_{\rho}, k_g, k_l; k_{\rho}, k_g, k_{\sigma}; k_{\rho}, k_g, k_{\eta}$ и т. п. При независимом выборе k_{ρ}, k_g, k_l остальные масштабы определяют на основании полученных уравнений:

$$k_{\sigma} = k_{\rho} k_g k_l; \quad k_v = \sqrt{k_g k_l};$$

$$k_{\gamma} = k_l k_{\rho} \sqrt{k_l k_g}; \quad k_t = \sqrt{k_l k_g}$$

Приравнявая $k_{\rho} = k_g = 1$, получим: $k_{\sigma} = k_l; k_v = \sqrt{k_l}; k_{\eta} = k_l^{\frac{3}{2}}; k_t = \sqrt{k_l}$.

Масштаб k_P общего сопротивления деформированию P определяют из соотношений типа P/P_{σ} , где P_{σ} — составляющая общего сопротивления, зависящая от удельных силовых характеристик $\sigma = P_{\sigma}/l^2$, откуда $k_P = k_{\sigma} k_l^2$.

Величины остальных масштабов определены ограничениями, вытекающими из критериев-симплексов. Формулы перехода к оригиналу даны в табл. IV 2.

Изготовление эквивалентных материалов, удовлетворяющих всем указанным условиям, сложно. При физическом моделировании широко применяют методы приближенного моделирования. Условия приближенного моделирования определяют путем анализа системы критериев подобия и выявления тех случаев, когда из-за малости ряда действующих сил рядом критериев можно пренебречь.

Определение критериев подобия процесса резания грунта на базе анализа термодинамического уравнения процесса. Уравнения динамического равновесия и состояния, приведенные выше, составлены в предположении однородности молекулярного и микроскопического строения грунта как упруговязкопластической среды, с которой взаимодействует рабочее оборудование и движитель машины. В действительности такое дисперсное тело, как грунт, отличается разнообразной структурой и сложной микрогеологией.

В связи с этим, например, метод получения критериев подобия на базе математических уравнений процесса механического разрушения грунта как упруговязкопластического тела не может являться достаточно общим. Поэтому наряду с применением методов анализа уравнений и анализа размерностей представляется целесообразным проверить правильность полученных критериев подобия процесса разрушения грунта на основании более общих законов природы, справедли-

Формулы перехода от параметров модели к параметрам оригинала

Определяющий параметр	Расчетные формулы при моделировании		
	с изменением прочностных свойств среды		без изменения прочностных свойств среды
	при соблюдении условий $\gamma_M = \gamma_H; \rho_M = \rho_H$	с поправкой при $\gamma_M \neq \gamma_H; \rho_M \neq \rho_H$	
Угол резания и др. Глубина резания Ширина резания Высота (ковша, отвала) Емкость ковша	$\alpha_{iH} = \alpha_{iM}$ $h_H = h_M k_l$ $B_H = B_M k_l$ $H_H = H_M k_l$ $q_H = q_M k_l^3$		
Скорость процессов (резания, передвижения)	$v_H = \begin{cases} v_M k_l^{1/2} \\ v_M k_l^2 k_\omega^{-1} \end{cases}$		$v_H = v_M k_l^{\left(\frac{n}{2}-1\right)}$

Сопротивление копанью (результатирующая и составляющие)	$P_{iH} = P_{iM} k_l^3$	$P_{iH} = P_{iM} k_l^3 k_\gamma k_\rho$	$P_{iH} = P_{iM} k_l^n$
Вес оборудования	$G_H = G_M k_l^3$	$G_H = G_M k_l^3 k_\gamma$	$G_H = G_M k_l^n$
Тяговое усилие	$T_H = T_M k_l^3$	$T_H = T_M k_l^3 k_\rho$	$T_H = T_M k_l^n k_{PG}$
Мощность	$N_H = N_M k_l^{3,5}$	$N_H = N_M k_l^{3,5} k_\rho^{3,5}$	$N_H = N_M k_l^{\frac{3}{2}n-1}$
Динамическая нагрузка	$P_{д.н} = P_{д.м} k_l^3$	$P_{д.н} = P'_{д.м} k_l^3$	$P_{д.н} = P''_{д.м} k_l^n$

Примечание: $k_\gamma = \frac{\gamma_H}{\gamma_M}$; $k_\rho = \frac{\rho_H}{\rho_M}$; $k_\rho = \frac{\varphi_H}{\varphi_M}$; $k_{PG} = \frac{P_M + G_M f_{ср.м} k_{zf}}{P_M + G_M f_{ср.м}}$

$$k_{zf} = \frac{(k_{сц} \varphi_{сц} - f_{ср})_M}{(k_{сц} \varphi_{сц} - f_{ср})_H}; P'_{д.н} = v_M \sqrt{m_M C_{пр.м}} + \left(T_M k_{PG} - P_{г.м} k_\gamma k_\rho - W_M \frac{k_{zf}}{f_{ср}} \right)$$

$$P'_{д.н} = k_\rho v_M \sqrt{m_M C_{пр.м}} + (T_M k_\rho - P_{г.м} k_\gamma k_\rho - W_M k_\gamma k_\rho).$$

вых для всех систем, независимо от их структурного и молекулярного строения.

В данном случае в качестве такого общего закона, как и при рассмотрении ряда других процессов [23], могут быть использованы основные законы термодинамики. В этом случае критерии подобия устанавливаются на основании известного уравнения, объединяющего первое и второе начала термодинамики:

$$TdS = dU + dF,$$

где $TdS = dQ$ — тепло, подведенное к системе.

Для элементарного отрезка времени можно записать

$$T \frac{dS}{dt} = \frac{\partial U}{\partial V} \frac{dV}{dt} + \frac{dF}{dt}.$$

Общий критерий термодинамического подобия получен в следующей форме:

$$\frac{TdS - \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T d\left(\frac{g}{\gamma_T}\right)}{dF} = \text{idem},$$

где T — абсолютная температура; S — энтропия; U — внутренняя энергия системы; V — элементарный объем; t — время; F — свободная энергия системы.

Указанные величины в данном случае выражаются в механической системе единиц.

Основные этапы получения критериев подобия заключаются в следующем: вычисляют выражения для основных термодинамических параметров системы; полученные функции выражаются через единую систему размерностей; вычисляют дифференциалы функции энтропии и свободной энергии и частную производную от полной энергии по объему при постоянной температуре; искомые критерии подобия получают путем записи указанного выражения в относительных единицах.

В процессе резания, в соответствии с рис. III. 1, элементарный объем грунта находится во взаимодействии с режущим ножом. Нож, двигаясь с некоторой скоростью, деформирует грунт. Энергия деформации частично концентрируется в грунте в виде упругой энергии деформации, а частично переходит в теплоту и рассеивается. Для получения критериев подобия необходимо составить выражение основных термодинамических функций, рассматривая нож и взаимодействующий с ним грунт как некоторую физическую систему.

Свободная энергия системы dF складывается из кинетической энергии движения элемента вырезаемого пласта, потенциальной энергии, затрачиваемой на перемещение центра тяжести элемента грунта, а также из упругой энергии деформации элемента:

$$dF = dA_K + dA_{II} + dA_{ynp}.$$

Два слагаемых dA_K и dA_{II} , отнесенные к единице элементарного объема грунта, можно представить в следующем виде:

$$dA_K = \frac{\gamma_r dv^2}{2g}; \quad dA_{II} = \gamma_r dh.$$

При равномерном поле давления удельная работа, приводимая системой при упругой деформации некоторого объема,

$$dA_{ynp} = A_T + A_B,$$

где A_T — работа температурного расширения; A_B — работа внешних сил на упругом перемещении.

Раскрывая A_T и A_B , имеем:

$$dA_{ynp} = p x_i dT + \frac{pdP_1}{l^2 E},$$

где p — обобщенное удельное усилие; α_i — коэффициент температурного расширения; dT — приращение температуры; dP_1 — обобщенное элементарное сопротивление; E — модуль упругости грунта.

Если пренебречь работой температурного расширения, то удельная свободная энергия системы

$$dF = \frac{\gamma_r dv^2}{2g} + \gamma_r dh + \frac{p dP_1}{l^2 E},$$

где v — скорость движения, м/с; dh — перемещение центра тяжести элемента, м.

Энергию системы $dQ = TdS$ можно вычислить как сумму работы на преодоление вредных сопротивлений — трения, силы сопротивления остаточным деформациям и др.

Так как тепло подводится к телу главным образом за счет трения, то для единицы объема

$$dQ = pd \left(\frac{g}{\gamma_r} \right) \frac{\gamma_r}{g}.$$

Приращение внутренней энергии системы в общем виде для рассматриваемого случая определяется в виде

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V - p.$$

Пренебрегая скрытой теплотой расширения, получаем:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = -p.$$

Подставляя эти зависимости в общее выражение, получают следующее соотношение:

$$\frac{p \left[d \left(\frac{g}{\gamma_r} \right) \frac{\gamma_r}{g} + 1 \right]}{\gamma_r \frac{dv^2}{2g} + \gamma_r dh + \frac{p dP_1}{l^2 E}} = \text{idem}.$$

Поделив числитель и знаменатель на величину $\gamma_r dv^2 / 2g$ и перейдя к относительным единицам, имеем:

$$\frac{2pgl/(\gamma_r v^2)}{1 + \frac{2lg}{v^2} + \frac{2pg}{\gamma_r v^2} \frac{P_1}{l^2 E}} = \text{idem},$$

откуда критерии подобия записываются следующим образом:

$$\Pi_1 = \frac{pg}{\gamma_r v^2}; \quad \Pi_2 = \frac{gl}{v^2}; \quad \Pi_3 = \frac{P_1}{l^2 E} \frac{pg}{\gamma_r v^2}$$

Последний критерий представляется как произведение двух инвариантов:

$$\Pi_3 = \frac{P_1}{l^2 E} \Pi_1.$$

Включение в соотношения таких параметров, как обобщенное сопротивление P_1 и обобщенное удельное давление p , позволяет перейти к критериям, содержащим в своей структуре параметры, которые определяют механические характеристики грунта τ , σ , c_w и ряд других, входящих в условия однозначности.

§ IV.2. ВАРИАНТЫ МОДЕЛЕЙ И ВОПРОСЫ УСТАНОВЛЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ ДОМИНИРОВАНИЯ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ

Практика исследования рабочих процессов и элементов конструкций дорожно-строительных машин приводит к выводу о целесообразности отказа от принципов полного конструктивного подобия модели. Достаточно ограничиться соблюдением моделирования основополагающих физических характеристик процесса.

Важной частью физического моделирования является вопрос о подобии моделирующей среды оригиналу. Необходимо подчеркнуть, что требования, предъявляемые к моделирующей среде, меняются в зависимости от свойств моделирующего объекта и напряженного состояния, которое предполагается изучать на модели. Во-первых, предполагаемый материал оригинала должен быть рассмотрен с точки зрения возможности отнесения его к соответствующей реологической модели упругой, упругохрупкой, упругопластической, упругоползучей, сыпучей с элементами сцепления, пластичной и др. Во-вторых, важно определить напряженное состояние объекта — упругое предельное, упругопластическое или упругоползучее.

При работе с упругохрупкими материалами (например, при изучении процессов рыхления мерзлых грунтов) наряду с требованиями подобия между напряжениями в модели и натуре существенную роль играет дополнительное требование о подобии предельных напряжений, соответствующих моменту разрушения.

Области доминирования критериев подобия, условия моделирования процессов взаимодействия рабочего оборудования со средой, имеющей различные физико-механические свойства и состояние, могут быть установлены на основании анализа общих реологических уравнений. Последние являются также исходной базой для установления областей доминирования определяющих критериев подобия. Поведение среды в зависимости от ее свойств и внешних факторов изучают методами реологии. Вопросам реологии различных сред посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых. Уравнения состояния сложных реологических моделей упруговязкопластических сред в общем виде записывают в форме $A_0 + A_1\sigma + A_2\sigma_0 + A_3\epsilon_0 + A_4\epsilon_0 + \dots + A_n\epsilon_n = 0$.

Частные значения коэффициентов уравнения A_0, A_1, \dots, A_n позволяют получить реологические уравнения состояния всех простых и составных моделей. Более детальное описание свойств сложной среды, например с учетом газообразной фазы, приводит к необходимости использования многоэлементных моделей, а при большом числе элементов переходят к модели с непрерывным распределением элементов.

В безразмерном виде уравнение может быть записано следующим образом:

$$\Pi_{об} = \Pi_{r_1} + \Pi_{r_2} + \Pi_{r_3} + \Pi_{r_4} + \dots + \Pi_n,$$

$$\text{где } \Pi_{об} = \frac{\tau}{\gamma_{rl}}; \Pi_{r_1} = \frac{A_0}{A_1 \gamma_{rl}}; \Pi_{r_2} = \frac{A_2 \tau}{A_1 \gamma_{rl}}; \Pi_{r_3} = \frac{A_3 \varepsilon_0}{A_1 \gamma_{rl}};$$

$$\Pi_{r_4} = \frac{A_4 \varepsilon_0}{A_1 \gamma_{rl}}.$$

При $A_0/A_1 = \sigma \operatorname{tg} \rho + c_\omega$; $A_4/A_1 = \eta$; $A_2 = 0$; $A_3 = 0$ получают обобщенный критерий для вязкопластической среды

$$\Pi_{об} = \frac{\sigma \operatorname{tg} \rho + c_\omega}{\gamma_{rl}} + \frac{\eta \varepsilon_0}{\gamma_{rl}}.$$

Для анализа вязкопластической среды используют механическую модель среды Бингама — Шведова, представляющую собой параллельное соединение моделей среды Ньютона и Прандтля — Кулона. Уравнение состояния такого тела имеет вид

$$\tau = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} + c_\omega + \sigma \operatorname{tg} \rho,$$

где $d\varepsilon/dt$ — относительная скорость деформации сдвига.

Следовательно,

$$\tau = c_\omega + \sigma \operatorname{tg} \rho + \eta \frac{dv}{dl}.$$

Это уравнение получено на основании реологической модели Бингама — Шведова, которую часто используют в качестве уравнения напряженного состояния грунта в целом. Путем деления членов уравнения на γ_{rl} получают:

$$\frac{\tau}{\gamma_{rl}} \simeq \frac{c_\omega}{\gamma_{rl}} + \operatorname{tg} \rho \frac{v^2}{gl} + \frac{\eta v}{\gamma_{rl}^2}$$

Полученное уравнение включает критерии подобия $c_\omega/(\gamma_{rl})$; ρ ; $v^2/(gl)$; $\eta v/(\gamma_{rl}^2)$, которые составляют систему критериев приближенного подобия процесса деформирования среды, например грунта.

Уравнение, записанное в виде соотношения между критериями, представляет математическую запись обобщенного критерия подобия:

$$\Pi_{об} = \Pi_1 + \Pi_{10} \Pi_4 + \Pi_3,$$

где $\Pi_1 = c_\omega/(\gamma_{rl})$; $\Pi_{10} = \operatorname{tg} \rho$; $\Pi_4 = v^2/(gl)$; $\Pi_3 = \eta v/(\gamma_{rl}^2)$.

Обобщенный критерий подобия процесса представляются в виде соотношения

$$\Pi_1 \Pi_{об}^{-1} + \Pi_{10} \Pi_4 \Pi_{об}^{-1} + \Pi_3 \Pi_{об}^{-1} = 1 \text{ или } K_{\Pi_1} + K_{\Pi_{10}; 4} + K_{\Pi_3} = 1,$$

где $K_{\Pi_1} = \Pi_1 \Pi_{об}^{-1} = c_\omega \tau$ — коэффициент влияния критерия Π_1 (в общем критерии подобия); $K_{\Pi_{10}; 4} = \Pi_{10} \Pi_4 \Pi_{об}^{-1} = \operatorname{tg} \rho \frac{\gamma_{rl} v^2}{g}$ —

коэффициент влияния критериев Π_{10} , Π_4 (в обобщенном критерии подобия); $K_{пз} = \Pi_3 \Pi_{06}^{-1} = \frac{\gamma v}{\tau l}$ — коэффициент влияния критерия Π_3 .

Раскрывая содержание составляющих обобщенного критерия подобия, получаем:

$$\frac{c_\omega}{\tau} + \operatorname{tg} \rho \frac{\gamma v^2}{g \tau} + \frac{\gamma v}{\tau l} = 1.$$

Сумма коэффициентов влияния составляет единицу. Чем больше коэффициент влияния данного критерия, чем ближе он к единице, тем большее влияние он оказывает на исследуемый процесс.

Обобщенный критерий подобия процесса копания грунта, его составляющие и их коэффициент влияния изменяются в широких пределах в зависимости от режима работы машины, типа и состояния грунта. Анализ позволяет выделить три области доминирования критериев: *I* — сыпучий грунт, поведение которого при физическом моделировании определяется системой критериев ρ , $v^2/(gl)$; *II* — связный грунт, поведение которого при физическом моделировании определяется системой критериев $c_\omega/(\gamma_r l)$, $\eta v/(\gamma_r l^2)$; *III* — переувлажненный грунт, поведение которого при физическом моделировании определяется критерием $\gamma v/(\gamma_r l^2)$.

При малых, близких к нулю значениях c_ω и ω (в процентах) среда приближается к идеально сыпучему телу.

Грунты, разрабатываемые землеройными машинами, занимают промежуточное положение между сыпучей и переувлажненной средами. Область *II* соответствует процессам, протекающим в суглинке, супеси, песке и глине. Влияние критериев ρ , $c_\omega/(\gamma_r l)$, $\eta v/(\gamma_r l^2)$ на процесс движения твердого тела в среде оказывается определяющим. При моделировании установившегося рабочего процесса бульдозера и скрепера критерий $v^2/(gl)$ не является доминирующим, его можно исключить из системы критериев. С увеличением скорости при прочих равных условиях влияние критерия $\eta v/(\gamma_r l^2)$ на исследуемый процесс возрастает. Процесс копания грунта рабочим оборудованием землеройных машин непрерывного действия необходимо моделировать с учетом этого критерия. В зависимости от характера доминирующих сил формируют различные варианты приближенного физического моделирования процессов взаимодействия рабочего оборудования со средой (табл. IV 3).

§ IV.3. ПРИБЛИЖЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ СРЕДЫ С КОМПЕНСАЦИЕЙ НЕСОБЛЮДЕНИЯ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ

Важной задачей теории приближенного физического моделирования процессов взаимодействия рабочего оборудования со средой является определение основных положений моделирования при испытании моделей в среде оригинала в условиях проявления всех действующих факторов. Достоинством такого моделирования является то, что здесь не требуется прибегать к изменению прочностных свойств среды. Определение значения коэффициентов перехода от параметров модели к параметрам оригинала и характер их изменения от влияющих факто-

Варианты приближенного моде

Варианты мо- делирования	Домнирующие факторы	Критерии подобия	Ограничения и независимые мас- штабы величин (ва- риант)	Напряжение, вяз- кость, сцепление, модуль деформации, число ударов плот- номера
1	Силы струк- турного сцеп- ления и вяз- кости	$\frac{\gamma v}{\sigma l}; \frac{c_{\omega}}{\rho} \frac{E}{\sigma};$ $\delta; \frac{c_m}{c_{уд}};$ $\frac{l_i}{l_j};$	$k_s; k_{\gamma}; k_l;$ $k_s = k_{\gamma};$ $k_s = k_{\gamma} = 1;$ $k_{\varphi} = k_{\delta} = 1$	$\sigma_M = \frac{\sigma_H}{k_l}$ <hr/> $\sigma_M = \sigma_H$
2	Силы струк- турного сцеп- ления, вяз- кости и инер- ции	$\frac{\gamma v}{\sigma l} \quad \frac{\rho v^2}{\sigma};$ $\frac{c_{\omega}}{\sigma} \quad \frac{E}{\sigma}$ $\varphi; \delta; \frac{l_i}{l_j}$ α_i	$k_{\rho}; k_{\gamma}; k_l;$ $k_s = k_{\gamma};$ $k_g = k_{\rho} = 1$ $k_{\varphi} = k_{\delta} = 1$	$\sigma_M = \frac{\sigma_H}{k_{\rho} k_l^2}$
3	Силы струк- турного сцеп- ления, вяз- кости и веса	$\frac{\gamma v}{\sigma l} \quad \frac{\rho g l}{\sigma} \quad \frac{\gamma l}{\sigma};$ $\frac{c_{\omega}}{\sigma}; \frac{E}{\sigma} \quad \frac{l_i}{l_j}$ $\varphi;$	$k_s \quad k_{\gamma}; k_l;$ $k_s = k_{\gamma};$ $k_{\varphi} = k_g = 1$ $k_{\varphi} = k_{\delta} = 1$	$\sigma_M = \frac{\sigma_H}{k_{\rho} k_g k_l}$
4	Силы струк- турного сцеп- ления, вяз- кости, инер- ции и веса	$\frac{\gamma v}{\sigma l} \quad \frac{\rho g l}{\sigma};$ $\frac{\rho v^2}{\sigma}; \frac{c_{\omega}}{\sigma}; \frac{E}{\sigma};$ $\varphi; \delta; \frac{l_i}{l_j}; \alpha_i$	$k_s; k_{\gamma}; k_l;$ $k_g = k_{\varphi} = 1;$ $k_{\varphi} = k_{\delta} = 1$	$\sigma_M = \frac{\sigma_H}{k_{\rho} k_g k_l}$
5	Силы инер- ции и веса	$\frac{v^2}{g l}; \varphi; \delta; \frac{l_i}{l_j};$ α_i	$k_g; k_l;$ $k_{\varphi} \quad k_{\delta} = 1$	—

лирования и параметры модели

Линейные размеры, углы, скорость, время	Силы сопротивлений	Удельные давления (ходовой системы на грунт и др.)	Допустимые вариации параметров и ограничения по масштабу линейных размеров модели
$l_M = \frac{l_H}{k_l}$ $\alpha_M = \alpha_H$ $v_M = \frac{v_H}{k_l};$ $t_M = t_H$	$P_M = \frac{P_H}{k_z k_l^2};$	$q_M = \frac{q_H}{k_l}$	<p>По сцеплению $c_{\omega M}$</p> $0 < c_{\omega M} < 0,4 \gamma_{Г} \frac{B_H}{k_l}$ <p>По числу ударов $C_{уд. м}$</p> $0 < C_{уд. м} < 0,003 \gamma_{Г} \frac{B_H}{k_l}$ <p>(для ударника с площадью наконечника $F=10F_0$)</p>
	$P_M = \frac{P_H}{k_l^2}$	$q_M = q_H$	<p>По углу внутреннего трения φ</p> $0,92 \varphi_H \leq \varphi_M < 1,08 \varphi_H$ <p>По объемному весу $\gamma_{Г}$</p> $0,8 \gamma_{Г. н} \leq \gamma_{Г. м} < 1,02 \gamma_{Г. н}$
	$P_M = \frac{P_H}{k_p k_g k_l^4}$	$q_M = \frac{q_H}{k_p k_l^2}$	<p>По предельному объему среды (если структурные составляющие не моделируют)</p> $dV \geq 200 d^3,$ <p>по точности прибора, по предельным давлениям</p>
$l_M = \frac{l_H}{k_l};$ $\alpha_M = \alpha_H;$ $v_M = \frac{v_H}{\sqrt{k_g k_l}};$ $t_M = \frac{t_H}{\sqrt{k_g k_l}}$			

ров для общего случая действия сил связано с наибольшими теоретическими и экспериментальными трудностями.

В частном случае, когда моделирующая среда тождественна оригиналу, подобие системы обусловлено соблюдением простейших критериев подобия: E/σ , σ/τ , ρ , δ , c_w/σ .

Это следует из тождественности физико-механических характеристик среды модели и оригинала, так как в обоих случаях исследования ведут в одной и той же среде.

Комплексные критерии подобия, составленные из величин, имеющих разную размерность, не соблюдаются: $\tau/(\gamma_r l)$; $c_w/(\gamma_r l)$; $v^2/(gl)$; $\eta v/(\sigma l)$.

Величина их у модели будет иной, чем у оригинала. Установлено, что в условиях работы ряда машин наиболее важным обстоятельством, определяющим нарушение подобия системы, является несоблюдение критериев подобия $c_w/(\gamma_r l)$; $\sigma/(\gamma_r l)$.

Переход от модели к оригиналу по величинам, определяющим силовые характеристики процесса, может быть в общем случае осуществлен посредством применения принципа суперпозиции при анализе сил, определяющих рассматриваемый процесс. Такой прием базируется на известном положении механики о независимости действия сил.

Правомерность такого подхода к анализу сил, действующих на рабочее оборудование со стороны среды, обусловлено прежде всего практикой применения этого принципа при определении сил сопротивления резанию, рыхлению, копанью и др. [9].

Из рассмотренных уравнений и полученных критериев подобия следует, что изучаемый процесс обусловлен проявлением главным образом действием объемных (массовых) и поверхностных сил. Расчетная схема, приведенная на рис. IV 1, иллюстрирует возможный характер сил разного вида, действующих в подсистемах типа «грунт — режущий элемент».

Общее сопротивление, действующее на инструмент при его взаимодействии со средой, представляют в виде суммы

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4,$$

где P_1 — сопротивление, обусловленное проявлением массовых сил, величина которых пропорциональна кубу линейного размера системы; P_2 — сопротивление, обусловленное действием поверхностных сил, величина которых характеризуется предельными значениями сцепления сдвига, отрыва и пропорциональна квадрату линейных размеров системы; P_3 — сопротивление, являющееся результатом действия сил, пропорциональных единице длины; действует в области лезвия и площадки затупления (рис. IV 1); P_4 — силы, приложенные к системе сосредоточенно (например, сопротивление отдельных включений).

Наличие сил, пропорциональных кубу, квадрату и линейному размеру подсистемы, подтверждается экспериментальными исследованиями. Анализ полученного соотношения с использованием второго следствия из теорем подобия позволяет разработать зависимости перехода от модели к оригиналу по силовым и энергетическим параметрам с компенсацией ошибки на несоблюдение соответствующих критериев

подобия. Важным ограничением использования этого метода является требование сохранения качественного подобия процесса при нарушении в некоторых пределах величин определяющих критериев подобия.

Рассмотрим процесс движения твердого тела в жесткопластической вязкой среде. Сопротивление движению можно представить в виде

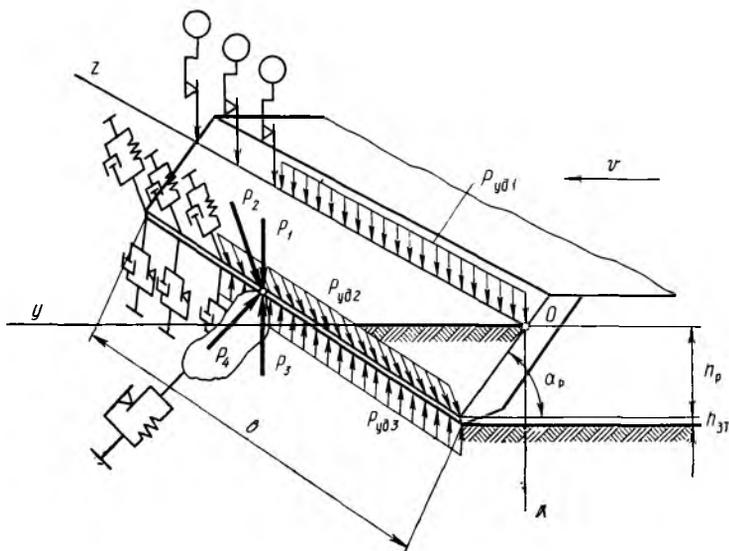


Рис. IV.1. Схема, моделирующая характер действующих при резании грунта сил

механической модели, состоящей из набора простейших реологических моделей.

Соответствующие сопротивления P_1 , P_2 , P_3 и P_4 определяются выражениями:

$$\bar{P}_1 \simeq \bar{\gamma} l_x l_y l_z \operatorname{tg} \rho; \quad \bar{P}_2 \simeq \bar{c}_\omega l_x l_y + \eta \frac{d\bar{v}_y}{dl_x} l_x l_z; \quad \bar{P}_3 \simeq \bar{c}_\omega l_x l_z;$$

$$\bar{P}_4 \simeq \bar{c}_\omega l_x l_z,$$

При моделировании инструмента линейные размеры l_x , l_y , l_z изменяются пропорционально масштабу. Размер l_{x1} , характеризующий площадку затупления, практически остается без изменения, так как определяется технологией изготовления лезвия, которая тождественна оригиналу. Величина l_{z1} тоже не изменяется, так как определяется размерами тела, находящегося в среде, а параметры среды по условию задачи остаются без изменения.

Сопротивление движению можно представить в виде следующей суммы:

$$\bar{P} \cong \bar{\gamma} l^3 \operatorname{tg} \rho + \bar{c}_\omega l^2 + \eta \frac{d\bar{v}}{dl} l^2 + \bar{c}_\omega l l_{x1} + \bar{c}_\omega l_x l_{z1}.$$

Отношение между силовыми параметрами оригинала и модели представляют в виде

$$P_H = P_M k_p,$$

где k_p — масштабный коэффициент перехода от модели к оригиналу.

Величину k_p определяют, как было рассмотрено ранее, через масштабный коэффициент линейных размеров системы при соответственном изменении физико-механических параметров среды, таких, как c_{ω} , γ и др. Последнее возможно на базе применения эквивалентных материалов.

Искомое расчетное значение коэффициента k_p может быть получено на основании анализа математических моделей с различной степенью приближения описывающих механизмов изучаемого явления.

Для упрощения принимаем $\overline{P_4} = 0$, что для рассматриваемой зависимости соответствует $l_{z_1} = 0$.

Приведенное уравнение позволяет записать соотношение P_H/P_M в следующем виде:

$$\frac{P_H}{P_M} \approx \frac{\gamma_H l_H^3 \operatorname{tg} \rho_H + l_H^2 \left(c_{\omega H} + \gamma_H \frac{dv_H}{dl_H} \right) + c_{\omega H} l_H l_{x_1 H}}{\gamma_M l_M^3 \operatorname{tg} \rho_M + l_M^2 \left(c_{\omega M} + \gamma_M \frac{dv_M}{dl_M} \right) + c_{\omega M} l_M l_{x_1 M}}.$$

Выражаем параметры оригинала через параметры модели и соответствующие масштабные коэффициенты:

$$l_H = l_M k_l; \quad \gamma_H = \gamma_M k_\gamma; \quad \operatorname{tg} \rho_H = \operatorname{tg} \rho_M k_\rho;$$

$$c_{\omega H} = c_{\omega M} k_c; \quad \gamma_H = \eta_M k_\gamma; \quad v_H = v_M k_v;$$

$$l_{x_1 H} = l_{x_1 M} k_{l_{x_1}}$$

По условию задачи величина площадки затупления модели равна оригиналу $k_{l_{x_1}} = 1$ (рис. IV 1).

После преобразования выражение может быть приведено к виду

$$P_H = P_M k_l^3 k_1,$$

где P_M — величина, устанавливаемая при моделировании; k_l — масштабный коэффициент линейных размеров модели.

Значение k_l можно определить также по информации о величинах объемов среды, перемещаемых оригиналом q_H и моделью q_M :

$$k_l = \sqrt[3]{q_H/q_M}$$

Величина k_1 определяется на основании количественного и качественного анализа физических и механических свойств среды модели и оригинала.

Для рассматриваемого случая значение k_1 рассчитывается по формуле

$$k_l = \frac{\gamma_M l_M^3 \operatorname{tg} \rho_M k_\gamma k_\rho + \frac{l_M^2 \left(c_{\omega M} k_{c_{\omega M}} + \gamma_M \frac{dv_M}{dl_M} k_\gamma \frac{k_v}{k_l} \right)}{k_l} + \frac{c_{\omega M} k_{c_{\omega M}} l_M l_{x_1 M}}{k_l^2}}{\gamma_M l_M^3 \operatorname{tg} \rho_M + \left(c_{\omega M} + \gamma_M \frac{dv_M}{dl_M} \right) l_M^2 + c_{\omega M} l_M l_{x_1 M}}$$

Важно подчеркнуть, что полученное соотношение базируется на соблюдении основного положения теории подобия о качественной тождественности уравнений модели и оригинала. Нарушение условий количественного соответствия вследствие несоблюдения критериев подобия компенсируется введением поправки через соответствующие масштабные коэффициенты.

В зависимости от характера действующих сил и степеней их доминирования появляются варианты упрощенных расчетных зависимостей.

Отсутствие сил вязкого сопротивления, когда $\gamma_l \frac{dv}{dl} \simeq 0$, приводит к следующей зависимости:

$$P_H = P_M k_l^3 \frac{\gamma_M l_M^3 \operatorname{tg} \rho_M k_\gamma k_\rho + \frac{c_{\omega M} l_M^2 k_{c_{\omega M}}}{k_l} + \frac{c_{\omega M} k_{c_{\omega M}} l_M l_{x_1 M}}{k_l^2}}{\gamma_M l_M^3 \operatorname{tg} \rho_M + c_{\omega M} l_M^2 + c_{\omega M} l_M l_{x_1 M}}$$

Если среда не моделируется, то $k_\gamma = 1$; $k_\rho = 1$; $k_{c_{\omega M}} = 1$.

Можно указать на один из факторов, накладывающих ограничение на величину линейных размеров инструмента при моделировании с использованием эквивалентных материалов. В последнем случае в соответствии с критерием $c_{\omega M}/(\gamma l)$ величина $k_{c_{\omega M}} = k_l$, откуда $c_{\omega M} = c_{\omega H}/k_l$. При $\gamma_H = \gamma_M$ и $\rho_H = \rho_M$, когда среду не изменяют, имеем:

$$P_H = P_M k_l^3 \frac{\gamma_H l_H^3 \operatorname{tg} \rho_H + \frac{c_{\omega H} l_H^2}{k_l} + \frac{c_{\omega H} l_{x_1 H} l_H}{k_l^2}}{\gamma_H l_H^3 \operatorname{tg} \rho_H + \frac{c_{\omega H} l_H^2}{k_l} + \frac{c_{\omega H} l_{x_1 H} l_H}{k_l}}$$

Анализ показывает, что ошибка при моделировании изменяется с уменьшением линейных размеров модели за счет третьего члена, характеризующего затупление, так как масштаб площадки затупления $k_{l_{x_1}} = 1$. Для абсолютно острого лезвия или при $k_{l_{x_1}} = k_l$ зависимость принимает вид

$$P_H = P_M k_l^3.$$

Анализ полученных зависимостей показывает, что ограничение на уменьшение линейного размера инструмента следует прежде всего из нарушения геометрического подобия системы в части несоблюдения масштаба площадки затупления по высоте площадки $l_{x_1 H} \simeq l_{x_1 M}$. При $\gamma l^3 c_{\omega} l^2 k_{c_{\omega}} = 1$; $P_H = P_M k_l^2$.

Отличительной особенностью метода, используемого в зарубеж-

ной практике, по сравнению с рассмотренным является структура формул перехода от силовых параметров, зафиксированных на модели, к параметрам оригинала.

Формулы перехода формируются с учетом различия характера действующих на систему со стороны грунта сил сопротивления. Силы отделения грунта от массива (силы когезии) и сцепления грунта со стальной поверхностью ковша (силы адгезии) пропорциональны квадрату обобщенного линейного размера системы. Эта система сил именуется *двухмерной системой*. Силы сопротивления перемещению призма волочения перед инструментом (ковшом) и силы веса стружки грунта и грунта в ковше представляют силы, пропорциональные кубу линейного размера. Эту систему сил называют *трехмерной системой*.

Переход от модели к оригиналу осуществляют на базе рассмотренного принципа и анализа схемы сил, действующих на моделируемую и моделирующую системы.

Масштабный коэффициент линейных размеров системы обозначают так: $k_l = h_n/h_m = D_n/D_m = L_n/L_m$.

Силы сопротивления для двухмерной системы рассчитывают для модели следующим образом:

$$(P_{2н}) W_{Fм} = b_m h_m c_{км} + D_m L_m c_{ам},$$

где b_m — ширина модели; h_m — длина поверхности скола как функция глубины копания; $c_{км}$ — сцепление грунта с грунтом в канале (удельное сопротивление когезии); D_m — эквивалентная глубина боковых элементов ковша, трущихся о грунт и подвергающихся адгезии; L_m — эквивалентная длина боковой стенки ковша, подвергающаяся адгезии; $c_{ам}$ — сцепление грунта со сталью в канале (удельные сопротивления адгезии).

В соответствии с пропорциональностью этой системы величине k_l^2 для оригинала величину $W_{Fм}$ умножают на квадрат k_l :

$$(P_{2н}) W_{Fн} = k_l^2 (b_m h_m c_{км} + D_m L_m c_{ам}) \cdot$$

Силу сопротивления трехмерной системы определяют как разность между суммарной силой сопротивления копанию, зафиксированной при испытании модели $W_{\Sigma м}$, и силой двухмерной системы:

$$(P_{1н}) W_{Vн} = k_l^3 [W_{\Sigma м} - (b_m h_m c_{км} + D_m L_m c_{ам})].$$

Возможная разница между плотностью и углами трения грунта в канале и моделируемого грунта требует введения в полученное выражение поправочных коэффициентов в виде масштабов соответствующих величин:

$$(P_{1н}) W_{Vн} = k_l^3 (W_{\Sigma м} - W_{Fм}) \frac{\gamma_n \operatorname{tg} \rho_n}{\gamma_m \operatorname{tg} \rho_m},$$

где γ_n , γ_m — плотность грунта оригинала и модели; ρ_n , ρ_m — угол внутреннего трения грунта оригинала и модели.

Результирующая сила сопротивления копанию

$$(P_{1н}) W_{\Sigma н} = W_{Fн} + W_{Vн}$$

или

$$(P_H)W_{\Sigma H} = k_l^2 (b_M h_M c_{KM} + D_M L_M c_{aM}) + k_l^3 (W_{\Sigma M} - W_{FM}) \frac{\gamma_H \operatorname{tg} \rho_H}{\gamma_M \operatorname{tg} \rho_M}.$$

Силы сопротивления качению для скрепера определяются по формуле

$$(P_{fH})W_{fH} = k_l^3 \left(\frac{G_{c.H}}{k_l^3} + G_{гр.м} \right) f_H,$$

где $G_{c.H}$ — чистый вес агрегата (скрепера) в натуре; $G_{гр.м}$ — вес грунта в ковше модели; f_H — коэффициент сопротивления перекачиванию в оригинале.

Общее сопротивление при копании для оригинала определяется по измерениям, сделанным при моделировании на основании следующей формулы:

$$(P_H)W_H = (P_{2H})W_{FH} + (P_{1H})W_{VH} + (P_{fH})W_{fH}.$$

Рекомендуемая зависимость дает достаточно точные результаты при $k_l \leq 6$, т. е. с уменьшением не более чем в шесть раз по отношению к оригиналу. Трудность представляет получение достоверных значений c_{KM} и c_{aM} , нет четких рекомендаций по определению величин h_M , D_M , L_M . Для аналогичного варианта рассмотренные выше положения дают более простую зависимость.

Для результирующей силы сопротивления копанию при l_{x_1}

$$P_H = P_M k_l^3 \left(\frac{\gamma_M l_M^3 \operatorname{tg} \rho_M k_p k_\gamma + c_{\omega M} l_M^2 \frac{k_{c\omega}}{k_l} + \frac{c_{\omega M} k_{c\omega} l_M l_{x_1 M}}{k_l^2}}{\gamma_M l_M^3 \operatorname{tg} \rho_M + c_{\omega M} l_M^2 + c_{\omega M} l_M l_{x_1 M}} \right).$$

Общая сила сопротивления копанию с учетом сопротивления качению

$$P_{H\Sigma} = P_H + k_l^3 \left(\frac{G_{0H}}{k_l^3} + G_{гр.м} \right) f_H.$$

Величина l_M является обобщенным линейным размером и определяется по предполагаемой емкости ковша оригинала:

$$l_M = \sqrt[3]{q_H} k_l^{-1}$$

Предлагаемая формула при линейном масштабе $k_l \leq 10 \div 12$ дает погрешность, не превышающую 15—25%. Зависимость $(P_H)W_H$ дает относительно большую погрешность, что является следствием учета в формулах перехода только двух видов сил: пропорциональных кубу и квадрату линейного размера инструмента. Силы, пропорциональные линейному размеру и не зависящие от линейного размера, в формулах перехода от модели к оригиналу не приняты во внимание. Стремление ограничить ошибку привело к ограничению применения такого типа формул до линейных масштабов не менее $(1/5) \div (1/6)$.

Формула с учетом рассмотренного вида сил дает возможность уменьшить погрешность и рекомендовать ее применение для линейных масштабов $(1/10) \div (1/15)$.

Выбор теоретической модели для определения коэффициента перехода от модели к оригиналу при нарушении критериев подобия является важным этапом моделирования без изменения свойств среды и связан с реализацией второго следствия, вытекающего из основных теорем подобия и дополнительных положений. Рассмотренный метод моделирования и прием перехода от параметров модели к оригиналу является приближенным, что вытекает из основных положений теории подобия. Надежность прогнозирования на реальные условия протекания процесса повышается при соблюдении следующих основных положений: 1) теоретическая гипотеза, составляющая основу математического описания процесса, на базе которой рассчитывается компенсационный коэффициент, качественно должна как можно полнее соответствовать механизму изучаемого процесса. Это следует из первой теоремы подобия. Подобные процессы должны описываться одинаковой системой уравнений; 2) параметры, определяющие в теоретической модели напряженно-деформативные свойства среды, должны быть независимыми от линейных размеров системы.

Если последнее положение нарушается, то определение коэффициентов компенсации через посредство таких простейших моделей дает приемлемую относительную погрешность не более 15—20% в ограниченном диапазоне изменения линейного масштаба моделирования. Предельное значение масштабного коэффициента при оптимальной гипотезе и моделировании процессов взаимодействия со средой не должно превышать $k_l = 5 \div 12$ в зависимости от физико-механических свойств среды и методов воздействия на последнюю.

§ IV.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ РАЗНОГО МАСШТАБА

Рассмотрение системы уравнений и полученных критериев подобия приводит к выводу, что изучаемые процессы обусловлены проявлением главным образом объемных и поверхностных сил. В первом приближении некоторая составляющая по одной из осей координат общего сопротивления при механическом воздействии на среду может быть представлена в виде некоторой условной зависимости

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4,$$

где P_1 — сопротивление, обусловленное действием объемных сил среды; P_2 — сопротивление, обусловленное действием поверхностных сил среды (силы сцепления, сдвига, отрыва, смятия и др.); P_3 — сопротивление, являющееся результатом действия сил, пропорциональных длине; P_4 — сосредоточенные силы (сопротивление отдельных включений с размерами, которые не изменяются с изменением линейных размеров инструмента и прочность которых иная, чем прочность окружающей среды).

Установлено, что сила P_3 проявляется в зоне лезвия и доминирует при внедрении рабочего оборудования в среду. Значение и характер действия силы P_3 в условиях взаимодействия со средой окончательно не выяснены. Возможность проявления сил, пропорциональных длине, подтверждается экспериментами по резанию грунта тонкими стружками различной длины.

Следует ожидать, что силы P_4 и их проявления носят вероятностный характер. Влияние этих сил сказывается, например, при воздействии на среду с отдельными макроскопическими включениями, а также при работе с оборудованием, линейные размеры которого сопоставимы с размерами отдельных включений. Последнее может также наблюдаться при значительном уменьшении линейных размеров модели оборудования. При резании однородной среды силы P_4 можно не принимать во внимание.

В данном случае значение коэффициента перехода от модели к оригиналу или соответствующий масштаб сил так же, как и при физическом моделировании, может быть связано с величиной, характеризующей изменение линейных размеров элементов оборудования. Это следует из соблюдения основных условий геометрического подобия и характера изменения при моделировании различных сил, рассмотренных выше.

Для модели можно записать:

$$P_M = \rho_{уд1} l_M^3 + \rho_{уд2} l_M^2 + \rho_{уд3} l_M + P_{4M}.$$

Для оригинала это выражение представляют в виде следующего соотношения:

$$P_H = \rho_{уд1} l_H^3 + \rho_{уд2} l_H^2 + \rho_{уд3} l_H + P_{4H}.$$

Из рассмотренных выше положений $P_{4H} = P_{4M}$; $l_H = k_l l_M$ имеем:

$$P_H = \rho_{уд1} l_M^3 k_l^3 + \rho_{уд2} l_M^2 k_l^2 + \rho_{уд3} k_l l_M + P_{4M}.$$

Полученные выражения можно записать следующим образом:

$$P_M = P_{1M} + P_{2M} + P_{3M} + P_{4M};$$

$$P_H = P_{1M} k_l^3 + P_{2M} k_l^2 + P_{3M} k_l + P_{4M},$$

откуда следует, что результирующая сопротивления и другие зависящие от нее параметры для оригинала могут быть установлены по соответствующим параметрам модели и известному значению коэффициента уменьшения линейных размеров рабочего оборудования.

Основным в методике моделирования в этом случае является определение для модели составляющих P_{1M} , P_{2M} , P_{3M} , P_{4M} . Аналитическое определение их затруднительно и в настоящее время может быть выполнено приближенно. Трудно также учесть взаимное влияние составляющих друг на друга. Метод экспериментального определения искомых сил следует считать наиболее целесообразным. В этом случае можно определить не только отдельные составляющие, но и учесть их возможное влияние друг на друга.

При определении сил $P_{1M}, P_{2M}, P_{3M}, P_{4M}$ можно воспользоваться методом испытания моделей различного масштаба. Для моделей с определяющим линейным размером $l_{M1} > l_M$ значение усилия может быть для модели определено следующим образом:

$$P'_M = P_{1M}k_{l1}^3 + P_{2M}k_{l1}^2 + P_{3M}k_{l1} + P_{4M}.$$

Аналогичным образом могут быть получены уравнения при экспериментах с моделями, которые имеют линейные размеры l_2 и l_3 и подчиняются условию $l_M < l_{M1} < l_{M2} < l_{M3}$. Получаем систему из четырех уравнений, имеющую четыре неизвестных:

$$\begin{aligned} P_{1M} + P_{2M} + P_{3M} + P_{4M} &= P_M, \\ P_{1M}k_{l1}^3 + P_{2M}k_{l1}^2 + P_{3M}k_{l1} + P_{4M} &= P'_M, \\ P_{1M}k_{l2}^3 + P_{2M}k_{l2}^2 + P_{3M}k_{l2} + P_{4M} &= P''_M, \\ P_{1M}k_{l3}^3 + P_{2M}k_{l3}^2 + P_{3M}k_{l3} + P_{4M} &= P'''_M \end{aligned}$$

В матричной форме имеем

$$AP = P_M,$$

где A — матрица коэффициентов k_{l1}, k_{l2}, k_{l3} при неизвестных P_{1M}, P_{2M}, P_{3M} и P_{4M} ; P — столбец из неизвестных $P_{1M}, P_{2M}, P_{3M}, P_{4M}$; P_M — столбец свободных членов P_M, P'_M, P''_M, P'''_M .

Значения P_M, P'_M, P''_M, P'''_M определяют при экспериментах с четырьмя моделями разного масштаба и $l_M < l_{M1} < l_{M2} < l_{M3}$.

При $P_{4M} = 0$; $k_{l1} < k_{l2}$; $l_{M1} < l_{M2} < l_{M3}$

$$P_{1M} = \frac{P_M k_{l1} k_{l2} (k_{l1} - k_{l2}) + P'_M k_{l1} (1 - k_{l1}) + P'_M k_{l2} (k_{l2} - 1)}{k_{l1} k_{l2} [k_{l1} - k_{l2} + k_{l2}^2 (1 - k_{l1}) + k_{l1}^2 (k_{l2} - 1)]};$$

$$P_{2M} = \frac{P'_M k_{l2} (1 - k_{l2}^2) + P_M k_{l1} k_{l2} (k_{l2}^2 - k_{l1}^2) + P'_M k_{l1} (k_{l1}^2 - 1)}{k_{l1} k_{l2} [k_{l1} - k_{l2} + k_{l2}^2 (1 - k_{l1}) + k_{l1}^2 (k_{l2} - 1)]};$$

$$P_{3M} = \frac{P''_M k_{l1}^2 (1 - k_{l1}) + k_{l2}^2 [P'_M (k_{l2} - 1) + P k_{l1}^2 (k_{l1} - k_{l2})]}{k_{l1} k_{l2} [k_{l1} - k_{l2} + k_{l2}^2 (1 - k_{l1}) + k_{l1}^2 (k_{l2} - 1)]}$$

В некоторых случаях, пренебрегая значениями P_{1M} или P_{3M} , можно ограничиться опытами с двумя моделями без существенного изменения точности экспериментов.

При $P_{1M} > P_{3M} < P_{2M}$

$$P_{1M} = \frac{P_M k_{l1}^2 - P'_M}{k_{l1}^2 (1 - k_{l1})}; \quad P_{2M} = \frac{P'_M - P_M k_{l1}^3}{k_{l1}^2 (1 - k_{l1})}.$$

При $P_{2M} > P_{1M} < P_{3M}$ (рыхление твердых пород)

$$P_{2M} = \frac{P'_M - P_M k_{l1}}{k_{l1} (k_{l1} - 1)}; \quad P_{3M} = \frac{P'_M - P_M k_{l2}^2}{k_{l1} (1 - k_{l1})}.$$

В исходной системе уравнений в первом случае принято $P_{3M} = 0$, $P_M'' = 0$; во втором случае $P_{1M} = 0$, $P_M = 0$. Значения P_M , P_M' и P_M'' представляют горизонтальные составляющие сопротивления резанию для моделей с линейными размерами l_M , l_{M1} , l_{M2} .

Так как значения P_M , P_M' и P_M'' (а в общем случае и P_M''') являются результирующими и определяются экспериментально, то обеспечивается регистрация этих сил с учетом взаимного влияния друг на друга каждой из составляющих результирующей силы.

Наиболее трудно по предлагаемой методике определить значение P_{1M} , P_{2M} , P_{3M} , P_{4M} . В том случае, если они найдены (например, по предлагаемому методу экспериментов с моделями разного масштаба), то определение параметров оригинала по модели не вызывает существенных трудностей. Для определения сопротивления имеем:

$$P_H = P_{1M}k_l^3 + P_{2M}k_l^2 + P_{3M}k_l + P_{4M}.$$

Аналогично можно найти подобные выражения и для составляющих. Например, горизонтальная составляющая может быть установлена по формуле

$$P_{гн} = (P_{1M})_г k_l^3 + (P_{2M})_г k_l^2 + (P_{3M})_г k_l + (P_{4M})_г.$$

В приведенных зависимостях составляющие P_{1M} , P_{2M} , P_{3M} и P_{4M} определяют на моделях по соответствующим замерам для каждой проекции силы — горизонтальной, вертикальной и боковой.

Соотношения между скоростями модели и оригинала при неустановившемся режиме определяются по следующей зависимости:

$$v_M = v_H \frac{k_l}{\sqrt{k_p}},$$

где k_p — определяет масштаб сил системы;

$$k_p = P_H/P_M \text{ или } k_p = \frac{P_{1M}k_l^3 + P_{2M}k_l^2 + P_{3M}k_l + P_{4M}}{P_M}.$$

Полученные соотношения позволяют определить остальные характеристики процесса для оригинала по соответствующим параметрам модели.

Так, мощность

$$N_H = (P_{1M}k_l^3 + P_{2M}k_l^2 + P_{3M}k_l + P_{4M}) v_M \sqrt{k_p / k_l^2}$$

Как следует из сопоставления их с данными экспериментальных исследований, полученные формулы соответствуют зависимостям, получаемым при изучении процессов резания грунтов моделями рабочих органов различного масштаба. Зависимости справедливы при геометрическом подобии системы, когда соответствующие стороны системы пропорциональны, а углы равны. В ряде случаев могут возник-

нать задачи, связанные с моделированием систем, когда линейные размеры модели по трем измерениям имеют разные масштабы. Это наиболее общий случай моделирования без изменения прочностных свойств. Отработка методики и экспериментальное обоснование моделирования при различных масштабах по трем измерениям системы требуют специальных исследований.

Приведенные выше соотношения для перехода от модели к оригиналу, особенно для случая, когда $P_{4м} \neq 0$, сложны по структуре. Упрощенные зависимости для величин, имеющих размерность силы, для оригинала и модели могут быть записаны следующим образом:

$$P_n = P_m k_l^n.$$

Значение k_l известно и определяется масштабом геометрической модели. Показатель степени n подлежит определению. Выражая сопротивление копанию для оригинала P_n через параметры модели, можно записать:

$$k_l^3 (P_{01} + P_{02} k_l^{-1} + P_{03} k_l^{-2})_м = P_m k_l^n,$$

где $P_m = P_{1м} + P_{2м} + P_{3м}$; $P_{1м}$, $P_{2м}$, $P_{3м}$ — силы сопротивления различного вида, действующие на модель рабочего оборудования при моделировании без изменения прочностных свойств среды, когда последние отличны от оригинала, откуда получаем:

$$n = \lg \left[\frac{k_l^3 (P_{01} + P_{02} k_l^{-1} + P_{03} k_l^{-2})_м}{P_m} \right] (\lg k_l)^{-1},$$

где $P_{01м}$, $P_{02м}$, $P_{03м}$ — силы сопротивления различного вида, действующие на модель рабочего оборудования в среде оригинала.

Составляющие сопротивления P_1 , P_2 и P_3 могут быть установлены: 1) методом последовательного определения сил при испытании модели оборудования; 2) методом испытания моделей различного масштаба по формулам, рассмотренным выше.

Значение показателя n зависит от характера действующих сил, которые определяют механизм разрушения грунта на различных этапах внедрения рабочего оборудования в грунт, формы и размеров рабочего оборудования, характера воздействия оборудования на грунт, а также физико-механических свойств и состояния грунта. Показатель n зависит также и от коэффициента k_l .

Из анализа характера изменения показателя степени n в зависимости от k_l и действующих сил следует, что при наличии вероятностной составляющей $P_{4м}$ в общем случае показатель степени может изменяться в пределах $3 \geq n \geq 0$. Если доминирует сила P_1 , то $n \rightarrow 3$, если доминирует сила P_2 , то $n \rightarrow 2$, и если доминирует составляющая P_3 , то показатель $n \rightarrow 0$.

В ряде случаев показатель n можно в первом приближении определить аналитически. Это важно для предварительного определения масштабного коэффициента и скорости резания.

Границы применения методов физического моделирования с изменением свойств среды и без изменения этих свойств определяются:

1) задачами исследований; 2) возможностью проведения испытаний в среде с соответствующими прочностными показателями; 3) возможностью изготовления моделей различного масштаба; 4) режимами изучаемого процесса.

Моделирование с изменением прочностных свойств грунта целесообразно использовать при обработке и сопоставлении рабочего оборудования различного типа и конструктивного выполнения при работе его в условной усредненной (стандартной) среде, например тяжелом суглинке. В этом случае возможна вариация параметров, соответствующих оригиналу. Характеристики модели можно определить по одному показателю c_w , что не сопряжено с большими трудностями. Необходимо только, чтобы при уменьшении сцепления модели среды, например за счет неуплотнения, такие параметры, как γ_r , ρ и др., не выходили за пределы разброса, имеющего место для оригинала.

Данный вид моделирования позволяет исследовать как установившиеся, так и неустойчивые режимы рабочего процесса. Каждую из моделей в этом случае изготавливают в одном экземпляре, что при исследовании сложных моделей существенно упрощает экспериментальные исследования.

Поправки на несоблюдение параметров γ_r , ρ (от ± 10 до $\pm 15\%$) могут быть учтены на основании разработанных формул (см. табл. III. 3). Такая модель может быть изготовлена и в том случае, когда за основу будет взят любой другой параметр оригинала, например E , η , τ и др.

Формирование эмпирических зависимостей. Рассмотренные положения являясь базой для получения эмпирических формул типа $P = Ch^n$, которые получили широкое распространение. Согласно изложенному в таких зависимостях $C = P_M/h_M^n$ (при $0 \leq n \leq 3$). Следовательно, показатель степени при глубине резания изменяется в пределах от 0 до 3 в зависимости от условий эксперимента и характера исследуемого процесса.

Ориентировочное определение коэффициентов степенных зависимостей типа $y = Ax^n$ при моделировании в условиях сохранения качества уравнений, описывающих процесс, может быть выполнено методом испытания двух моделей с разными линейными масштабами по формулам:

$$n = \frac{\lg y_2 - \lg y_1}{\lg \frac{x_2}{x_1}}; \quad A = \frac{y_1}{x_1^n}.$$

Здесь величины y_1 , x_1 и y_2 , x_2 определяются при испытании модели с разными линейными масштабами k_{11} и k_{12} . Физический смысл коэффициентов A и n может быть установлен на основании положений теории подобия.

Методы подобия и положение о независимости сил, действующих на рабочее оборудование дорожно-строительной машины, позволяют рекомендовать метод получения ряда приближенных формул перехода от параметров модели к параметрам оригинала при моделировании без изменения свойств среды с учетом поправки на нарушение соответ-

ствующих критериев подобия. Эти зависимости можно использовать также в качестве приближенных эмпирических формул. Так, соответствующие составляющие сил сопротивления могут быть рассчитаны на основании следующих зависимостей, в основу которых положены результаты исследования с моделями (см. рис. IV. 2).

Например, для разработки грунта ковшами, когда доминируют вес и сила структурного сцепления,

$$P_H = P_M k_l^3 k_1,$$

где

$$P_M = P_{1M} + P_{2M} \frac{1}{k_l}; \quad k_1 = 1 + \frac{P_{3M} k_l^{-2} + P_{4M} k_l^{-3}}{P_{1M} + P_{2M} k_l^{-1}}$$

Из полученного соотношения следует необходимость изменения прочностных свойств среды при моделировании. При $k_1 = 1$ и $\gamma_H = \gamma_M$ из равенства $P_{2M} k_l^{-1} = P_{2M}'$ следует, что если для грунта имеют место соотношения $P_{2M} = c_{\omega M} l_M^2$ и $P_{2M}' = c_{\omega M}' l_M^2$, то полученное выражение для P_M будет справедливо при $c_{\omega M} = c_{\omega M}' / k_l$ и его можно записать

$$P_M = P_{1M} + P_{2M}'.$$

Соблюдение последнего равенства возможно при моделировании эквивалентными материалами.

Для режущего и разрыхляющего инструментов (ножи, зубья и др.), когда вес не имеет доминирующего значения,

$$P_H = P_M k_l^2 k_2,$$

где $P_M = P_{2M} + P_{3M} k_l^{-1}$ $k_2 = 1 + \frac{P_{1M} k_l + P_{4M} k_l^{-2}}{P_{2M} + P_{3M} k_l^{-1}}.$

При работе с лезвиями и периметрами

$$P_H = P_M k_l k_3,$$

где $P_M = P_{2M} k_l + P_{3M}; \quad k_3 = 1 + \frac{P_{1M} k_l^2 + P_{4M} k_l^{-1}}{P_{2M} k_l + P_{3M}}$

Здесь и выше коэффициенты k_1, k_2, k_3 зависят от несоблюдения ряда критериев подобия и их следует рассматривать как величины, учитывающие проявление масштабного эффекта.

Значения P_{1M}, P_{2M}, P_{3M} определяют, как указано выше, методом испытания системы моделей. Для ориентировочной оценки искомой величины расчет P_{1M}, P_{2M} и т. д. можно выполнить приближенно. Так, для определения тягового усилия тягача по данным, полученным на модели в предположении действия в области контакта сил трения и сцепления с учетом ограничения по $p_{уд}$ и $F_{доп}$, имеем

$$T_H \approx \left(G_M f + \frac{z c_m b_M L_M}{k_l} \right) k_l^3,$$

где G_M — сцепной вес модели системы; f — коэффициент трения; z — количество контактирующих опорных поверхностей; c — сцепление между частицами грунта; b_M — ширина опоры; L_M — длина опоры.

Переход от модели к оригиналу по величине сопротивления, если модель для определения P_M испытана в среде, отличающейся от оригинала по обобщенному показателю прочности, а геометрическое подобие системы сохраняется, в первом приближении можно осуществить по формуле

$$P_{II} = P_M k_{c0} k_l^n,$$

где P_M — составляющая сила сопротивления для модели в грунте, основные свойства которого отличаются от основных свойств оригинала; k_{c0} — масштаб обобщенного показателя прочности, например числа ударов динамического плотномера.

Для грунтов при P_M , P_{IM} , P обобщающем показателе C_Y $\gamma \approx \alpha_\gamma C_{Yд}$ и $c_0 \approx \alpha_c C_Y$; имеем:

$$P_{M,II} = P_M I \frac{C_{Yд,II} \left(1 - \frac{\gamma_{II} L_M}{z_{c,II}} \right)}{C_{Yд,I} \left(1 - \frac{\gamma_I L_M}{z_I} \right)}$$

где $P_{M,II}$ — составляющие сопротивления грунтов, имеющие значения обобщенного показателя прочности; $\alpha_{c\gamma}$ — сцепные коэффициенты, определяющие характер связей c_0 с обобщенным показателем прочности $C_{Yд}$.

Следовательно, для изучения процессов разрушения формулы $P_{II} = P_M k_{C_{Yд}} k_l^n$ возможно при ограничениях: либо в условиях доминирования сцепления $\alpha_{\gamma I} L_M \leq \alpha_{c0 I}$; $\alpha_{\gamma II} L_M > \alpha_{c0 II}$ либо при ствующих эмпирических коэффициентов $\alpha_{\gamma I}$ и $\alpha_{c0 I}$ прочностные параметры грунта модели характерем C_Y ; 1 , то при $C_{Yд,II} > C_{Yд,I}$; $k_{C_{Yд}}$ полу

$$P_{II} = P_M C_{Yд,II} k_l^n.$$

Ошибка приближенного расчета определений связей между частными параметрами иными показателями.

Связь между методами приближенного ренными выше, методом с компенсационным на базе анализа гипотетических масштабов, и методом испытания моделей раподобия математических зависимостей, с моделирующей системы (модели) к моделирующей зависимости определяются, например, для процесса соответственно коэффициентами k_p и

При моделировании двумя указанными методами одного и того же процесса имеет место тождество

$$k_p \equiv k_1^n$$

Из этого соотношения логарифмированием определяют величину показателя степени:

$$n = \log k_p / \log k_1.$$

Здесь линейный масштаб модели k_1 — заданная величина. Масштаб величины исследуемого физического эффекта (сил сопротивления и т. п.) k_p определяется на основании анализа математических моделей, принимаемых в качестве исходных гипотез. Последний прием был изложен выше. Это положение является базой для определения показателя степени « n » при формировании приближенных зависимостей, не прибегая к эксперименту с физическими моделями разного масштаба.

§ IV.5. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СО СРЕДОЙ. ОЦЕНКА ОШИБКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОГРАНИЧЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Вероятностные модели процессов взаимодействия рабочих органов со средой представляют интерес применительно к изучению физических характеристик систем, процессов и явлений. Методы физического моделирования при определенных условиях используются для изучения на модели характера нагружения систем, определения показателей их надежности, синтеза объектов при случайных воздействиях и управляющих воздействиях и др. Изучение закономерностей и условий вероятностного подобиya является предметом физической теории подобиya. В работе [8] рассмотрены вопросы подобиya случайных величин. Случайные величины называются стохастически подобными, если для математических ожиданий \bar{x}_M выполняется условие

$$\bar{x}_M = k_x \bar{x}_M,$$

где k_x — коэффициент подобиya, а для относительно центрированных случайных величин $\tilde{x}_M = \frac{x_M - \bar{x}_M}{\sigma_M}$ имеет место тождество плотности

$$f(\tilde{x}_M) = f_M(\tilde{x}_M)$$

для определения и моментов абсолютных случайных величин выполняются следующие равенства:

$$M(x_M) = k_x f_M(x_M);$$

$$M(x_M) = (x_M) k_x^n$$

где $M(x_M)$ — моменты распределения вероятностей соответствующих величин, а (x_M) — момент n -го порядка значения x_M .

Аналогично определяют подобие многомерных случайных величин.

Для подобия стохастических систем необходимо и достаточно, чтобы имело место подобие при условии соблюдения гипотезы о детерминированно определенных параметрах и соблюдение при этом всех теорем подобия, а также соблюдалось тождество совместных плотностей распределения определяющих критериев подобия систем. Согласно π -теореме уравнение, характеризующее систему, может быть представлено в виде функции определяющих критериев подобия

$$\Pi_k = f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n),$$

где Π_k — определяемый критерий подобия.

Определяющие критерии подобия являются случайными величинами. При этом условием стохастического подобия оригинала и модели является

$$\varphi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_i, \dots, \Pi_n) = \text{idem},$$

где φ — многомерная плотность распределения определяющих критериев подобия Π_1, Π_2 и др.

Это условие следует из анализа выражения момента n -го порядка случайной величины Π_k в следующем виде:

$$\mu_n[\Pi_k]_{-\infty}^{+\infty} = \int (n)_{-\infty}^{+\infty} \int [f(\Pi_1, \dots, \Pi_n)]^n \varphi(\Pi_1, \dots, \Pi_n) \times d\Pi_1, \dots, d\Pi_n.$$

Из рассмотренного следует тождество соответствующих моментов случайных величин Π_k для модели и оригинала:

$$\mu_n[\Pi_k] = \text{idem}.$$

В том случае, если критерии подобия являются независимыми случайными величинами, рассмотренное условие может быть представлено в следующем виде:

$$\varphi(\Pi_1) = \text{idem}; \quad \varphi(\Pi_2) = \text{idem}; \quad \dots \quad \varphi(\Pi_n) = \text{idem}.$$

В приведенных выше выражениях $\varphi[\Pi_i]$ — одномерная плотность распределения.

Условия стохастического подобия систем «среда — рабочее оборудование» устанавливаются для случая, когда значения параметров, определяющих процесс, неодинаковы по всей площади контакта, т. е. когда эти параметры являются случайными величинами не только в направлении движения, но и по площади контакта. Характер нарушения стохастического подобия может быть установлен экспериментально по анализу соответствующих критериев согласия. При условии вероятностного подобия модели и оригинала имеет место тождественность основных стохастических характеристик критериев подобия.

Рассмотрим, например, критерий $c_{\omega} \gamma^{-1} l^{-1}$. Плотность распределения вероятности $f(c_{\omega} \gamma^{-1} l^{-1})$ для критерия как произведения двух независимых случайных величин $f(x, y) = f(x)f(y)$ определяется следующим выражением:

$$f\left(\frac{c_{\omega}}{\gamma l}\right)_M = \frac{1}{2\pi\sigma_{c_{\omega}}\sigma_{\gamma l}} e^{-(t_{c_{\omega}} + t_{\gamma l})}$$

или

$$f\left(\frac{c_{\omega}}{\gamma^l}\right)_m = f\left(\frac{c_{\omega}}{\gamma^l}\right)_n$$

Следовательно, плотности распределения вероятностей критериев подобия резания грунтов для систем, подобных в стохастическом отношении, равны.

Для дисперсии $D(\dot{X}) = \int (X - \bar{X})^2 f(x) dx$ двух независимых случайных величин, составляющих критерий подобия $c_{\omega} \gamma^{-1} l^{-1}$, имеем:

$$D\left(\frac{c_{\omega}}{\gamma^l}\right)_m = D\left(\frac{c_{\omega}}{\gamma^l}\right)_n$$

Отсюда следует, что дисперсии для критериев подобия резания грунтов для систем, подобных в вероятностном отношении, равны.

Средние квадратичные отклонения $\sigma(X) = \sqrt{D(\dot{X})}$ для двух независимых случайных величин, составляющих критерий подобия $c_{\omega} \gamma^{-1} l^{-1}$, определяются на основании выражений для расчета соответствующих дисперсий. Для критериев подобия существуют следующие соотношения между квадратическими отклонениями модели и оригинала:

$$\sigma\left(\frac{c_{\omega}}{\gamma^l}\right)_m = \sigma\left(\frac{c_{\omega}}{\gamma^l}\right)_n$$

Следовательно, средние квадратические отклонения для критериев систем, подобных в вероятностном смысле, равны.

Для зависимых величин, определяющих критерии подобия, стохастическое подобие предопределяет равенство соответствующих коэффициентов корреляции.

Вероятностное подобие системы предполагает наличие соответствующих зависимостей для стохастических характеристик абсолютных размерных величин, определяющих процесс (сопротивление копанию, мощность, удельное сопротивление и др.). Рассмотрим соответствующие соотношения для такого параметра, как сопротивление копанию, определяя его как непрерывную случайную величину. Плотность распределения некоторой абсолютной размерной случайной величины для модели при моделировании можно выразить через параметры оригинала следующим образом:

$$f(X_m) = k \frac{1}{\sigma_{X_n} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X_{ni} - \bar{X}_n)^2}{2\sigma_{X_n}^2}}$$

где X_m , X_n — случайные величины для модели и оригинала; \bar{X}_n — математическое ожидание величины; σ_{X_n} — среднее квадратичное отклонение; k — соответствующий для рассматриваемой величины коэффициент.

Для параметров, определяющих процессы резания, копания и рыхления (сопротивление, мощность, удельное сопротивление), коэффи-

коэффициент k имеет соответственно следующие величины: k_1^3 , $k_1^{3.5}$, k_1 . Следовательно, ордината плотности распределения вероятности (например, сопротивление копанию) для модели в k_1 раз выше ординаты плотности распределения величины P_n для оригинала.

Дисперсии величин P для модели и оригинала

$$D(P_M) = D(P_n) / (k_1^3)^2$$

Отсюда следует, что параметр, характеризующий разбросанность случайной величины P_n , в $(k_1^3)^2$ раза больше параметра разброса случайной величины P_M , или математическое ожидание квадрата отклонения величины P_n от соответствующего математического ожидания \bar{P}_n в $(k_1^3)^2$ раза больше квадрата отклонения величины P_M от математического ожидания \bar{P}_M .

Среднее квадратичное отклонение на основании сказанного определяется следующими соотношениями:

$$\sigma(P_M) = \frac{\sqrt{D(P_n)}}{k_1^3} \quad \text{или} \quad \sigma_{P_M} = \frac{1}{k_1^3} \sigma_{P_n}$$

Последнее позволяет сделать вывод, что среднее квадратичное отклонение величины P_M для модели в k_1^3 раза меньше среднего квадратичного отклонения величины P_n для оригинала.

Относительная погрешность моделирования при вероятностном подобии систем, как характеристика безразмерная, для модели в соответствии с рассмотренными выше положениями остается равной относительной погрешности, имеющей место для оригинала.

Исследования землеройных и землеройно-транспортных машин показывают, что воздействие на рабочее оборудование со стороны грунта носят случайный характер, являются стационарными и протекают статистически однородно во времени.

Влияние структурных свойств материала на колебания измерений. При этом допускается, что закон распределения колебания измерений не меняется при изменении числа структурных элементов, составляющих системы, и, следовательно, не зависит от масштаба модели. В этом случае среднее квадратичное отклонение измерений, причиной которого являются случайные включения и различие в структуре дискретной среды, на основании общих положений теории вероятностей может быть принято обратно пропорциональным корню квадратному из числа параметров, определяющих неоднородность системы [23]:

$$\sigma_n = k_1 \sqrt{n_n},$$

где σ_n — средняя относительная квадратичная ошибка при измерении для оригинала; k_1 — коэффициент, зависящий от свойств элементов среды и степени их взаимного влияния; n'_n — число отдельных элементов, составляющих заданную среду в натуре.

В случае если материал среды и форма поверхности неизменны, независимо от геометрического масштаба модели коэффициент k_1 может считаться величиной постоянной. Если допустить, что строение

материала модели и грунта не зависит от абсолютных размеров системы, то можно считать, что величина n'_n определяется масштабом системы и с увеличением размера модели повышается. Сделанные допущения позволяют предполагать существование следующего соотношения:

$$n'_1 = k_2 k_l^{-\alpha}$$

где k_2 — эмпирический постоянный коэффициент; k_l — масштабный коэффициент системы (величина $k_l = l_n/l_m$ при уменьшении линейных размеров модели увеличивается); α_n — зависит от структурного строения частей, составляющих грунт ($1 \leq \alpha_n \leq 3$).

Если в грунте преобладают составляющие, построенные из линейно-соединенных элементов, $\alpha_n = 1$; если соединение элементов выполнено в плоскости, $\alpha_n = 2$; при пространственной структуре соединения $\alpha_n = 3$. Сказанное позволяет сделать заключение о более высокой статистической сущности модели с малыми размерами. Это непосредственно следует из зависимостей (σ_n) и (n'_1). С уменьшением линейного размера l_m и, следовательно, с увеличением коэффициента k_l число структурных элементов некоторой части системы будет уменьшаться. Поэтому в соответствии с зависимостью (σ_n) средняя квадратичная ошибка будет возрастать.

Для оригинала $k_l = 1$ и, следовательно, среднее квадратичное отклонение

$$\sigma_n = k_{1n} / \sqrt{k_{2n}}$$

Для модели при $k_l > 1$ можно записать:

$$\sigma_m = k_{1m} / \sqrt{k_{2m} k_l^{-\alpha_n}}$$

Принимая во внимание, что коэффициенты k_1 и k_2 не зависят от размеров модели, имеем:

$$\sigma_m = \sigma_n k_l^{\alpha_n/2}$$

Отсюда следует, что с увеличением коэффициента k_l , т. е. с уменьшением линейного размера модели, средняя квадратичная ошибка измерений возрастает по сравнению с ошибкой оригинала в $k_l^{\alpha_n/2}$ раз.

Приведенное соотношение позволяет сделать вывод, что заметные колебания различных свойств среды в природе значительно возрастают при разработке такой среды моделями с меньшими геометрическими размерами. Отсюда следует важный вывод, что если при моделировании ошибка, вызванная этими колебаниями, за счет соответствующей постановки эксперимента стала достаточно мала, то можно утверждать, что для образцов натуральных размеров в аналогичных условиях эта ошибка по крайней мере не будет больше той, которая получена при испытании моделей. Формула для определения σ_m позволяет по средней квадратичной ошибке, установленной на модели, подсчитать соответствующую предполагаемую ошибку оригинала:

$$\sigma_n = \sigma_m k_l^{-\alpha_n/2}$$

Это соотношение может быть полезно и при определении закона распределения параметров для оригинала, если таковой установлен для модели, при этом, однако, следует принимать во внимание условие ограничения размеров модели по предельному объему грунта.

Величина показателя степени α_n при моделировании процесса резания точно не установлена, определены лишь границы ее изменения в пределах от 1 до 3. Для получения более надежного результата при переходе от модели к оригиналу целесообразно в среднем взять $\alpha_n = 2$.

Проявление одновременного влияния структурных свойств грунта и методов измерений на колебания определяющих параметров системы. Случай, когда статистические колебания измерений параметров обусловлены влиянием не только структуры грунта, но и методами измерений исследуемой величины, является более сложным и рассматривается здесь в первом приближении. На основании анализа ошибок двух независимых величин и полагая, что ошибки измерений и ошибки, обусловленные структурой грунта, подчиняются закону нормального распределения, суммарную среднюю квадратичную ошибку эксперимента можно представить в виде следующей зависимости:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2},$$

где σ_1 — среднее квадратичное отклонение измеряемой величины, обусловленное статистическими факторами структуры грунта; σ_2 — среднее квадратичное отклонение, обусловленное принятым методом измерений.

Среднее квадратичное отклонение для модели на основании формул для определения (σ_M) и (σ_{II}) может быть записано в виде

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_{II}^2 k_l^{2n} + \sigma_2^2}$$

откуда формула перехода от отклонений модели к соответствующим отклонениям оригинала записывается следующим образом:

$$\sigma_{III} = k_l^{-2n/2} \sqrt{\sigma_M^2 - \sigma_2^2}$$

Ошибка измерений σ_2 , обусловленная прибором, в данном случае подлежит определению предварительно. Для этой цели используют результаты опытов, выполненных для двух моделей, отличающихся линейным масштабом рабочего оборудования.

В первом приближении можно принять, что величина ошибки прибора σ_2 в формуле для определения σ равна ошибке, обусловленной статистическими свойствами структуры. Тогда общая ошибка системы

$$\sigma_M = \sigma_2 \sqrt{k_l^{2n} + 1}$$

Считая $k_l^{2n} > 1$, что имеет место при достаточно большом уменьшении линейных размеров модели против оригинала, имеем:

$$\sigma_M = \sigma_2 k_l^{2n/2}$$

Если принять в среднем $a_n = 2$, получаем:

$$\sigma_m = \sigma_2 k_l,$$

откуда средняя квадратичная ошибка наблюдения растет пропорционально уменьшению геометрических размеров модели, т. е. возрастает по мере роста коэффициента k_l . Последнее обстоятельство является одной из основных причин, ограничивающих величину масштаба.

Погрешности физического моделирования, связанные с неточностью воспроизведения или несоблюдением некоторых критериев подобия. Подобие явления на физической модели невозможно осуществить с большой степенью точности. Возможные погрешности обусловлены проявлением следующих основных факторов: 1) статистической неоднородностью структуры грунта, которая может проявляться в модели не так, как в оригинале; 2) неточностями, связанными с принятыми методами измерений и приборами; 3) недостаточно точным воспроизведением на физической модели параметров, входящих в критерии подобия; 4) несоблюдением ряда критериев подобия, обусловленным недоучетом некоторых параметров, определяющих протекание процесса взаимодействия рабочего оборудования с грунтом и др. Влияние двух первых факторов было рассмотрено выше.

Рассмотрение вопроса неточности воспроизведения необходимых критериев подобия обычно ограничено определением суммарной неточности осуществления критерия подобия [7]. На основании известного положения, что критерий подобия может быть представлен как произведение определяющих его параметров, возведенных в степень, т.е.

$$\Pi = A^a B^b V^v, \dots$$

может быть установлена общая зависимость для определения величины k_Π , показывающей, во сколько раз критерий оригинала больше критерия, установленного по параметрам модели:

$$k_\Pi = 1 \pm a \sum \epsilon_A \pm b \sum \epsilon_B \pm v \sum \epsilon_V +$$

где $\epsilon_{A, B, V}$ — относительные погрешности параметров, определяющих процесс; a, b, v, \dots — показатели степени определяющих параметров.

При одинаковом знаке погрешностей, характерном для наихудшего случая, необходимо уменьшать погрешности тех величин модели, которые входят в критерии с наивысшим показателем степени. Это положение касается в основном параметров, определяющих линейные размеры модели и скорость ее движения.

При физическом моделировании важно выдержать в заданных пределах прочностные параметры грунта. Характеристики прочности грунта модели могут отклоняться от тех значений, которые обусловлены заданным масштабом модели. Отклонение прочностных характеристик модели от их среднего значения не должно превосходить соответствующего отклонения для природы. Ошибки, обусловленные несоответствием геометрических размеров модели, угла резания, глубины резания, и другие ошибки подобного характера уменьшаются при переходе

к более крупному масштабу. Неточности, связанные с нарушением или несоблюдением ряда критериев подобия, и их влияние на характер протекания процесса обычно могут быть установлены главным образом экспериментально.

Степень влияния критериев подобия на точность экспериментов с моделями может быть установлена также и аналитическим методом, путем решения системы уравнений, определяющих протекание процесса. Такая проверка результатов моделирования позволяет выявить возможности приближенного моделирования. В ряде случаев, если процесс определяется ограниченным числом основных критериев подобия, например критериями $c_\omega/(\gamma l)$, $v^2/(gl)$, ρ , предварительный анализ влияния несоблюдения критериев подобия на результаты физического моделирования может быть выполнен по формуле для оценки вероятностной погрешности:

$$\varepsilon_{P_{kl}} \simeq 2\varepsilon_{ср}\Pi,$$

где $\varepsilon_{P_{kl}}$ — ожидаемая относительная ошибка сопротивления копанию оригинала; $\varepsilon_{ср}\Pi$ — средняя относительная ошибка определяющих критериев подобия.

В этих условиях для получения относительной погрешности в оригинале, не превышающей 15%, относительная погрешность каждого из определяющих критериев подобия при моделировании не должна превышать 10%. Для случая, когда в качестве эталона рассматривается модель, ожидаемая относительная погрешность для оригинала устанавливается по ошибке экспериментов с моделями:

$$\varepsilon_{P_H} = (1 + 3\varepsilon_{k_l})(1 + \varepsilon_{P_M}) - 1,$$

где ε_{P_M} — относительная ошибка величины P_M для модели; ε_{k_l} — относительная ошибка масштабного коэффициента k_l .

Соответствующая относительная погрешность критерия подобия рассчитывается по формуле (k_{Π}). В особо ответственных случаях соответствующие расчеты следует проверять методом испытания моделей разного линейного масштаба.

Ошибка при моделировании без изменения свойств грунта может быть установлена по формуле

$$\varepsilon_{P_H} = \frac{(1 + n\varepsilon_{k_l})(1 + \varepsilon_{P_M}) - 1}{(1 - n\varepsilon_{k_l}) - n(\varepsilon_{k_l}/\varepsilon_{P_M})},$$

где n — показатель степени, определяемый по рассмотренной выше методике.

В последнем случае ошибка моделирования может быть также установлена по величине ошибок, возникающих при экспериментальном определении составляющих P_1 , P_2 и P_3 , получаемых методом экспериментирования с моделями различного масштаба. Например, если при $P_3 = 0$ соответствующие величины P и P'_M имеют отклонение от среднего Δ_1 , Δ_2 , то можно записать:

$$P_M \pm \Delta_1 = P_1 \pm \Delta P_1 - P_2 \pm \Delta P_2;$$

$$P'_M \pm \Delta_2 = k_l^2 (P_1 \pm \Delta P_1) + k_l^2 (P_2 \pm \Delta P_2).$$

Это позволяет получить выражения для расчета соответствующих ошибок:

$$P_1 = \pm \frac{\Delta_1 k_l^2 + \Delta_2}{k_l^2 (1 - k_l)}; \quad P_2 = \pm \frac{\Delta_1 k_l^2 + \Delta_2}{k_l^2 (1 - k_l)}$$

Предельное значение масштаба линейных размеров физических моделей в условиях применения эквивалентных материалов, в том числе и природных аналогов, определяется допустимым объемом среды, взаимодействующей с моделью рабочего оборудования, и точностью измерительных приборов. Определяющим условием подобия систем «среда — рабочее оборудование» является геометрическое подобие модели и оригинала по линейным l_i и угловым α_i размерам. Значение l_i является обобщающим, оно определяет линейные размеры всех составных частей, образующих систему, включая характерные размеры элементов, составляющих среду: размеры составляющих минеральной фракции, включений, пустот, трещин и т. п. Физическая модель грунта должна быть приготовлена таким образом, чтобы выдерживалось равенство масштабов всех указанных элементов.

Эквивалентные материалы для моделирования грунтов создают на основе естественных грунтовых составляющих, таких, как щебень, песок, глина. При этом линейные размеры элементов минеральных фракций не моделируют. Исключение составляют специальные модели, для которых геометрическое подобие структурных элементов среды является основным условием моделирования.

Если в процессе моделирования при уменьшении размеров рабочего органа гранулометрический состав среды остается без изменения, происходит относительное увеличение размеров фракций. В этих условиях с возрастанием масштаба моделирования нарушается подобие системы и растет ошибка моделирования.

При соблюдении критериев динамического и геометрического подобия системы при физическом моделировании эквивалентными материалами объем среды, взаимодействующей с оборудованием оригинала,

$$V_{II} = V_M k_l^3,$$

где V_M — объем среды, взаимодействующей с моделью оборудования.

При нарушении геометрического подобия по структуре эквивалентной среды указанное соотношение тоже нарушается, что, в свою очередь, вызывает при определенном линейном масштабе нарушение динамического подобия. Это следует из анализа нарушения такого обобщенного критерия подобия, как угол внутреннего трения Π_z . Для подобия систем $\Pi_{zM} = \Pi_{zII}$, где критерий

$$\Pi_z = \Pi_\delta \left[2 + \frac{\Pi_\delta^{-1} (\Pi_\delta^2 + 1)}{\Pi_d (1 + \Pi_z \Pi_\delta + \Pi_z)} \right] + \Pi_{c\omega},$$

где $\Pi_\delta = \delta$; $\Pi_d = \frac{d/2}{a + d/2}$;

$$\Pi_\tau = k_\sigma; \quad \Pi_\tau = \frac{\eta v}{\rho_{уд} l}; \quad \Pi_{c_\omega} = c_\omega / \rho_{уд},$$

где δ — угол внешнего трения материала, из которого состоят структурные элементы, составляющие среду; η — динамическая вязкость; v — скорость движения; $\rho_{уд}$ — удельное давление на поверхности сдвига; k_σ — коэффициент бокового давления; c_ω — сцепление между частицами среды; l — определяющий линейный размер рабочего оборудования (ширина, длина и т. п.); d — средний размер линейных частиц, составляющих среду; a — расстояние между отдельными частицами среды.

Анализ геометрического подобия системы по критериям $\Pi_{d_1} = a \cdot d$ и $\Pi_a = a/l$ позволяет заменить их критериями $\Pi_{d_1} = a/d$ и $\Pi_d = l/d$.

Критерий Π_d показывает, какое число структурных элементов, составляющих среду, приходится на определяющий линейный размер рабочего органа. Подставляя в выражение для Π_Φ полученное соотношение, имеем:

$$\Pi_\Phi = \Pi_\delta \left[2 + \frac{\Pi_\delta^{-1} (\Pi_\delta^2 + 1)}{\frac{l}{d} (1 + \Pi_\tau \Pi_\delta + \Pi_\tau)} \right] + \Pi_{c_\omega}.$$

Из анализа этого соотношения следует, что нарушение критерия $\Pi_d = l/d$ приводит к нарушению подобия по обобщенному критерию Π_Φ . Важно установить предельное значение критерия $\Pi_d = l/d$, при котором нарушение подобия находится в допустимых пределах. Экспериментальные исследования влияния критерия l/d на характер нарушения подобия систем приводились на моделях среды, состоящей из стальных шаров диаметрами 3 и 7 мм, обладающей дискретностью. В этой среде отсутствует структурное сцепление между частицами, что позволило при решении задачи исключить влияние структурного сцепления и вязкого трения.

Модели рабочего органа выполнены с масштабными коэффициентами 1; 2; 3; 4; 6; 8. Ширина рабочего органа менялась в пределах

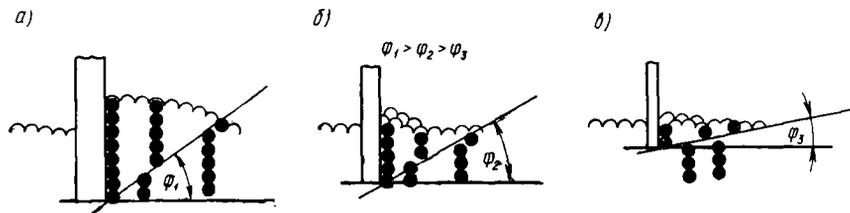


Рис. IV.2. Схема, иллюстрирующая характер нарушения подобия системы по изменению объема среды, взаимодействующей с моделями рабочего оборудования в зависимости от их линейного масштаба:

$$a - k_l = 1; \quad б - k_l = 2; \quad в - k_l = 3$$

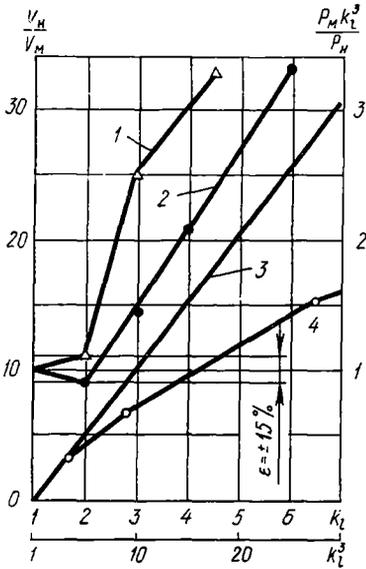


Рис. IV.3. Изменение отношения объемов среды оригинала и модели, взаимодействующей с рабочим оборудованием, в зависимости от k_l^3 , когда в качестве среды используется конгломерат стальных шаров одинакового диаметра, и сил сопротивления движению рабочего оборудования:

1 — изменение отношения сил сопротивления $P_M k_l^3 / P_H$ движению рабочего оборудования модели и оригинала в зависимости от линейного масштаба рабочего оборудования k_l в сыпучей среде, состоящей из стальных шаров диаметром 7 мм; 2 — то же, что и для кривой 1, но при диаметре шаров 3 мм; 3 — теоретическая зависимость при $V_H = V_M k_l^2$; 4 — характер изменения отношения объемов среды перед моделями рабочего оборудования различного масштаба, установленный по анализу схемы процесса при $V_H = V_M k_l^3$

ходит нарушение динамического подобия системы по критериям Π_z , Π_v , Π_t , Π_{c_0} и др. Это положение подтверждается анализом нарушения статистического подобия системы, которое в рассматриваемом случае оценивали тождественностью для оригинала и модели плотности распределения вероятностей, отношением текущего значения сопротивления P_i к математическому ожиданию сопротивления \bar{P}

Изменение отношения $P_M k_l^3 / P_H$ в зависимости от k_l показана на рис. IV 3. При $k_l > 2$ ошибка при переходе от модели к оригиналу по значению P согласно формуле $P_M k_l^3$ превышает 15%. По мере уве-

от 20 до 2,5 мм, глубина копания — от 40 и 5 мм, критерий Π_d — от 0,35 до 6,45. Размеры профиля для оригинала выбраны таким образом, чтобы объем среды, взаимодействующей с оборудованием, соответствовал предельному объему $\Delta V \geq 200 d^3$.

Одновременно с записью условий резания проводили фотосъемку процесса через прозрачную стенку лотка, что позволило получить фотографии развития процесса сдвига среды для всех масштабов моделирования. Схема развития процесса представлена на рис. IV 2. Если размеры элементов, составляющих среду, не изменяются в соответствии с критерием подобия Π_d , объем среды, взаимодействующей с моделью рабочего оборудования, линейные размеры которого варьируют согласно масштабу моделирования, не изменяется пропорционально k_l^3 . При этом угол сдвига по мере роста k_l уменьшается от 45 до 15°, а сдвигаемый объем с ростом линейного масштаба модели оборудования остается больше величины

$$V_M > \frac{V_H}{k_l^3}$$

На рис. IV 3 приведена зависимость, характеризующая отношение объемов среды оригинала и модели, взаимодействующей с рабочим оборудованием, в зависимости от величины k_l^3 . При $k_l > 2$ отклонение экспериментальной кривой от теоретической превышает допустимую ошибку измерения. В этом случае проис-

личения k_l ошибка увеличивается. Значение критерия Π_d , соответствующее этому линейному масштабу рабочего оборудования, следует считать критическим. Условие моделирования по предельному искажению критерия определяет неравенство $\Pi_d > 1,6$.

Экспериментальные исследования приводят к необходимости соблюдения условий геометрического подобия структурных элементов среды для достижения статистического подобия системы «грунт — рабочее оборудование» при моделировании с использованием эквивалентных материалов.

Нецелесообразно моделирование процессов с применением эквивалентных материалов без изменения гранулометрического состава за пределами ограничения $\Delta V > 200 d^3$, дополненного условием $\Pi_d > 1,6$.

Размеры масштаба модели рабочего оборудования по допустимому объему грунта, взаимодействующего с моделью рабочего оборудования при нарушении геометрического подобия системы, регламентируются указанными неравенствами. В этих условиях процессы в модели отличаются от процессов в оригинале. Здесь нецелесообразно вводить поправочные коэффициенты в формулы перехода от параметров модели к параметрам оригинала, так как такой прием не позволяет учитывать качественное отличие моделирующего процесса от моделируемого.

При физическом моделировании систем «среда — рабочее оборудование» объем среды, взаимодействующей с рабочим органом, постепенно уменьшают при увеличении масштабного коэффициента линейных размеров. Это приводит к возрастанию дисперсии силы сопротивления и является причиной искажения соответствующего закона распределения вероятностей. При значительных линейных размерах моделей, когда число структурных элементов n , образующих объем среды, взаимодействующей с рабочим оборудованием, достаточно велико, т. е. $[n] \geq 400$, значение сопротивления подчиняется нормальному закону. При уменьшении линейных размеров моделей число n структурных элементов уменьшается. Ограничения по объему среды, взаимодействующей с оборудованием, обуславливают предельное значение масштабного коэффициента k_l . Объем грунта, который взаимодействует с инструментом,

$$V \approx BHL_x,$$

где B — ширина инструмента; H — глубина резания, высота инструмента; L_x — размер отделяемого элемента грунта в направлении резания, длина ковша и др.

При $a_L = \frac{B}{L_r}$; $a_h = \frac{B}{H}$ получают $V = \frac{1}{a_h a_L} B^3$.

Для модели $\frac{1}{a_h a_L} B_m^3 > 200 d^3$.

Принимая во внимание, что $k_l = \frac{B_H}{B_m}$, получаем: $k_l \leq k_d \frac{B_H}{d}$,

где $k_d = 1 / \sqrt[3]{200 a_h a_L}$

Значение коэффициента k_d зависит от типа рабочего органа, размеров инструмента, режима его работы. При ориентировочных расчетах можно рекомендовать следующие значения k_d : 0,2 — для процессов рыхления; 0,13 — для движения грунта в ковше; 0,065 — для перемещения призмы грунта перед отвалом бульдозера.

Линейный размер модели, установленный по предельно допустимой ошибке измерения. Из зависимости для выделения σ_m следует, что при увеличении масштабного коэффициента или уменьшении линейных размеров модели растет средняя квадратичная погрешность измерений при моделировании. Это положение может быть использовано при определении минимального размера модели по предельно допустимой ошибке измерения. На основании соотношения между абсолютными ошибками опыта и метода измерения также можно получить зависимость

$$\Delta = \Delta_2 k_l^{\alpha n/2}$$

где Δ — абсолютная ошибка опыта; Δ_2 — абсолютная ошибка метода измерения.

Выражая Δ через относительную величину, можно получить соотношение

$$P_\varepsilon = \Delta_2 k_l^{\alpha n/2}$$

где ε — относительная погрешность опыта в относительных единицах; P — измеряемая величина.

Полученное соотношение может быть положено в основу установления предельного значения коэффициента k_l , при котором будет обеспечена соответствующая точность эксперимента. Общее соотношение между силовыми параметрами оригинала и модели на основании положений, рассмотренных ранее, выражается следующим образом:

$$k_l^n = P_n / P_m.$$

Минимальное усилие, надежно регистрируемое на модели измерительным прибором,

$$P_m = \frac{\Delta_2 k_l^{\alpha n/2}}{\varepsilon}.$$

Абсолютная ошибка прибора Δ_2 может быть представлена в виде зависимости от класса точности прибора

$$\Delta_2 = \frac{k_{т.п}}{100} P_{пр\ max},$$

где $k_{т.п}$ — класс точности прибора, %; $P_{пр\ max}$ — предел измерения по шкале рабочего прибора.

Подставляя значение Δ_2 в формулу для определения P_m , получаем коэффициент уменьшения линейных размеров:

$$k_l = \sqrt[n + \frac{\alpha_n}{2}]{\frac{P_{II} \varepsilon 100}{P_{\text{пр max}} k_{T.II}}},$$

где n — показатель степени, зависящий от характера подобия объектов; α_n — показатель степени, зависящий от статистических свойств состава грунта; ε — относительная ошибка опыта; P_{II} — усилие, характеризующее рабочий процесс оригинала. Следовательно, увеличение коэффициента k_l или уменьшение линейного масштаба модели M_l возможно в том случае, если: 1) увеличивается допустимая относительная погрешность; 2) уменьшается $k_{T.II}$, т. е. растет класс точности прибора; 3) повышается ожидаемая нагрузка для оригинала и 4) уменьшается величина допустимого измерения по шкале прибора.

Для определения $P_{\text{пр max}}$ необходимо предварительно из конструктивных соображений с учетом зависимости для определения k_l установить размеры модели рабочего органа. При этом необходимо, чтобы $P_{\text{пр max}} \geq P_M$.

Для предварительной настройки и выбора приборов искомая величина $P_{\text{пр max}}$ может быть установлена на базе существующих методов ориентировочного расчета. Величина P_{II} определяется в данном случае также ориентировочно, на основании существующих методов расчета; ε задается в пределах от 0,08 до 0,1; остальные величины устанавливаются по паспорту прибора. При соблюдении определяющих критериев подобия и условий физического моделирования $1 \leq n \leq 3$. Принимая, как и ранее, $\alpha_n = 2$, на основании формул для определения k_{l_v} и k_{l_ε} можно записать следующее неравенство:

$$k_d \frac{l_{II}}{d} \geq k_l \leq \left(\frac{P_{II} \varepsilon 100}{P_{\text{пр max}} k_{T.II}} \right)^{\frac{1}{n + \frac{\alpha_n}{2}}},$$

где k_d — коэффициент.

Рассмотренные выше положения позволяют сделать вывод, что независимо от принятого метода моделирования минимальные размеры модели могут быть с достаточной точностью установлены по формуле для расчета k_{l_ε} . Основным фактором, ограничивающим уменьшение линейных размеров модели в грунтах с фракциями $d \leq 2$ мм, является допускаемая величина ε погрешности измерения.

Если ограничивающим фактором оказывается величина предельно допустимого объема, что может иметь место, например, при моделировании взаимодействия рабочего оборудования с крупнозернистыми материалами (щебень, булыжник), целесообразно уменьшать размер фракций в соответствии с критериями приближенного физического моделирования. Из формулы для определения (k_{l_ε}) следует, что грунт с величиной фракции $d \leq 2$ мм может быть использован в качестве среды для работы модели без изменения размеров фракций. При моделировании без изменения свойств грунта формула (k_{l_ε}) может быть использована для предварительного расчета показателя степени n :

$$n = \frac{\lg A}{\lg k_l} - 1,$$

где $A = \frac{P_{нэ} 100}{P_{пр \max} k_{г.п}}$

Выбор рациональных размеров модели является сложной задачей. В заключение следует отметить, что в ряде случаев величину k_l необходимо ограничивать по соотношению

$$k_l \leq c_{\omega н} / c_{\omega ми}$$

где $c_{\omega \min}$ — минимальное значение сцепления грунта, получаемое при моделировании и надежно регистрируемое инструментом.

Последнее соотношение имеет, например, важное значение при исследовании механизма взаимодействия рабочего оборудования с грунтом и установлении и уточнении исходных расчетных схем при разработке соответствующих аналитических зависимостей.

§ IV.6. УСЛОВИЯ ПОСТРОЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

При моделировании широкое распространение получают комбинированные методы [7]. Комбинированные методы перспективны при сочетании ЭВМ с АВМ, представляющие гибридные модели, а также физических моделей с соответствующими аналогами, полученными на АВМ и ЭВМ. Комбинированные модели такого типа называют *физико-математическими*, их применение эффективно при изучении рабочих процессов дорожно-строительных машин. Математическая модель одной из подсистем набирается на электронной машине и используется совместно с физической моделью другой подсистемы типа «среда — рабочее оборудование». Вместе они представляют полную систему объекта исследования. Подсистемы «среда — рабочее оборудование» целесообразно представлять в виде физических моделей. Это важно, когда оценивают научно-технические решения и патенты.

При сопряжении физической модели процесса с математической моделью, полученной на АВМ, необходимо установить условия подобия физико-математической модели, преобразовать физические величины в электрические для ввода в ЭВМ, согласовать масштабы времени и нагрузок. Для сопряжения с физическим объектом или соответствующей физической моделью необходимо, чтобы часть подсистемы, полученная на ЭВМ, была воспроизведена в масштабе времени, соответствующем масштабу времени в физической модели. Только в этом случае обеспечивается соответствие постоянных времени физической и математической моделей.

Последнее условие ограничивает возможности физико-математического моделирования, так как физическая модель подсистемы в ряде случаев уменьшает масштаб времени. При воспроизведении слишком медленно или очень быстро протекающих процессов резко снижается точность моделирования. Исключения составляют процессы, характер протекания которых не зависит от изменения масштаба времени.

Представим, что система, изображенная на рис. III. 5, состоит из двух подсистем: первая — «грунт — рабочее оборудование»; вторая — «рабочее оборудование — движитель — грунт». Подчеркнем, что по условию задачи отсутствует четкая теоретическая модель подсистемы «грунт — рабочий орган». Поэтому для первой подсистемы принимают приближенную трактовку модели на основании представления грунта как жесткопластической модели (см. рис. III. 2)

$$W \simeq \gamma l^3 \operatorname{tg} \rho + c_{\omega} l^2.$$

Для второй подсистемы (см. рис. I. 12)

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + Cx = W.$$

Формирование комбинированных моделей выполняется в несколько этапов: 1) на основании имеющейся информации представляют теоретическую модель процесса, например как это сделано выше; 2) приводят уравнение к форме, удобной для набора на математической машине, например для набора на АВМ решают уравнение относительно старшей производной:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{Cx}{m} + \frac{W}{m};$$

3) составляют структурную схему предметно-математической модели (рис. IV 4, а); 4) определяют масштабные коэффициенты, постоянные интегрирования и коэффициенты блока АВМ, выявляют соответствие масштабов моделей каждой из подсистем; 5) анализируют первую подсистему, представляют величину W в виде гипотетической теоретической модели на базе реологических уравнений или теории сплошной среды, определяют критерии подобия, формируют физическую модель; 6) проверяют масштабы времени функционирования моделей каждой из подсистем, которые должны работать в едином масштабе времени (желательно, чтобы $k_t = 1$); 7) объединяют подсистемы в единый комплекс так, чтобы сигнал с физической модели поступал на соответствующий вход предметно-математической модели; 8) проверяют работу комбинированной модели при решении частной задачи; 9) проводят эксперименты по плану исследований; 10) полученные результаты пересчитывают на оригинал, анализируют и принимают решение.

Преобразование физических величин является одним из важнейших этапов при формировании физико-математических моделей. Входные и выходные величины могут иметь различную природу, а переменные величины в математической модели должны быть выражены только электрическими сигналами. Широкое применение различного рода преобразователей механических, тепловых и других величин в электрические и наоборот позволяющих получить физико-математические модели различной сложности.

Особенностью решающих элементов АВМ является их малая мощность. На выход таких систем можно подключить ограниченную нагрузку. На вход реальных элементов систем привода и управления фи-

зической модели сигнал от АВМ необходимо подавать через соответствующие усилители мощности (электронные и магнитные усилители и т. п.). Преобразователи могут быть сложными устройствами, и в ряде случаев их стоимость может превышать стоимость физических моделей и математических машин.

Анализ структурной схемы системы «грунт — рабочее оборудование — движитель — грунт» и соответствующей физико-математической

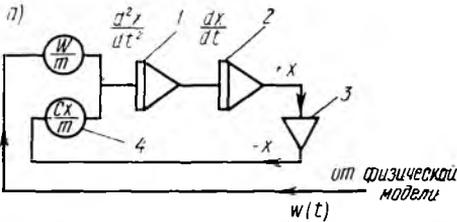
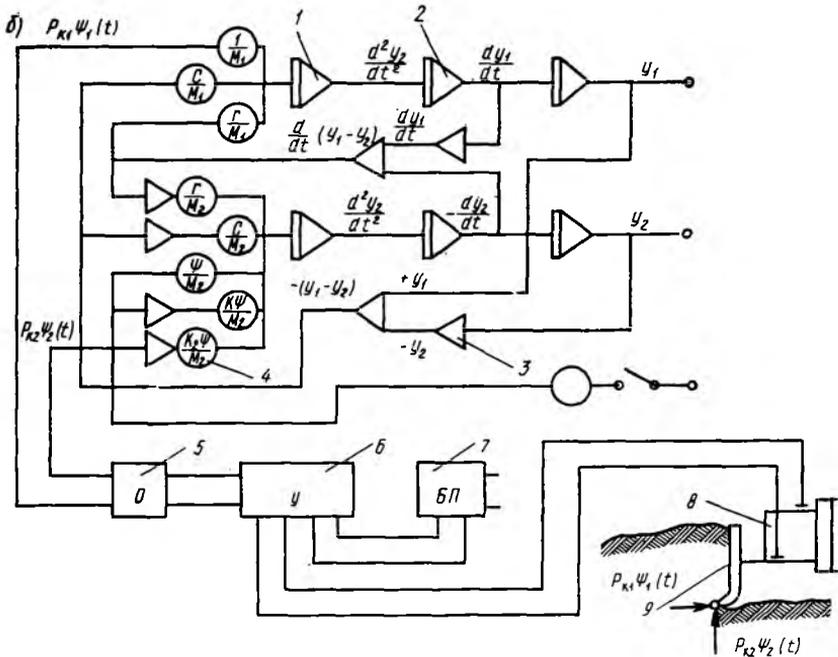


Рис. 1V.4. Схема формирования моделей:

а — предметно-математической; б — комбинированной физико-математической; 1 — интегрально-суммирующий усилитель; 2 — интегратор; 3 — инвертор; 4 — мультипликатор; 5 — осциллограф; 6 — усилитель; 7 — блок питания; 8 — датчики регистрации горизонтальной и вертикальной составляющих сопротивления; 9 — физическая модель рабочего оборудования



модели (см. рис. III. 5) дает представление об основном различии таких систем. Оно заключается в существовании в структуре моделей элементов сопряжения ее предметно-математической и физической частей. Условие подобия систем при наличии в одной из них элементов сопряжения на основании дополнительных положений теории подобия заключается в соблюдении следующих требований.

1. Равенство определяющих критериев подобия основных подсистем в сходственные моменты времени, которое определяется равенством

обобщенного критерия подобия, составленного из параметров, характеризующих элементы сопряжения в моделирующей системе:

$$\Pi_{i \text{ об.н}} = \Pi_{i \text{ об.м}}$$

Для приближенного моделирования это условие определяется минимизацией погрешностей соответствующих критериев подобия:

$$F(\varepsilon) = [\Pi_{i \text{ об.н}}(\tau) - \Pi_{i \text{ об.м}}(\tau)] \rightarrow \min.$$

2. Ошибка, вносимая элементами сопряжения, должна быть минимальной. Переход от одного явления к другому в этом случае называют *аналоговым преобразованием*.

При сопоставлении основного процесса и его аналогии взаимодействующие значения y и z связаны следующим соотношением:

$$\frac{y}{y_0} = \frac{z}{z_0} \text{ или } y = \frac{y_0}{z_0} z,$$

где y — значение, характеризующее протекание основного процесса; z — взаимодействующее значение аналогичного процесса в модели; y_0 и z_0 — заданные значения.

Переход от значения z к значению y заключается в умножении первого на множитель $k_{yz} = y_0/z_0$:

$$y = k_{yz}z.$$

Противоположный переход определяется аналогичным соотношением

$$z = k_{zy}y,$$

где $k_{zy} = z_0/y_0$.

Значения k_{yz} , k_{zy} называют множителями аналоговых преобразований. Последние в отличие от множителей пропорционального преобразования k_v , k_z и других являются размерными величинами. В остальном свойства множителей тождественны. Уравнения, ограничивающие свободу выбора численных значений множителей аналогового преобразования k_{yz} , k_{zy} и других, так же как и множителей пропорционального преобразования, следуют из анализа безразмерных комплексов — критериев подобия. Коэффициенты k_{yz} , k_{zy} и другие связывают не только численные значения множителей, но и их размерности.

Условия подобия и соответствующие аналоговые преобразования для подобных систем, из которых некоторые имеют разную физическую природу, следуют из равенства критериев подобия оригинала и соответствующего оригиналу аналогичного явления, протекающего в модели.

Уравнения движения самоходных дорожно-строительных или землеройно-транспортных машин (см. рис. III. 5):

$$m_{\text{нп}} \frac{d^2y}{dt^2} + C_{\text{нп}}y = T - P_r k_{\text{неп}};$$

$$m_{\text{нп}} \frac{d^2x}{dt^2} + C_{\text{ш}}x = G - \left(P_{\text{в}} + r_{\text{ш}} \frac{dx}{dt} + F_{\text{ш}} \text{sign} \frac{dx}{dt} \right),$$

где $m_{\text{пр}}$ — приведенная масса; $C_{\text{пр}}$ — приведенная жесткость металлоконструкции; T — тяговое усилие, развиваемое двигателем; $P_{\text{г.в}}$ — горизонтальная и вертикальная составляющие сопротивления копанью; $k_{\text{пер}} \approx \left(1 + \frac{W}{P_{\text{г}}}\right)$ — коэффициент, учитывающий влияние на процесс сопротивления передвижению; $C_{\text{ин}}$ — жесткость пневматических колес; G — вес машины; $r_{\text{ш}}$ — коэффициент вязкого трения; $F_{\text{ш}}$ — сила сухого трения пневматиков; W — сила сопротивления передвижению.

Принятые допущения определяются следующими выражениями:

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots}; \quad m_{\text{пр}} = m + \sum_1^a \frac{I_j^2}{r_k^2} \eta_j;$$

$$T = G_{\text{сц}} \varphi_{\text{сц}}; \quad W = Gf; \quad T = \frac{M_{\text{дв}} \pm M_{\text{ин}}}{r_k}.$$

Условия на границе элементов, взаимодействующих со средой, определяются в первом приближении следующими соотношениями:

$$\tau = p_{\text{уд}} \operatorname{tg} \rho + c_{\omega}; \quad \tau = p_{\text{уд}} \operatorname{tg} \rho;$$

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \rho + c_{\omega}; \quad \tau = \sigma \operatorname{tg} \rho.$$

При $t = t_0$ $v = v_{\text{min}}$; при $t = t_1$ $v = v_1$.

Подобие систем такого типа определяется критериями подобия, имеющими следующий вид:

$$\Pi_1 = \frac{m_{\text{н}} l_{\text{yn}}}{T_{\text{н}} t_{\text{н}}^2}; \quad \Pi_2 = \frac{C_{\text{пр.н}} l_{\text{yn}}}{T_{\text{н}}}; \quad \Pi_3 = \frac{P_{\text{г.н}} k_{\text{пер}}}{T_{\text{н}}};$$

$$\Pi_4 = \frac{m_{\text{н}} l_{\text{xn}}}{G_{\text{н}} t_{\text{н}}^2}; \quad \Pi_5 = \frac{C_{\text{ш.н}} l_{\text{xn}}}{G_{\text{н}}}; \quad \Pi_6 = \frac{P_{\text{в.н}}}{G_{\text{н}}};$$

$$\Pi_7 = \frac{r_{\text{ш.н}} l_{\text{xn}}}{G_{\text{н}} t_{\text{н}}}; \quad \Pi_8 = \frac{F_{\text{ш.н}}}{G_{\text{н}}}.$$

Для стенда, показанного на рис. V 5, представляя соответствующий динамический эквивалент, получаем аналогичную систему критериев в виде одномассовой модели. Упрощенные варианты систем с одной степенью свободы определяют тремя первыми критериями.

Условия подобия подсистемы «среда — рабочее оборудование», рассмотренные выше, делают необходимым дополнение приведенного комплекса рядом других, учитывающих влияние на протекание процесса сил, действующих на рабочее оборудование со стороны разрабатываемой среды: сил структурного сцепления, веса, вязкого и сухого трения и сил инерции:

$$\Pi_9 = \frac{\omega l^2}{T}; \quad \Pi_{10} = \frac{\rho g l^3}{T}; \quad \Pi_{11} = \frac{\tau \omega l}{T};$$

$$\Pi_{12} = \varphi; \quad \Pi_{13} = \delta; \quad \Pi_{14} = \frac{\rho l^2 v^2}{T},$$

где σ — напряжение, обобщенный параметр (структурное сцепление c_ω ; предел прочности при сдвиге τ , при сжатии $\sigma_{сж}$, при отрыве σ_p ; модуль линейной деформации E и т. п.); l — обобщенный линейный размер; ρ — плотность среды, взаимодействующей с рабочим оборудованием; g — ускорение свободного падения; η — динамическая вязкость среды; v — скорость движения рабочего оборудования; φ — угол внутреннего трения; δ — угол внешнего трения.

В упрощенном варианте для рассматриваемых систем с одной степенью свободы общее условие подобия записывают следующим образом:

$$\begin{aligned} \Pi_{1н} &= \Pi_{1м}; & \Pi_{2н} &= \Pi_{2м}; & \Pi_{3н} &= \Pi_{3м}; \\ \Pi_{9н} &= \Pi_{9м}; & \Pi_{10н} &= \Pi_{10м}; & \Pi_{11н} &= \Pi_{11м}; \\ \Pi_{12н} &= \Pi_{12м}; & \Pi_{13н} &= \Pi_{13м}; & \Pi_{14н} &= \Pi_{14м}. \end{aligned}$$

Соотношения между масштабами определяющих параметров моделируемой и моделирующей систем определяют следующие уравнения:

$$\begin{aligned} k_m k_l &= k_T k_t^2; & k_{снр} k_l &= k_T; & k_p k_{пер} &= k_T; \\ k_\sigma k_l^2 &= k_T; & k_f k_g k_l^3 &= k_T; & k_\eta k_v k_l &= k_T; \\ k_\varphi &= 1; & k_\delta &= 1; & k_\rho k_l^2 k_v^2 &= k_T. \end{aligned}$$

При формировании физико-математических моделей представляют интерес моделирующие системы, у которых масштабы прочностных параметров среды остаются равными единице, а процессы протекают в реальном масштабе времени. Последнее является неперменным условием моделирования, когда модель работает с реальными приборами управления, а ретрансляторы времени отсутствуют.

Для машин, работающих со средой, в которой доминирующими являются силы структурного сцепления, а силы вязкого трения несущественны, общее количество масштабных соотношений сокращено. При этом условия моделирования эквивалентной среды не накладывают ограничений на скорость и время протекания процесса. Масштабы этих параметров можно назначать исходя из условий формирования физико-математической модели. Для моделирования в реальном масштабе времени необходимо, чтобы $k_v = k_l$, тогда $k_t = 1$.

Это накладывает ограничение на масштабы k_m и k_G :

$$k_m = k_s k_l; \quad k_G = k_g k_s k_l.$$

Однако последнее равенство противоречит условию $k_W = k_T$, где $k_W = W_H/W_M$. Так как $k_T = k_\sigma k_l^2$, то моделирование в условиях реального масштаба времени здесь возможно, если влиянием сопротивления передвижению системы на характер протекания процесса можно пренебречь, что следует из условия $k_{пер} \approx 1$.

Указанное ограничение значения $k_{\text{нед}}$ позволяет вести эксперимент в условиях приближенного подобия в реальном масштабе времени. При этом прочностные свойства эквивалентной среды тождественны оригиналу. Эксперимент может быть также выполнен в среде оригинала.

В условиях когда $k_\sigma = k_{\sigma_0}$, $k_E = k_g = 1$, получаем:

$$k_v = k_l; \quad k_{\tau} = 1; \quad k_W \approx k_T; \quad k_l = 1; \quad k_g = 1;$$

$$k_m = k_l; \quad k_T = k_l^2; \quad k_{C_{\text{нп}}} = k_l; \quad k_p = k_T.$$

Если сопротивлением передвижению пренебречь нельзя, ограничение на масштаб времени накладывают соотношения:

$$k_t = \sqrt{k_l/k_g}; \quad k_v = \sqrt{k_g k_l}$$

Возможности моделирования систем, работающих с вязкой средой в условиях неустановившегося движения, анализируют на примере процесса разработки среды, для которого доминирующими являются силы веса, вязкого трения и инерции. Здесь масштабные соотношения имеют вид:

$$k_m k_l = k_T k_l^2; \quad k_p k_g k_l^3 = k_T;$$

$$k_{C_{\text{нп}}} k_l = k_T; \quad k_p k_l^2 k_v^2 = k_T;$$

$$k_p = k_T; \quad k_r k_v k_l = k_T.$$

Моделирование возможно при изменении масштабов вязкости:

$$k_\eta = k_p k_g^{1/2} k_l^{3/2}$$

Для масштабов скорости и времени имеем:

$$k_v = \frac{k_\eta}{k_p k_l}; \quad k_t = \frac{k_p k_l^2}{k_\eta}$$

или

$$k_v = \sqrt{k_g k_l}; \quad k_t = \sqrt{k_l/k_g}$$

Масштабы приведенной массы, веса и приведенной жесткости аналогичны масштабам указанных величин, рассмотренных в предыдущем случае. При рассмотренных условиях моделировать процесс в реальных масштабах времени при $k_g = 1$ невозможно. Масштабный коэффициент вязкого трения определяется масштабом линейного размера. Возможные случаи реализации процессов и систем на физико-математических моделях в зависимости от характера действующих сил приведены в табл. IV 4. На основании рассмотренных масштабных соотношений определяют соответствующие параметры физико-математической модели и корректируют отдельные звенья системы.

Условия моделирования систем на физико-математических моделях

Доминирующие факторы, определяющие свойства среды		Среда, с которой взаимодействует рабочее оборудование											
		Прочные грунты (мерзлые и горные породы)				Талые грунты, обладающие сцеплением				Сыпучие грунты и насыпные грузы		Строительные смеси	
		Структурное сцепление	Структурное сцепление, вязкость	Структурное сцепление, силы инерции	Структурное сцепление, силы инерции, вязкость	Структурное сцепление, вес	Структурное сцепление, вес, вязкость	Структурное сцепление, силы инерции	Структурное сцепление, вязкость, силы инерции	Вес	Вес, силы инерции	Вес, вязкость	Вес, вязкость, силы инерции
		Вариант моделей				Структурное сцепление, вес	Структурное сцепление, вес, вязкость	Структурное сцепление, силы инерции	Структурное сцепление, вязкость, силы инерции	Вес	Вес, силы инерции	Вес, вязкость	Вес, вязкость, силы инерции
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Масштабы	времени k_t	$k_t = \sqrt{k_l/k_g}$				$k_t = \sqrt{k_l/k_g}$				$k_t = \sqrt{k_l/k_g}$			
	скорости k_v	$k_v = \sqrt{k_l k_g}$				$k_v = \sqrt{k_l k_g}$				$k_v = \sqrt{k_l k_g}$			
Масштабы	напряжения k_σ	$k_\sigma = 1$				$k_\sigma = k_p k_g k_l$				$k_\sigma = k_p k_g k_l$			
	вязкости k_η	$k_\eta = k_p \sqrt{k_l/k_g}$				$k_\eta = k_p k_g^{1/3} k_l^{3/2}$				$k_\eta = k_p k_g^{1/3} k_l^{3/2}$			
	массы машины k_m	$k_m = \frac{k_m}{k_g} k_l^2$				$k_m = k_p k_l^3$				$k_m = \frac{k_\sigma}{k_g} k_l^2$			
	силы k_p	$k_p = k_\sigma k_l^2$				$k_p = k_p k_g k_l^3$				$k_p = k_\sigma k_l^2$			
Возможность и условия приближенного моделирования	По свойствам среды	Не изменяются				Изменяются				Не изменяются		Изменяются	
	в натуральном масштабе времени					$k_t = 1$ $k_v = k_t$ при $W \approx 0$				Моделировать при $k_t=1$ нельзя		$k_t=1$ Моделировать при $W \approx 0$ нельзя	

§ IV.7. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СРЕДУ

Параметры, подлежащие контролю при изготовлении эквивалентных материалов. Важной составной частью физической модели системы «среда — рабочее оборудование» является модель среды, с которой взаимодействует оборудование реальной машины в процессе эксплуатации. Основные свойства такой эквивалентной среды устанавливают при анализе критериев подобия процесса. Формирование модели требует четкого определения целей и задач исследования с учетом применения возможных вариантов приближенного моделирования, что приводит к значительному сокращению материальных средств и времени исследования. Важное соотношение, определяющее подобие τ/σ , обозначает обобщенный симплекс и представляет соотношения типа $\sigma_{сж}/\sigma_p$; τ_0/σ_p и т. п., где $\sigma_{сж}$, σ_p , τ_0 — пределы прочности на сжатие, разрыв и сдвиг.

Варианты приближенного моделирования и соответствующие условия построения моделей приведены в табл. IV. 3. Из анализа критериев подобия следует, что в процессе моделирования такие характеристики грунтов, как $\sigma_{сж}$, σ_p , τ_0 , необходимо изменять пропорционально масштабу моделирования для других параметров ϕ , δ , ϵ , μ , чтобы их значения изменялись не более чем в пределах точности измерений. Доминирующее влияние на характер изменения значений $\sigma_{сж}$, σ_p , τ_0 , η и других оказывают связывающие эти величины комплексы. В условиях доминирования влияния на протекание процесса критерия $\eta/(\sigma l)$, когда вес и силы инерции являются несущественными, масштабы прочностных параметров μ и σ могут быть как равными друг другу, так и различными и при соблюдении условия $\eta/(\sigma l) = \text{const}$ не зависящими от линейного масштаба процесса.

Процессы такого типа протекают при резании и рыхлении прочных и мерзлых грунтов на малых скоростях движения (< 1 м/с).

В качестве экспресс-метода для оценки η , как установлено, можно воспользоваться показаниями динамического плотномера [14].

Из индикатора подобия

$$\frac{k_\tau k_v}{k_\sigma k_l} = 1$$

следует критерий

$$П_{C_{yд}} = \frac{C_{yд} v}{\sigma l};$$

где $C_{yд}$ — число ударов плотномера (параметр, оценивающий вязкость среды; $C_{yд} = k\eta(c_w)$; $C_{yд} = kc_w$).

Оценка параметра η по значению $C_{yд}$ возможна при равномасштабном изменении параметров прочности. В других случаях необходимо контролировать все определяющие показатели прочности.

Параметр η можно оценить на основании уравнения энергетического баланса динамического плотномера:

$$\eta \approx \frac{C_{уд} A_1 - A_{\Sigma}}{\frac{dv}{dl} Fl},$$

где A_1 — энергия одного удара;

$$A_{\Sigma} = A_{\sigma} + A_{\tau} + A_{\varphi} + A_{\delta};$$

A_{σ} — энергия на преодоление сил сопротивления сжатию; A_{τ} — энергия на преодоление сил сопротивления сдвигу; A_{φ} — энергия на преодоление сил трения ядра уплотнения; A_{δ} — энергия на преодоление сил трения по боковой поверхности стержня; $dv/(dl)$ — градиент скорости сдвига.

Величины A_{δ} , A_{τ} , A_{σ} , A_{φ} определяют по известным значениям δ , τ , σ , φ и параметрам прибора.

Свойства эквивалентного материала достаточно полно можно контролировать по сокращенному комплексу критериев подобия: ρ , $\sigma_{сж}/\sigma_p$, $C_{уд}/\sigma_p$, φ , δ , μ .

При существенности процессов, вызванных распространением упругих колебаний, необходимо контролировать такие параметры, как скорость распространения упругих колебаний, а также степень их поглощения средой.

Изменение свойства грунта при физическом моделировании процессов резания, копания и рыхления. Как следует из формул для определения основных параметров модели, изменение физико-механических свойств грунта является важным условием приближенного физического моделирования, когда преобладают силы сцепления и веса.

На основании выражения $c_w/(\gamma_r l)$ можно сделать вывод, что соблюдение критерия Π_1 при изменении определяющего линейного размера рабочего оборудования (обычно при физическом моделировании) возможно за счет изменения: 1) объемного веса среды γ_r ; 2) прочностных свойств грунта c_w и др.

Если для модели взят натуральный грунт, для которого $\tau_m = \tau_n$, то, как следует из критериев подобия, основной метод моделирования заключается в том, чтобы обеспечить путем изменения γ_r действие на модель таких объемных сил, которые превосходили бы вес во столько раз, во сколько размеры исследуемого рабочего органа меньше размеров натурального образца. Этот метод связан с трудоемким центробежным моделированием, и его реализация сопряжена со значительными техническими трудностями.

Другой метод, обеспечивающий соблюдение критерия Π_1 , состоит в подборе такого грунта, который имел бы предел прочности при сдвиге (отрыве) τ , а также модуль упругости E в k_1 раз меньше аналогичных параметров натурального грунта. Соблюдение при этом всех рассмотренных критериев подобия является обоснованием соответствия между деформациями, напряжениями и силами сопротивления разрушению грунта модели и натурального. По этой причине в экспериментах с моделями целесообразно соблюдать равенство $\gamma_{r,m} = \gamma_{r,n}$.

Соблюдение критерия Π_1 и соответствующей зависимости в этом случае более просто осуществлять, изменяя прочностные свойства

грунта. Этот прием соответствует принятому при изучении горного давления методу эквивалентных материалов [17].

Соответствующие изменения параметров, определяющих прочностные свойства грунта, и в частности предела прочности грунта при сдвиге, можно осуществлять введением в грунт специальных добавок (воды, масла, цемента, гипса, парафина и др.) в определенных пропорциях, повышающих его прочность. Важным фактором, оказывающим влияние на предел прочности грунта при сдвиге, является степень его уплотнения.

Разработано несколько рецептов моделирующих смесей на масляной основе. Для моделирования суглинков применяют смесь следующего состава (%): цемент — 40, молотая глина — 10, песок — 40, веретенное масло — 10. При $C_{уд.м} = 20$ такой эквивалентный материал имеет $\gamma_{г.м} = 1,9 \div 2,1$ г/см³, $c_{\omega.м} = 0,02$ МПа. Для моделирования легких супесей можно использовать смесь следующего состава (%): песок — 90, молотая глина — 3 — 4, веретенное масло — 7—6. При $C_{уд.м} = 6$ такая смесь имеет $\gamma_{г.м} = 1,6 \div 1,7$ г/см³, $c_{\omega.м} = 0,002$ МПа.

Если при различном воздействии рабочего органа на грунт разрушение наступает при различных сложных напряженных состояниях, то соответствующие пределы прочности модели грунта, определяющие характер его разрушения, устанавливают согласно зависимостям, содержащим параметр τ . Это положение базируется на результатах исследований, которыми установлена и обоснована корреляционная зависимость сопротивляемости грунтов (в том числе и в мерзлом состоянии) различным видам механического разрушения.

Физическое моделирование по критерию Π_1 в более общем случае может быть выполнено при соблюдении критериев подобия:

$$\Pi_{1(1)} = \frac{\Sigma_{\omega}}{\gamma_{г} l}; \quad \Pi_{1(2)} = \frac{c_c}{\gamma_{г} l}; \quad \Pi_{1(3)} = \frac{c_{3п}}{\gamma_{г} l}.$$

При моделировании суглинистых и супесчаных грунтов в ряде случаев (например, если значение структурного сцепления c_c превышает значение других составляющих) необходимо проверять соблюдение критерия Π_1 по соответствующим составляющим c_{ω} . Для влажности, близкой к естественной, достаточно установить подобие по критерию Π_1 , принимая во внимание суммарное значение c_{ω} . При этом липкость модели грунта должна определяться из критерия $c_{\omega 2}/(\gamma_{г} l)$ (численное значение $c_{\omega 2}$ определяется лабораторными методами [9]).

В качестве основного параметра, определяющего подобие грунта по прочности, допустимо использовать условный показатель, зависящий от основных параметров прочности и соответствующий данному воздействию на грунт. В качестве такого условного показателя можно также с известным приближением использовать число ударов ударника ДорНИИ $C_{уд}$ или другой подобный параметр.

Соответствующее условие моделирования при этом

$$\Pi_1 = C_{уд}/(\gamma_{г} l); \quad C_{уд.м} = C_{уд.н} k_I^{-1}.$$

В ряде случаев нет необходимости, чтобы при изменении c_{ω} другие

параметры прочности (μ , E) изменялись точно в соответствии с установленными условиями физического моделирования. Их изменение пропорционально изменению показателя прочности, принятого в качестве определяющего, например c_w .

Удовлетворение требованиям подсыба по такому обобщающему показателю прочности может обеспечивать близкое подобие природы и модели, что подтверждается экспериментами. Параметры модели грунта приведены в табл. IV 5.

Таблица IV.5

Характеристика естественного грунта и соответствующей физической модели

Грунт	Сцепление c_w , МПа	Угол внутреннего трения ρ , град	Угол внешнего трения δ , град	Объемный вес γ , г/см ³	Модуль деформации грунта E , МПа	Число ударов $C_{уд}$	Размер фракции d , мм
Средний суглинок при естественной влажности ω 4—10%	0,005—0,06	17—26	16—22	1,5—1,8	25	40—60	Менее 2
Модель грунта при $k_t = 10$: расчетные значения	0,006	22	20	1,8	—	5*	
Допустимые пределы изменения	0,002 (при $\rho_{II} = 3$ м)	20—24	18—21	1,5—1,8	—	0—2*	

Примечание. Коэффициент динамической вязкости η для грунтов и размер d (если $d < 2$ мм) при моделировании можно не контролировать. Состав моделирующего грунта, %: песок — 90, глина — 5, вода — 5.

* Для ударника с увеличенной площадью наконечника $F = 10$ см².

Моделирующая среда при изучении процессов газодинамического разрушения талых, прочных грунтов и грунтов с каменными включениями. Исследование процесса разрушения талых грунтов инструментом с газодинамическим интенсификатором осуществляется на моделирующем грунте, состав которого и основные показатели физико-механических свойств приведены ниже.

Диапазон изменения влажности, %	до 0—18
Устойчивая влажность грунта в лабораторных условиях (t воздуха 15—25°C), %	до 5—8
Диапазон изменения сцепления грунта с грунтом (при $\omega = 5—8\%$), МПа	10—20
Число ударов динамического плотномера конструкции ДсрНИИ	до 2
Угол внутреннего трения грунта по грунту (при $\omega = 5—8\%$), град.	22—27
Угол внешнего трения грунта по металлу (при $\omega = 5—8\%$), град.	20—23
Объемный вес грунта (при $\omega = 5—8\%$), кг/м ³	1800—1900

Гранулометрический состав, %, при диаметре частиц,

мм:	
2,0	0,5
2—1	6,0
1—0,5	40,0
0,5—0,10	35,0
0,1—0,05	5,5
0,05—0,005	10,0
0,005	3,0

Такой грунт соответствует наиболее распространенному типу реальных грунтов — среднему суглинку II—III категории трудности разработки с массовой влажностью 5—8%, числом ударов динамического плотномера $C_{уд} = 8—10$ и объемным весом 1,7—2 г/см³.

В зависимости от степени уплотнения такой грунт позволяет осуществлять моделирование с линейным масштабом до $k_l = 10$. Минимальная погрешность наблюдается при $k_l = 5—7$.

Для исследования процессов разработки грунтов с каменными включениями в качестве моделирующей среды используют грунтово-каменные смеси следующего состава, %:

Грунтовая составляющая	0	20	40	60	80	100
Щебень	100	80	60	40	20	0

Характеристика грунтовой составляющей аналогична рассмотренной. Приготовленную смесь укладывают в бункер перед выхлопным отверстием и утрамбовывают до плотности грунтового компонента с составляющей $C_{уд} = 1$ на требуемой глубине.

Моделирование прочных грунтов IV—V категорий осуществляют эквивалентным материалом, представляющим смесь цемента и песка. Одна из возможных технологий приготовления включает замешивание составляющих на воде; закладку смеси в специальный бункер, установленный перед выхлопным отверстием газоимпульсного устройства, и выдерживание смеси в течение 1 суток. Прочностные свойства грунтов оценивают по числу ударов динамического плотномера $C_{уд}$. Состав и величина $C_{уд}$ моделей прочного грунта приведены ниже:

Песок, %	78—80	80,5—82,5	86—84	83—85	88—90	89—91
Цемент,	15	12,5	10	7	5	4
Вода, %	5—7	5—7	5—7	5—7	5—7	5—7
Число ударов $C_{уд}$	22—19	19—17	15—12	13—10	12—9	10—8

Эквивалент мерзлого грунта устанавливают по наиболее вероятным характеристикам естественного грунта. Конкретные значения критериев $\sigma_{сж}/\sigma_p$, $C_{уд}/\sigma_p$, φ , δ , ϵ , μ для соответствующих эквивалентных материалов, физически подобных мерзлому грунту, а также величины, входящие в критерии подобия, определяют экспериментально. Для наиболее типичных мерзлых грунтов и условий указанные критерии приведены в табл. IV. 3.

При выборе эквивалентного материала необходимо, чтобы его критериальные характеристики были с допустимой погрешностью равны соответствующим критериям подобия, определяющим напряженное

состояние мерзлого грунта. В настоящее время эквивалентные материалы широко и успешно применяют при изучении процессов разрушения различных сред, в том числе и методами физического моделирования. Ряд предложенных материалов по некоторым характеристикам соответствует моделям мерзлых грунтов. При моделировании рабочих процессов разрушения мерзлых грунтов использование существующих разработок встречает ряд трудностей. Отсутствует информация о характере изменения ряда комплексов.

Отсутствие приборов для определения значения $C_{уд}$ моделей при малой толщине ее слоя не позволяет контролировать критерий $C_{уд}/\sigma_p$. Характеристики моделей трудно воспроизвести при повторении опытов ввиду отсутствия надежного оборудования для приготовления эквивалентных материалов с заданными свойствами. Нет достаточно надежной информации о влиянии на свойства таких материалов степени уплотнения, однородности степени перемешивания и других факторов.

Необходима разработка технологии и оборудования для приготовления эквивалентных материалов, обеспечивающих надежное воспроизведение в материале критериев подобия, определяющих заданное значение прочностных параметров среды.

Исследование влияния состава среды и степени уплотнения на параметры прочности эквивалентного материала для моделирования мерзлого грунта позволили установить, что контроль прочностных свойств и подобия материала целесообразно осуществлять по показателям $\sigma_{сж}$, σ_p , $C_{уд}$ и критериям $\sigma_{сж}/\sigma_p$; $C_{уд}/\sigma_p$. Показатель $C_{уд}$ рассматривался в качестве обобщающего, являющегося функцией $\sigma_{сж}$, σ_p , τ_0 , φ , δ , ϵ , μ .

По критерию $\sigma_{сж}/\sigma_p$ косвенно оценивали условия подобия по прочности и подобию на границе разрушения.

Степень уплотнения

$$\epsilon_y = \left(\frac{h_0 - h_c}{h_c} \right) 100\%,$$

где h_0 — толщина слоя материала до уплотнения; h_c — толщина слоя материала после уплотнения.

Содержание вязкой составляющей определялось в процентах от массы единицы объема материала.

Грунтовые смеси различного состава, приготовленные на парафино-канифольном связующем с песчаным наполнителем. Размер зерен наполнителя 0,15—0,30 мм. Сопrotивление сжатию и разрыву при раскалывании определяли на образцах с размерами не менее 20×20 мм стандартными приборами с передачей давления через резиновые прокладки. Для измерения $C_{уд}$ исследователем разработаны специальные малогабаритные ударники с наконечниками соответствующей длины.

Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать вывод, что степень уплотнения оказывает существенное влияние на прочностные характеристики материала. Параметры $\sigma_{сж}$, σ_p , $C_{уд}$ увеличиваются с повышением степени уплотнения. Отношение растет

менее заметно, изменяясь в пределах от 2,6 до 2,9. Изменение содержания вяжущей составляющей до 5% также не оказывает существенного влияния на отношение $\sigma_{сж}/\sigma_p$, которое колеблется в пределах от 2,7 до 2,9, однако приводит к значительному росту значений $\sigma_{сж}$, σ_p , $C_{уд}$, $C_{уд}/\sigma_p$. По характеру и пределам изменения свойств в зависимости от степени уплотнения эквивалентные материалы, содержащие 97% песка, 2% канифоли и 1% парафина, соответствуют мерзлым грунтам различного типа. Соответствующие характеристики мерзлых грунтов, состав и характеристики эквивалентных материалов приведены в табл. IV. 6.

Таблица IV.6

Материалы, эквивалентные мерзлым грунтам

Степень уплотнения, %	Эквивалент * песчаного мерзлого грунта $\omega=20\%$, $T=-(-3-5)^{\circ}\text{C}$					Эквивалент ** мерзлых супе- си и суглинки $\omega=20\%$, $T=-(-5+10)^{\circ}\text{C}$				
	Параметры			Критерии		Параметры			Критерии	
	$\sigma_{сж}'$ МПа	σ_p' МПа	$C_{уд}'$ кол. уд.	$\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p}$	$\frac{C_{уд}}{\sigma_p}$	$\sigma_{сж}'$ МПа	σ_p' МПа	$C_{уд}'$ кол. уд.	$\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p}$	$\frac{C_{уд}}{\sigma_p}$
0	0,45	0,17	13	2,6	0,8	0,17	0,11	3	1,5	0,3
5	0,55	0,20	19	2,7	0,9	0,24	0,13	5	1,8	0,4
10	0,64	0,23	25	2,8	0,1	0,32	0,16	7	2,0	0,4
15	0,74	0,27	31	2,8	1,2	0,39	0,18	9	2,2	0,5
25	0,93	0,33	43	2,8	1,3	0,54	0,23	14	2,3	0,6
40	1,21	0,42	64	2,8	1,5	0,75	0,30	20	2,5	0,7

* Состав смеси, %: песка 97, канифоли 2 и парафина 1.

** Состав смеси, %: песка 98, канифоли 2.

Рекомендуемые материалы могут быть использованы в качестве материала модели независимо от ее линейного масштаба, например когда на процесс доминирующее влияние оказывает только критерий $\eta v(\sigma t)$ и прочностные параметры не зависят от линейного масштаба системы. В других условиях, рассмотренных в табл. IV. 3, моделирование возможно при изменении прочностных параметров в соответствии с изменением масштаба линейных размеров рабочего оборудования. При необходимости увязки масштаба линейного размера с масштабом значений $\sigma_{сж}$, σ_p и других, определяющих прочностные характеристики системы, можно воспользоваться табл. IV 7. Для других вариантов моделирования связи между параметрами устанавливают на основании соответствующих масштабных соотношений (см. табл. IV 3).

Эквивалентные материалы на парафиновой и канифольевой основе отличаются сложной технологией приготовления и требуют применения дорогостоящего оборудования. У эквивалентных материалов на такой основе изменяются физические свойства при каждом повторном нагревании в результате выгорания связующего.

Эквивалентные материалы на глинистой основе являются более простыми. В качестве связующего компо-

Таблица IV.7

Зависимость параметров эквивалентного материала, составленного из глины и песка, от масштаба (оригинал-суглинок при $t = -5^\circ\text{C}$, влажность $\omega = 20\%$)

Линейный масштаб моделирования K_L	Параметры прочности						Эквивалентный материал			
	$\sigma_{с1}$ Н/м ²	σ_p Н/м ²	$S_{уд}$ уд.	$\sigma_{сж}$ σ_p	$S_{уд}$ σ_p	кол. уд. м ² Н	Влажность ω , %	Количество уплотняющих ударов $n_{уд}$	Компоненты, %	
									глина	песок
1 (оригинал)	$66 \cdot 10^5$	$20 \cdot 10^5$	160	3,3	$8 \cdot 10^{-5}$	—	—	—	—	
5	$13 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	32	3,3	$8 \cdot 10^{-5}$	—	—	—	—	
8	$8 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^5$	20	3,3	$8 \cdot 10^{-5}$	9	25	50	50	
10	$6,6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	16	3,3	$8 \cdot 10^{-5}$	9	18	50	50	
12	$5,5 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$	13	3,3	$8 \cdot 10^{-5}$	11	15	50	50	
15	$4,4 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$	10	3,3	$8 \cdot 10^{-5}$	11	11	50	50	

нента берут молотую глину с добавлением воды, а в качестве наполнителя — песок. Контроль подобия материалов определяют на основании параметров $\sigma_{сж}$, σ_p , $S_{уд}$. Показатель $S_{уд}$ рассматривают в качестве обобщающего. Для приготовления такого моделирующего материала рекомендуется технология, включающая операции просушивания и последующее измельчение компонентов (связующего и наполнителя) просеивания и развесовки компонентов; перемешивания песка-наполнителя с водой; перемешивания влажного песка со связующим до получения однородного состава; укладывания смеси в контейнер; уплотнения смеси динамическим способом, обжиманием на прессе; контроля свойств эквивалентного материала. Уплотнение эквивалентного материала рекомендуется проводить в грунтовом контейнере размером $0,45 \times 0,35 \times 0,15$ м падающим грузом весом 5 кг с высоты 2 м. Контроль свойств эквивалентного материала проводят стандартными методами. Параметр $S_{уд}$ измеряют непосредственно на массиве в контейнере с повторностью не менее шести раз при степени относительной ошибки не более 20%, коэффициенте вариации 10—20% и при надежности $\alpha = 95\%$.

Подобие эквивалентного материала устанавливают на основании анализа экспериментов о параметрах $\sigma_{сж}$, σ_p , τ , $S_{уд}$ мерзлого грунта и соответствующих величин эквивалентного материала.

Следует подчеркнуть, что физико-механические характеристики эквивалентного материала зависят от технологии его приготовления. Правильно приготовленные смеси имеют механическое подобие с мерзлыми грунтами по безразмерным характеристикам в диапазоне $S_{уд}/\sigma_p = 7 \div 25$ и $\sigma_{сж}/\sigma_p = 3 \div 5$ (см. табл. IV 7). Число уплотняющих ударов является важным фактором, влияющим на параметры $\sigma_{с1}$, σ_p ,

Судя, поэтому необходимо тщательно контролировать указанный параметр. Такой эквивалентный материал можно использовать повторно. Его измельчают, тщательно перемешивают, а затем уплотняют в соответствии с установленной технологией.

Эквивалентная среда, моделирующая грунт на ферромагнитной порошковой основе. представляет материал в виде мелкодисперсных смесей железа, никеля, кобальта, бария, а также талька, графита, магнетита, магнезии, кварца, окиси цинка и др. Их гранулометрический состав находится в пределах от 10 до 600 мкм. Роль связки в данном случае выполняет магнитный поток, пронизывающий грунт-аналог. Изменение физико-механических характеристик подобного грунта-аналога можно осуществлять как путем регулирования параметров магнитного поля, так и изменением фракционного и гранулометрического состава ферромагнитного порошкового материала. Однако создание магнитного поля в грунтовом канале большой площади наряду с трудностями поставки значительного количества ферромагнитных материалов осуществить сложно.

Моделирование снежного покрова. Возможности метода эквивалентных материалов при моделировании механических свойств среды иллюстрирует практика создания сред, имитирующих снежный покров.

Эквивалентный материал, моделирующий механические свойства снежного покрова, определяется на основании условий моделирования, следующих из табл. IV 3. Исследования методов создания и свойств такого моделирующего материала позволяют говорить о возможности и технико-экономической эффективности применения такого рода эквивалентов при использовании снегоуборочных машин и для функциональных испытаний готовой продукции, что важно для летнего периода работы предприятия. Состав материала определяется вариантом моделирования по видам доминирующих сил.

Для слабосмерзшегося снега можно использовать (Э. А. Кравцов) материал следующего состава: опилки древесные из лиственных пород с размером зерен 0,5—1,0 мм —30%; песок с таким же размером зерен —37%; парафин —33%. Составные части перемешиваются в нагретом состоянии с постепенным охлаждением. Объемная масса смеси находится в пределах от 5 кн/м³.

Некоторые сорта несмерзшегося снега можно моделировать опилками, устанавливая физико-механические свойства среды на основании критериев варианта, соответствующего моделированию сыпучего материала. В ряде случаев для моделирования плотного снега можно использовать речной песок влажностью до $\omega = 3\%$ с размером частиц 0,05—0,005 мм не более 4%. Объемная масса такого материала составляет $\gamma = 14,6$ кн/м³, сцепление достигает 0,0012 МПа. Материал имеет угол внутреннего трения, соответствующий некоторым видам снега 27—29°

Приступая к формированию приближенных физических моделей процессов взаимодействия инструмента со средой в соответствии с рекомендациями, рассмотренными в гл. IV, необходимо обратить внимание на следующие положения:

1. Критерии подобия изучаемого процесса следует устанавливать на основе анализа математических моделей-описаний, определяющих протекание процесса, для получения которых используют положения механики сплошной среды и в качестве первого приближения уравнения термодинамической модели процесса.

2. Физические модели с использованием метода эквивалентных материалов, так же как и методы, основанные на испытании масштабной модели в натурной естественной среде с введением поправочного коэффициента на несоблюдение критериев подобия, могут дать достоверные результаты в пределах основного ограничения, что в моделирующей системе процесс описывается уравнениями, справедливыми для моделируемого объекта.

Глава V

ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ И МАШИН МЕТОДАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

§ V.1. ВЫБОР МОДЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ИССЛЕДОВАНИЙ С МОДЕЛЯМИ

Выбор средств для исследования комплексов и рабочих процессов дорожно-строительных машин определяется характером задач и особенностями самих моделирующих установок и ЭВМ. Существующие средства моделирования и вычислительной техники имеют определенную сферу применения при решении задач, связанных с исследованием рабочих процессов дорожно-строительных машин. Важно указать те области, в которых предпочтительнее использовать то или иное средство или метод. Оценку соответствующего оборудования выполняют по анализу следующих характеристик моделей: точность, возможность решения сложных математических и логических задач, масштаб исследований и расчетов, затраты времени на подготовку и быстрота выдачи результатов, наглядность исследования, требуемая квалификация обслуживающего персонала и трудоемкость освоения, удобство использования, стоимость.

На основании указанных характеристик в табл. V. 1 дан анализ применения средств моделирования и вычислительной техники для расчетов и использований рабочих процессов дорожно-строительных машин. Для каждого средства указаны положительные и отрицательные характеристики. Положения, приведенные в таблице, даны без учета экономической целесообразности использования средств и потому ориентировочны. Из сравнения следует, что при поисковых исследованиях наибольший эффект может быть получен при совместном использовании средств физического моделирования и вычислительной техники (математического моделирования).

Различают два вида совместного использования средств: комбинированное и комплексное. *Комбинированным* называют такой метод исследования, когда то или иное средство при решении конкретной задачи дополняется отдельными элементами другого, образуя единую установку. Комбинированные модели позволяют расширить возможности отдельных средств и компенсировать их некоторые недостатки. Широко применяется комбинирование АВМ с реальными элементами, с физическими моделями, с элементами ЭВМ.

Стремление к улучшению характеристик отдельных средств моделирования и вычислительной техники путем комбинирования приводит к образованию нового средства с принципиально новыми свойствами и характеристиками. Примером такого средства может служить стенд

Свойства и область применения предметно-методических
и физических моделей

Модели	Свойства		Область и условия применения
	положительные	отрицательн	
АВМ	Решение сложных задач без предварительного преобразования к арифметическим операциям. Высокое быстродействие. Изменение параметров в широких пределах. Простота измерения параметров. Хорошая наглядность в процессе решения. Удобство эксплуатации	Зависимость точности от сложности задачи. Значительная стоимость. Большое время на подготовку при решении сложных задач. Необходимость в квалифицированном обслуживающем персонале	Решение задач динамики при известном математическом описании процесса
ЭВМ	Большая точность расчетов. Возможность решения задач различного вида. Высокое быстродействие. Достоверность в пределах используемых решений	Большое время на подготовку решений. Необходимы специальные устройства, обеспечивающие наглядность. Высокая стоимость машин и расчетов. Необходимость в квалифицированном обслуживающем персонале	Решение детерминированных и статистических задач при известном математическом описании процесса и плотностях распределения величин
Физические: с изменением свойств среды	Достоверность в пределах справедливости критериев подобия. Сохранение физической природы процесса. Точность в пределах расчетов. Отсутствие необходимости в математическом описании. Возможность моделирования любых процессов. Хорошая наглядность. Большая производительность	Ограничение скорости операций. Необходимость в моделировании среды. Трудоемкость приготовления модели и среды. Трудность осуществления подобия по всем критериям процесса	Моделирование динамических процессов взаимодействия оборудования со средой при отсутствии полного математического описания, установленные эмпирических зависимостей
Без изменения свойств среды	Достоверность в пределах ограничений метода. Отсутствие необходимости в моделировании среды	Необходимость в нескольких моделях разного масштаба для перехода от модели к оригиналу или определения поправочного коэффициента	Моделирование установившихся и переходных процессов

Модели	Свойства		Область и условия применения
	положительные	отрицательные	
Комбинированные физико-математические	Решение сложных задач. Универсальность. Изменение параметров в широких пределах. Наглядность. Удобство эксплуатации. Достоверность в пределах справедливости критериев подобия	Трудность осуществления связи между физической и математической частями модели. Необходимость в квалифицированном обслуживающем персонале	Моделирование комплексов с новым рабочим оборудованием при отсутствии надежного математического описания процесса взаимодействия оборудования со средой

для физико-математического моделирования рабочих процессов землеройно-транспортных машин, который состоит из физической модели, соединяемой по определенным правилам с математической моделью.

Комплексное использование средств моделирования и вычислительной техники означает, что все или некоторые средства направлены на решение одной задачи при возможно более полном использовании особенностей каждого из них. Комплексное использование заключается в применении того или иного средства при решении такого вопроса, при котором могут проявиться наиболее сильные его стороны. Например, при необходимости выявления физической сущности изучаемого явления в процессе взаимодействия оборудования со средой целесообразно применять физические модели. Там, где требуется оценить различные варианты технико-экономических систем, системы стандартных приводов и другие при известных зависимостях и ограничениях целесообразно использовать ЭВМ. В случае необходимости определения пределов изменения отдельных параметров при подготовке задачи для решения на ЭВМ лучше использовать физическую модель. К помощи ЭВМ целесообразно обращаться при отработке типовых программ.

Комплексное моделирование позволяет выявить такие стороны исследуемой системы, которые недоступны при применении каждого метода и средства в отдельности.

Процесс моделирования с использованием моделей различного вида обусловлен соблюдением ряда общих процедур или правил. Одной из важных является выбор рациональной точности моделирования. Чем выше точность, тем ценнее результат, но тем сложнее модель и больше время моделирования. Основой компромисса является показатель эффективности. Внутри модели должен соблюдаться баланс точностей, заключающийся в соразмерности систематической погрешности моделирования с погрешностью исходного описания, соответствие точностей отдельных составных частей модели. Для надежной балансировки следует вести параллельное моделирование процессов на моделях разного вида, а также разных вариантов одной модели.

В описании необходимо выделить отдельные блоки, тесно связанные между собой; но которые удобно анализировать самостоятельно. Это облегчает их удаление из модели или упрощение, если степень влияния такого блока на результаты не существенна. Обмен информацией между блоками модели должен быть минимальным. В ряде случаев сложное воздействие целесообразно заменить случайным наиболее тяжелым для рассматриваемого процесса. Упрощение модели осуществляют на первом этапе посредством неконтролируемого упрощения до уровня максимальной простоты, а затем переходят к контролируемому последовательному усложнению.

Выбор модели требует идентификации, т. е. определение степени соответствия ее оригиналу. Грубая идентификация осуществляется на основании морфологических данных по описанию составных частей, связей между ними, их устройству. Следующий этап — сравнение логико-математических схем, а также количественная оценка различия. Для моделей технических систем оценка степени подобия осуществляется на основании анализа критериев подобия особых количественных характеристик системы. Наиболее трудно поддаются идентификации эвристические модели и рефлективные элементы, критерии подобия по которым практически не разработаны.

Оценка результатов моделирования осуществляется на базе анализа функционального показателя эффективности. Целесообразно такой критерий непосредственно включать в модель в качестве отдельного блока. Однако это не удастся сделать, если показатель имеет качественный характер. Здесь важно осуществить его трансформацию в показатель, имеющий количественную интерпретацию и измеряемый физически. Одним из эффективных способов упрощения показателей состоит в их декомпозиции или замены одного обобщенного несколькими частными показателями.

Эффективным способом моделирования является представление сложной системы в виде отдельных агрегатов [7] при предметно-математическом моделировании. При исследовании рабочих процессов дорожно-строительных машин рациональным является использование комбинированных моделей, основу которых составляет система физических и математических моделей для отдельных подсистем объекта.

Самое неожиданное техническое решение на поверку содержит элементы ранее известных конструкций. Его отличие заключается в том, что эти элементы дополнены новыми, собраны в новую конструкцию, рассмотрены под новым углом зрения и развиты в новом направлении. В этом проявляется закономерность единства и борьбы противоположностей. Каждое новое решение можно либо отвергнуть, либо понять. Последнее наиболее трудно и технически, и психологически, так как требует восприятия и переработки большого количества информации. Поэтому при выдвигании нового решения необходимо такое его представление, которое облегчает его восприятие и поддержку.

Рекомендации по использованию физических масштабных моделей в практике исследования. Выбор масштаба модели определяется в значительной степени конечной целью и задачами исследования. Задачи могут меняться в зависимости от этапов проектирования и созда-

ния машины. В соответствии с этим возникает потребность в получении соответствующих сведений об объекте. В зависимости от сведений, которые необходимо получить от модели, выбирают масштабы параметров, материал для изготовления модели, метод испытания и точность измерения фиксируемых параметров. Выбор линейного масштаба модели является определяющим. Это определяет точность результатов, время и материальные затраты. Анализ результатов моделирования в СССР и за рубежом позволяет сделать вывод о целесообразности использования комплексного и комбинированного моделирования с широким применением физических моделей разного назначения и масштаба.

Выбор линейного масштаба моделей рабочих органов необходимо рассматривать исходя из существа потребностей каждого из этапов проектирования: проектное предложение, проектное задание, разработка рабочих чертежей, создание экспериментального образца, серийное производство и эксплуатация. При разработке проектного предложения на начальном этапе проектирования при формировании концепции машины, рабочего органа или другой подсистемы, когда идет поиск идеи, обосновывается схема, оцениваются качественные характеристики процесса, целесообразно использовать приближенные физические модели малого масштаба с 15—25-кратным линейным уменьшением без строгого ограничения, накладываемого на моделирующий материал. На этом этапе достаточно выявить характер взаимодействия инструмента со средой, установить, соответствует ли наблюдаемая картина выдвинутой теоретической гипотезе. Достоинство таких моделей заключается в их низкой стоимости и быстром изготовлении и испытании.

На этапе разработки проектного задания возникает необходимость выбрать рациональную конструктивную схему подсистемы, установить рациональные параметры процесса, выявить его силовые и энергетические показатели, оценить технико-экономическую эффективность. В этом случае целесообразно применить приближенные модели большего линейного масштаба с 5—12-кратным уменьшением против оригинала. Условия подобия должны быть на этом этапе обоснованы методами анализа уравнений. Целесообразно использовать комплексное моделирование. Важно исследование на физической модели вести параллельно исследованию на предметно-математической модели АВМ или ЭВМ. При отсутствии надежной логико-математической модели на этом этапе следует воспользоваться методами анализа размерностей.

На этапе проектного задания целесообразно проверить ряд характеристик основных узлов. В этом случае последние могут быть выполнены в натуральную величину или с кратностью линейного уменьшения, не превышающей 4—5. Соответствующую модель и оригинал изготавливают из одинакового материала. Такую модель можно использовать для получения основных показателей надежности, безотказности и долговечности. На этапе рабочего проектирования большой интерес представляют сведения, касающиеся более точной оценки технико-экономических показателей машины.

Основные этапы исследований с моделями. Обоснованность получения достоверных результатов на моделях в значительной степени

обусловлена полнотой выявления определяющих критериев подобия и их последующей реализацией в модели. Важно правильно сформулировать задачи исследования и четко соблюдать последовательность проведения отдельных этапов исследований. Большое значение имеет аккуратность выполнения соответствующих операций. Обобщение опыта использования моделей в различных областях науки и техники позволяет выделить ряд основных этапов исследования, краткая характеристика которых дана на рис. V 1.

Постановка задачи является одной из важнейших задач, имеющих подготовительный характер. Методика существенно не отличается от аналогичных задач при исследовании рабочих процессов новых натуральных объектов. На этом этапе формулируется общая концепция рабочей гипотезы протекания исследуемого процесса и выявляются альтернативы принципиального конструктивного оформления рабочего органа, осуществляющего изучаемый процесс. Для подтверждения принятой гипотезы помимо анализа научно-технической и патентной информации уже на этом этапе бывает целесообразно использовать приближенные физические модели упрощенного типа. Это позволяет наиболее экономично внести в модель соответствующие коррективы. Важным вопросом этого этапа является также анализ полученной информации и формирование цели и задач исследования.

Если сомнение вызывает исходная гипотеза или использование логико- или предметно-математических моделей встречает существенные трудности и требуются уточнения, возникает необходимость постановки экспериментальных исследований специального характера, выполнение которых наиболее эффективно осуществляется методами физического моделирования. В этом плане основные задачи исследования обычно включают следующие вопросы: получение сведений для формирования логико-математических моделей; оптимизация параметров и режимов процесса; оптимизация силовых и энергетических параметров рабочего органа; использование физической модели подсистемы «рабочий орган — среда» как элемента комбинированной гибридной предметно-математической модели; проверка машинных решений.

В зависимости от поставленных вопросов выявляются общие требования к физической модели и составляющих ее частей. Если необходимо исследовать процесс, при котором под воздействием инструмента среда меняет свои физико-механические свойства и состояние в качестве среды моделирующей подсистемы, нужно использовать натуральный материал.

Этап формирования основных условий моделирования при формировании физических моделей включает установление критериев подобия. Исходные материалы для этого рассмотрены выше. На этом этапе не целесообразно использовать уравнения-гипотезы, правомерность которых необходимо уточнить на моделях. В том случае, если процесс не может быть представлен в виде обособленной математической модели, целесообразно воспользоваться методом анализа размерности.

Задача, касающаяся проверки машинного решения, как правило, не требует рассмотрения вопроса о переходе от модели к оригиналу.

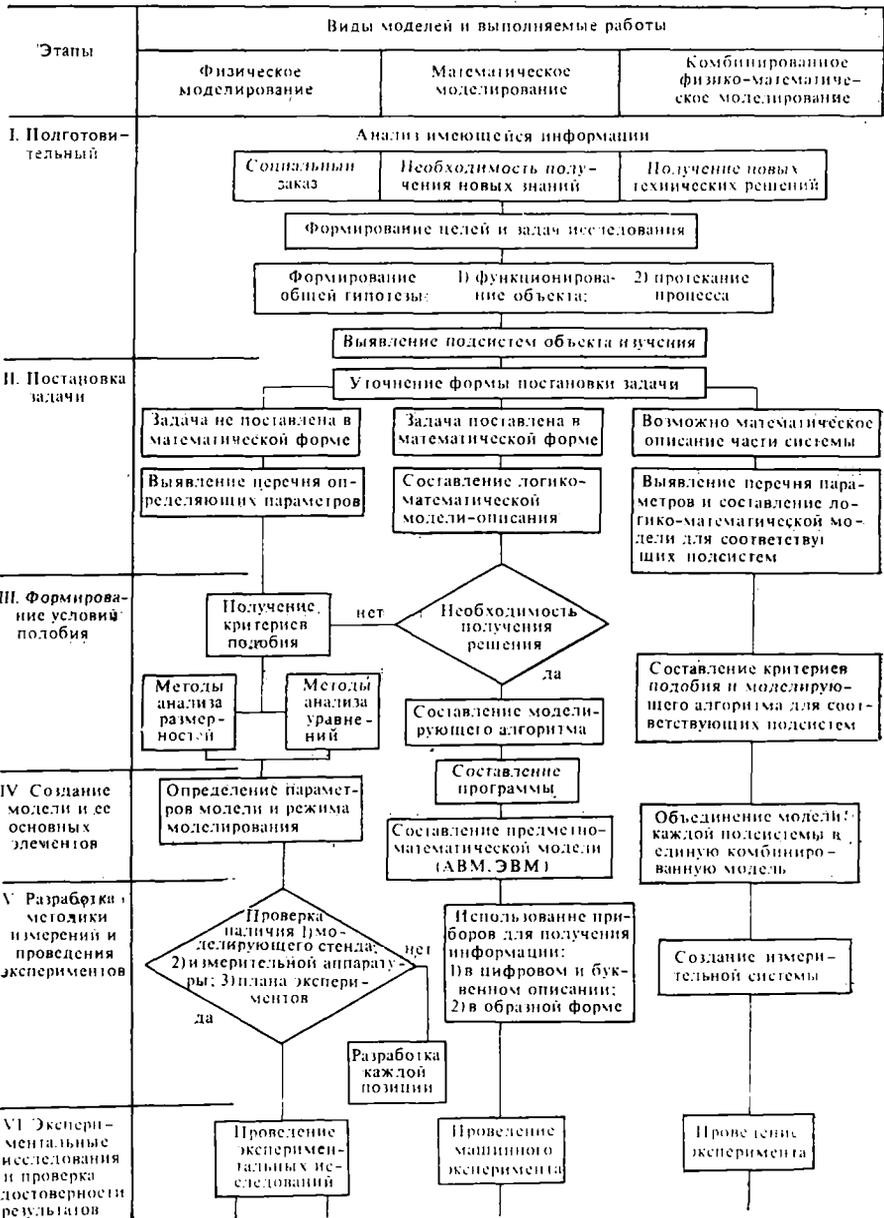


Рис. V.1. Основные этапы и виды работ, выполняемых при изучении рабочих процессов дорожно-строительных машин методами моделирования



Рис. V.1. Продолжение

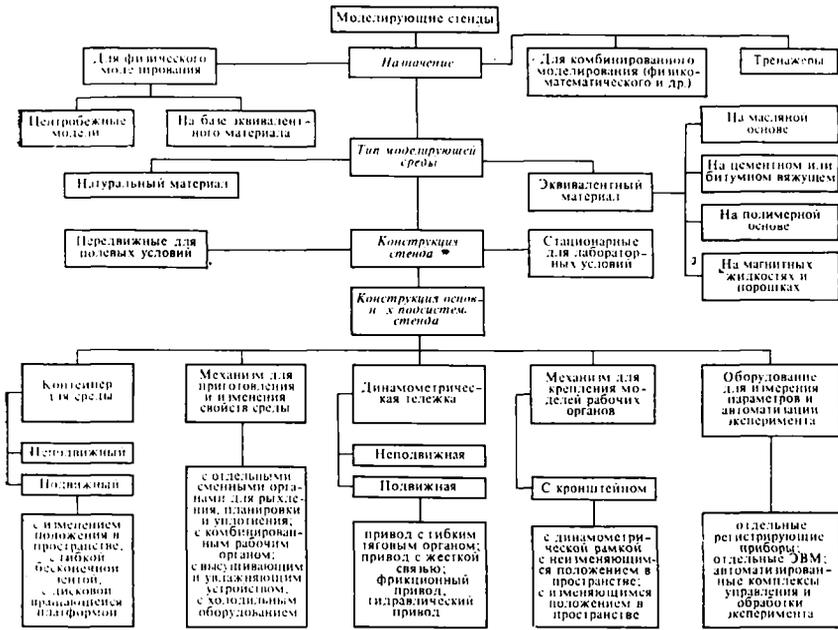


Рис. V.2. Классификация стендов для исследования рабочих процессов землеройных, дорожных и других строительных машин

Проверка осуществляется путем расчета имеющейся физической модели и сопоставления полученного решения с экспериментом на модели.

§ V.2. СТЕНДЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Оборудование для физико-математического моделирования состоит из двух основных частей. Одна из них является физической моделью исследуемой подсистемы, вторая представляет комплекс ЭВМ и устройство для представления другой части системы в виде предметной математической модели. Классификация стендов дана на рис. V. 2. Комплексный стенд разработан в Московском автомобильно-дорожном институте для моделирования рабочих процессов и систем дорожно-строительных машин. Физическая и математическая подсистемы стенда соединены в единый комплекс. Блок-схема стенда приведена на рис. V. 3.

При необходимости можно использовать в работе только физическую модель или только математическую часть системы. Стенд позволя-

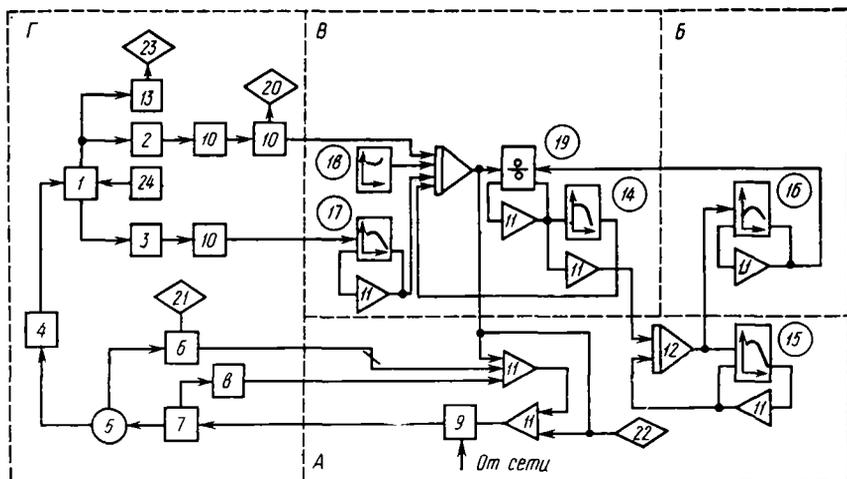


Рис. V.3. Блок-схема стенда для физико-математического моделирования:

А, Б, В — математические модели подсистем «двигатель — трансмиссия — движитель»; Г — физическая модель подсистемы «грунт — рабочее оборудование»; 1 — физическая модель рабочего органа; 2 — датчик усилия копания; 3 — датчик контроля глубины резания; 4 — элементы механического привода физической модели рабочего органа; 5 — двигатель привода рабочего органа постоянного тока; 6 — тахогенератор; 7 — тиристорный выпрямитель с фазовращателем; 8 — датчик силы тока; 9 — блок включения системы и коррекция по скорости перемещения модели рабочего органа; 10 — усилитель постоянного тока; 11 — операционный усилитель АВМ; 12 — интегрально суммирующие усилители АВМ; 13 — датчик линейного перемещения модели рабочего органа; 14 — блок нелинейности, реализующий закон изменения коэффициента буксования от силы тяги $\delta = f(\tau)$; 15 — блок нелинейности, реализующий закон изменения крутящего момента дизеля от угловой скорости $M_t = f(\omega_d)$; 16 — блок нелинейности, реализующий закон изменения угловой скорости вала трансмиссии от угловой скорости вала двигателя $\omega_T = f(\omega_d)$; 17 — блок коррекции тягового усилия от рельефа; 18 — блок, реализующий закон изменения коэффициента перекачивания в зависимости от грунтовых усилий; 19 — блок деления АВМ; 20 — прибор для регистрации значения сопротивления копанью; 21 — прибор для регистрации действительной скорости перемещения модели рабочего органа; 22 — прибор для регистрации скорости на математической модели системы; 23 — прибор для регистрации линейного перемещения модели рабочего органа; 24 — физическая модель грунта

ет собирать комбинированные модели различной сложности и назначения для исследования: 1) процессов, которые не связаны с приводом и системой автоматического регулирования (САР) объекта, например, для изучения влияния типа и конструкции рабочего органа на рабочий процесс резания грунта, влияния параметров двигателя на тяговые и сцепные свойства и т. д.; 2) динамики бесступенчатой системы регулирования; 3) параметров дизеля с регулятором в специфических условиях рабочего процесса; 4) всей машины, включая САР.

Приведенные группы позволяют получить несколько вариантов структурных схем для решения задач различного типа.

Математическая модель как часть описываемого стенда представляет набор АВМ. На них осуществляется математическое моделирование части изучаемой подсистемы. АВМ размещена на отдельной платформе, которая расположена выше физической модели. Оператор, ведущий процесс, имеет возможность наблюдать за работой математической и физической моделей одновременно.

В качестве моделирующей установки используют блоки АВМ. Для набора приближенного варианта модели, например модели бульдозера, необходимы две такие установки, а для получения полного развернутого варианта — три. Для удобства работы оператора приборы управления и контроля АВМ и стенда для физического моделирования размещены на специальном пульте управления.

Электронная модель имитирует работу подсистемы «двигатель — грунт» и «двигатель — двигатель». На электронную модель подается сигнал с тензодатчика физической модели, который, например, может соответствовать горизонтальной составляющей силы сопротивления копанью грунта, действующей на физическую модель. Слабым звеном подобной системы является то, что сигнал, снимаемый с усилителя постоянного тока, должен быть усилен еще, ибо в ряде случаев его значение сопоставимо с возможным дрейфом нуля операционного усилителя моделирующей установки. Напряжение, имитирующее действительную линейную скорость перемещения машины, подается на систему управления приводами физической модели и реализуется на двигателе перемещения. Уменьшение или увеличение линейной скорости электронной модели соответствует уменьшению или увеличению линейной скорости физической модели. Для решения сложных нелинейных систем возможна параллельная работа двух и более установок типа МН-7 или МН-14. Моделирование может происходить в натуральном или в преобразованном масштабе времени. Установка может работать совместно с приборами управления или автоматического регулирования исследуемой системы.

САР обеспечивает автоматическое управление рабочим процессом физико-математической модели, а также регулирование по угловой скорости вала двигателя и по буксованию. Она имитируется с помощью реле, операционных усилителей и диодных блоков сравнения электронной установки и поляризованного двухобмоточного реле. Сопротивление каждой обмотки этого реле равно 20 кОм, что позволяет использовать в качестве нагрузки для операционного усилителя каждую обмотку реле. Для получения сигналов управления от электронной

модели необходимы дополнительные устройства. В структурной схеме системы управления физико-математической моделью используется двухконтурная система управления двигателем перемещения физической модели и двигателем заглубления.

Стенд для физического моделирования является составной частью физико-математической модели. Он может быть использован в качест-

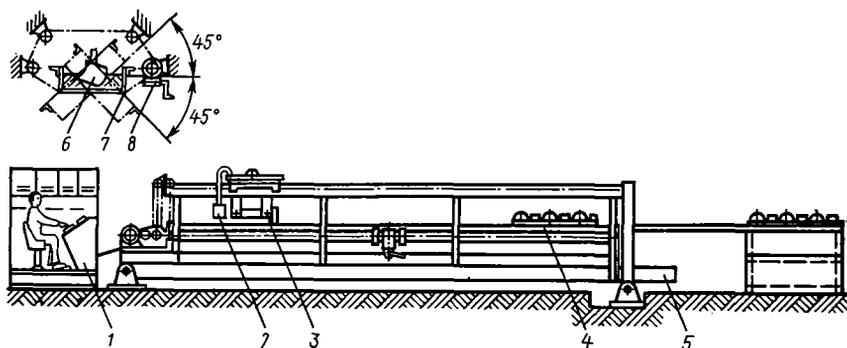


Рис. V. 4. Стенд для физического и физико-математического моделирования рабочих процессов дорожно-строительных машин:

1 — стационарный пульт управления работой стенда с осциллографическим оборудованием и платформой для размещения ЭВМ; 2 — переносный пульт управления работой стенда; 3 — тензометрическая тележка; 4 — оборудование для подготовки грунта; 5, 8 — механизмы имитации продольных уклонов и поперечных профилей поверхности разрабатываемой среды (грунта); 6 — физическая модель исследуемого рабочего оборудования машин; 7 — грунтовой контейнер

ве отдельного испытательного стенда самостоятельно. Основным элементом стенда является грунтовой канал, позволяющий моделировать процессы, протекающие в подсистеме «грунт — рабочее оборудование» (рис. V 4). Рама стенда — сварная. Она предназначена для размещения грунтового контейнера и крепления направляющих элементов тензометрической тележки и оборудования для подготовки грунта. Для удобства обслуживания стенд снабжен одним переносным и двумя стационарными пультами управления.

Стенд для физического моделирования рабочих процессов дорожно-строительных машин СИ-89 является более совершенным оборудованием (рис. V 5). Он состоит из рамы 1, подготовительной 2 и тензометрической 3 тележек. Рама 1 представляет собой жесткую пространственную металлоконструкцию, внутри которой находится грунтовой контейнер. На верхней части боковых стенок рамы выставлены секции направляющих путей, по которым перемещаются тележки. Нижняя часть боковых стенок с прямоугольными вырезами и кожухами, в которых имеется большое количество отверстий, является воздухопроводом. В кожухах установлены электронагревательные элементы ТЭН-21. Воздух, подаваемый вентилятором высокого давления ВВД-5, проходит по воздухопроводу и через отверстия в кожухах попадает в грунт. Нагретый воздух, просачиваясь через грунт, выпаривает влагу. Воздуховод одновременно является и дренажной системой. Слив воды

производится через специальное отверстие в торце боковой стенки. Рама может поворачиваться вокруг своей поперечной оси на 15° в одну сторону. Поворот и фиксация осуществляются при помощи двух домкратов. Опоры, на которых при помощи пальцев, установлена рама, крепятся к фундаменту болтами. Торцы грунтового контейнера закрыты съемными крышками для удобства выгрузки грунта.

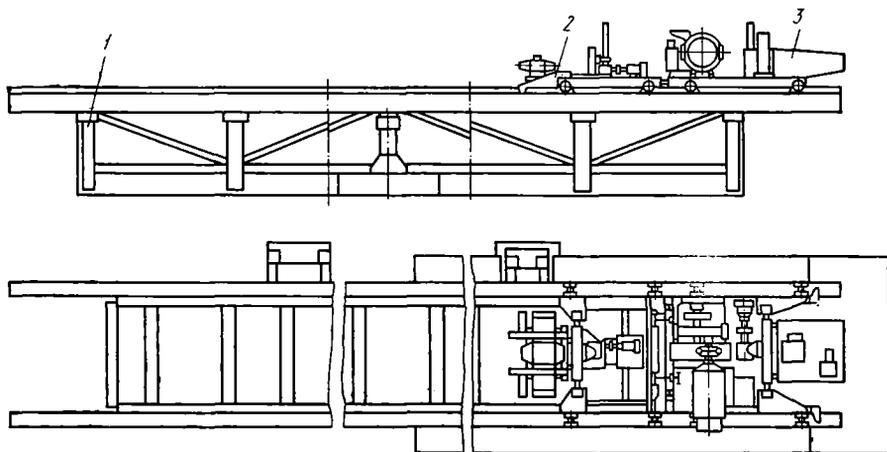


Рис. V.5. Стенд СИ-89 для физического моделирования рабочих процессов дорожно-строительных машин

Методы физического моделирования рабочих процессов получили большое распространение за рубежом. В дополнение к стандартному оборудованию для испытания машин в натуральную величину разработаны стенды для физического моделирования системы в целом или отдельных ее элементов. Основу таких стендов представляют грунтовые каналы с соответствующей динамометрической аппаратурой.

Стенд для исследования рабочего оборудования землеройных машин фирмы «Дженерал Моторс» имеет динамометрическое оборудование, которое включает счетно-решающий комплекс. Грунтовой канал создан для исследования специального «лунного» вездехода, а также для выбора параметров гусеничных движителей тракторов и рабочих органов землеройных машин и орудий. Канал имеет длину 27,5 м и состоит из девяти секций размером 3,05 × 1,52 м. Одна из секций в центре разделяется на два участка длиной по 12,2 м. Один из участков заполнен чистым кремниевым песком с постоянной влажностью 5—6%, другой — заполнен каолиновой глиной с высоким содержанием кремния, имеющей влажность 12—13%. Для сохранения стабильной влажности канал в нерабочем состоянии закрывается пластиковой пленкой.

Приводная система канала расположена между рельсами и включает электродвигатель мощностью 15 квт, вращающий через шестеренный редуктор четырехскоростную трансмиссию и роликтовую передачу, барабан диаметром 55,4 см и бесконечные тросы, проходящие под рель-

сами. Испытываемая тележка присоединяется к тросам при помощи гидравлических зажимов и протаскивается вдоль рельсов с максимальным тяговым усилием на I передаче 1,72 кН и скоростью 0,7 м/с. Максимальная скорость движения тележки на IV передаче (2,78 м/с) поддерживается с точностью $\pm 0,5\%$. Стенд позволяет испытывать модель скрепера в 1/6 натуральной величины.

В процессе испытаний ведется непрерывная запись времени и пройденного тележкой расстояния. Для поддержания почвы в необходимом состоянии имеется рабочая тележка, оборудованная приспособлениями для рыхления, планирования и укатывания почвы, а также увлажнителем. Усилия, действующие на испытываемую модель, регистрируются на осциллографе и передаются на ЭВМ, что позволяет получить готовый результат в виде графика уже к концу того или иного опыта.

Экспериментальная лаборатория по изучению водных путей (США) имеет грунтовой канал многоцелевого назначения, отличительной особенностью которого является динамометрическая тележка подвешенного типа, перемещающаяся по рельсам.

Грунтовой канал, имеющий форму окружности, установлен в лаборатории по изучению машин для обработки почвы министерства земледелия США. В процессе исследований бункер с грунтом вращается, а подвергаемое испытанию оборудование, закрепленное на динамометрическом рычаге, остается неподвижным.

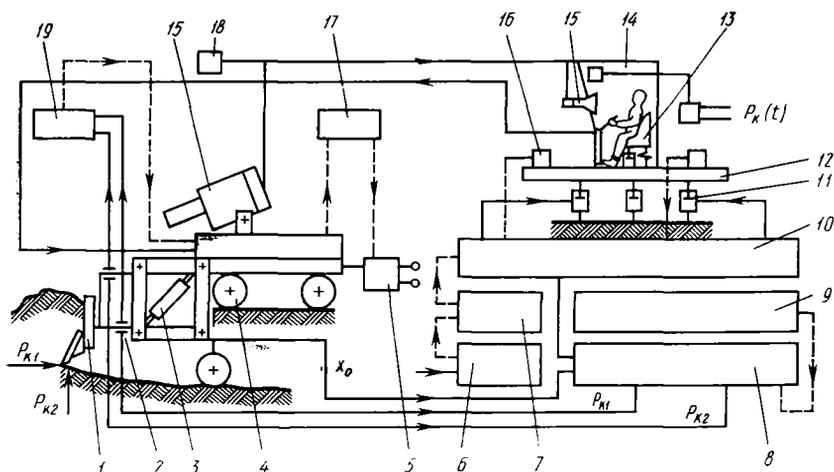


Рис. V.6. Схема комбинированной физико-математической модели для комплексного исследования землеройно-транспортных машин и моделирования систем «среда — машина — оператор»:

1 — физическая модель системы «грунт—рабочее оборудование»; 2 — тензодатчик; 3 — устройство для заглубления рабочего органа; 4 — динамометрическая тележка; 5 — запоминающее устройство; 6 — приемник сигналов от акселерометра; 7 — интегратор; 8 — математическая модель землеройно-транспортной машины как динамическая система; 9 — аппаратура для записи и воспроизведения микропрофиля реальной дороги; 10 — система управления гидроцилиндрами; 11 — гидроцилиндры; 12 — платформа; 13 — сиденье оператора; 14 — кабина; 15 — телевизионная система; 16 — датчики уровня; 17 — система автоматического регулирования скорости; 18 — кинопроектор для дополнительной индикации обстановки; 19 — система автоматического регулирования глубины резания

Анализ различных конструкций грунтовых каналов позволяет сделать вывод о тождественности принципов замера усилий и обработки опытных данных. Конструкция приводов систем управления, механизмов для приготовления грунта и динамометрических тележек в каждом из стендов различна и обусловлена задачами исследований, типом и размерами изучаемого оборудования.

Перспективно дальнейшее развитие стендов для комбинированного физико-математического моделирования. В качестве последующего этапа, например, можно предусмотреть использование комбинированной модели для определения нагрузок в металлоконструкциях, тягово-сцепных свойств движущегося агрегата в процессе выполнения различных вариантов рабочего цикла. Целесообразно использование стенда в качестве тренажера для изучения психологических аспектов управления, а также для обучения приемам управления уникальными или громоздкими агрегатами.

Стенд, блок-схема которого приведена на рис. V 6, имеет многоцелевое назначение. Он может быть, например, использован для исследования физических возможностей человека при управлении машинами, работающими на повышенных скоростях, а также на новых принципах разрушения грунтов, которые могут оказывать вредное воздействие на водителя (вибрация, удар, взрыв и т. п.).

§ V.3. ОБРАБОТКА И ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ

Оценка соответствия физических моделей оригиналу. При физическом моделировании системы «среда — рабочий орган машины» ряд определяющих параметров носит случайный характер. В этом случае имеет место стохастическое подобие модели оригиналу. Подобие при этом устанавливают по соблюдению тождества распределения плотностей вероятностей определяющих критериев модели и оригинала. Последнее оценивают по равенству статистических характеристик соответствующих величин. Число замеров определяет объем выборки. С возрастанием порядка момента случайной величины снижается точность его оценки по данной выборке. Повышение точности обычно обеспечивают увеличением кратности экспериментов.

Оценку соответствия осуществляют по анализу заданной плотности распределения вероятности или функции распределения случайной величины. За неизвестное точное значение критерия подобия принимают величину его математического ожидания при достаточно большой выборке Π_n . Значение критерия, определенное по текущим замерам входящих в него величин, обозначают Π_i . Ошибку критерия определяют как $\delta = \bar{\Pi}_n - \Pi_i$. Ее считают следствием суммирования большого числа малых ошибок параметров, определяющих процесс. Это позволяет считать ее подчиняющейся нормальному закону распределения.

Степень подобия при моделировании случайных процессов оценивают по статистическим величинам, характеризующим значения критериев подобия, как случайных величин. Оценка соответствия явле-

ний, протекающих в приближенных физических моделях «среда — рабочее оборудование машин», включает рассмотрение ряда вопросов.

На первом этапе производят серию экспериментов на двух моделях изучаемых процессов с устройствами различных масштабов: $k_1 = 2$, $k_1 = 4$. Устройство с масштабом $k_1 = 2$ является оригиналом. Относительно полученных на нем результатов сравнивают данные, зафиксированные на модели $k_1 = 4$.

По результатам наблюдений составляют ранжированный ряд значений определяющих критериев подобия. В качестве последних принимают относительные величины или критерии вероятностного подобия $\tilde{\Pi} = \Pi_i/\bar{\Pi}$, где Π_i — случайное значение критерия подобия; $\bar{\Pi}$ — средняя величина. Один из таких критериев, например, для разрушения грунтов газодинамическим методом можно представить так:

$$\tilde{\Pi}_V = V_i/h^3,$$

где V_i — объем разрушаемого грунта за один газодинамический цикл; h — глубина копания.

Величину $\tilde{\Pi}_V$ определяют для каждой группы опытов, характеризующейся определенным значением параметров, например k_1 и h , а также для всего диапазона значений входящих в нее параметров для каждого масштаба и рассматривают как выборку из генеральной совокупности.

Затем определяют размах ряда $R = (\tilde{\Pi}_{\max} - \tilde{\Pi}_{\min})$, длину его разряда $h = R/(m - 1)$ (где m — число разрядов; $5 \leq m \leq 12$), левую и правую границы областей разрядов $\Pi_{0\pi} = \Pi_{\min} \mp \frac{h}{2}$ и границу разрядов $\tilde{\Pi}_i = \tilde{\Pi}_0 + ih$ (где $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ при $m = 6$, $\tilde{\Pi}_6 = \tilde{\Pi}_{\max}$). Далее строят интервальный ряд распределения, при этом все значения $\tilde{\Pi}_i$ сводятся в группы по числу разрядов. Если какое-либо значение удовлетворяет неравенствам $\tilde{\Pi}_{i-1} < \tilde{\Pi}_i < \tilde{\Pi}_{i+1}$ (где $\tilde{\Pi}_{i-1}$ и $\tilde{\Pi}_{i+1}$ — соответственно левая и правая границы интервала), то эту величину относят к рассматриваемому $(i + 1)$ -интервалу. После этого определяют относительную плотность распределения $\tilde{p}_i = p_i/h$ (где p_i — частность интервала). $p_i = n_i/n_{\Sigma}$, где n_i — частота интервала значений величины; n_{Σ} — объем выборки.

По этим материалам строят гистограмму эмпирического распределения или график изменения относительной плотности. На оси абсцисс откладывается m равных отрезков, каждый из которых изображает интервал h . Затем на этих отрезках, как на основаниях, строят прямоугольник, высота которого равна относительной плотности \tilde{p}_i , так что площадь прямоугольника равна частности интервала. Так как сумма всех частностей равна 1, то и сумма площадей всех прямоугольников равна 1. В заключение выполняют расчет основных статистических характеристик отдельно для каждой группы опытов $k_1 = 2$ и $k_1 = 4$. Статистические характеристики отражают свойства ряда в целом, и

присущие ему закономерности дают возможность сравнивать ряды распределения различных совокупностей по отношению к одному и тому же признаку и наоборот. В качестве характеристик соответствия обычно используют основные: средняя арифметическая \bar{P} , дисперсия $D(P_i)$, среднее квадратическое отклонение $\sigma = \sqrt{D(P_i)}$, коэффициент вариации, характеризующий изменчивость признаков $k_{вi} = \sigma / \bar{P}$, асимметрия, эксцесс и соответствующие им коэффициенты.

После этих расчетов осуществляют операцию выглаживания гистограмм кривой нормального распределения:

$$\rho(\tilde{P}) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\tilde{P}_i - \bar{P})^2}{2\sigma^2}\right),$$

где σ — среднее квадратическое отклонение; \bar{P} — математическое ожидание вероятностного критерия; \tilde{P}_i — случайное значение вероятностного критерия.

На базе этой зависимости строят теоретические графики плотности распределения вероятностей для каждой группы опытов. На оси абсцисс откладывается m равных отрезков, каждый из которых изображает длину интервала h . Из середины этих отрезков откладываются ординаты относительной плотности.

На завершающем этапе проводят анализ графиков распределения \tilde{P} и статистических характеристик и делают заключение о степени адекватности процессов. Если разница основных статистических характеристик двух систем $k_l = 2$ и $k_l = 4$ не превышает 10%, то считают, что явления в модели подобны явлениям в оригинале:

$$\rho(\tilde{P})_{k_l=2} = \rho(\tilde{P})_{k_l=4}.$$

Расчет адекватности в соответствии с рассмотренными положениями осуществляют на ЭВМ.

Эксперименты по установлению соответствия оригиналу моделей систем «среда — рабочее оборудование» иллюстрируют примеры, касающиеся изучения газодинамических методов воздействия на грунт для камеры, установленной неподвижно, и для передвигающейся системы.

В первом случае сопоставлялись процессы разрушения грунта двумя газимпульсными камерами. Камера объемом $V_{KH} = 0,008 \text{ м}^3$ имела наибольший размер и условно принималась за оригинал. Другая газимпульсная камера была выполнена геометрически подобной оригиналу в масштабе 1 : 4 и имела объем камер $V_{KM} = 0,000125 \text{ м}^3$. Давление газа изменяли пропорционально масштабу моделирования с учетом поправки на несоблюдение критерия по атмосферному давлению, что составило для оригинала 1,3 МПа, для модели — 0,4 МПа. Количество экспериментов устанавливали методом математической статистики, исходя из условий, что при надежности $\alpha = 0,95$ ошибка в оценке генеральной средней не должна превышать 10% при среднем квадратичном отклонении $\sigma = 0,25$. Принималось по 46 экспериментов на каждую установку.

Экспериментальные исследования проводят с моделью грунта, параметры которого даны на стр. 188, и со щебнем. Приближенное моделирование размеров фракций щебня проводят по критерию $G_i(\gamma I^3)$ путем подбора фракций равной массы. Масса отдельных фракций щебня для оригинала составляла 80 ± 5 г, для модели масштаба $k_I = 4$ примерно 1,25 г. Экспериментальные значения кривой плотности распределения вероятностей критерия $\tilde{P}_V = V_i/\bar{V}$ показаны на рис. V 7.

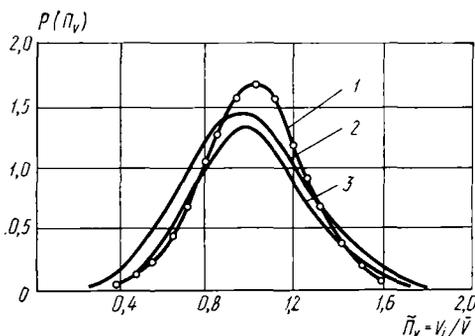


Рис. V.7. Кривые распределения плотности вероятностей критерия $\tilde{P}_V = V_i/\bar{V}$ процесса разрушения грунта импульсом сжатого газа:
1—оригинал $k_I=1$; 2—модель $k_I=2$; 3—модель $k_I=4$

Характер распределения $\Pi_Q = Q_i/\bar{Q}$ по данным результатов экспериментов, проведенных со щебнем, аналогичен.

Из анализа графиков и статистических характеристик следует, что с увеличением масштаба моделирования среднее квадратичное отклонение σ , определяющее среднюю квадратичную ошибку, возрастает, так как модели с более высоким масштабом моделирования более чувствительны к неоднородностям физико-механических свойств грунта и другим аналогичным случайным факторам. При масштабе $k_I = 4$

расчетная ошибка моделирования достигает 15—18%. На величину ошибки оказывает также влияние неравномерность срабатывания целлофановой диафрагмы. Это создает дополнительный разброс определяемых величин выброса V и массы выбрасываемого щебня G за счет нестабильности газодинамического потока.

Особенности процесса разработки грунтов, выявленные на модели $k_I = 4$, соответствуют процессу разработки грунтов оригиналом $k_I = 1$, так как плотности распределения вероятностей определяемого критерия подобия $\tilde{P}_V = V_i/\bar{V}$ для моделей и оригинала имеют одинаковые распределения, подчиняющиеся нормальному закону, а относительное рассогласование по основным статистическим характеристикам (математическому ожиданию и дисперсии) не превышает 10%.

Ошибка моделирования в пределах изменения масштабов до $k_I = 4 \div 5$ при равенстве основных критериев подобия в лабораторных исследованиях составляет 15—18%. Процессы разработки грунтов на модель подобны процессу разработки грунтов оригиналом по плотности распределения вероятностей критериев подобия.

Планирование многофакторного эксперимента при изучении явлений на физических моделях. При экспериментальном изучении процессов методы планирования эксперимента являются основой, его анализ—принятие решений. Традиционные методы экспериментальной

работы связаны с большими затратами времени и средств, так как основу составляют поочередное варьирование отдельных независимых факторов при фиксированных значениях других. Уменьшение числа рассматриваемых уровней варьирования снижает степень надежности эксперимента. Крупным недостатком в этом случае, даже при проведении большого числа опытов, является невыявленность степени взаимовлияния факторов между собой.

Методы подобия в сочетании с методами планирования эксперимента при широком обобщении их результатов позволяют сократить количество опытов. Представление функций в критериальной форме приводит к сокращению числа переменных. Планирование эксперимента позволяет при сохранении уровня точности уменьшить объем экспериментальных исследований.

Кратность уменьшения числа переменных при использовании критериальных форм определяется формулой

$$k_n = 1 - (m/n),$$

где n — число всех физически разнородных величин, существенных для процесса; m — число величин с независимой равномерностью. Величины $(m/n) < 1$ и $k_n > 0$.

Обоснованность и достоверность анализа в критериальной форме определяются обоснованностью установления определяющих критериев подобия, количество которых должно быть не меньше установленного по теореме подобия. Каждая переменная должна встречаться в критериях хотя бы один раз. Критерии подобия должны иметь четкий физический смысл, форма их записи отвечать требованиям удобства дальнейшего анализа процесса. Переменную величину, по которой отсутствуют надежная предварительная информация, целесообразно включить только в один из критериев подобия.

Обработка эксперимента в критериальной форме обуславливает представление функции в виде произведения или суммы определяющих комплексов:

$$П = kП_1^a П_2^b П_3^c$$

$$П = d_0 + d_1 П_1 + d_2 П_2 + d_3 П_1 П_2 +$$

В этом случае целесообразно матрицу стандартного эксперимента любого типа формировать таким образом, чтобы в качестве переменных x_1, x_2, \dots, x_n рассматривались определяющие критерии подобия $П_1, П_2, \dots, П_k$.

На первом этапе планирования осуществляют кодирование факторов посредством линейного преобразования координат факторного пространства с переносом начала координат в нулевую точку. Выбирают масштабы по осям в единицах варьирования факторов, используя при этом следующее соотношение:

$$x_i = (C_i - C_{0i})/\varepsilon_{в}$$

где x_i — кодированное значение критерия подобия; C_i, C_{0i} — соответствующее текущее их значение и значение на нулевом уровне; $\varepsilon_{в}$ —

значение интервала варьирования критерия. Определяемые критерии используют в качестве параметра отклика [8].

Применение теории подобия для выявления характера регрессионных математических моделей. Широкое использование методов экспериментального анализа базируется на зависимостях, основу которых составляют регрессионные модели в виде формул с эмпирическими коэффициентами. Пределы применения таких зависимостей не выходят за границы диапазона вариации параметров, которые ограничивались условиями эксперимента, что затрудняет прогнозирование за пределы указанных условий. Отчетливо этот недостаток проявляется при оценке нового рабочего органа, основу которого составляют ранее не исследованные методы воздействия на среду. Затрудняется детерминированное толкование характера и механизма влияния на протекание процесса коэффициентов при аргументах регрессионного уравнения.

Комплексное моделирование процесса путем исследования теоретической гипотезы в виде математического выражения, описывающего процесс в детерминированной форме, и получения многофакторной зависимости на базе физического эксперимента, поставленного по соответствующему плану, позволяет для ряда задач преодолеть указанные выше недостатки.

Решение базируется на следствии, вытекающем из первой теоремы подобия. Основой при этом является соблюдение условия, заключающегося в необходимости отыскания эмпирической математической модели-анalogии в виде полинома, форма и порядок которого соответствуют форме и порядку полинома, полученного в виде логико-математической модели-описания как итог анализа исходной теоретической гипотезы о механизме протекания процесса. Такой подход целесообразен, когда при изучении процесса требуется установить характер его протекания в зависимости от изменения геометрических параметров рабочего инструмента или ряда других подобных факторов.

Задача по изучению влияния линейных размеров инструмента на величины, характеризующие сопротивление, возникающее при взаимодействии инструмента со средой, является характерной. Исходная гипотеза для рассматриваемого класса задач заключается в представлении среды как тела, обладающего свойствами гравитации и сцепления между частицами, а результирующее сопротивление при взаимодействии инструмента с таким телом является аддитивной функцией частных сопротивлений (см. рис. IV 1).

Результирующую функцию как теоретическую модель в общем случае можно представить в виде следующего выражения:

$$P = D_1 k_l^3 - D_2 k_l^2 - D_3 k_l - D_4,$$

$$\text{где } D_1 = \sum a_{1i} x_{1iM}^3 - \sum a_{2i} x_{2iM}^2 x_{ijkM} - \sum a_{3i} x_{1iM} x_{2iM} x_{3iM};$$

$$D_2 = \sum a_{1j} x_{1jM}^2 + \sum a_{2j} x_{1jM} x_{2jM};$$

$$D_3 = \sum a_k x_{kM}; \quad D_4 = \sum a_q.$$

Величины коэффициентов, определяющих влияние на протекание процесса действующих факторов, устанавливают аналитически на базе принятой теоретической гипотезы, масштаб является независимым аргументом. В соответствии с первой теоремой подобия полином должен соответствовать структуре полинома, вытекающего из анализа основной гипотезы.

Для иллюстрации рассматриваемой группы задач используют метод ортогонального планирования третьего порядка на двух или трех уровнях параметра k_l . Решая задачу, получаем следующую эмпирическую однофакторную регрессионную модель:

$$\hat{P} = B_1 x_1^3 + B_2 x_1^2 + B_3 x_1 + B_4,$$

где B_1, B_2, B_3, B_4 — коэффициенты регрессии; x_1 — определяющий фактор, равный в данном случае линейному масштабу системы ($x_1 = k_l$).

В рассматриваемой задаче изучается различными методами один и тот же процесс, и как следствие, вытекающее из первой теоремы подобия, должно иметь место равенство полученных моделей:

$$P \equiv \hat{P}_\bullet$$

Последнее условие будет соблюдаться в том случае, если соответствующие коэффициенты при неизвестных уравнения будут соответственно равны:

$$B_1 = D_1; \quad B_2 = D_2; \quad B_3 = D_3; \quad B_4 = D_4.$$

Коэффициенты B_i и D_i имеют вероятностную природу. Степень их соответствия оценивают методами и критериями согласия теории математической вероятности и статистики.

Для соблюдения условия $P \equiv \hat{P}$ необходимо наличие ограничений по основным критериям согласия:

$$M(B_i) = M(D_i); \quad D(B_i) = D(D_i) \text{ и др.}$$

Анализ математической модели, полученной на основе рассмотрения исходной гипотезы, позволяет выявить различные виды моделей, которые могут быть получены при экспериментальных исследованиях изучаемого процесса. Действительно, при $a_{1i} = 0$, $x_{1i} = 0$ силы, имеющие гравитационную природу, отсутствуют. Уравнение представляют в виде полинома второй степени:

$$P = D_2 k_l^2 + D_3 k_l + D_4.$$

При равенстве нулю величин a_{1j} и x_{1j} , когда силы молекулярного сцепления малы, модель принимает вид

$$P = D_1 k_l^3 + D_3 k_l + D_4.$$

Равенство нулю величин a_{ik} , a_q приводит к полиному третьей степени вида

$$P = D_1 k_l^3 + D_2 k_l^2$$

Это позволяет накладывать ограничения на форму полинома регрессионной модели и гипотезу отбрасывания ряда коэффициентов регрессии. Последние отбрасываются на основании: 1) статистической оценки значимости коэффициентов регрессии по известным критериям согласия теории вероятностей; 2) на основании анализа знака коэффициента; если отрицательное значение коэффициента противоречит исходной теоретической гипотезе, то это может указать на необходимость отбрасывания соответствующего члена регрессионной модели.

§ 5.4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Практика использования моделирования систем дает значительный экономический эффект. Он обусловлен следующими факторами: 1) сокращением материальных затрат; 2) повышением производительности труда; 3) снижением трудоемкости работ; 4) сокращением сроков разработки новых систем; 5) повышением качества разрабатываемых объектов техники за счет углубления и расширения научных исследований.

Результаты применения моделирования при изучении рабочих процессов дорожно-строительных машин следует сопоставлять с результатами, полученными при использовании оборудования для изучения объектов естественных размеров, например грунтовых каналов традиционного типа. Эффективность применения установок для физико-математического моделирования может быть рассчитана на основании общей методики оценки народнохозяйственной эффективности внедрения новой техники. Последняя заключается в соизмерении экономии на экспериментах с затратами, которые обуславливают получение соответствующей экономии. Это соизмерение производится с помощью показателя народнохозяйственной эффективности $\mathcal{E}_{\text{нх}}$, который выражается разностью между приведенными удельными затратами для старого и нового оборудования. Значение соответствующих приведенных затрат определяется как сумма текущих затрат (себестоимости эксперимента) и одновременных затрат (капиталовложений).

Расчет народнохозяйственной эффективности для рассматриваемого случая может быть выполнен по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{нх}} = [(C_0 - C_M) - E_{\text{н}} (K_{y.m} - K_{y.o})] A_M,$$

где C_0 — себестоимость эксперимента с оборудованием натуральных размеров, руб/эксп; C_M — себестоимость эксперимента на установке для моделирования, руб/эксп; $E_{\text{н}}$ — нормативный коэффициент капиталовложений, характеризующий средний размер экономики от снижения себестоимости на 1 руб. дополнительных капиталовложений; $K_{y.m}$ — удельные капитальные затраты при экспериментировании на моделях, руб/эксп; $K_{y.o}$ — удельные капитальные затраты, представляющие сумму производственных основных фондов, отнесенную к годовому объему работ, при экспериментировании с оборудованием натуральных размеров, руб/эксп; A_M — годовой объем экспериментальных работ, представляющий общее количество экспериментов, выполненных на стенде для моделирования, шт.

Разность между старой и новой себестоимостью эксперимента, умноженная на годовой объем выполняемых экспериментов $(C_o - C_m)A_m$, представляет условную годовую экономию от внедрения моделирования.

Разность между удельными капиталовложениями сравниваемых вариантов, умноженная на нормативный коэффициент и годовой объем экспериментов $E_n A_m (K_{y,m} - K_{y,o})$, выражает нормативную народнохозяйственную экономию, которая должна быть получена от использования дополнительных капиталовложений. Это — плановая экономия, регламентируемая в соответствии с заданными темпами накоплений, идущих на расширенное воспроизводство фондов. Внедрение нового оборудования должно обеспечивать превышение фактической экономии над планируемой или их равенство. В первом случае эффективность использования капиталовложений больше нормативной. При использовании моделирования в исследовательских работах реализация указанного положения является главным критерием эффективности. В развернутом виде показатель $\Delta_{нх}$ можно записать следующим образом:

$$\Delta_{нх} = \left[(C_o K_{нр} - C_m) \frac{B_n}{T_{с,л}} \left(\sum_1^n \Delta_{р,о} - \sum_1^m \Delta_{р,м} \right) + (H_a \div E_m) (C_o K_{нр} - C_m) - E_n \Delta K_{y,m} \right] A_m,$$

где $K_{y,o} = K_{y,m} - K_{y,o}$ — удельные капиталовложения в производство нового оборудования, руб.эксп; $K_{нр}$ — коэффициент, определяющий, во сколько раз качественный уровень нового оборудования по производительности и надежности выше уровня старого ($K_{нр} = K_n K_n$); K_n — показатель повышения производительности по сравнению со старым оборудованием; K_n — показатель повышения надежности по сравнению со старым оборудованием (для данного случая $K_n = 1$); B_n — коэффициент приведения, учитывающий разновременность затрат на создание изделий повышенного качества и экономии, получаемой в процессе их эксплуатации (для ориентировочных расчетов в рассматриваемом случае $B_n = 1$; $T_{с,л} = 1/H_a$ — общий экономически целесообразный срок службы оборудования, год; H_a — годовая норма или коэффициент амортизационных отчислений на полное восстановление оборудования (реновацию) при двухсменной работе; $\Delta_{р,о}$ — цикловые затраты на ремонтные операции для старого оборудования, руб.; $\Delta_{р,м}$ — цикловые затраты на ремонтные операции для нового оборудования, руб.; C_o — отпускная цена старого оборудования, руб.; C_m — отпускная цена нового оборудования, руб.

Для ориентировочных расчетов можно воспользоваться упрощенной зависимостью. Рассмотрим случай, когда затраты на ремонтные операции для нового оборудования не превысят соответствующих затрат для старого. Так, ремонт физической модели рабочего оборудования, которая представляет упрощенный аналог реальной системы и имеет меньшие объем и массу, требует меньших расходов. Это позво-

ляет воспользоваться соотношением

$$\sum_1^n \mathcal{E}_{p.o} \geq \sum_1^m \mathcal{E}_{p.m.}$$

Производство нового экспериментального оборудования для рассматриваемых условий связано с капитальными вложениями, не превышающими тех, которые имеют место в условиях применения старого оборудования. Отсюда

$$\Delta K_{y.m} \leq 0.$$

Можно считать одинаковыми расходы, связанные с приобретением и обслуживанием тензометрического оборудования, которое и в том, и в другом случае аналогично:

$$K_{изм.o} = K_{изм.m}; \quad C_{изм.o} = C_{изм.m}.$$

Важно, чтобы величины C_m и Π_m , входящие в показатель эффективности, были выражены через соответствующие ожидаемые исходные параметры реальной системы C_o и Π_o по соотношениям подобия.

Моделирование с уменьшением масштаба рабочего оборудования k_l связано с уменьшением капитальных затрат на оборудование и его эксплуатацию и пропорционально значению k_l^n . Значение n принимают в зависимости от условий моделирования. На основании рассмотренного положения можно записать:

$$C_m = \frac{(C_{э.o} + C_{ед.o})}{k_l^n} + C_{изм.o}; \quad \Pi_m = \frac{(\Pi_{об.o} + \Pi_{к.o})}{k_l^n} + \Pi_{изм.o},$$

где $C_{э.o}$ — энергетические затраты на эксперимент для старого оборудования, руб/эксп; $C_{ед.o}$ — удельные единовременные затраты на доставку оборудования и грунта в канал, руб/эксп (для приближенных расчетов принимаем, что эта часть расходов сокращается с уменьшением размеров, объема и массы модели пропорционально масштабному коэффициенту k_l^n); $C_{изм.o}$ — удельные расходы на эксплуатацию старого оборудования, включая измерительное, с учетом заработной платы и прочих затрат, руб/эксп; $\Pi_{об.o}$ — стоимость рабочего оборудования для оригинала, руб.; $\Pi_{к.o}$ — стоимость грунтового канала для исследования оригинала, руб. $\Pi_{изм.o}$ — стоимость измерительного оборудования, руб.

На основании сделанных допущений можно рассчитать значение $\mathcal{E}_{пх}$:

$$\mathcal{E}_{пх} = \left\{ \left(K_{пр} - \frac{1}{k_l^n} \right) [(C_{э.o} + C_{ед.o}) + K_E (\Pi_{об.o} - \Pi_{к.o})] + \right. \\ \left. + (K_{пр} - 1) (C_{изм.o} + \Pi_{изм.o} K_E) \right\} A_m,$$

где $K_E = H_a + E_n$.

При необходимости установления значения $\Delta K_{y.m}$ расчет можно выполнить по формуле

$$\Delta K_{y.m} \approx \frac{1}{z} \left[(\Pi_{об.о} + \Pi_{к.о}) \left(\frac{1}{K_{пр} k_l^n} - 1 \right) + \Pi_{изм.о} \left(\frac{1}{K_{пр}} - 1 \right) \right],$$

где z — количество экспериментов в год, выполняемых на старом оборудовании.

Рассмотренные положения можно также использовать при решении обратной задачи — ориентировочной оценке ожидаемых приведенных удельных затрат, например, в том случае, когда возникает необходимость в организации экспериментов с опытным оборудованием натуральных размеров. Здесь в качестве исходных следует использовать соответствующие параметры, рассчитанные для модели или замеренные при моделировании:

$$Z_{уд} \approx (C_{э.м} + C_{ед.м}) k_l^n + C_{изм.м} + \frac{K_E}{z} [(\Pi_{об.м} + \Pi_{к.м}) k_l^n + \Pi_{изм.м}].$$

Показатель степени n здесь и выше зависит от условий моделирования. При моделировании методом эквивалентных материалов $n = 3$; если моделирование рабочего процесса осуществляется без изменения прочностных свойств среды, то $n = 2$. Для изучения процессов взаимодействия рабочего оборудования с грунтом при изменении прочностных свойств последнего $n = 3$, и расчетная формула для определения $\Theta_{нх}$ принимает вид

$$\Theta_{нх} = \left\{ \left(K_{пр} - \frac{1}{k_l^3} \right) [(C_{э.о} + C_{ед.о}) + K_E (\Pi_{об.о} + \Pi_{к.о})] + \right. \\ \left. + (K_{пр} - 1) (C_{изм.о} + \Pi_{изм.о} K_E) \right\} A_m.$$

Анализ полученного выражения приводит к выводу, что значение $\Theta_{нх}$ зависит от коэффициента повышения производительности труда при экспериментировании на моделях ($K_{пр} > 1$), а также от масштаба уменьшения размеров модели ($k_l > 1$). Большой эффект получается от увеличения производительности труда при исследовании на стендах для моделирования. Удельные капиталовложения в производство нового экспериментального оборудования при соответствующих ограничениях будут меньше расходов, связанных с организацией исследования опытных систем реальных размеров.

Приближенные зависимости для определения показателя $\Theta_{нх}$ дают возможность рассчитать ожидаемый эффект только от увеличения производительности и снижения энергетических и материальных затрат в процессе экспериментальных исследований. Важными для повышения эффективности являются также сокращение сроков разработки нового оборудования и повышение его качества, что следует прежде всего из возможности более глубокого изучения механизма исследуемого процесса при моделировании.

Глава VI

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН НА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

§ VI.1. ИССЛЕДОВАНИЕ НА МОДЕЛЯХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА МАШИНЫ НА ОБРАБАТЫВАЕМУЮ СРЕДУ

Критерии подобия процесса взаимодействия ножа с грунтом. Определение критериев подобия рабочего процесса машины в зависимости от вида устанавливаемого подобия включает определение критериев подобия явления в целом с учетом всех определяющих его параметров и изучение отдельных процессов с учетом наиболее важных для данного явления параметров. Внедрение лезвия ножа в грунт можно рассматривать как внедрение штампа произвольной формы в полубесконечное пространство (см. рис. III. 1). Уравнения равновесия состояния и непрерывности могут быть записаны по аналогии с уравнениями, рассмотренными выше.

Сопротивление резанию и энергоемкость процесса разработки грунта рабочим органом землеройно-транспортных машин в значительной степени определяются явлениями, протекающими при движении вырезанной из массива стружки грунта по поверхности рабочего органа или в полости ковша. Математическое выражение движения пласта для этого случая составляется в соответствии с расчетной схемой, данной на рис. III. 15, а. Предполагается, что грунт, составляющий пласт, несжимаем, так что в процессе движения претерпевает изменение только форма пласта. Размеры пласта на этом этапе анализа предполагаются известными. Элементарный объем движущегося пласта и силы, действующие на него, приведены на рис. III. 15, б.

Общая система критериев подобия процесса взаимодействия рабочего оборудования с грунтом устанавливается на базе критериев подобия частных процессов путем исключения одинаковых величин. Критерии приближенного подобия рассматриваемого процесса, полученные при анализе уравнений, приведены в табл. IV 3.

Приближенное физическое моделирование процессов. Теория моделирования содержит требования, которым должна удовлетворить модель, чтобы процессы, происходящие в ней, были подобны процессам, протекающим в оригинале. Условия физического моделирования рабочего процесса землеройных машин вытекают из основных положений теории подобия и заключаются в следующем: 1) определяющие критерии подобия процесса копания грунта для модели и оригинала должны быть численно равными; 2) одноименные физические параметры системы дифференциальных уравнений, описывающей рабочий

процесс, составленный для модели и оригинала, должны быть соответственно пропорциональны; 3) процесс взаимодействия рабочего оборудования со средой в модели и оригинале должен принадлежать к одному классу явлений и описываться одинаковой системой дифференциальных уравнений; 4) модель и оригинал рабочего оборудования и системы в целом должны быть геометрически подобными; 5) начальные условия, характеризующие рабочий процесс в модели, должны быть подобны соответствующим условиям оригинала; 6) граничные условия модели должны быть подобны граничным условиям оригинала.

Основные условия физического моделирования и соответствующие зависимости по расчету параметров модели следуют из равенства критериев подобия рассматриваемого процесса. Условия приближенного физического моделирования резания, копания и рыхления на основании полученных критериев подбоя можно записать следующим образом:

$$\left(\frac{\tau}{\gamma_{\Gamma} l}\right)_{\text{м}} = \left(\frac{\tau}{\gamma_{\Gamma} l}\right)_{\text{н}}; \quad \left(\frac{v^2}{gl}\right)_{\text{м}} = \left(\frac{v^2}{gl}\right)_{\text{н}} \quad \varphi_{\text{м}} = \varphi_{\text{н}}; \quad \delta_{\text{м}} = \delta_{\text{н}};$$

$$\left(\frac{d}{l}\right)_{\text{м}} = \left(\frac{d}{l}\right)_{\text{н}}; \quad \left(\frac{l_i}{l}\right)_{\text{м}} = \left(\frac{l_i}{l}\right)_{\text{н}} \quad \alpha_{i\text{м}} = \alpha_{i\text{н}},$$

где d — линейный размер кусков и отдельных включений, находящихся в грунте; l_i — обобщенный линейный размер оборудования; l — определяющий линейный размер оборудования; α_i — углы, определяющие геометрию рабочего оборудования.

В том случае, если силы сопротивления, обусловленные вязкостью грунта η , силы упругости и силы липкости грунта принимаются во внимание, приведенные условия физического моделирования дополняются соотношениями вида

$$\left(\frac{\tau v}{\gamma_{\Gamma} l^2}\right)_{\text{м}} = \left(\frac{\tau v}{\gamma_{\Gamma} l^2}\right)_{\text{н}}; \quad \left(\frac{E}{\sigma}\right)_{\text{м}} = \left(\frac{E}{\sigma}\right)_{\text{н}}; \quad \left(\frac{c_{\text{ом}}}{\tau}\right)_{\text{м}} = \left(\frac{c_{\text{ом}}}{\tau}\right)_{\text{н}}$$

Важными являются параметры, определяющие граничные условия, соблюдение которых сопряжено в ряде случаев с большими трудностями. При использовании в качестве исходного материала для модели грунта естественных компонентов, составляющих натуральный грунт, соблюдение этих условий не представляет принципиальных трудностей.

Влияние критериев $c_{\text{ом}}/(\gamma_{\Gamma} l)$ и h/B на значение сопротивления копанию отвалом бульдозера при физическом моделировании дано на рис. VI. 1.

При соблюдении критерия $c_{\text{ом}}/(\gamma_{\Gamma} l)$ относительная ошибка физического моделирования не превышает 10—15% при переходе от параметров модели к параметрам оригинала. В диапазоне $0 \leq c_{\text{ом}} \leq 0,4\gamma_{\Gamma} \frac{B_{\text{н}}}{k_f}$ несоблюдение критерия $c_{\text{ом}}/(\gamma_{\Gamma} l)$ при моделировании не приводит к существенной ошибке. Критерий $c_{\text{ом}}/(\gamma_{\Gamma} l)$ оказывает влияние на значение мощности процесса резания и удельное сопротивление резанию. Основные условия построения приближенной физической модели процесса резания грунта приведены в табл. IV 3.

Зависимости сопротивления копанию от пути копания для ковшей скреперов натурального размера и масштабных моделей по результатам исследований автора и зарубежных приведены на рис. VI. 2. Полученные зависимости позволяют сделать вывод о количественном подобии процесса по параметрам сопротивления копанию P_K и пути набора l . Это подтверждают сделанные ранее выводы о подобии таких систем.

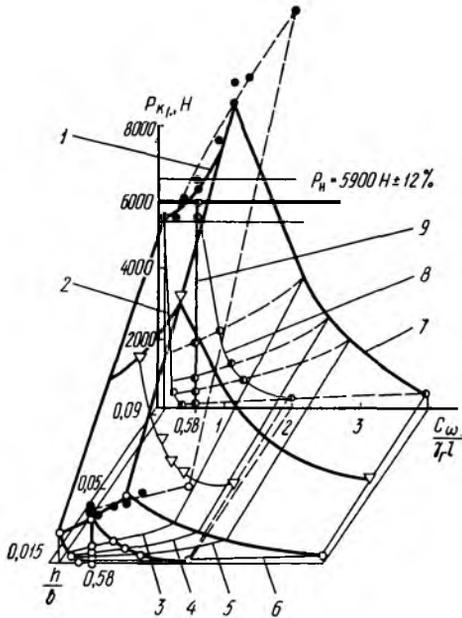


Рис. VI.1. Влияние критериев $c_{\omega}/(\gamma_l l)$ и h/B на значение горизонтальной составляющей сопротивления копанию P_K при физическом моделировании процесса копания грунта отвалом бульдозера $v_H = 0,24$ м/с:

- 1 — $k_l = 1$; 2 — $c_M = c_H = 0,002$ МПа; 3 — $k_l = 1$,
 4 — $k_l = 2$; 5 — $k_l = 2,5$; 6 — $k_l = 3,5$; 7 — $c_M =$
 $= c_H = 0,022$ МПа; 8 — $c_M = c_H = 0,011$ МПа;
 9 — $c_M = c_H k_l^{-1}$

Использование в качестве физической модели рабочего оборудования существующих машин. Важным результатом физического моделирования является возможность посредством экспериментов с моделями проводить соответствующие исследования и устанавливать искомые параметры оригинала. Основным при этом является отыскание масштабов подобия или коэффициентов перехода от параметров модели к параметрам оригинала. Это особенно важно при моделировании в условиях нарушения подобия. Так, удельную энергоёмкость процесса копания (резания) при этом устанавливают по сопротивлению копания и скорости резания модели:

$$N_{уд.н} \approx N_{уд.м} k_l k_z k_r k_p$$

Формулы перехода от модели к оригиналу по основным параметрам при соблюдении и нарушении определяющих критериев подобия приведены в табл. IV 2, IV 3.

Полученные ранее зависимости позволяют установить условия, соблюдение которых в процессе эксперимента дает возможность использовать существующие образцы землеройно-транспортных машин в качестве моделей конструктивно подобных машин, имеющих другие линейные и весовые параметры. Исследование соответствующего промышленного образца происходит по существу в эксплуатационных условиях. При этом проводимые опыты непосредственно зависят от условий эксплуатации; экспериментальные исследования базируются на основных положениях теории подобия, что способствует их обобщению

и позволяет распространить их на группу подобных явлений.

Если линейные параметры, определяющие типоразмер проектируемой машины, относятся к сходственным параметрам существующего образца в соответствии с условиями геометрического подобия, то между ними имеют место следующие соотношения:

$$l_{ин(п)} = l_{им} k_l; \quad q_{ин(п)} = q_{им} k_l^3,$$

где $l_{ин(п)}$, $q_{ин(п)}$ — определяющие линейные размеры и емкость рабочего оборудования проектируемой машины; $l_{им}$, $q_{им}$ — параметры су-

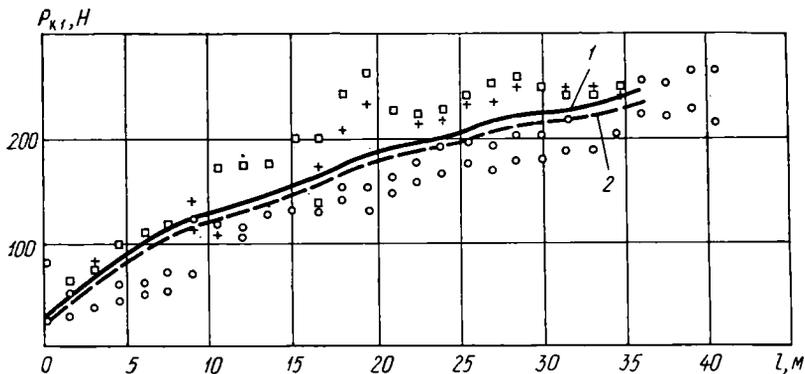


Рис. VI.2. Зависимость сопротивления копанию P_K от пути копания l для тракторного скрепера $ТС-14$:

1 — емкостью $q = 10.7 \text{ м}^3$ при $v = 2.42 \text{ км/ч}$; 2 — модели в $1/5$ натуральной велич ($k_l = 5$), работающей в песчаном грунте (данные пересчитаны на оригинал)

ществующего образца, который принимается в качестве физической модели. Здесь и ниже индекс «м» относится к существующему образцу машины, который используется в качестве модели, а индекс «н» — к конструктивно подобной машине, проект которой подлежит разработке. В рассматриваемом случае

$$l_{им} < l_{ин(п)}; \quad q_{им} < q_{ин(п)}; \quad k_l = l_{ин(п)} / l_{им}.$$

Образец землеройно-транспортной машины как физическую модель необходимо испытывать при соблюдении следующих основных условий. Прочностные параметры грунта для испытаний должны находиться в определенном соотношении с параметрами исследуемой машины, как следует из табл. IV 2. Приведенная жесткость системы для машины модели $C_M = C_{н(п)} k_l^{-2}$. Коэффициент сопротивления передвижению модели $f_{ср}$ и коэффициент сцепления $\varphi_{сц}$ должны равняться соответствующим коэффициентам проектируемой машины.

При соблюдении указанных условий основные параметры проектируемой машины (составляющие сопротивления копанию P_i , тяговое усилие T , вес машины G , сопротивление передвижению W , динамическая нагрузка на рабочий орган P_d и др.) определяются зависимостями, приведенными в табл. IV 2. Возможно введение соответствующих

поправок, связанных с несоблюдением условия $\gamma_{г.м} = \gamma_{г.н}$, $\varphi_m = \varphi_n$ и др.

Оценка эффективности новых конструктивных решений бульдозерного оборудования. Изменение конфигурации отвала в плане. Для выполнения специальных работ (прокладки колонных путей, засыпки траншей, очистки территории) отвалам придается различную форму в плане. В некоторых патентах по форме отвала в плане встречаются V-образные (треугольные), трапециевидные и округлые формы. Исследуемые отвалы сопоставлялись с лобовыми отвалами, имеющими как плоскую, так и криволинейную поверхности. Ширина захвата и высота всех исследуемых моделей приняты одинаковыми и равными соответственно 364 и 100 мм. В моделях с V-образными отвалами угол захвата боковых крыльев был 30; 45; 60; 75 и 90°. Исследования Дворковой В. Я. позволили установить существование оптимального угла захвата, который при глубинах копания 10—30 мм (для натуральных отвалах 0,1—0,3 м) находится в пределах от 30 до 45° (рис. VI.3). С увеличением глубины копания оптимальный угол захвата увеличивается. Это связано с повышением удельного сопротивления резанию и его доли в общем балансе удельных сопротивлений.

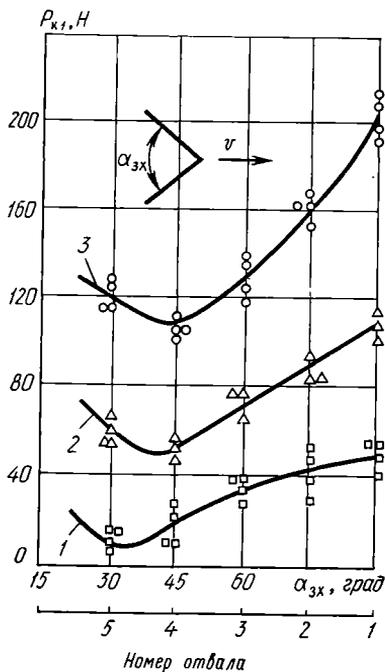


Рис. VI.3. Зависимость горизонтальной составляющей сопротивления копания $P_{к1}$ для отвала V-образной формы от угла захвата $\alpha_{зх}$:

1 — $h = 1$ см; 2 — $h = 2$ см; 3 — $h = 3$ см

одной и той же ширине захвата усилие $P_{к1}$ и удельное сопротивление копания увеличиваются. Такой характер зависимостей наблюдается при углах захвата боковых крыльев $\alpha > 60^\circ$. При $\alpha < 45^\circ$ с уменьшением длины средней части сила сопротивления копания увеличивается от наименьшего значения для лобового отвала до наибольшего значения для V-образного отвала. Это объясняется тем, что с уменьшением угла захвата боковых крыльев растет их длина, и, следовательно, увеличиваются сопротивление перемещению призмы волочения и подъему стружки вверх по отвалу. При копании грунта исследуемыми отвалами в обратном направлении горизонтальная со-

противления резанию и его доли в общем балансе удельных сопротивлений.

Трапециевидные отвалы сопоставлялись с лобовым и V-образным отвалами. Анализ кривых изменения горизонтальной составляющей силы сопротивления копания в зависимости от ширины средней лобовой части a трапециевидных отвала показывает, что с увеличением значения a при

ставляющая силы сопротивления копанью при одних и тех же a и h больше для V-образного отвала и меньше для лобового отвала. Зависимость $P_{к1} = f(h)$ также является параболической, но показатель степени при h меньше единицы. Интенсивность увеличения силы с глубиной копания меньше, поскольку первостепенное значение имеет сопротивление, обусловленное перемещением призмы волочения.

Представляет интерес анализ влияния формы отвала в плане с переменным по его длине углом захвата на эффективность копания, например полукруглого. Сопротивление копанью полукруглыми отвалами меньше сопротивления для лобового отвала во всем диапазоне изменения глубины копания. Сопротивление для полукруглых отвалов с переменным углом захвата остается большим по сравнению с сопротивлением для V-образных отвалов. Расхождение увеличивается с ростом глубины копания. Последнее можно объяснить разрывностью призмы волочения для полукруглых отвалов, в результате чего затрачивается дополнительная энергия на дробление грунта в призме волочения, которая тем выше, чем больше глубина копания, плотность и связность разрабатываемых грунтов.

Отвал с средним выступающим ножом (ВСН), как следует из предварительного анализа, обладает рядом преимуществ перед традиционным.

1. Возможность набора большей призмы волочения и лучшего сохранения ее в процессе транспортировки. Потери грунта по торцам отвала меньше по сравнению с потерями для обычного отвала такой же высоты, что увеличивает производительность бульдозера на $15 \div 30\%$.

2. Сокращение пути и времени набора грунта вследствие лучшего сохранения призмы волочения, уменьшение времени внедрения режущей кромки.

При работе на прочных и мерзлых грунтах и при наличии каменных включений в грунтах исследуемый отвал быстрее заглубляется. Это обусловлено увеличением давления на единицу длины режущей кромки.

3. Улучшение условий формирования призмы волочения, снижение потерь, уменьшение сил сопротивления в области режущей части, так как выступающий нож способствует снижению сил сопротивления движению стружки вверх по отвалу.

4. Стабилизация прямолинейного движения машины в процессе копания. Это способствует повышению производительности качества выполняемых работ, обеспечивает удобство управления.

5. Простота конструкции отвала, которая обеспечивает сохранение традиционных свойств машины.

Для экспериментов была изготовлена модель бульдозерного отвала Д-521А с выступающей средней частью ножа в масштабе 1 : 10. Специальное устройство позволяло регулировать степень выдвижения ножа относительно основной режущей кромки в широких пределах. Сопоставимые эксперименты с моделью традиционного типа проводились на этой же модели, так как изготовленная модель без дополнительного ножа являлась моделью отвала бульдозера Д-521А (см. рис. III. 22).

В процессе экспериментов изменяли степень выдвижения среднего ножа относительно основного $h_{всн}$ и глубину копания основного ножа h . Постоянными в процессе эксперимента оставались плотность грунта $C_{уд.м} = 7$ ударов, влажность $\omega_m = 6,8\%$ и скорость копания моделью $v_m = 20$ см/с. Объем призмы волочения замеряли на участке

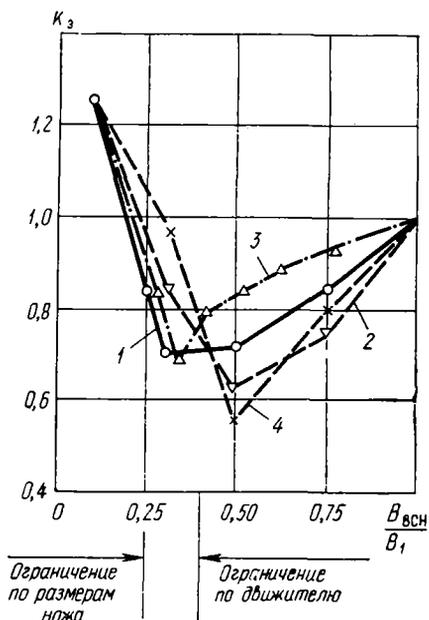


Рис. VI.4. Зависимость показателя эффективности при копании грунта бульдозером со ступенчатым ножом от отношения $B_{всн}/B_1$ и формы ножа:

1 — прямоугольная; 2 — трапецидальная; 3 — полукруглая; 4 — треугольная

установившегося копания. Энергоемкость копания у отвала исследуемого типа по сравнению с традиционным уменьшилась на 15—25%. Оптимальным является отвал, у которого ширина выдвигающейся средней части $B_2 = (1/2 \div 1/3)$, B_1 — ширина основного отвала (рис. VI. 4). При разработке грунта отвалом с выдвинутой средней частью уменьшаются потери грунта в боковые валики.

Изучение эффективности копания грунта отвалами при сдвигании бульдозеров в единый землеройный агрегат. Укрупнение машин и агрегатов, повышение их мощности является четко выраженной тенденцией современного развития дорожно-строительной техники. Рост единичной мощности машин и других параметров (емкость, ширина захвата и др.) на каждом этапе развития техники имеет пределы. Ограничения диктуются ограничением развития смежных отраслей техники. Крупногабаритные машины трудно транспортировать с одно-

го объекта на другой, вес их не может превышать грузоподъемность транспортных систем, а размеры — выходить за пределы дорожно-транспортных габаритов. Увеличение единичных мощностей машин можно осуществлять за счет временного объединения отдельных машин в единый функциональный агрегат.

Исследование по выявлению возможного эффекта от реализации рассматриваемого предложения целесообразно проводить двумя этапами: 1) используя закономерности подобия, дать приближенный анализ процесса и выявить возможность получения эффекта в качественном отношении; 2) на базе методов физического моделирования получить ряд количественных характеристик.

Результаты анализа первого этапа позволяют сделать ряд рекомендаций. Тяговое усилие, развиваемое сдвоенным агрегатом, будет

меньше тяги подобного ему по ширине базового бульдозера ($T_{сд} < T$). Производительность сдвоенного агрегата не будет превышать производительность эквивалентного бульдозера большого размера, но она будет больше производительности двух отдельных бульдозеров того же размера. Для уточнения этого вывода необходимо выполнить исследование соблюдения неравенства.

Эффект от сдвоения по производительности $k_{п.сд}$ зависит от выполнения неравенства

$$k_{п.сд} > k_H^2 z^\alpha$$

где $k_H = H/H_1$; $0 \leq \alpha \leq 1/2$; z — количество бульдозеров в агрегате; H, H_1 — высота отвалов для сдвоенных и одиночных бульдозеров.

Величину $k_{п.сд}$ устанавливают экспериментальным путем и исследуют в широком диапазоне изменения влияющих факторов.

Анализ соответствующих зависимостей показывает, что эффект по производительности, материалоемкости и энергоемкости, обобщенному показателю определяется величиной коэффициента $k_{п.сд}$. Последний определяет эффект увеличения производительности при сдвоении бульдозеров в основном за счет уменьшения потерь грунта и большей накопительной способности двух отвалов, работающих «бок о бок» по сравнению с их отдельным использованием.

Накопительная способность зависит от ширины и квадрата высоты отвалов. Поэтому важно и в этом случае установить возможно допустимую степень увеличения высоты отвала при сдваивании бульдозеров за счет съемных элементов и тяговых возможностей агрегата. Критерии подобия рабочего процесса устанавливают по отдельным подсистемам в соответствии с рассмотренными выше вариантами моделирования.

Подсистему «грунт — режущий нож отвала» характеризуют следующие критерии:

$$\frac{c_w}{\gamma l}; \frac{C_{уд}}{c_w}; \rho; \delta; \frac{v^2}{gl}; x_p; \frac{h}{B}; \frac{h}{b}.$$

Для подсистемы «призма — отвал» критерии имеют вид

$$\rho_{пв}; \delta_{пв}; \frac{v^2}{gl}; \frac{H}{B}; \frac{B}{b}; \frac{H}{R}$$

Параметры физической модели процесса копания и формулы перехода от параметров модели к оригиналу в соответствии с положениями, рассмотренными ранее, определяются приведенными соотношениями.

Производительность оригинала определяют соответствующими замерами на модели по формуле

$$\Pi = \Pi_M k_l^{3+\alpha},$$

где Π_M — производительность, установленная на модели соответствующего оборудования; k_l — линейный масштабный коэффициент, $k_B = k_H = k_l$; α — показатель, зависящий от характера изменения сопротивления от скорости.

При моделировании по критерию $v^2/(gl)$ $\alpha = 1/2$; при преобладании сил вязкого сопротивления и действия критерия $\eta v/(c_\omega l)$ $\alpha = 1$. В рассматриваемом случае грунт может быть представлен как пластическая среда, соответствующая модели Кулона — Мора и $\alpha = 0$.

Сила сопротивления копания для оригинала определяется через соответствующую величину, замеренную на модели P_M . При соблюдении условий моделирования, следующих из равенства отношений: $k_c = k_l$; $k_\gamma = 1$; $k_p = 1$; $k_z = 1$,

$$P_H = P_M k_l^3.$$

В случае, когда указанные соотношения нарушаются: $k_c \neq k_l$; $k_\gamma \neq 1$; $k_p \neq 1$; $k_z \neq 1$, если эксперимент проводят в грунте оригинала, то переход от силы сопротивления, замеренной на модели P_M , к оригиналу осуществляют по формуле

$$P_H = P_M k_p,$$

где $k_p = k_l^3 \frac{\left(\frac{c_M l_M^2 k_c}{k_l} + \gamma_{гр.м} l_M^3 f_{гр.м} k_\gamma k_{f_{гр}} \right)}{c_M l_M^2 + \gamma_{гр.м} l_M^3 f_{гр.м}}$.

Из анализа формулы для определения масштаба сил k_p следует, что при доминировании гравитационной составляющей $c_M \simeq 0$; $k_\gamma = 1$ и $k_{f_{гр}} = 1$ масштаб сил равен: $k_p = k_l^3$.

В условиях, когда $c_M l_M^2 \gg \gamma_{гр.м} l_M^3$, масштаб сил k_p равен k_l^2 .

Если имеют место и те и другие силы, масштаб сил можно выразить в виде степенной функции от линейного масштаба:

$$k_p = k_l^n$$

Мощность, необходимая для работы агрегата, определяется по соответствующим измерениям, выполненным на модели:

$$N = N_M k_l^{n+\alpha},$$

где n — показатель степени; изменяется от 2 до 3; α — показатель степени; изменяется от $0 \leq \alpha \leq 1$.

При соблюдении условий приближенного подобия, когда $k_c = k_l$, $k_\gamma = 1$, $k_p = 1$, $k_z = 1$, $\alpha = 0$,

$$N = N_M k_l^3$$

Полученные соотношения позволяют рассчитать другие показатели процесса, необходимые для оценки эффективности рассматриваемого решения, и сделать соответствующие выводы.

Исследование на моделях отвалов с механической активизацией. Эффективность отвальных рабочих органов дорожно-строительных машин можно повысить путем оснащения механическими интенсификаторами. Последние обеспечивают реализацию принципа канализации энергии непосредственно к рабочему органу, минуя движитель. Отвалы с механическими интенсификаторами могут быть полезны бла-

годаря воздействию интенсификаторов на призму волочения, на перемещение которой затрачивается при операции копания грунта 30—50%, а при операции перемещения — до 80% мощности, реализуемой на отвале.

Изучение работы отвала в комплексе со шнековым и ленточным интенсификаторами методами физического моделирования представляет большой практический интерес. Поиск характеризуется возможностью широкого использования методов приближенного подобия, когда модели рабочих органов, компоновка их узлов и привод делают такими, чтобы в объекте нашло реализацию подобие только принципа действия системы. Процессы и конструктивные элементы, не являющиеся главными, во внимание не принимают.

Воздействие на грунт отвалов с интенсификаторами механического типа относится к тому же классу явлений, которые протекают и при работе традиционного оборудования. В качестве объекта исследования целесообразно использовать приближенную физическую модель с изменением свойств грунта, условия подобия которой рассмотрены в предыдущих разделах. Анализ подобия системы в данном случае целесообразно вести путем деления процесса на подсистемы с выявлением определяющих критериев подобия для каждой из подсистем в соответствии с вариантами моделирования систем «среда — рабочий орган» (см. табл. IV 3).

Для подсистемы «грунт — нож» отвала критерии можно записать в следующем виде:

$$\frac{c_{\omega}}{\gamma_{\Gamma} l} ; \quad \delta ; \quad \frac{v^2}{\gamma_{\Gamma} l} ; \quad \frac{B}{H} ; \quad \alpha_{\Gamma} ; \quad \frac{R}{H} ; \quad \frac{h_{3T}}{h}$$

Для подсистемы «призма — шнек» критерии имеют вид:

$$\rho_{\text{ш}} ; \quad \delta_{\text{ш}} ; \quad \frac{v^2}{\gamma_{\text{ш}} l} ; \quad \frac{D_{\text{ш}}}{H_{\text{ш}}} ; \quad \frac{H_{\text{ш}}}{H} ; \quad \frac{L_{\text{ш}}}{L} ; \quad \frac{D_{\text{ш}}}{t_{\text{ш}}} ; \quad \alpha_{\text{ш}} ; \quad \frac{v_{\text{ш}}}{n_{\text{ш}} l_{\text{ш}}}$$

Формирование физической модели основывают на независимости масштабов следующих параметров: l , α , ρ , δ , g , γ . Масштабы геометрических величин k_l и k_x можно принять равными соответственно 8 и 1. Для других независимых величин масштабы приняты равными единице: $k_g = k_{\rho} = k_{\delta} = k_{\gamma} = 1$. Масштабы основных зависимых величин определяются соотношениями $k_{c_{\omega}}$, k_l и $k_v = k_l^{0,5}$. Моделируемый грунт, взятый для исследования, представлял суглинок со следующими физико-механическими свойствами: при влажности $\omega = 16\%$ объемная масса $\gamma_{\Gamma} = 1,9 \text{ т/м}^3$; угол внутреннего трения $\rho = 32^\circ$; угол внешнего трения $\delta = 27^\circ$; сцепление $c_{\omega} = 0,03 \text{ МПа}$; число ударов стандартным ударником $C_{\text{уд}} = 10$.

Соответствующие параметры моделирующего грунта, приготовленного в лаборатории, имели следующие значения: при влажности $\omega = 3\%$ объемная удельная масса $\gamma_{\Gamma} = 1,5 \text{ т/м}^3$; угол внутреннего трения $\rho = 31^\circ$; угол внешнего трения $\delta = 25^\circ$; сцепление $c_{\omega} = 0,0025 \text{ МПа}$; число ударов ударником $C_{\text{уд}} = 0,5$.

Вариация соответствующих величин, определяющих физико-механи-

ческие свойства моделируемого и моделирующего грунтов, обуславливает недостаточно высокую точность соблюдения критериев $\frac{c_{\omega}}{\gamma_{\Gamma} l}$; ρ ; δ . Затруднено получение моделирующего грунта соответствующей прочности при влажности 3%. Повышение влажности в данном случае ведет к некоторому искажению качественной картины процесса копания.

Величины, характеризующие точность соблюдения основных критериев, соблюдаемых при формировании модели исследуемого процесса, приведены ниже (%):

Отношение сил сопротивления сдвигу к весу грунта $c_{\omega} / \gamma_{\Gamma} l$	16,0
Отношение сил инерции к весу грунта v^2 / gl	1,0
Отношение сил трения грунта по грунту к действующей силе ρ	3,0
Отношение сил трения грунта по металлу к действующей силе δ	7,0
Углы (резания, захвата, зарезания и др.) α_i	2,0—10,0
Отношение длин сходственных сторон l_i / l	0,5—2,0

Переход от модели к оригиналу по принятой системе показателей должен осуществляться с учетом поправок на несоблюдение масштабов параметров γ_{Γ} и c_{ω} :

$$k_F = k_l^2; \quad k_P = k_l^3 k; \quad k_{N_T} = k_P k_v; \quad k_{N_{И}} = k_M k_{\omega};$$

$$k_{\Pi} = k_F k_v; \quad k_{y_{д} l} = \frac{k_{N_{\Sigma}}}{k_l k_{\Gamma}}$$

где k — поправка на несоблюдение масштабов параметров γ_{Γ} и c_{ω} ,

$$k = \frac{\text{tg } \rho_M \gamma_{\Gamma M} l_M^3 k_{\rho} k_{\gamma_{\Gamma}} + k_{c_{\omega}} C_{\omega M} l_M^2 k_l^{-1}}{\text{tg } \rho_M \gamma_{\Gamma M} l_M^3 + c_{\omega M} l_M^2}.$$

Эффективность рассматриваемых методов интенсификации на этапе моделирования целесообразно оценивать по системе показателей, в которую входят: F — площадь вырезаемой стружки грунта; v — скорость рабочего процесса; P_i — составляющие сопротивления копанию; l — дальность поперечного перемещения грунта; N_T , $N_{И}$ — мощность, расходуемая на преодоление сопротивления копанию и на привод интенсификатора; N_{Σ} — суммарная мощность; Π — производительность; $N_{y_{д} l}$ — удельная энергоёмкость, отнесенная к дальности поперечного перемещения грунта; $G_{y_{д}}$ — удельная материалоемкость; $N_{y_{д}} / \Pi_{y_{д}}$ — обобщенный показатель.

Модели рабочих органов на стенде устанавливают через посредство тензометрической подвески (рис. VI. 5). Система обеспечивает замер трех составляющих усилия копания и точку приложения равнодействующей. Стенд позволяет осуществлять наклон и поворот моделей, а также изменять расстояние между шнеком и отвалом. Привод шнека осуществляется от электродвигателя постоянного тока с плане-

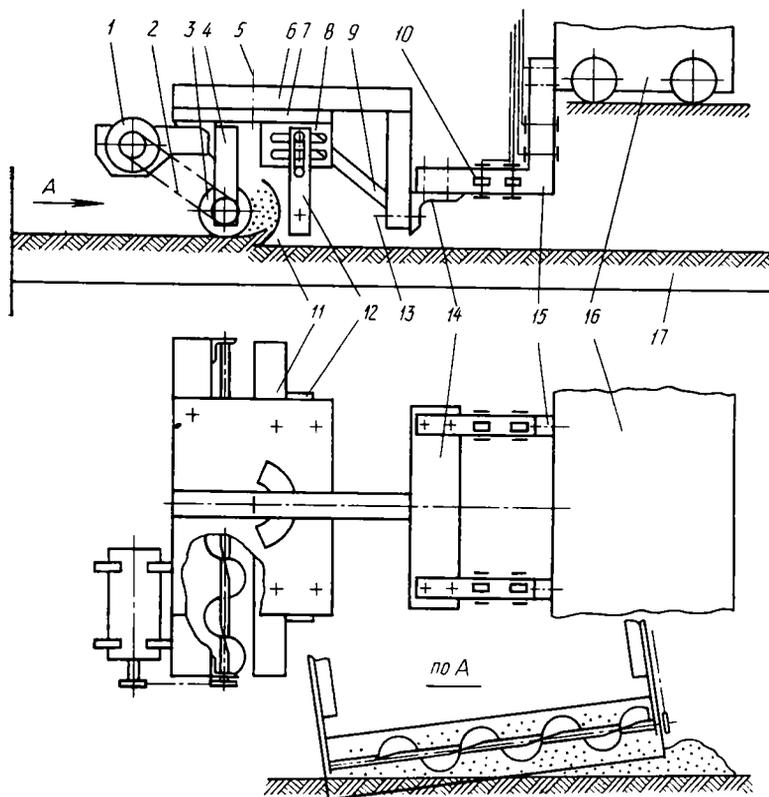


Рис. VI.5. Схема стенда для испытания моделей отвалов автогрейдера:
 1 — двигатель привода шнека; 2 — цепная передача; 3 — шнек; 4 — кронштейн шнека;
 5 — ось поворота моделей; 6 — Г-образный кронштейн подвески; 7 — поворотная пластина;
 8 — уголки с прорезями; 9 — подкос; 10 — тензодатчик; 11 — отвал; 12 — кронштейны отвала;
 13 — ось наклона моделей; 14 — рама; 15 — тензометрические кронштейны; 16 — тележка стенда; 17 — грунтовый лоток

тарным редуктором через цепную передачу. Модель ленточного отвала выполнена в виде рамы с двумя роликами, охваченными резиновой лентой, опирающейся с рабочей стороны отвала на фторопластовую пластину. Наиболее работоспособной конструкцией механического интенсификатора отвала автогрейдера является шнековый рабочий орган, повышающий производительность на 20%.

Оценка рабочего процесса скрепера. Телескопический ковш скрепера. Телескопическая форма ковша скрепера позволяет изменять отношения ширины к длине ковша в процессе набора грунта, что оказывает существенное влияние на характер, силовые и энергетические параметры процесса заполнения. Ковш такого типа позволяет воздействовать на образование призмы волочения, не изменяя толщины стружки, поскольку последнее отрицательно сказывается как на прочности стружки, так и на тягово-сцепных свойствах самоходных машин.

Телескопический ковш состоит из одной или нескольких секций, перемещающихся друг относительно друга внутри основного ковша. Анализ характера изменения тягового усилия от пути копания для телескопического ковша вместимостью 40 м^3 показывает, что по максимальной величине усилие соответствует ковшу вместимостью 25 м^3 . Перемещение малого ковша и задней стенки назад вместе с грунтом

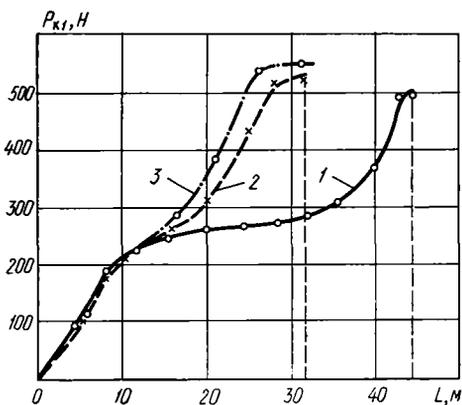


Рис. VI.6. Изменение горизонтальной составляющей сопротивления копанию $P_{к1}$ скрепера с двухсекционным телескопическим ковшом емкостью $q = 40 \text{ м}^3$ (кривые 1 и 2) и традиционного скрепера емкостью $q = 25 \text{ м}^3$ (кривая 3); грунт — средний суглинок с $S_{уд.н} = 6 \div 9$

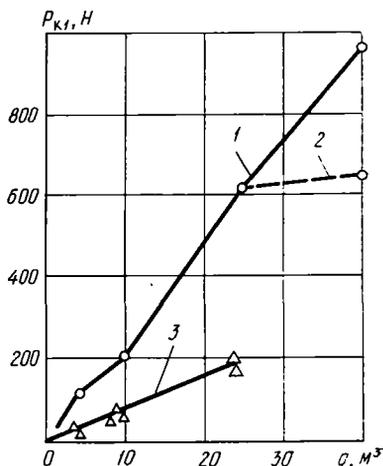


Рис. VI.7. График зависимости сил сопротивления при выгрузке (P) и при опускании заслонки ($P_з$) от емкости ковша q :
1 — для традиционного ковша;
2 — для телескопического ковша (суглинок с $S_{уд.н} = 8 \div 9$); 3 — при опускании заслонки для песчаного грунта с $S_{уд.н} = 2$

можно выполнить двумя способами: 1) малый ковш отодвигается быстро и затем заполнение продолжается до конца набора; 2) малый ковш и задняя стенка медленно отодвигаются назад в течение всей последующей стадии набора. Копание производится при одинаковых толщине стружки, скорости копания и прочности грунта (рис. VI. 6). Преимущество телескопического ковша перед традиционным увеличивается с уменьшением толщины вырезаемой стружки. Сопротивление грунта выгрузке у телескопического ковша значительно ниже. При работе трех секций можно набирать 40 м^3 грунта. Эксперименты говорят о достаточной эффективности разработки грунтов скреперами такого типа. Однако двух- и трехсекционный ковш увеличивает общую длину агрегата, что может привести к ухудшению маневренности и росту стоимости.

Подгребающее устройство скрепера для облегчения загрузки ковша выполняют в виде подвижной заслонки или специального устройства на толкаче. При заполнении с одновременным по-

вышеннем коэффициента заполнения возможно уменьшение тягового усилия на 15—25%.

Влияние наклона боковых стенок ковша скрепера на эффективность процесса копания изучено на модели скрепера с ковшем емкостью 25 м³. Боковые стенки ковша поворачивались относительно оси крепления, располагающейся у днища ковша. Угол наклона стенки к вертикали изменялся от 0 до 85°. При максимальном угле боковые стенки являлись практически продолжением днища ковша. Опыты производили на моделях грунтов: плотном песчаном суглинке при числе ударов ударника $C_{уд.м} = 6 \div 8$ и влажности $\omega_m = 5 \div 6\%$ и на рыхлом уплотненном грунте той же влажности при $C_{уд.м} = 2 \div 3$. Сопротивление наполнению при работе в плотных грунтах снижается с увеличением угла наклона боковых стенок. Изменение угла от 30 до 40° дает наибольший эффект. При неизменном тяговом усилии можно увеличить емкость ковша на 15—20%. Для рыхлых грунтов заметного снижения сил сопротивления наполнению не наблюдается во всем диапазоне изменения углов. Можно ожидать появления аналогичного эффекта при рациональном выборе формы и параметров среднего или боковых выступающих ножей скрепера.

Исследования сопротивлений, действующих при работе заслонки и задней стенки, производились на моделях ковшей скреперов емкостью 4; 10; 25 и 40 м³, изготовленных в $\frac{1}{12}$ натуральной величины. Прототипами моделей являлись ковши полуприцепного скрепера емкостью 4 м³, а также самоходных скреперов ТШ1-3 и ДЗ-67. Модели рабочих органов сохраняли форму оригинала, а линейные размеры были соответственно уменьшены. Форма и размеры заслонки и задней стенки, а также ширина ковша емкостью 40 м³ были выбраны такими же, как у ковша емкостью 25 м³. В результате проведенных экспериментов получены зависимости усилий, действующих на заслонку и заднюю стенку ковша при их взаимодействии с грунтом для скреперов до 40 м³ (рис. VI. 7).

Скрепер с двумя щелевыми ковшами при определенных условиях испытывает меньшее сопротивление при копании. Результаты исследований показывают, что сопротивление наполнению для ковшей такого типа при равенстве заполняемых объемов снижается на 35% и более (рис. VI. 8). Перспективны упрощенные конструкции ковшей с двухножевой системой копания при наличии управляемого заднего ножа.

Такой тип скрепера, как и аналогичный ковш драглайна, характеризуется наличием двух режущих элементов, расположенных в передней и средней части днища. В отличие от драглайна ширина переднего ножа скрепера составляет $\frac{1}{2}$ — $\frac{1}{3}$ ширины ковша. Задний нож перекрывает ковш по всей ширине. Разработку грунта таким ковшом можно осуществлять несколькими способами: одновременное резание грунта двумя ножами при расположении переднего и заднего режущих лезвий на одном уровне; та же схема, но при расположении режущих лезвий на разных уровнях; последовательное копанье сначала задним режущим ножом, затем передним. Определить коэффициент эффективности

по снижению тягового сопротивления скрепера исследуемого типа можно на основании анализа моделей (см. табл. II. 1).

При копании скрепером с двухщелевой загрузкой грунт, поступающий в передний ковш после вырезания стружки узким ножом, свободно расходится в стороны. Грунт, вырезаемый задним ножом в условия-

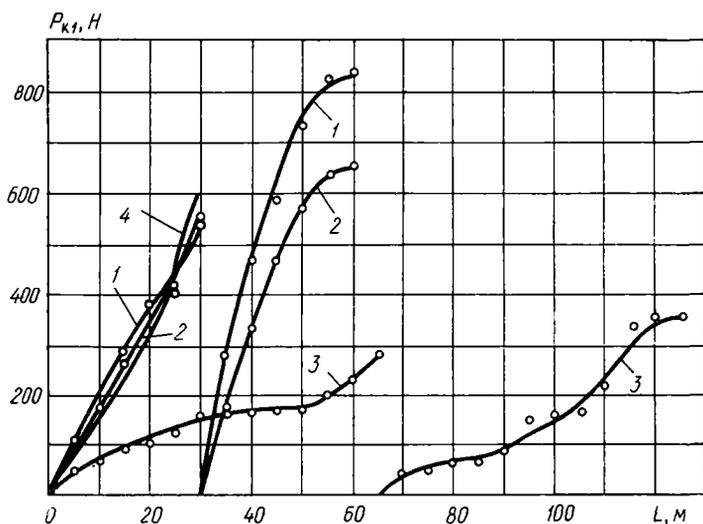


Рис. VI.8. Зависимость горизонтальной составляющей сопротивления копанию P_{k1} от пути набора L для скрепера с двухщелевым ковшом:

1 — $h = 32$ см, $q = 50$ м²; 2 — $h = 24$ см, $q = 45$ м²; 3 — $h = 10$ см, $q = 25$ м²; 4 — $h = 24$ см, $q = 20$ м² (традиционный ковш)

ях полублокированного резания, свободно заваливается внутрь. В обоих случаях сопротивления трения грунта о боковые стенки ковша меньше, чем в случае применения традиционного ковша.

При моделировании объекта целесообразно принять геометрическую модель скреперного ковша емкостью 15 м³ с двухножевой системой резания, выполненную в масштабе 1 : 10 (рис. VI. 9). У передней загрузочной щели имеется узкий средний нож, у задней — сплошной. Режущие кромки обоих ножей установлены на одном уровне. При копании резание осуществляют оба ножа. Задний сплошной нож осуществляет копание в условиях полублокированного резания.

В процессе экспериментов изменялись расстояние от переднего ножа до заднего — l_2 , ширина щели у заднего ножа — l_3 , ширина переднего ножа — b_{cp} .

В качестве показателей эффективности принимают отношение силы сопротивления грунта копанию к весу грунта в ковше. Переход от параметров, замеренных при моделировании, к параметрам оригинала осуществляется по зависимостям (см. табл. IV 2).

Величина горизонтальной составляющей сопротивления копанию

$$P_{k1н} = P_{k1м} k_l^3$$

Величина вертикальной составляющей сопротивления копанью

$$P_{к2H} = P_{к2M} k_l^3.$$

Мощность, необходимая для реализации процесса копания,

$$N_{H} = N_{M} k_l^{3+\alpha}$$

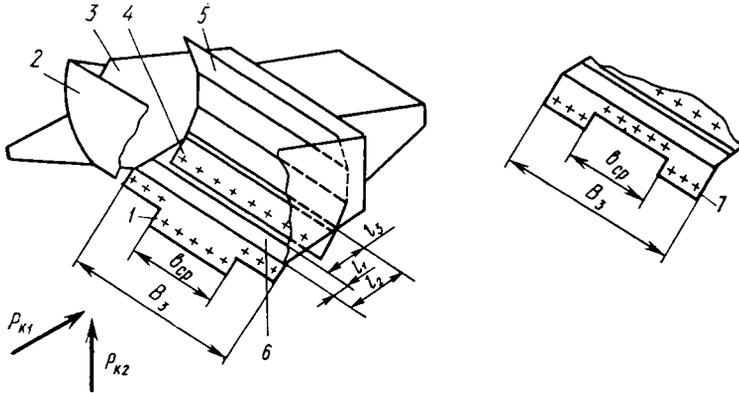


Рис. VI.9. Скреперный ковш с двухножевой системой копания: 1 — передняя ножевая система с выступающим средним ножом (BCH); 2 — заслонка; 3 — боковые стенки; 4 — задняя ножевая система с управляемым ножом; 5 — задняя стенка ковша; 6 — днище ковша; 7 — задняя ножевая система с выступающими боковыми ножами (BBH)

Величина показателя степени α определяется характером преобладающих сил: кулоновых сил $\alpha = 0$; сил вязкого сопротивления $\alpha = 1$; сил инерции $\alpha = 1/2$.

Соблюдение условий подобия по указанным в табл. IV. 3 параметрам позволяет оценить ряд коэффициентов для соответствующих показателей эффективности по данным моделирования без предварительного приведения исходных величин к оригиналу:

$$k_{\text{эп}} P_{к1H} = k_{\text{эп}} P_{к1M}$$

Если моделирование осуществляют в соответствии с вариантом без изменения свойств грунта, т. е. модель исследуют в условиях разработки грунта оригинала, то горизонтальную составляющую сопротивления копанью определяют по формуле

$$P_{к1H} = P_{к1M} k_l^3 k,$$

где k — поправочный коэффициент.

Величину k определяют в зависимости от физико-механических свойств грунта и линейного масштаба модели:

$$k = \frac{\text{tg } \rho_M \gamma_{ГМ} l_M^3 k_p k_\gamma + c_{\omega M} l_M^2 \frac{k_{c\omega}}{k_l}}{\text{tg } \rho_M \gamma_{ГМ} l_M^3 + c_{\omega M} l_M^2}$$

Расчет мощности для оригинала

$$N_H = N_M k_l^3 k k_v,$$

где $k_v = v_{II}/v_M$ — в пределах изменения скорости копания до 1,5 м/с. Остальные обозначения указаны выше.

Объем грунта в ковше q_H , объем потерь в боковые валики q_B , объем призмы волочения q_{HP} определяют независимо от варианта моделирования:

$$q_{iH} = q_{iM} k_l^3,$$

где q_i — соответствующий объем грунта для оригинала и замеренный при моделировании.

Изменение горизонтальной составляющей силы сопротивления грунта копанию в зависимости от пути копания грунта при вырезании его сплошным задним ножом показано на рис. VI. 10. С увеличением ширины щели сопротивление грунта копанию снижается, а затем стабилизируется. Максимальное снижение сил сопротивления грунта копанию соответствует расстоянию $l_2 = 0,5l_{общ}$ при $l_3 = 0,75$ м и составляет в среднем 30—35%. Дальнейшее увеличение щели обеспечивает незначительный эффект по тяговому сопротивлению, однако вес грунта в ковше уменьшается из-за возрастания его потерь в боковые валики. Также возрастает вес призмы волочения перед задним ножом.

С целью отработки рациональных геометрических параметров конструкций ножей скрепера проводят опыты, в которых при измененной емкости ковша и постоянной ширине щели $l_3 = 0,75$ м производят копание грунта в условиях изменения ширины переднего ножа. Установлено, что рациональное отношение ширины переднего выступающего ножа b_{cp} к ширине заднего ножа B , равной ширине ковша скрепера: $b_{cp}/B \approx 1/2$.

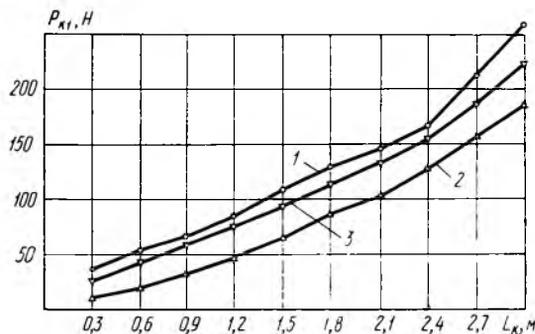


Рис. VI. 10. График изменения горизонтальной составляющей сопротивлению копания $P_{к1}$ от пути копания $L_{к}$ для двухщелевого ковша с передним выступающим ножом (ВЧН):

1 — для традиционного ковша; 2 — для двухщелевого при $b_{cp} = B_3$; 3 — то же, при $b_{cp} = \frac{1}{3} B_3$

Такое соотношение размеров режущих ножей и ширины задней щели обеспечивает получение максимального веса грунта в ковше и по сравнению с традиционным ковшом вес увеличивается в среднем на $10 \div 15\%$. Перед заслонкой вес призмы волочения снижается и наблюдается уменьшение потерь грунта в боковые валики.

Физическое моделирование процесса копания грунта рабочим оборудованием землеройных машин непрерывного действия. Условия моделирования таких систем заключаются в соблюдении системы критериев подобия вида:

$$\frac{c_{\omega}}{\gamma_{\Gamma} l} \left(\frac{C_{уд}}{\gamma_{\Gamma}} \right); \quad \frac{\gamma v}{\gamma_{\Gamma} l^2} \left(\frac{\omega v}{\gamma_{\Gamma} l^2} \right)$$

Последняя при моделировании таких процессов является основной и приводит к погрешностям при пересчете показаний, снятых с модели, на оригинал, не превышающим $\pm 15\%$. При скоростях копания грунта до 5 м/с нелинейный характер сил трения в рабочем оборудовании не проявляется. Критерий подобия, определяющий подобие рабочего оборудования малой жесткости $\Pi = C_{пп}/(\gamma_{\Gamma} l^2)$, при моделировании в условиях физического подобия элемента можно не контролировать. При соблюдении условий геометрического подобия, особенно по стреле величины провисания цепи рабочего оборудования, возможна реализация приближенного подобия процесса копания грунта рабочим оборудованием землеройных машин непрерывного действия.

Эксперименты, выполненные в полевых и лабораторных условиях при рытье траншей, глубина которых $H = 1,0$ м и ширина $B = 0,6$ м (рис. VI 11), показали, что зависимость $P_{кп} = f(v_{ц}/v_x)$, полученная при копании среднего суглинка с числом ударов динамического плотномера $C_{уд} = 8$ ($7 \div 9$) и влажностью $\omega = 18\%$, иллюстрирует хорошую сходимость результатов, полученных на физической модели, с результатами полевых испытаний (ошибка до $\pm 15\%$) для разных скоростей копания грунта $v_{ц} = 2,2; 1,65$ и $1,1$ м/с. Грунт физической модели в этом случае моделировался по системе критериев

$\frac{\gamma v}{\gamma_{\Gamma} l^2} \left(\frac{\omega v}{\gamma_{\Gamma} l^2} \right)$ и $\frac{c_{\omega}}{\gamma_{\Gamma} l} \left(\frac{C_{уд}}{\gamma_{\Gamma}} \right)$. Если процесс копания моделируется по критериям $\frac{c_{\omega}}{\gamma_{\Gamma} l} \left(\frac{C_{уд}}{\gamma_{\Gamma}} \right)$ и $\frac{v^2}{gl}$, а критерий $\frac{\gamma v}{\gamma_{\Gamma} l^2}$ не принимается во внимание, сходимость результатов модель-

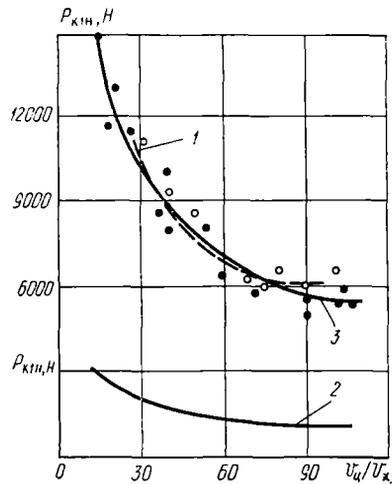


Рис. VI.11. Сопоставление результатов исследования моделей и оригинала при разработке траншеи в суглинке цепным экскаватором:

1 — оригинал, $C_{уд.н} = 8$, $\omega = 18\%$, $v_{ц} = 2,2$ м/с; 2 — модель $k_1 = 5$; 3 — переход к оригиналу при соблюдении критерия $\Pi = \gamma v / (\gamma_{\Gamma} l^2)$

ных испытаний при их пересчете на оригинал нельзя считать удовлетворительной. Ошибка в этом случае достигает 50%.

Моделирование рабочего процесса роторного метателя грунта. Перемещение грунта от рабочего органа на расстояние до 50 м в направлении, перпендикулярном движению машины, эффективно осуществляется метательным транспортирующим устройством.

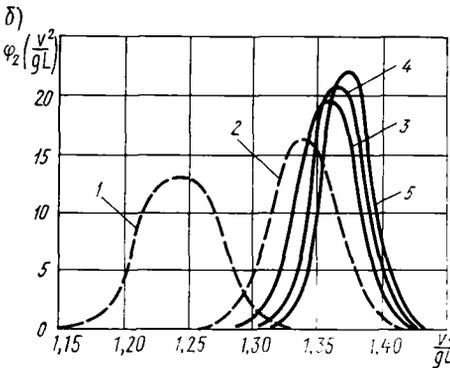
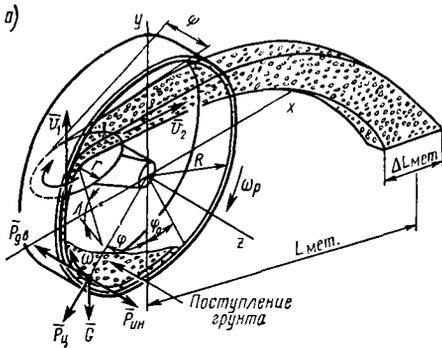


Рис. VI.12. Схема, моделирующая работу метателя безлопастного типа (а); график изменения плотности вероятности определяющего критерия $v^2/(gL)$ для метателя безлопастного типа в зависимости от подобия системы (б):

при наруж критерия $\frac{R}{d_{фр}} - 1 - k_l = 2,25$;
 2 - $k_l = 1,5$; при соблюден и критерия $\frac{R}{d_{фр}} - 3 -$
 $k_l = 2,25$; 4 - $k_l = 1,5$; 5 - оригинал $k_l = 1$

оси. Полет потока грунта происходит по баллистической траектории в условиях аэродинамического сопротивления воздушной среды. Укладка грунта в насыпь сопровождается уплотнением за счет реализации кинетической энергии струи грунта. Рабочий процесс оборудования с метательным органом рассматривают состоящим из подсистем: «грунт —

Роторные метатели грунта хорошо компонуются с грунторазрабатывающими органами различных типов и при небольшой массе и габаритах в ряде случаев обеспечивают высокую производительность. Существенным недостатком применяемых на землеройно-транспортных машинах (ЗТМ) роторно-лопастных метателей с неподвижным кожухом является низкий КПД вследствие значительных потерь мощности на трение грунта о кожух.

Рабочий процесс роторно-безлопастного метателя грунта с диском-эвакуатором (рис VI.12) осуществляется следующим образом: грунт с грунторазрабатывающего органа ЗТМ поступает в осевом направлении во внутреннюю полость ротора метателя и под действием центробежной силы и силы трения разгоняется до окружной скорости ротора. Разгрузка осуществляется за счет изменения направления движения потока грунта в роторе с помощью диска-эвакуатора, расположенного наклонно относительно плоскости вращения ротора и свободно вращающегося вокруг собственной

грунторазрабатывающее оборудование», «грунт — метатель», «поток грунта — воздушная среда», «поток грунта — насыпь». Критерий подобия подсистем устанавливают на базе анализа уравнений процессов, протекающих в каждой из подсистем.

Подсистема «грунт — метатель» характеризуется следующими критериями подобия:

$$\Phi; \frac{\omega^2 R}{g}; \omega t; f; \frac{l_i}{R}; \frac{N}{v_{\text{мт}}^2 \Pi_{\text{мт}} \gamma_{\text{г}}}; \frac{F_{\text{тр}}}{v_{\text{мт}} \Pi_{\text{мт}} \gamma_{\text{г}}},$$

где ω — угловая скорость ротора; l_i — определяемый линейный размер метателя; N , $\Pi_{\text{мт}}$ — мощность и производительность метателя; $\gamma_{\text{г}}$ — плотность грунта.

При моделировании с изменением прочностных свойств грунта необходимо учитывать критерий

$$\frac{c_{\omega} d_{\text{фр}}^2}{m \omega^2 R},$$

где c_{ω} — сцепление грунта.

Для подсистемы «поток грунта — воздушная среда» при моделировании грунта по линейному размеру фрагментов имеют место следующие критерии подобия:

$$\frac{l_i}{L_{\text{мт}}}; \frac{v_{\text{мт}}^2}{g L_{\text{мт}}}; \alpha_{\text{мт}}; \frac{\gamma_{\text{в}} L_{\text{мт}} C_x}{\gamma_{\text{г}} d_{\text{фр}}}; \frac{v_{\text{внт}}}{v_{\text{мт}}},$$

где $L_{\text{мт}}$ — дальность метания грунта, м; $v_{\text{внт}}$ — скорость фрагмента грунта, м/с; $\alpha_{\text{мт}}$ — угол метания грунта, град; C_x — коэффициент сопротивления.

При моделировании без изменения прочностных свойств грунта необходимо учитывать в качестве критерия относительную влажность грунта W (%).

Подсистема «поток грунта — насыпь» при изменении прочностных свойств грунта характеризуется критериями:

$$p_{\text{уд}}/\sigma_{\text{кр}}; v_{\text{под}}^2 \gamma_{\text{г}}/\sigma_{\text{кр}}; E/\sigma_{\text{кр}},$$

где $p_{\text{уд}}$ — удельное давление фрагмента грунта при внедрении в насыпь; $\sigma_{\text{кр}}$ — критическое напряжение, соответствующее нарушению структурных связей в грунте.

Относительная влажность W также учитывается при моделировании без изменения проточных свойств грунта. Для рассмотренных условий моделирования основным является критерий

$$\frac{\Pi_{\text{мт}} \gamma_{\text{г}} v_{\text{под}}}{p_{\text{уд}} S_{\text{фр}}},$$

где $S_{\text{фр}}$ — площадь контакта фрагмента с насыпью.

Критерий $L_{\text{мт}}/d_{\text{фр}}$ соблюдается при моделировании грунта по линейному размеру фрагментов, а крит.

$$\frac{\gamma_{\text{г}} v_{\text{под}}^2 E v_{\text{фр}}}{\sigma_{\text{кр}}^2 V_{\text{деф}}},$$

определяющий подобие сил деформации грунта, соблюдается при моделировании грунта одновременно по линейному размеру фрагментов и прочностным свойствам.

Установлено (Гласко М. С.), что при нарушении условий стохастического подобия процесса метания грунта по критерию $R/d_{фр}$ в подсистеме «поток грунта — воздушная среда» нарушается также подобие по критерию $v^2_{мт} (gL_{мт})$. При оценке по плотности распределения вероятностей ошибка моделирования возрастает при уменьшении линейного размера модели, превышая ошибку при соблюдении критерия $R/d_{фр}$ в девять раз. В случае соблюдения условия подобия по критерию $R/d_{фр}$ однородность результатов по критерию $v^2/(gL_{мт})$ не нарушается. Однородность результатов по критерию $N/(v^2_{мт} \Pi_{мт\gamma_{гр}})$ сохраняется как при соблюдении, так и при нарушении условий подобия по критерию $R/d_{фр}$.

Оценку нарушения подобия осуществляют в соответствии с принятой методикой моделирования процесса метания. Анализ положений методики проведен на базе физической модели роторно-лопастного метателя грунта с неподвижным кожухом, выполненной в масштабе 1/6. Эксперименты проводились с использованием суглинистого грунта влажностью 15—17% с предварительно нарушенной структурой в условиях, соответствующих натурным исследованиям опытного образца-метателя. Установлено, что расхождение между оригиналом и моделью метателя в пересчете на оригинал по дальности метания $L_{мт}$ не превышает 6%, а по мощности N , затрачиваемой на метание, не превышает 10—16% (рис. VI.12, б).

В заключение необходимо подчеркнуть, что осуществление приближенного физического моделирования процесса полета грунта в воздушной среде, свойства которой соответствуют оригиналу, требует в качестве одного из основных условий подобия соблюдения критерия, определяющего геометрическое подобие фрагментов, составляющих поток отбрасываемого ротором грунта. Рассмотренные положения методики моделирования могут быть использованы для оценки эффективности других типов метателей грунта.

§ VI.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СО СРЕДОЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ, ОБОРУДОВАННЫХ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМАЗКОЙ

Одним из способов интенсификации рабочих процессов дорожно-строительных машин путем снижения сил сопротивления при трении рабочих органов о среду, а также устранения явления залипания является применение газовой смазки. Газовоздушная смазка поверхностей рабочих органов землеройных машин, контактирующих с грунтом, дает возможность создания новых грунтообрабатывающих органов.

Критерии подобия процесса взаимодействия рабочего органа, оборудованного газовой смазкой, со средой устанавливают на базе анализа уравнений, составленных для каждой из подсистем оборудования [28].

Подсистема «грунт — отвал» (поверхность контакта) характеризуется в общем случае криволинейной поверхностью. Схема сил, действующих на элемент пласта, приведена на рис. VI.13. Составленное дифференциальное уравнение в дальнейшем используют для получения критериев подобия или соответствующего аналитического решения:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{d\varphi} - I \operatorname{tg} \delta_B = 2BR \sin \rho_B \cos \rho_{\Gamma B} \frac{H}{2} + 2BR^2 \sin \rho_B \cos \rho_B \sin \\ \times \left(\varphi - \frac{\omega}{2} \right) \gamma_{\Gamma B} - 2RBc_{\omega B} + \gamma_{\Gamma B} aRB \operatorname{tg} \delta \sin \left(\varphi - \frac{\omega}{2} \right) - \\ + \frac{\gamma_{\Gamma B}}{g} aRB \frac{dv}{dt} + \gamma_{\Gamma B} aRB \cos \left(\varphi - \frac{\omega}{2} \right) - \operatorname{tg} \delta_{\Gamma B} p_B RB d\varphi \cos \beta - \\ - p_B RB d\varphi \sin \beta, \end{aligned}$$

где ρ_B — угол трения грунта по грунту при возможной аэрации; δ_B — угол трения грунта по металлу при условии действия газовой смазки; $c_{\omega B}$ — сцепление грунта при возможной аэрации; p_B — давление воздуха в слое смазки; a, B, H, R — геометрические размеры пласта и отвала; v — скорость движения пласта по отвалу; β — угол направления потока воздуха к касательной.

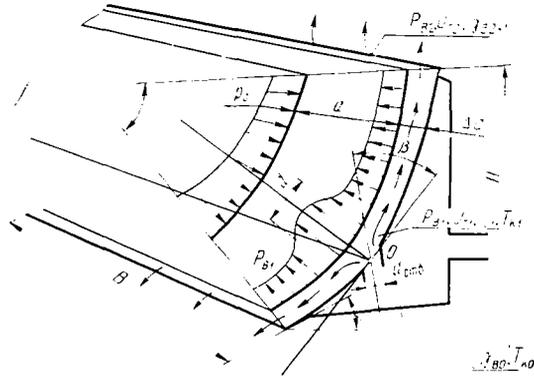


Рис. VI.13. Схема модели движения грунтового пласта по криволинейной поверхности с газовой смазкой

Аналитическое решение уравнения зависит от вида функции изменения нормального давления на поверхность отвала p_B (принимают $p_B = \text{const}$).

Подсистема «газовоздушный поток — поверхность отвала» характеризуется уравнениями газовой динамики. В упрощенном варианте соответствующие уравнения могут быть записаны в следующем виде:

$$p_B / \gamma_B = R_0 T_K,$$

где p_B — давление воздуха; γ_B — объемная масса; R_0 — газовая постоянная; T_K — абсолютная температура.

Давление, обеспечивающее удерживание пласта грунта или призмы от соприкосновения с отвалом,

$$p_B \geq W_{\text{пр. гор}} / (C_{\text{у}} F_{\text{отв. ср}}),$$

где $W_{\text{пр.гор}}$ — горизонтальная составляющая сопротивления призмы волочения и пласта; C_y — коэффициент силы, обеспечивающей удержание пласта от соприкосновения с поверхностью отвала; $F_{\text{с.тв.ср}}$ — среднее значение площади, находящейся под действием газовой смазки.

Для ориентировочных расчетов в соответствии с данными, приведенными на стр. 119, можно использовать логико-математическую модель в виде выражения

$$W_{\text{пр.гор}} = \gamma_p \cos^2 \rho_p \frac{BH^2}{2}$$

Величина P_v для нормального функционирования системы должна быть ограничена:

$$\frac{W_{\text{пр.гор}}}{C_{\text{уд}} F_{\text{отв.ср}}} \leq p_v \leq c_r,$$

где c_r — сцепление между частицами грунта.

Суммарное давление на выходе из отверстия в отвале определяется зависимостью

$$p = p_v + p_c + p_{\text{т.в}};$$

$$\text{где } p_c = \xi \rho_v \frac{v_v^2}{2}; \quad p_{\text{т.в}} = \eta \frac{v_v}{s},$$

где ξ — коэффициент сопротивления, учитывающий потери при выходе из отверстия и потери при выходе газовой смеси из-под грунта; ρ_v — плотность газовой смеси; v_v — скорость потока; η — вязкость газовой смеси; s — толщина слоя.

Скорость газовой смеси при выходе из отверстия

$$v_v \simeq \sqrt{\frac{2gk}{k-1} \frac{p_v}{\gamma_v} \left(1 - \frac{p_a}{p_v}\right)^{\frac{k-1}{k}}}$$

где k — показатель адиабаты; p_a — атмосферное давление.

Расход воздуха при наличии фильтрации через поры грунта определяется аддитивной функцией

$$Q = Q_{\text{пл}} + Q_{\text{ф}},$$

где Q — потребный расход воздуха от компрессора или газогенераторной установки другого типа; $Q_{\text{пл}}$ — расход воздуха, необходимый для вывешивания пласта; $Q_{\text{ф}}$ — фильтрационные потери.

Величина $Q_{\text{пл}}$ определяется выражением

$$Q_{\text{пл}} = v_v f,$$

где f — площадь выходного отверстия ($f = bs$; b — ширина слоя; s — толщина слоя).

При ориентировочных расчетах для системы «грунт — газовый поток» рекомендуют:

$$s \simeq k_d d_r,$$

где k_d — коэффициент, равный 0,22; d_r — диаметр частицы грунта.

Величина фильтрационных потерь определяется зависимостями движения газа в пористых средах.

$$Q_\phi = \frac{p_B^2 - p_a^2}{\rho g R_B T_K} \sqrt{\frac{k_\phi m \omega R}{\pi p_a v_{пл}}},$$

где p_B — давление воздуха в слое газовой смазки; k_ϕ — коэффициент фильтрации; ω — центральный угол пласта; R — радиус пласта; $v_{пл}$ — скорость движения пласта; m — коэффициент пористости.

Энергия потока газа в зоне выхода из отверстия

$$N_B = p_B Q.$$

Граничные условия в первом приближении могут быть записаны в следующем виде:

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \rho_B + c_B;$$

при $\varphi = 0$ $T = P_0$; при $\varphi = \omega$ $T = T_{\max}$; при $t = 0$ $v_{пл} = v_0$, при $t = t_1$ $v_{пл} = v_1$.

Критерии подобия процесса по каждой из подсистем определяют методом интегральных аналогов.

Исходное уравнение движения пласта в форме интегральных аналогов имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{T}{\varphi} &\sim T \operatorname{tg} \delta_B \sim BR \sin \theta \cos \rho \gamma_{гв} \frac{H}{2} \sim BR^2 \sin \rho \cos \rho \sin \left(\varphi - \frac{\omega}{2} \right) \gamma_{гв} \sim \\ &\sim RB c_{\omega B} \sim \gamma_{гв} a RB \operatorname{tg} \delta \sin \left(\varphi - \frac{\omega}{2} \right) \sim \frac{\gamma_{гв}}{g} a RB \frac{v}{t} \sim \\ &\sim \gamma_{гв} a RB \cos \left(\varphi - \frac{\omega}{2} \right) \sim \operatorname{tg} \delta_{гв} \rho_B RB \varphi \cos \beta \sim \rho_B RB \varphi \sin \beta. \end{aligned}$$

Конкретную соответствующую целям исследования форму записи критериев подобия определяют делением каждого из членов на один из них, например на третий.

Подсистема «грунт — поверхность контакта» при наличии газовой смазки и соблюдении условий геометрического подобия определяется следующей системой критериев:

$$\begin{aligned} \frac{c_{\omega B}}{\gamma_{гв} l}; \quad \frac{p_B}{\gamma_{гв} l}; \quad \frac{T}{\gamma_{гв} l^3}; \\ \frac{v^2}{gl}; \quad \delta_B; \quad \rho_B; \quad \alpha_i(\beta_i); \quad \frac{l_i}{l_j}. \end{aligned}$$

Анализ уравнений подсистемы «газовоздушный поток — поверхность контакта» приводит к необходимости дополнения системы критериев рядом комплексов:

$$\frac{\gamma_B g v_B^2}{\rho_B}; \quad \frac{vf}{Q}; \quad \frac{p_a}{\rho_B}; \quad \frac{f}{d^2 n}; \quad \frac{f}{bs}; \quad \frac{s}{d_2};$$

$$\frac{\tau_{\text{в}} \nu}{s p_{\text{в}}}; \quad \frac{p_{\text{в}} Q}{N}; \quad C_{\text{у}}; \quad \xi; \quad k; \quad \frac{p_{\text{в}}}{R_{\text{в}} T_{\text{к}} \gamma_{\text{в}}}.$$

Соответствующая система уравнений, связывающая масштабные коэффициенты параметров, имеет вид:

$$\begin{aligned} k_{c_{\text{ов}}} &= k_{\gamma_{\text{в}}} k_l; & k_{p_{\text{в}}} &= k_{\gamma_{\text{гв}}} k_l; & k_{\text{т}} &= k_{\gamma_{\text{гв}}} k_l^3; \\ k_{\text{в}} &= \sqrt{k_{\text{г}} k_l}; & k_{\rho} &= 1; & k_{\dot{c}} &= 1; & k_{\alpha} &= 1; & k_{l_i} &= k_{l_j}; \\ k_{\gamma_{\text{в}}} k_{\text{г}} k_{\text{в}}^2 &= k_{p_{\text{в}}}; & k_{\text{в}} k_{\text{ф}} &= k_{\text{Q}}; & k_{p_{\text{а}}} &= k_{p_{\text{в}}}; \\ k_{\text{ф}} &= k_{\text{д}}^2 k_{\text{н}}; & k_{\text{ф}} &= k_{\text{в}} k_{\text{с}}; & k_{\text{с}} &= k_{\text{д}}; \\ k_{\gamma_{\text{в}}} k_{\text{в}} &= k_{\text{с}} k_{p_{\text{в}}}; & k_{p_{\text{в}}} k_{\text{Q}} &= k_{\text{N}}; & k_{C_{\text{у}}} &= 1; \\ k_{\dot{c}} &= 1; & k &= 1; & k_{p_{\text{в}}} &= k_{R_{\text{в}}} k_{T_{\text{к}}} k_{\gamma_{\text{в}}} \end{aligned}$$

Условия формирования приближенных физических моделей. При $k_{\gamma_{\text{гв}}} = 1$; $k_{c_{\text{ов}}} = 1$ необходимо, чтобы $k_l = 1$. Поэтому при моделировании системы на эти величины накладывают ограничения. Принимают $k_{\gamma_{\text{гв}}} = 1$, тогда при моделировании необходимо соблюдать условия:

$$k_{p_{\text{в}}} = k_{c_{\text{ов}}} = k_{p_{\text{а}}} = k_l.$$

Условие $k_{p_{\text{а}}} = k_l$ требует изменения в модели атмосферного давления. Реализация этого положения сопряжена с трудностями. Поэтому в приближенных моделях принимают $k_{p_{\text{а}}} = 1$ и вносят соответствующую поправку при расчете параметров модели.

Кроме того, условия $k_{\gamma_{\text{в}}} k_{\text{в}} = k_{\text{с}} k_{\text{ф}}$ и $k_{\text{в}} = \sqrt{k_{\text{г}} k_l}$ дают различные рекомендации по масштабу скорости.

Для упрощения задачи принимают, что вязкость воздуха не оказывает существенного влияния на механизм процесса. Кроме того, при формировании модели во время проведения поисковых исследований и уточнения общей схемы процесса не контролируют соблюдение критериев $C_{\text{у}}$, k , $\frac{p_{\text{в}}}{R_{\text{в}} T_{\text{к}} \gamma_{\text{в}}}$. Это дает возможность значительно ускорить проведение исследований.

Перспективным методом упрощения модели без существенного нарушения критериев подобия является метод разделения линейных масштабов по осям координат, который рассмотрен ниже.

Процесс движения пласта по поверхности скольжения с газовой смазкой нецелесообразно изучать при нарушении подобия системы по критериям газодинамической части системы. Трудности соблюдения указанных критериев при формировании модели по полной системе критериев приводят к целесообразности использовать метод разделения линейных масштабов по осям координат как вариант аффинного подобия. При изучении рабочих процессов, связанных с отделением грунта от массива, такой прием открывает воз-

возможность вести моделирование без изменения масштабов ряда параметров, определяющих процесс. Достоинства метода разделения масштабов следуют из примера анализа подобия рабочего оборудования, имеющего воздушную подушку на поверхностях контакта с грунтом. Схема процесса приведена на рис. VI.14.

При разделении масштабов линейных размеров движущегося пласта по осям координат на масштабы поперечного и продольного размеров пласта накладываются следующие ограничения:

$$k_b = k_c = k_l,$$

где k_b — масштабный коэффициент ширины пласта; k_c — масштабный коэффициент длины поверхности скольжения.

На линейные масштабы по оси «у» ограничения записывают в следующем виде:

$$k_a = k_{\Delta a} = k_f = k_s = k_i = k_{la},$$

где k_s — масштабный коэффициент (s — путь, на котором совершается работа при движении пласта).

Уравнения связи между масштабами рассмотрены ранее.

При сохранении натуральных размеров пласта по оси «у» и масштаба пути сдвига грунта

$$k_s = k_a = k_{\Delta a} = 1$$

условия моделирования принимают вид:

$$k_{\gamma_b} = k_{\rho_b} = k_{\eta} = k_R = k_{T_K} = 1;$$

$$k_{\gamma_r} = k_{\tau} = k_{\rho_r} = k_{c_\omega} = 1.$$

Реализация этих соотношений открывает возможность осуществлять моделирование, применяя сжатый воздух или газ с параметрами оригинала, а также использовать грунт или другую среду, имеющие естественные свойства и структуру.

Определенные ограничения накладываются в этом случае на число и размеры отверстий для выхода воздуха.

Из соотношений

$$k_Q = k_v k_f k_n;$$

$$k_E = k_{\gamma_b} k_l^2 k_s k_{\Delta a}; \quad k_E = k_{\rho_b} k_l^2 k_s;$$

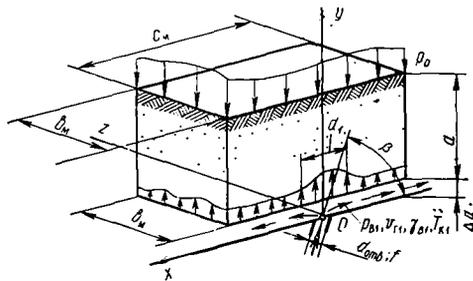


Рис. VI.14. Схема модели движения грунтового пласта по плоской поверхности с газовоздушной смазкой

$$k_E = k_Q k_{p_b} k_f; \quad k_E = k_Q k_{\gamma_b} k_v^2 k_c k_q^{-1}$$

при $k_v = 1$ получаем: $k_v k_f = k_i^2$.

Из последнего следует связь линейных масштабов образца по ширине k_b и длине k_c с масштабами числа отверстий — k_n и их размерами k_f . Для круглых отверстий при $k_f = 1$ получаем:

$$k_b = k_i^2 \text{ или } k_{v_b} k_{c_c} = k_b k_c.$$

В этих условиях число отверстий по длине и ширине образца должно уменьшаться пропорционально линейным масштабам уменьшения длины соответствующих сторон образца:

$$k_{nb} = k_b; \quad k_{nc} = k_c.$$

Для щелеобразных отверстий имеем: $k_n k_f = k_i^2$ или $k_{na} k_b k_t = k_b k_c$ при $k_t = 1$ и $k_{nc} = k_c$.

Если система определяется рассмотренными соотношениями, масштабные коэффициенты силовых и энергетических параметров устанавливают следующим образом:

$$k_p = k_i^2; \quad k_p = k_b k_c;$$

$$k_E = k_i^2; \quad k_E = k_b k_a$$

Основным вопросом методики с разделением линейных масштабов является формирование ограничений по предельному линейному масштабу по ширине и длине образца. Наряду с известными ограничениями линейного масштаба по предельному объему среды и ошибке измерительной аппаратуры необходимо соблюдать следующие условия:

$$k_l \leq 7d_{\text{кав}} = 7d_1; \quad l_{\text{борт}} \geq 2d_{\text{ков}} = 2d_1;$$

где $d_{\text{кав}}$ — размер каверны в грунте от действия единичной струи воздуха, м; $l_{\text{борт}}$ — расстояние стенки сдвигового прибора до края выходного отверстия, м.

Важным достоинством рассмотренного варианта моделирования является его достаточно простая реализация посредством прибора сдвигового типа.

Практический интерес представляют также еще два варианта моделирования, в которых можно пренебречь некоторыми факторами, не являющимися главными для рассматриваемого процесса: 1) можно пренебречь силами веса и вязкости воздуха; 2) дополнительно можно не принимать во внимание силы структурного сцепления между частицами среды (грунта) и силами инерции. Для изучения сил трения указанные варианты не могут быть использованы, так как не позволяют установить аналитическим путем степень искажения процесса и влияние этого искажения на результаты прогноза на натуральный образец.

В условиях, когда параметры системы определяются рассмотрен-

ными соотношениями, масштабы силовых и энергетических параметров определяют следующим образом:

$$k_T = k_l^2 = k_b k_c k_{f_s}; \quad k_E = k_l^2 = k_b k_c.$$

В физической модели сдвигового типа не обязательно соблюдать масштаб кривизны поверхности скольжения, контактирующей с грунтом. Если между высотой (длиной) и радиусом кривизны соблюдается отношение $k = \frac{R}{H} \geq 0,9$, то влияние R на изменение сопротивления движению пласта незначительно, поэтому возможно проведение исследований на стенде сдвигового типа с горизонтальной поверхностью скольжения (см. рис. III.17).

Основным вопросом методики приближенного моделирования с разделением линейных масштабов пласта является формирование ограничений по предельному линейному масштабу по ширине и длине образца, а также установление ограничений по предельным расстояниям стенки сдвигового прибора до края выходного отверстия.

Применение физической модели сдвигового типа, у которой изменены линейные размеры движущегося пласта грунта по двум осям координат, базируется на рассмотренном варианте моделирования. Такой вариант физического моделирования на первом этапе исследований позволяет с достаточной степенью точности получить результаты по эффективности применения воздушной смазки при разработке различных грунтов, при разной скорости перемещения пласта, установить коэффициент трения. Данный вариант моделирования выгодно отличается от существующих тем, что при таком варианте на образце с уменьшенными линейными размерами в плане можно вести эксперимент без изменения свойств воздуха, грунтовой среды и режимов движения. Основными ограничениями при этом являются линейные масштабы пласта по осям координат в плане. Предельно допустимый объем грунта ограничивается необходимой точностью измерения параметров и классом применяемой аппаратуры.

Исследование процесса движения грунта при наличии газовой смазки на физических моделях сдвигового типа является наиболее удобным, так как дает возможность проводить эксперименты без изменения свойств грунта, параметров газа, режимов скорости. Образец пласта грунта с размерами соответственно a , b и c помещают в металлическую рамку и перемещают вместе с ней по поверхности скольжения. При этом под движущийся образец грунта, имитирующий движение пласта по поверхности скольжения рабочего органа, подается сжатый воздух. Контроль величины уплотнения пласта грунта в рамке осуществляют любым из принятых методов.

Исследование влияния боковых стенок и дна на прочностные параметры грунта в сдвиговой рамке перестает сказываться при расстоянии между стенками более 125 мм и при заполнении рамки грунтом на высоту не менее 9 см.

Проверка указанных ограничений выполнена на базе экспери-

ментов по определению сопротивления движению пласта грунта по поверхности скольжения при наличии газового слоя для разных масштабов рамки в плане [25].

Сущность экспериментов заключается в том, что для рамок с разными масштабами $k_{b_1}, k_{b_2}, \dots, k_{b_n}$ и $k_{c_1}, k_{c_2}, \dots, k_{c_n}$ определяли величину сопротивления движению $T_{M_1}, T_{M_2}, \dots, T_{M_n}$. Сопротивление движению определялось как для случая подачи воздуха под движущийся пласт, так и без воздуха. Установлено, что ошибка отклонения результатов с увеличением масштаба пласта в плане возрастает и при определенных значениях k_b, k_c составляет 50% и более. Для получения результатов с ошибкой в пределах $\pm 15\%$ размеры основания рамки для образца грунта не должны быть меньше $b = 15$ см; $c = 20$ см.

Необходимо соблюдать также ограничения по предельным расстояниям стенки сдвигового прибора (рамки) до края выходного отверстия. Это ограничение устанавливают, исходя из размеров каверны в грунте от действия единичной струи газа с учетом получения максимального эффекта по снижению силы сопротивления движению пласта. Установлены следующие соотношения:

$$\begin{aligned} (4 \div 5) d_{\text{кав}} &\leq l_b \leq (8 \div 10) d_{\text{кав}}; \\ (4 \div 5) d_{\text{кав}} &\leq l_c \leq (8 \div 10) d_{\text{кав}}; \\ l_{\text{бок}} &\geq d_{\text{кав}} \simeq (15 \div 20) d_{\text{отв}}, \end{aligned}$$

где $d_{\text{кав}}$ — размер каверны в грунте от действия единичной струи газа, см; $l_{\text{бок}}$ — расстояние от стенки рамки до крайнего выходного отверстия, см; $d_{\text{отв}}$ — диаметр выходного отверстия, см.

Переход от параметров модели к оригиналу. При соблюдении указанных ограничений параметры процесса, замеренные на модели, пересчитывают на оригинал на основании соотношений между масштабами.

Давление в системе подачи газозвдушной смазки

$$p_{\text{вн}} = p_{\text{вм}}.$$

Расход газа при щелевидном отверстии выхода

$$Q_{\text{н}} = Q_{\text{м}} k_v k_s k_b.$$

При $k_v = 1$; $k_s = 1$; $k_b = b_{\text{н}} / [b_{\text{м}}]_{\text{доп}}$ (где $[b_{\text{м}}]_{\text{доп}}$ — допустимое уменьшение ширины сдвиговой рамки)

$$Q_{\text{н}} = Q_{\text{м}} b_{\text{н}} / [b_{\text{м}}]_{\text{доп}}.$$

Для выхода газа через систему отверстий, равномерно распределенных по ширине основания сдвигового прибора, расход определяется по аналогичной зависимости.

Мощность на привод газогенераторной установки компрессора определяют по формулам:

$$N_{\text{вн}} = N_{\text{вм}} \frac{k_Q k_p}{k_\gamma} \quad \text{или} \quad N_{\text{вн}} = N_{\text{вм}} \frac{k_\tau k_s k_b k_p}{k_\gamma}.$$

При $k_{p_b} = 1$; $k_\gamma = 1$; $k_b = 1$; $k_s = 1$; $k_b = b_H/[b_M]_{\text{доп}}$ получаем:

$$N_{\text{вн}} = N_{\text{вм}} \frac{b_H}{[b_M]_{\text{доп}}}$$

Сопротивление движению образца по контактирующей поверхности с газовойоздушной смазкой

$$T_{\text{н}} = T_{\text{м}} k_b k_c k_a k_\gamma;$$

так как $k_a = k_\gamma = 1$,

$$T_{\text{н}} = T_{\text{м}} k_b k_c.$$

Мощность на передвижение образца определяется зависимостью

$$N_{2\text{н}} = N_{2\text{м}} \frac{k_T k_v}{k_\gamma}.$$

При $k_b = 1$; $k_\gamma = 1$; $k_T = k_1 k_c$ $N_{2\text{н}} = N_{2\text{м}} k_b k_c.$

Общий расход мощности для системы

$$N_{\text{н}} = N_{\text{вм}} \frac{b_H}{[b_M]_{\text{доп}}} + N_{2\text{м}} k_b k_c$$

или

$$N_{\text{н}} = N_{\text{вм}} \frac{b_H}{[b_M]_{\text{доп}}} + N_{2\text{м}} \frac{F_{\text{н}}}{[F_M]_{\text{доп}}},$$

где $F_{\text{н}}$ — площадь поверхности натурального рабочего органа, на которую подается газовойоздушная смазка; $F_{\text{м}}$ — соответствующая площадь на модели, ограниченная предельно допустимыми размерами.

Величина предполагаемого эффекта от применения газовойоздушной смазки определяется степенью снижения коэффициента трения

$$k_{\text{эф.тр}} = 1 - \frac{f_{\text{тр.с}}}{f_{\text{тр.т}}}.$$

Важной задачей исследования процессов с газовойоздушной смазкой является изучение влияния параметров процесса на величину коэффициентов трения.

Исследование образования полости в зоне контакта струи газа с грунтом. Изучение механизма взаимодействия струи газа или воздуха с пластом грунта осуществляют посредством введения струи газа внутрь образца грунта, заключенного в жесткую рамку [28]. Одну сторону ограждения, через которую наблюдают за процессом, выполняют прозрачной.

Эксперименты с таким оборудованием позволяют исследовать влияние прочности и влажности грунта, давления газовойоздушного потока и других факторов на размеры каверн (пустот), образующихся в зоне контакта струи газа или воздуха с грунтом и характер разрушения пласта над каверной. Установлено, что каверна образуется только в песчаных и супесчаных грунтах, имеющих сравнительно низкие характеристики прочности (сцепление) и высокую пористость.

В суглинистых и даже слабо уплотненных глинистых грунтах каверны не образуются. При достаточно высоком давлении и расходе воздуха пласт поднимается над основанием и вывешивается над воздушной подушкой, образуемой над щелью. Считают, что в слабосвязных грунтах (песок, супесь) фильтрация идет через микропоры, имеющиеся в структуре грунта. Во влажных неразрыхленных грунтах с высокой связностью (суглинок, глина) фильтрация осуществляется через разрывы структур и щели между микрофрагментами грунта.

Для слабосвязного грунта при $c_w \geq p - p_a$ характер изменения площади поверхности каверны, через которую фильтруется воздух, подаваемый под пласт, зависит от избыточного давления сжатого воздуха. Установлено, что активная площадь фильтрации изменяется пропорционально корню квадратному от величины избыточного давления

$$F_k = k_1 \sqrt{p_k - p_a}$$

где k_1 — эмпирический коэффициент; p_k — абсолютное давление в потоке газовой смазки на выходе из сопла; p_a — атмосферное давление.

Площадь поверхности каверны определяют на основании анализа масштабных фотографий процесса, которые получают через прозрачную стенку ограждения. Изменение величины просветности слабосвязного грунта в зависимости от $C_{уд}$ для рассматриваемого условия [28]: при $\mu_{отв} = 0,8$, $p_k - p_a = \gamma_r H \leq 0,002$ МПа (где H — высота пласта грунта, см), определяется выражением

$$\mu_{гр}^n = k_2 C_{уд}^{-\frac{1}{2}}$$

где $\mu_{гр}$ — коэффициент расхода газа через поры в грунте, зависящий от формы и размеров пор, величины потерь при истечении и др.; n — просветность — как отношение площади пор в поперечном сечении пласта ко всей площади сечения пласта, зависящая от типа грунта, размера частиц, влажности, степени уплотнения и др.; $C_{уд}$ — число ударов динамического плотномера; k_2 — эмпирический коэффициент.

Увеличение площади каверны и полученные закономерности ограничены условием $c_w \gg p_k - p_a$, где c_w — коэффициент сцепления.

За пределами ограничения происходит обрушение свода каверны и нарушение сплошности грунта над ней. Для слабосвязных грунтов это зафиксировано при $p \geq 0,1$ МПа.

Снижение коэффициента трения пласта грунта по металлической поверхности скольжения, к которой подводится сжатый воздух, зависит от давления воздуха, типа грунта и его влажности. Для песчаных и супесчаных грунтов рациональным следует считать давление $p_b = 0,05 - 0,09$ МПа. При этом коэффициент трения снижается на 65—70%. Соответственно для суглинков и глин — $p_b = 0,1 - 0,15$ МПа и снижение коэффициента трения на 75—95%.

Коэффициент трения грунта по металлу при подаче под движущийся пласт газовой смазки определяется толщиной грунта и давлением воздуха. С увеличением толщины грунта при неизменных параметрах давления воздуха эффективность снижения коэффициента трения уменьшается, что объясняется повышением потерь давления воздуха по высоте пласта (Хмара Л. А.).

Влияние давления газовой смазки на изменение сопротивления движению пласта характеризуется зависимостями, показанными на рис. VI.15.

Для песчаных грунтов влажностью $W = 3-4\%$ и прочностью $c_{уд} = 1 \div 2$, перемещающихся по поверхности скольжения с газовой смазкой, с увеличением давления воздуха от $p_v = 0,025 \div 0,075$ МПа сопротивление движению пласта резко снижается. Пласт вывешивается и передвигается на газовом слое. При $p_v = 0,01$ МПа происходит стабилизация сопротивления движению пласта. Дальнейшее увеличение давления не ведет к уменьшению сопротивления движению пласта, однако при этом наблюдается рост расхода воздуха и общих энергозатрат.

Для супесчаных грунтов в первоначальный момент процесс протекает аналогично. Резкое увеличение сопротивления движению пласта объясняется тем, что при увеличении давления воздуха, подводимого на границу контакта «грунт — поверхность скольжения», происходит местное разрушение пласта струей сжатого воздуха и эффект вывешивания исчезает. Уменьшается аэрированная площадь контакта и площадь воздушной каверны. Струя сжатого воздуха разрушает пласт при превышении давления струи газовой смазки предела прочности грунта.

Для суглинистых и глинистых грунтов различной влажности, прочности и плотности с увеличением давления воздуха сопротивление движению пласта снижается (рис. VI.15). Эффект всплывания пласта над поверхностью скольжения наступает в зависимости от влажности при $p_v = 0,05-0,15$ МПа.

Моделирование процесса копания грунта бульдозером с газовой смазкой основывают на анализе критериев подобия процесса

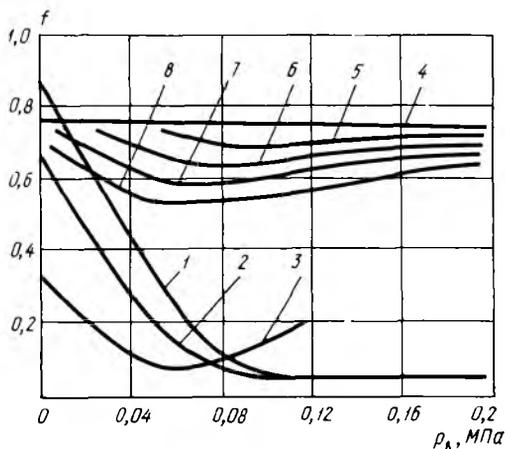


Рис. VI.15. Влияние давления в полости газовой смазки на величину коэффициентов трения грунта по металлу:

1 — глина — $\omega = 20\%$, $C_{уд} = 11$; 2 — суглинок — $\omega = 28\%$, $C_{уд} = 4,5$; 3 — песок — $\omega = 6,8\%$, $C_{уд} = 3$; 4 — грунт по грунту для песчаного грунта $\omega = 6,8\%$; $C_{уд} = 1,2$; $\gamma = 1,6$ г/см³; $v = 0,03$ м/с при различном удалении от газовой прослойки: 4 — $h = 16$ см; 5 — $h = 12,7$ см; 6 — $h = 10$ см; 7 — $h = 5,4$ см; 8 — $h = 3,1$ см

и уравнений связи между масштабами. Система критериев подобия для процессов такого типа рассмотрена в предыдущих разделах. Здесь важно конкретизировать условия приближенного моделирования в соответствии с рис. III.15 и VI.13. Эта задача упрощается при последовательном исключении из рассмотрения параметров, не оказывающих существенного влияния на механизм процесса копания.

Рассмотрим вариант установившегося движения, когда вязкость среды и ряд характеристик газа не влияют на процесс копания грунта. Соответствующие критерии подобия составим для каждой из подсистем. Подсистему «грунт — режущий нож» (последний находится вне сферы действия газовой смазки) характеризуют критерии:

$$c_{\omega}/(\gamma_{\Gamma}l); \delta; \tau_p; h/B; h_{\text{зт}}/h.$$

Подсистема «призма грунта — газовойдушный поток» определяется критериями подобия:

$$c_{\Gamma\text{В}}/(\gamma_{\Gamma\text{В}}l); p_{\text{В}}/(\gamma_{\Gamma\text{В}}l); \delta_{\text{В}}; H/B; R/H.$$

Подсистема «газовоздушный поток — отвал» характеризуется в упрощенном варианте критериями вида:

$$\gamma_{\text{В}}v_{\text{В}}^2/g\rho_{\text{В}}; v_f/Q; p_a/p_{\text{В}}; f/(bs); s/d_{\Gamma}; p_{\text{В}}Q/N.$$

При $k_p \simeq 1$; $k_{\delta} \simeq 1$; $k_{\gamma_{\Gamma}} \simeq 1$; $k_{\gamma_{\text{В}}} \simeq 1$ для формирования модели важно соблюдение условий:

$$k_{c_{\omega}} = k_l; k_{p_{\text{В}}} = k_l.$$

Если $k_{p_a} \neq k_l$, при переходе от оригинала к модели и обратно необходимо в расчетные формулы вносить соответствующую поправку.

Соблюдение указанных условий позволяет на основании зарегистрированных при моделировании параметров прогнозировать характер протекания и ожидаемые в реальных условиях параметры и показатели.

Давление в слое газовой смазки

$$p_{\text{ВН}} = p_{\text{ВМ}}k_l\Delta,$$

где Δ — поправочный коэффициент на несоблюдения условий подобия по атмосферному давлению.

Для приближенных расчетов можно принимать

$$\Delta \simeq 1 + \frac{p_a}{p_{\text{М}}} \left(\frac{1}{k_l} - 1 \right).$$

Расход воздуха

$$Q_{\text{В}} = Q_{\text{М}}k_{f_{\text{отв}}} \sqrt{\frac{k_l\Delta}{k_{\mu_{\text{В}}}k_{\text{пор}}}},$$

где $k_{\text{пор}}$ — коэффициент, учитывающий влияние изменения пористости грунта при моделировании.

Мощность на привод компрессора или газогенераторную установку другого типа

$$N_{\text{вн}} = N_{\text{вм}} k_f f_{\text{отв}} \sqrt{\frac{k_l^3 \Delta^3}{k_{\rho\text{в}} k_{\text{пор}}}}$$

Сопrotивление копанию (как суммарная величина, так и каждая из составляющих по осям координат)

$$P_{\text{кн}} = P_{\text{км}} k_l^3 k_{\gamma\Gamma}$$

В более общем виде

$$P_{\text{кн}} = P_{\text{км}} k_l^n$$

Если при моделировании условие $k_{c\omega} = k_l$ нарушается, то величина горизонтальной составляющей сопротивления копанию

$$P_{\text{к.н}} = P_{\text{к.м}} k_l^3 k,$$

где

$$k = \frac{c_{\omega\text{м}} l_{\text{м}}^2 k_{c\omega}}{k_l} + \frac{\gamma_{\Gamma\text{м}} l_{\text{м}}^3 f_{\Gamma\text{.м}} k_{f\Gamma} (1 + f_{\text{отв.м}} f_{\Gamma\text{м}} k_{f_{\text{отв}}} k_{f_{\Gamma}})}{c_{\omega\text{м}} l_{\text{м}}^2 + \gamma_{\Gamma\text{м}} l_{\text{м}}^3 f_{\Gamma\text{м}} (1 + f_{\text{отв.м}} f_{\Gamma\text{м}})}$$

где $c_{\omega\text{м}}$ — сцепление грунта модели; $\gamma_{\Gamma\text{м}}$ — объемная масса грунта модели; $k_{c\omega} = c_{\omega\text{н}}/c_{\omega\text{м}}$; $f_{\Gamma\text{м}}$ — коэффициент трения грунта по грунту модели; $f_{\text{отв.м}}$ — коэффициент трения грунта по металлу;

$$k_{f_{\Gamma}} = f_{\Gamma\text{н}}/f_{\Gamma\text{м}}; \quad k_{f_{\text{отв}}} = f_{\text{отв.н}}/f_{\text{отв.м}}; \quad l_{\text{м}} \simeq \sqrt{q_{\text{м}}}$$

Мощность, необходимую для копания грунта, следует определять с учетом возможных изменений показателей степени по силовой и скоростной характеристикам:

$$N_{\text{гв}} = N_{\text{гм}} k_l^{n+\alpha}$$

При $k_c = k_l$; $k_v = k_l^{1/2}$ $N_{\text{гн}} = N_{\text{гм}} k_l^{3,5}$.

При $k_{c\omega} = k_l$; $k_v = 1$ $N_{\text{гн}} = N_{\text{гм}} k_l^3$.

Суммарная мощность привода

$$N_{\Sigma} = N_{\text{вм}} k_f f_{\text{отв}} \sqrt{\frac{k_l^3 \Delta^3}{k_{\rho\text{в}} k_{\text{кор}}}} + N_{\text{гм}} k_l^{3,5}$$

Полученные зависимости позволяют рассчитать предельное значение силы сопротивления призмам волочения

$$W_{\text{пр}} = C_y B H \sqrt[3]{\frac{N_{\text{в}}^2 f_{\text{отв}}^2 \gamma^2 75^2}{2 l_{\text{отв}}^2}}$$

Ориентировочно значение коэффициента эффективности по сни-

жению горизонтальной составляющей сопротивления копанью можно определить

$$k_{\text{эф}} = \frac{k_p b h + G_{\text{пр}} f_{\text{гр}}^2 f_{\text{отв}} k_{\text{эф.в}}}{k_p b h + G_{\text{пр}} (1 + f_{\text{гр}} f_{\text{отв}}) f_{\text{гр}}}$$

где $G_{\text{пр}}$ — вес призмы волочения; k_p — коэффициент удельного сопротивления резанию; $b h$ — ширина и глубина резания; $f_{\text{гр}}$, $f_{\text{отв}}$ — коэффициенты трения грунта по грунту и грунта по отвалу; $k_{\text{эф.в}}$ — коэффициент снижения коэффициента трения грунта по отвалу ($k_{\text{эф.в}} = 0,4 \div 0,6$).

Величину $k_{\text{эф.в}}$ устанавливают экспериментально на сдвиговом приборе. Соответствующие эксперименты рассмотрены в предыдущем разделе.

При подаче сжатого воздуха по отвалу вверх по касательной к поверхности скольжения вырезаемый пласт грунта подвергается меньшей разрыхляемости и насыщению его воздухом, что и обеспечивает лучшую сохраняющую способность объема призмы волочения. При определенных давлениях воздуха наступает всплывание пласта над поверхностью скольжения и между поверхностью пласта и отвалом образуется промежуточный газовый слой (Хмара Л. А.).

При $p_{\text{возд}} = 0,15 - 0,2$ МПа и более мелкие частицы грунта выбрасываются вместе со струей газа вверх по касательной к поверхности скольжения у верхней кромки отвала. Пыления грунта при этом не наблюдается. При подаче воздуха под движущийся пласт по касательной к поверхности скольжения вертикальная составляющая увеличивается на 11—12%. Рост вертикальной составляющей вызван появлением составляющей от действия воздушной струи. Зависимость снижения сопротивления копанью грунтов различной влажности показывает, что в исследованных пределах степень снижения сопротивления копанью с увеличением влажности возрастает.

Эффект снижения сопротивления копанью грунта отвалом бульдозера с увеличением давления газовой смазки сначала возрастает и при $p_{\text{в}} = 0,15 - 0,2$ МПа стабилизируется. Для рассмотренных условий исследований рациональный удельный расход мощности, необходимый для обеспечения газозвушной смазки на единицу площади поверхности скольжения, контактирующей с грунтом, составляет в среднем для песков, супесей $q_N = 6 \div 8$ кВт м², соответственно для глин, суглинков $q_N = 10 \div 12$ кВт м².

Мощность, необходимая для обеспечения газовой смазки отвальной поверхности, контактирующей с грунтом,

$$N = q_N F k_c,$$

где F — площадь поверхности, контактирующей с грунтом; k_c — коэффициент смазки отвальной поверхности скольжения ($k_c = F_c / F$, где F_c — площадь отвальной поверхности скольжения, на которую подается газовая смазка).

Для определения величины масштабного коэффициента сил используют формулу

$$k_p \simeq k_l^3 \frac{\left(\frac{c_{\text{ом}} l_M^2 k_{c_{\text{ом}}}}{k_l} + \gamma_{2M}^3 l_{2M}^3 k_{\gamma} k_{f_{\Gamma}} (1 + f_{\text{в.м}} f_{2M} k_{f_{\text{в}}} k_{f_{\Gamma}}) \right)}{\left(c_{\text{ом}} l_M^2 + \gamma_{\Gamma.М} l_M^3 f_{\Gamma.М} (1 + f_{\text{в.м}} f_{\Gamma.М}) \right)},$$

где $c_{\text{ом}}$ — сцепление моделирующего грунта; $k_{c_{\text{ом}}}$ — масштабный коэффициент по сцеплению ($k_{c_{\text{ом}}} = c_{\text{ом}}/c_{\text{омМ}}$); l_M — обобщенный линейный размер модели; $\gamma_{\Gamma.М}$ — объемный вес моделирующего грунта; k_{γ} — масштабный коэффициент по объемному весу ($k_{\gamma} = \gamma_{\Gamma.н}/\gamma_{\Gamma.М}$); $f_{\Gamma.М}$ — коэффициент трения грунта по грунту для модели; $k_{f_{\Gamma}}$ — масштабный коэффициент по коэффициенту трения ($k_{f_{\Gamma}} = f_{\Gamma.н}/f_{\Gamma.М}$); $f_{\text{в.м}}$ — коэффициент трения по поверхности (отвала) с воздушной смазкой для модели; $k_{f_{\text{в}}}$ — масштабный коэффициент по коэффициенту трения при наличии воздушной смазки ($k_{f_{\text{в}}} = f_{\text{в.н}}/f_{\text{в.М}}$).

Анализ приведенной зависимости для расчета k_p позволяет сделать некоторые выводы. При $k_{c_{\text{ом}}} = k_l$ в соответствии с условиями приближенного моделирования грунта $k_{\gamma} = 1$; $k_{f_{\Gamma}} = 1$; $k_{f_{\text{в}}} = 1$, $k_p = k_l^3$.

Если $\gamma_{\Gamma.М} l_M^3 = c_M l_M^2$, масштаб сил k_p равен k_l^2 .

Величину эффективности снижения горизонтальной составляющей сопротивления копанью устанавливают по формуле

$$k_{\text{эф}P_{\text{к1}}} = 1 - \frac{P_{\text{к1нов.м}}}{P_{\text{к1т.м}}},$$

где $P_{\text{к1нов.м}}$ — горизонтальная составляющая сопротивления копанью при наличии ВСН и газовой смазки, зафиксированная при моделировании; $P_{\text{к1т.м}}$ — горизонтальная составляющая сопротивления копанью для традиционного бульдозера при отсутствии ВСН и газовой смазки, зафиксированная на модели.

По величине $k_{\text{эф}P_{\text{к1}}}$ определяют ожидаемое усилие на оригинале:

$$P_{\text{к1нов}} = P_{\text{к1т}} (1 - k_{\text{эф}P_{\text{к1}}}).$$

Если известны отдельные эффекты по резанию ВСН и от применения газовой смазки, то суммарный коэффициент эффективности можно рассчитать на основании приближенной зависимости

$$k_{\text{эф}P_{\text{к1}}} \simeq \frac{P_p k_{\text{эф} \text{ВСН}} + G_{\text{пр}} f_{\Gamma}^2 f_{\text{отв}} k_{\text{эф.в}}}{P_p + G_{\text{пр}} (1 + f_{\Gamma} f_{\text{отв}}) f_{\text{пр}}}.$$

В приведенной зависимости величины P_p , $G_{\text{пр}}$, f_{Γ} , $f_{\text{отв}}$ соответствуют традиционному оборудованию и определяются на основании известных соотношений. Величины $k_{\text{эф.ВСН}}$ и $k_{\text{эф.в}}$ определяются экспериментально или на основании соответствующих логико-математических моделей. Ряд положений по расчету $k_{\text{эф.ВСН}}$ и $k_{\text{эф.в}}$ рассмотрен в соответствующих разделах.

Мощность, необходимая для копания,

$$N_H = N_M k_l^{n+\alpha}$$

где N_M — мощность, замеренная при моделировании; n — показатель степени ($n = 2 \div 3$); α — показатель степени ($\alpha = 0 \div 1$).

При соблюдении условий приближенного подобия $n = 3$; $\alpha = 0$.

$$N_H = N_M k_l^3$$

Параметры системы, обеспечивающей газоздушную смазку поверхности, контактирующей с грунтом, определяют соответствующими критериями подобия и масштабными соотношениями.

Давление (абсолютное) в потоке, образующем газоздушную прослойку,

$$p_{в.н} = p_{в.м} k_l \Delta,$$

где $p_{в.м}$ — абсолютное давление в модели; k_l — масштабный коэффициент линейных размеров; Δ — поправочный коэффициент на несоблюдение масштаба по атмосферному давлению;

$$\Delta = 1 + \frac{p_a}{p_m} \left(\frac{1}{k_l} - 1 \right),$$

где p_m — избыточное давление в системе для модели.

Расход воздуха Q_H определяется по расходу, замеренному на модели:

$$Q_H = Q_M k_{fc} \sqrt{\frac{k_l \Delta}{k_{\rho_B} k_{пор}}},$$

где k_{fc} — масштабный коэффициент по площади сопловых отверстий ($k_{fc} = F_{сн}/F_{сМ}$); k_{ρ_B} — масштабный коэффициент по плотности воздуха ($k_{\rho_B} = \rho_{в.н}/\rho_{в.м}$); $k_{пор}$ — коэффициент, учитывающий расход воздуха через поры в грунте ($k_{пор} = n_H/n_M$).

Мощность, необходимую для привода компрессора, можно установить по соответствующей мощности, замеренной на модели:

$$N_{в.н} = N_{в.м} k_{fc} \sqrt{\frac{(k_l \Delta)^3}{k_{\rho_B} k_{пор}}}.$$

Принятые обозначения указаны выше.

Суммарная мощность определяется мощностью, расходуемой на процесс копания и на привод компрессора:

$$N_{общ} = N_{PM} k_l^{n+\alpha} - N_{в.м} k_{fc} \sqrt{\frac{(k_l \Delta)^3}{k_{\rho_B} k_{пор}}}$$

Полученные величины позволяют рассчитать показатели эффективности от применения рассматриваемого оборудования в соответствии с системой показателей, приведенной в табл. II.1.

Эксперименты проводились на стенде для физического моделирования с регистрацией усилий в тензозвеньях по стандартной методике. Исследования проведены с физической моделью бульдозерного отвала, оборудованного ВСН с газовой смазкой поверхности скольжения (см. рис. VI.16). Модель представляла универсальное оборудование. Основой комбинированной модели была модель традиционного отвала бульдозера Д-521А. Последняя легко дооборудовалась устройством в виде ВСН и газовой смазкой. Модель состоит из отвала 4 с ножом 2, съемной выступающей средней части 1, системы подачи газа 3 и винтов с потайной головкой для крепления съемной части. В отвале имеются вертикальные пазы. Отвал установлен на толкающих брусках, которые в свою очередь фиксировались на динамометрической тележке. Выступающий средний нож 1 устанавливается на необходимую глубину копания $h_{\text{ВСН}}$ с помощью винтов и продольных пазов. В нижней части ВСН выполнена щель для подачи струи газа вверх по касательной к поверхности скольжения. Источником сжатого газа является компрессор или баллон. Ширина ВСН меньше ширины традиционного отвала. Контроль давления воздуха, подводимого к коллектору, осуществляется по манометру.

На рис. VI.17 приведены результаты экспериментальных исследований по определению изменения горизонтальной составляющей силы сопротивления грунта копанию в зависимости от пройденного отвалом пути при постоянной площади вырезаемой стружки. Глубина резания не устанавливалась оптимальной для получения минимального значения усилия копания ВСН. Несмотря на это, сила сопротивления грунта копанию для отвала с ВСН при газовой смазке поверхности выступающего ножа на всех участках пути копания оставалась меньшей, чем для традиционного отвала и отвала с ВСН. Уменьшение сил сопротивления грунта копанию отвалом

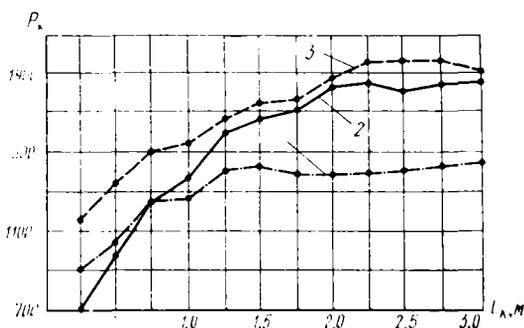


Рис. VI.17. Зависимость изменения горизонтальной составляющей сопротивления копанию отвалом бульдозера от длины пути копания при площади вырезаемой стружки ($F = 54,6 \text{ см}^2$):

1 — для отвала с ВСН и газовой смазкой; 2 — для отвала с ВСН; 3 — для отвала традиционного типа

бульдозера с ВСН при газовой смазке поверхности скольжения по отношению к отвалу традиционного типа на участке устойчивого копания при избыточном давлении в коллекторе $p_v = 0,02 \div 0,03$ МПа составляет в среднем 35%, а по отношению к отвалу с ВСН — в среднем 35—40%.

Вес призмы волочения наибольший у отвала бульдозера с ВСН, средний — у отвала с ВСН в условиях газовой смазки поверхности скольжения и наименьший — у отвала традиционного типа. Это объясняется тем, что у отвала с ВСН призма волочения формируется в большей части по середине — на участке движения вырезанного пласта. Аналогичная картина наблюдается и у отвала с ВСН в условиях газовой смазки, однако средняя часть при этом подвергается разрыхлению струей сжатого газа. Это приводит к тому, что призма волочения в средней части имеет разрыхленную структуру и частично теряется, что и обеспечивает некоторое ее весовое снижение по сравнению с отвалом с ВСН.

На создание газового слоя необходимо на 1 м² площади поверхности скольжения затрачивать $6 \div 12$ кВт соответственно для песчаного и глинистого грунтов.

Моделирование копания грунта ковшем скрепера с газовоздушным интенсификатором. Процесс копания ковшем скрепера при газодинамическом воздействии на грунт характеризуется наличием внутри ковша потока сжатого газа с постоянным во времени весовым расходом и обуславливается процессами газовой смазки г'верхностей трения и аэрации грунта. Для процессов, протекающих в ковше, важны эффекты объемной аэрации грунта как фактор снижения его внутреннего трения. Процесс свободной и принудительной разгрузки ковшей скреперов при подаче на внутренние поверхности днища боковых и задней стенок ковша газовой и газовой - эмульсионной смазки дает положительный эффект.

Применительно к условиям наполнения и разгрузки ковшей скреперов исследовался процесс копания грунта скрепером с непрерывной подачей сжатого газа из выпускной щели вверх по режущему ножу внутрь ковша, по нормали к поверхности режущего ножа, по касательной к днищу ковша и снизу вверх вдоль боковых стенок. Наиболее эффективным является вариант подачи газа вверх по режущему ножу внутрь ковша. Отмечено снижение усилия копания при увеличении расхода газа до 50% от усилия копания традиционным ковшем и независимость эффективности действия сжатого газа от толщины стружки.

Условия приближенного физического моделирования копания грунта ковшем скрепера с газовоздушным интенсификатором. Схема взаимодействия ковша с грунтом на завершающих этапах копания при наличии газовой - эмульсионной интенсификации приведена на рис. VI.18. Составление условий приближенного моделирования выполняют при условии установившегося движения пласта в ковше и непрерывной подачи сжатого газа через выходные отверстия. Истечение газа происходит из резервуара достаточно большой емкости

при постоянном давлении p . Под пластом газ образует каверну с поверхностью фильтрации F_{κ} . Над каверной находится столб грунта и действует атмосферное давление. Отделение грунта от массива (резание) осуществляется традиционным методом посредством механического разрушения.

Критерии подобия составляют путем последовательности рассмотрения отдельных подсистем процесса. Для подсистемы «ре-

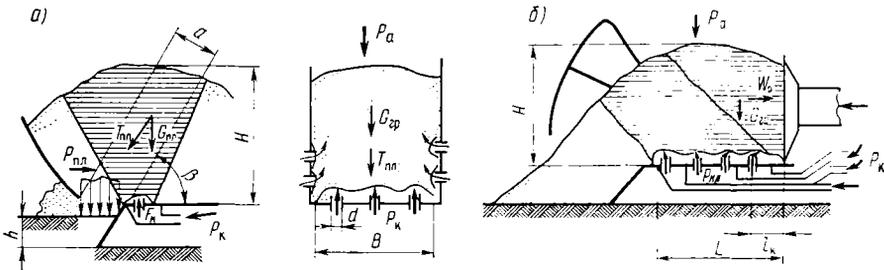


Рис. VI.18. Схема процесса взаимодействия ковша скрепера с грунтом (а) на этапе копания, (б) — на этапе выгрузки

жущий тож — грунт» критерии подобия определяются уравнениями, рассмотренными ранее, и могут быть записаны в следующем виде:

$$c_{\omega} / (\gamma_{\Gamma} l); \delta; \rho; \alpha_{\rho}; h/B; h_{з}/B; p_{пл}/c_{\omega}.$$

Для подсистемы «грунтовой пласт — грунт в ковше» условия моделирования определяются следующими критериями:

$$\frac{c_{\omega в}}{\gamma_{\Gamma в} l}; \frac{p_{\kappa}}{\gamma_{\Gamma в} l}; \delta_{в}; \rho_{в}; \frac{H}{B}; \frac{p_{пл}}{\gamma_{\Gamma} l}.$$

Подсистема, включающая «газовоздушный поток — грунт в ковше», характеризуется критериями, которые следуют из анализа уравнений, определяющих процесс взаимодействия газового потока с грунтом.

Уравнение состояния газа в потоке

$$\frac{p_{в}}{\gamma_{в}} = R_{в} T_{в},$$

где $p_{в}$ — давление воздуха в полости под пластом грунта; $\gamma_{в}$ — удельный вес воздуха; $R_{в}$ — газовая постоянная; $T_{в}$ — абсолютная температура воздуха.

Давление, обеспечивающее появление каверны и активное насыщение газом, прилегающего к входному отверстию объема грунта, определяется соотношением

$$p_{в} \geq \frac{T_{пл}}{C_{y} F_{\kappa \Sigma}},$$

где $T_{пл}$ — сопротивление грунта подъему; C_y — коэффициент силы, обеспечивающий удержание пласта над каверной; $F_{к\sigma}$ — среднее значение площади, находящейся под действием газовой воздушного потока.

Суммарное давление на выходе воздуха из отверстий в днище ковша определяется соотношением

$$p = p_b + p_c,$$

где $p_c = \xi \frac{\rho_b v_b^2}{2}$; ξ — коэффициент сопротивления, учитывающий потери при движении воздуха через поры в грунте; ρ_b — плотность газовой воздушной смеси; v_b — скорость потока.

Скорость истечения газовой воздушной смеси из выходного отверстия при адиабатическом расширении без теплообмена определяют по известным формулам. Для докритического режима истечения

$$v_b = \sqrt{\frac{2gk}{k-1} \frac{p_b}{\gamma_b} \left(1 - \frac{p_k}{p_b}\right)^{\frac{k-1}{k}}}$$

где k — показатель адиабаты (для воздуха $k = 1,41$); p_k , p_b — абсолютное давление воздуха в каверне и в резервуаре.

Для ориентировочных расчетов при $p_k/p_b \geq 0,5$

$$v_b = \sqrt{2g \frac{p_b}{\gamma_b} \left(1 - \frac{p_k}{p_b}\right)}$$

При увеличении давления p_b скорость истечения превышает скорость звука, режим переходит в надкритическую область. Для этого случая

$$v_b = p \sqrt{\frac{g}{2R_b T_b}}$$

Расход воздуха из сопла определяется выражением

$$Q_{отв} = \mu_{отв} \sum F_{отв} v_b,$$

где $\mu_{отв}$ — коэффициент расхода газа через отверстие, зависящий от формы и соотношения размеров величины потерь при истечении; $\sum F_{отв}$ — общая площадь выпускных отверстий.

Расход газа из каверны через поры в грунте при турбулентной адиабатической фильтрации

$$Q_{ф.г} = \mu_{г} n \sum F_k v_b,$$

где $\mu_{г}$ — коэффициент расхода газа через поры в грунте; n — пористость (отношение площади пор в поперечном сечении пласта к площади сечения пласта); определяется типом грунта, размером отдельных частиц, влажностью, степенью уплотнения и др. $\sum F_k$ — общая площадь поверхности каверн в грунте.

При установившемся протекании процесса

$$Q_{\text{отв}} \simeq Q_{\text{ф.г.}}$$

В качестве ограничения следует рассмотреть зависимости, определяющие размеры поверхности каверны и пористость, которые имеют место при $c_{\omega} \geq \rho_{\text{в}} - \rho_{\text{а}}$, т. е.

$$F_{\text{к}} = k \sqrt{\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{а}}} \quad \mu_{\text{г}} n = k C_{\text{уд}}^{-\frac{1}{2}}$$

Общая площадь всех каверн в грунте определяется величиной поверхности одной каверны и количеством выпускных отверстий:

$$\sum F_{\text{к}} = F_{\text{к}} n_{\text{отв}}$$

Для ориентировочных расчетов величина поверхности аэрации

$$\sum F_{\text{к}} = \frac{aB}{\sin \beta} k_{\text{а}}$$

где β — угол наклона пласта грунта к горизонту; $k_{\text{а}}$ — коэффициент, учитывающий возможное увеличение поверхности аэрации относительно площади сечения пласта грунта, поступающего в ковш.

Общая площадь выходных отверстий, определяется для круглых отверстий их диаметром и числом, для прямоугольных — размерами сторон:

$$\sum F_{\text{отв}} = F_{\text{отв}} n_{\text{отв}} \text{ или } \sum F_{\text{отв}} \quad b_{\text{отв}} t_{\text{отв}}$$

Анализ приведенных зависимостей позволяет получить ряд критериев подобия рассматриваемой подсистемы:

$$\frac{\rho_{\text{к}}}{\gamma_{\text{г}} H}; \left(\frac{\rho_{\text{к}}}{\sigma_{\text{г}}} \right); \frac{\rho_{\text{а}}}{\rho_{\text{к}}}; \mu_{\text{отв}}; n \mu_{\text{г}}; \frac{T_{\text{а}}}{T_{\text{к}}};$$

$$k; \frac{\rho}{\gamma_{\text{в}} R_{\text{в}} T_{\text{в}}}; \frac{\sum F_{\text{отв}}}{\sum F_{\text{к}}}; \left(\frac{F_{\text{отв}} n_{\text{отв}}}{Ba} \right)$$

Анализ критериев подобия показывает, что давление сжатого газа в системе должно изменяться пропорционально высоте ковша или давлению пласта грунта σ . В то же время ряд критериев ($\rho_{\text{а}}/\rho_{\text{к}}$) определяет пропорциональность давлений $\rho_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{к}}$ атмосферному давлению $\rho_{\text{а}}$. Следовательно, соблюдение полного подобия процесса возможно либо при пропорциональном изменении атмосферного давления, что связано с вакуумированием, либо при изменении объемной массы грунта $\gamma_{\text{г}}$, что влечет за собой необходимость изменения параметров процесса фильтрации газа через грунт. Это встречает существенные трудности. Целесообразно воспользоваться приемами приближенного моделирования, когда используются грунт и атмосферное давление природы, а ошибка моделирования учитывается поправочными коэффициентами. Из системы исключают критерии

p_a/p_k . Поправку на несоблюдение p_a определяют из выражения

$$p_{к.н} = p_{к.м} \Delta,$$

где $\Delta = 1 + \frac{p_a}{p_m} \left(\frac{1}{k_l} - 1 \right)$; k_l — масштаб моделирования. На основании критерия p_a'/p можно также записать:

$$p_n = p_m \Delta.$$

Последнее требует введения поправки в соотношение $Q_{отв} = Q_k$, учитывающей изменение суммарного проходного сечения выпускных отверстий. В частном случае, когда для модели и природы используются в качестве источников сжатого газа компрессоры низкого давления, можно принять условия моделирования: $T_{к.н} = T_{н.м}$ и $\mu_{отв.н} = \mu_{отв.м}$. При $\gamma_{г.н} = \gamma_{г.м}$ и $C_{уд.н} = C_{уд.м} k_l$ можно предполагать, что пористость грунта изменяется обратно пропорционально корню квадратному масштаба линейных размеров:

$$\mu_{г.н} n_n = \mu_{г.м} n_m k_l^{-0,5}.$$

Формула перехода от модели к природе по весовому расходу сжатого воздуха имеет вид

$$Q_n = Q_m k_l^2.$$

Мощность компрессорной установки приблизительно определяют по формуле

$$N_k = \frac{(p - p_a) Q}{\gamma \eta_k},$$

где η — КПД компрессорной установки.

Переход от модели к природе по мощности компрессора осуществляют по формуле

$$N_{к.н} = N_{к.м} k_l^2 \frac{(p_m \Delta - p_a)}{(p_m - p_a)} \frac{\eta_{к.м}}{\eta_{к.н}}.$$

Температура потока газов природы в ряде конструкций существенно превышает температуру сжатого воздуха модели. Для сохранения условий приближенного моделирования необходимо учитывать поправку на несоблюдение температурного подобия.

Влияние газоздушной смазки на сопротивление копанию грунта ковшом скрепера. Анализ зависимости усилия копания грунта прочностью $C_{уд.м} = 6 \div 7$ от пути копания при суммарном проходном сечении выпускных отверстий, равном $0,114 \text{ см}^2$, для двух значений избыточного давления воздуха в коллекторе $0,14$ и $0,05 \text{ МПа}$, при толщине вырезаемой стружки, равной $2,5 \text{ см}$, позволил установить, что эффект возрастает по мере наполнения ковша и доходит в конце пути копания до $20\text{—}25\%$. При копании рыхлого грунта $C_{уд.м} = 1$ заметного снижения усилия копания не обнаруживают (Ермилов А. Б.).

Установлено, что вертикальная составляющая усилия копания грунта существенно изменяется при подаче сжатого воздуха внутрь ковша за счет уменьшения силы трения стружки грунта о грунт в ковше, направленной снизу вверх. Коэффициент эффективности по горизонтальной составляющей усилия копания возрастает по мере увеличения пути копания до максимума — 10—15% при расходе сжатого воздуха 0,2 м³/мин, затем в конце падает. Коэффициент эффективности по вертикальной составляющей усилия копания возрастает на начальном отрезке пути копания до максимума примерно 5—10% при расходе сжатого воздуха 0,2 м³/мин, затем уменьшается и составляет в конце пути копания 5%. Ожидается, что при увеличении расхода сжатого воздуха будет достигнуто дальнейшее возрастание коэффициента эффективности по вертикальной составляющей.

Моделирование процесса принудительной разгрузки ковша скрепера при газовой интенсификации. Интенсифицировать процесс выгрузки можно путем использования метода газозвушной смазки и аэрации. Исследование этого процесса на модели позволяет выявить механизм протекания процесса и установить оптимальные параметры и режимы работы такого оборудования.

Критерии подобия целесообразно формировать для каждой из подсистем процесса на основании ранее рассмотренных положений в соответствии со схемой, приведенной на рис. VI.18, б. Подсистема «грунт — задняя стенка ковша» характеризуется следующими критериями: $\rho_B/\gamma_{гв}l$; δ_B ; ρ_B ; H/B ; B/L .

Подсистема «грунт — газозвушной поток» определяется критериями: $\gamma_{гв}g^2/\rho_B$; v_f/Q ; ρ_B/ρ_a ; $\Sigma F_{отв}/\Sigma F_K$; $\rho_B Q/N$.

Система уравнений, связывающая масштабы параметров, имеет вид:

$$\begin{aligned}k_{\rho_B} &= k_{\gamma_{гв}} k_l; & k_{\delta_B} &= 1; & k_{\rho_B} &= 1; \\k_H &= k_B = k_Z; & k_{\gamma_{гв}} k_g k_{\delta}^2 &= k_{\rho_B}; \\k_v k_F &= k_Q; & k_{\rho_B} &= k_{\rho_a}; \\k_{\Sigma F_{отв}} &= k_{\Sigma F_K}; & k_{\rho_B} k_Q &= k_N.\end{aligned}$$

При $k_{\rho} \simeq 1$; $k_{\delta} \simeq 1$; $k_{\gamma_{гв}} \simeq 1$; $k_{\gamma_{гв}} \simeq 1$ для формирования модели необходимо соблюдать следующие связи:

$$k_{\rho_B} = k_l; \quad k_{\rho_B} = k_{\rho_a}.$$

Если $k_{\rho_a} \neq k_{\rho_B}$, то при переходе от параметров оригинала к модели и наоборот необходимо вносить соответствующие поправки, вытекающие из нарушения критерия подобия по атмосферному давлению. Соблюдение при формировании модели рассмотренных условий позволяет на основании параметров, зарегистрированных на модели, прогнозировать качественные и количественные характеристики протекания процесса в реальных условиях эксплуатации.

Давление газа в коллекторе

$$p_{в.н} = p_{в.м} k_l \Delta,$$

где Δ — поправочный коэффициент;

$$\Delta \simeq 1 + \frac{p_a}{p_m} \left(\frac{1}{k_l} - 1 \right).$$

Величина $p_{в.}$, обеспечивающая образование и удержание в пласте каверны или полости (системы каверн), определяется на основании неравенства

$$c_{\omega p} > p_k(p_{в.}) > [p]_{\text{треб}},$$

где $c_{\omega p}$ — сцепление между частицами грунта в ковше; $[p]_{\text{треб}}$ — давление, необходимое для образования каверны. Величина $[p]_{\text{треб}}$ определяется экспериментально. Значение $[p]_{\text{треб}}$ лежит в пределах 0,15—0,3 МПа. Для ориентировочных расчетов можно воспользоваться зависимостью

$$[p]_{\text{треб}} \simeq \gamma_r H,$$

где γ_r — объемный вес грунта в ковше; H — высота грунта в ковше (высота ковша).

Расход воздуха

$$Q_{н} = Q_{м} k_{f_{\text{отв}}} \sqrt{\frac{k_l \Delta}{k_{pв} k_{\text{пор}}}},$$

где $k_{\text{пор}}$ — коэффициент, учитывающий изменение пористости при моделировании.

Мощность на привод компрессора

$$N_{в.н} = N_{в.м} k_{f_{\text{отв}}} \sqrt{\frac{k_l^3 \Delta^3}{k_{pв} k_{\text{пор}}}}.$$

Сопротивление выгрузке грунта как усилие, необходимое для реализации движения задней стенки ковша при выгрузке:

$$P_{н} = P_{м} k_l^3; \quad k_l = \sqrt[3]{k_q},$$

где k_q — масштаб объема ковша.

Если при моделировании имеют место условия $k_p \neq 1$; $k_\delta \neq 1$; $k_\gamma \neq 1$, то сопротивление выгрузке

$$P_{н} = P_{м} k_l^3 k_p k_\delta k_\gamma,$$

где k_p , k_δ , k_γ — коэффициенты изменения величин углов внутреннего и внешнего трения и объемного веса в ковше.

Мощность, необходимая для привода механизма выдвижения задней стенки,

$$N_{н} = N_{м} k_l^3$$

Ожидаемый коэффициент эффективности по снижению сопротивления выгрузке

$$k_{эф} \simeq 1 - \frac{f_B}{f},$$

где f_B , f — коэффициенты трения грунта по грунту в условиях газозвудушного насыщения и без него.

Действительную величину коэффициента эффективности определяют по результатам моделирования:

$$k_{эф} \simeq 1 - \frac{W_{выг.в}}{W_{выг}}$$

где $W_{выг.в}$, $W_{выг}$ — зафиксированные в эксперименте величины сопротивления выгрузки при газозвудушном воздействии на грунт и без него.

Исследования механизма принудительной разгрузки ковша в условиях газозвудушной интенсификации [13] позволили установить, что подача сжатого воздуха при разгрузке в коллектор, совмещенный с режущим ножом скрепера, не влияет на усилие разгрузки. Воздух проходит в открытый зев заслонки и не производит аэрации грунта в ковше. При подаче воздуха в средние коллекторы под давлением 0,12 МПа усилие разгрузки снижается по абсолютной величине в среднем на 31,7%. При установке дополнительного воздушного коллектора с координатой, соответствующей критическому перемещению задней стенки l_k (перемещение, при котором возникает максимальное усилие разгрузки без подачи воздуха), усилие разгрузки снижается на 50% при давлении 0,12 МПа и на 90% — при давлении 0,5 МПа (Ермилов А. Б.).

§ VI.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ГРУНТОВ ПОТОКОМ СЖАТОГО ГАЗА

Определение критериев подобия процесса. Важным направлением интенсификации рабочих процессов является применение энергии сжатого газа. Газовую струю можно использовать для частичного или полного разрушения и перемещения грунта. В зависимости от назначения рабочего органа струя газа воздействует отдельными импульсами или непрерывно. Схема землеройной машины с повторно-взрывным устройством такого типа изображена на рис. VI.19. Камера или несколько камер сгорания 2 заряжаются смесью углеводородного топлива и сжатого воздуха. Свеча зажигания 3 воспламеняет смесь. В камере поднимаются давление и температура газа. Резкое открытие выпускных клапанов приводит к выпуску продуктов сгорания в забой. Взрывообразный выход газа через отверстие в нижней части отвальной поверхности 4 разрушает грунт и создает в забое воронку. При поступательном движении базовой

машины *I* периодические импульсы газа производят разрушение и перемещение грунта в стороны.

Энергию сжатого газа используют для разрушения и перемещения грунта. При этом рабочий орган, например отвал, на котором установлено оборудование, выполняет в процессе копания вспомогательную роль. Он служит для размещения на нем специального обо-

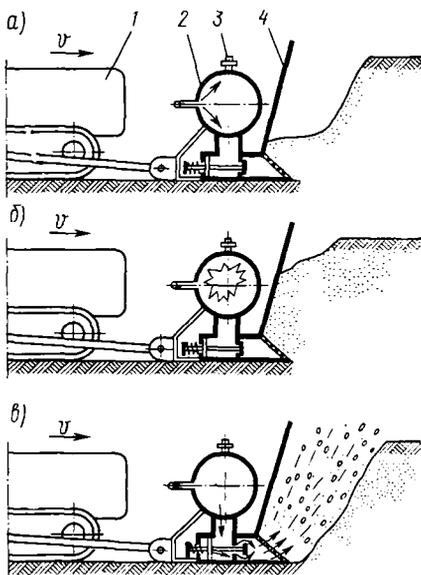


Рис. VI.19. Схема работы землеройной машины с газодинамическим воздействием на грунт:

a — внедрение в грунт, подача топлива в камеру; *б* — завершение внедрения, воспламенение горячей смеси; *в* — разрушение и выброс грунта потоком сжатого газа

рудования, предназначенного для получения сжатого газа и направленного выпуска газа в грунт, а также для уменьшения составляющих суммарного сопротивления грунта копанию, например для снижения сил трения или облегчения проталкивания грунта в ковш при неизменной конструкции рабочего органа, который работает по традиционной схеме копания.

Для изучения процессов и создания машин газодинамического действия необходимы: отработка конструкции устройства, обеспечивающей эффект газодинамического воздействия; исследование процесса взаимодействия сжатого газа с грунтом; определение оптимальных параметров рабочего оборудования и режимов его работы. Методы физического моделирования облегчают эти исследования и делают их более эффективными.

В теории моделирования взрыва, в частности в теории моделирования взрыва в грунте на выброс, широко известны работы Л. И. Седова, Г. И. Покровского [23, 25]. Существуют два способа моделирования взрыва в грунте на выброс. Первый способ основан на законе геометрического подобия, согласно которому действие двух взрывов подобно, если удовлетворяется соотношение $L^3 q = \text{const}$, при $2 < L < 25$ или $L^{3.5} q = \text{const}$ при $L > 25$ (где L — глубина заложения заряда, м; q — масса заряда, кг). При этом необходимыми условиями являются: постоянство свойств продуктов взрыва и неизменность характеристик среды при различных масштабах взрыва. Рассмотренные условия подобия являются приближенными, так как не учитывают силы тяжести грунта. Более точные результаты дает моделирование с применением центробежных установок, на которых подобие явлений процесса образования воронки достигается путем увеличения поля тяготения.

Второй способ моделирования основан на теории приближенного моделирования и допускает изменение свойств продуктов взрыва и прочностных характеристик грунта. Условия моделирования процесса образования воронки этим способом [22] разработаны на основании критериев подобия, выявленных при анализе размерностей параметров, определяющих процесс:

$$R_v/L; E/(\rho g L^4); E/\sigma L^3; E/(p_a L^3); r_0/L; k_a; f,$$

где R_v — радиус воронки; L — глубина заложения заряда; E — энергия взрыва; ρ — плотность среды; g — ускорение свободного падения; σ — предел прочности грунта; p_a — атмосферное давление; r_0 — радиус заряда; k_a — показатель адиабаты; f — коэффициент внутреннего трения грунта по грунту.

При моделировании этим способом воспроизведение процесса образования воронки в лабораторных условиях осуществляется в вакуумной установке путем уменьшения атмосферного давления и прочностных характеристик грунта. Источником энергии, имитирующим взрыв, является сжатый воздух.

Обширные исследования моделирования разрушающего действия взрыва в горных породах [16] выполнены в области рассмотрения возможности применения при моделировании теории упругих волновых движений, метода энергетического подобия и методов эквивалентных материалов. Установлено, что подобие процесса дробления пород при взрыве определяется не только параметрами напряженного состояния, но и рядом требований, накладываемых на процесс статистической теорией разрушения горных пород. Большое влияние на процесс разрушения оказывает длительность действия импульса напряжений. Импульс меньшей длительности при одинаковых напряжениях несет меньшую энергию. Для обеспечения подобия по длительности воздействия и по методам создания импульсов с заданными параметрами рекомендуется ряд уточнений. Установлено, что подобное дробление при взрыве может быть достигнуто двумя путями: 1) выбором моделирующего материала с соответствующими свойствами при заданных параметрах импульса в натуре и модели (подбором прочностных свойств и скорости развития трещин); 2) созданием соответствующего импульса напряжения на модели при заданном импульсе натуре, а также подобии моделирующего материала.

Одним из интересных решений в этом направлении являются машины взрыво-механического действия, работающие на твердых взрывчатых веществах — метательных порохам. Исследования, касающиеся разработки методов моделирования процессов взаимодействия сжатого газа с грунтом применительно к рабочему оборудованию землеройной техники, выполнены Е. И. Чижиком [30]. Отделение грунта от массива является результатом сжатия, сдвига, отрыва грунта и выталкивания его расширяющимся газом. Перед выпускным отверстием располагается массив грунта предельной величины. Грунт поднимается в виде полукупола. Напряжение на внешней границе полукупола равно атмосферному давлению p_a .

Радиальное напряжение на границе полости определяется давлением при истечении газа из сосуда ограниченного объема через отверстие постоянного сечения. Истечение газа через выпускное отверстие происходит адиабатически. Начальные параметры состояния газа в камере взрывного устройства определяются его давлением p_c , объемом V_c и абсолютной температурой T_k .

Система уравнений, описывающая напряженное состояние объема грунта, находящегося перед отвальной поверхностью рабочего органа, может быть составлена по аналогии с системами уравнений теории упругости и пластичности. Элементарный объем грунта находится под действием веса G , силы инерции и поверхностных сил.

Приближенное подобие процесса взаимодействия сжатого газа с грунтом применительно к рабочим органам землеройных машин взрывного действия определяется критериями подобия, приведенными в табл. VI.1.

Условия приближенного физического моделирования и соответствующие зависимости для расчета параметров модели следуют из равенства критериев подобия рассматриваемого процесса. При выбранном масштабе моделирования $k_l = l_n/l_m$ соотношения между масштабами определяющих параметров могут быть установлены в виде следующей системы связей: $k_\sigma = k_{\gamma r} k_i$; $k_t = k_l^{1.2}$; $k_A = k_{\gamma r} k_l^4$; $k_\mu = 1$; $k_{\mu 1} = 1$; $k_{\mu 2} = 1$; $k_a = 1$, где k_l , k_σ , k_t — масштабные коэффициенты, представляющие собой отношение соответствующих параметров оригинала к параметрам модели.

Подобие протекания процессов модели и натуры определяется соблюдением указанных соотношений между масштабами. Соответствующие условия подобия можно обеспечить двумя способами.

При первом способе параметры окружающей среды и давление газа в модели не меняются. Это характеризуется следующими равенствами: $k_{r_a} = 1$; $k_\sigma = 1$; $k_\mu = 1$; $k_{\mu 1} = 1$; $k_{\mu r} = 1$; $k_T = 1$; $k_{p_c} = 1$.

Здесь для соблюдения критериев подобия необходимо изменять соответственно удельный вес газа и грунта, что требует применения метода центрбежного моделирования.

При втором способе параметры окружающей среды и давление газа в модели меняются. Без изменений остается удельный вес газа и грунта. Этот способ обусловлен равенствами единице следующих масштабов: $k_{\gamma r} = 1$; $k_{\gamma r_a} = 1$; $k_\mu = 1$; $k_{\mu 1} = 1$; $k_{\mu r} = 1$.

Подобие процессов модели и натуры обеспечивают следующими соотношениями между масштабами: $k_A = k_l^4$; $k_{p_c} = k_i$; $k_\sigma = k_i$; $k_{r_a} = k_l$; $k_t = k_l^{1.2}$.

Для обеспечения этого условия необходимо, чтобы масштабы прочностных параметров грунта k_σ , давления газа в системе k_{p_c} и атмосферного давления k_{r_a} изменялись пропорционально линейному масштабу системы. Давление газа в системе и прочностные характеристики грунта изменяются сравнительно просто [22]. Изменение значения атмосферного давления p_a сопряжено с вакуумированием. Последнее приводит к необходимости снижения атмосфер-

**Критерии подобия системы «грунт — рабочее оборудование»
процесса взаимодействия сжатого газа со средой**

Процесс	Обозначение критериев и форма записи	Критерий
Разрушение и перемещение грунта	$\frac{c_{\omega}}{\gamma_{\Gamma} l} \quad \frac{\sigma}{\gamma_{\Gamma} l}$	Отношение сил сопротивления разрушению (сдвигу, отрыву) к весу грунта
	$\left(\frac{\sigma}{p_a}\right)^*$	Отношение сил сопротивления разрушению к силам атмосферного давления
	$\frac{gt^2}{l} ; \left(\frac{v^2}{gl}\right)$	Отношение сил инерции к весу грунта
	μ	Отношение сил трения грунта по грунту к действующей силе
	μ_1	Отношение сил трения грунта по стали к действующей силе
	$\frac{A}{\gamma_{\Gamma} l^4} \quad \frac{A}{\sigma l^3}$	Отношение энергий
Истечение газа из камеры сгорания	$\frac{gt^2}{l} \quad \left(\frac{v^2}{gl}\right)$	Отношение сил инерции к весу грунта
	$\left(\frac{p_c}{p_a}\right)$	Отношение давления газа к атмосферному давлению
	$\frac{A}{\gamma_{\Gamma} l^4} ; \left(\frac{RT_K}{l}\right)$	Отношение энергии взрыва к работе действующих сил
	μ_2	Отношение сил внешнего трения газа к действующей силе

* Подобие по критериям, взятым в скобки, осуществляется приближенно.

ного давления над обнаженной поверхностью грунта. Это усложняет установку для моделирования.

Рассмотренные способы моделирования находят применение при исследовании крупных взрывов на выбор [17, 22]. Наиболее простым является второй способ. Однако сложности, связанные с вакуумированием, не позволяют применить его достаточно эффективно для изучения процесса разработки грунта землеройным оборудованием взрывного действия. Это объясняется тем, что землеройное оборудование в процессе эксперимента должно совершать поступательное движение.

На рассматриваемый процесс определяющее влияние оказывают критерии $c_w/(\gamma_r l)$, $v^2/(gl)$, $p/(\gamma_r l)$, $A/(\gamma_r l^4)$. Критерий σ/p_a может быть исключен из рассмотрения, что позволяет избежать изменения атмосферного давления и упрощает эксперимент при физическом моделировании.

Моделирование при несоблюдении критерия подобия по атмосферному давлению. Если плотность газа, грунта и атмосферное давление при физическом моделировании остаются неизменными, то характер изменения давления газа согласно критерию $A/\gamma_r l^4$ не выражается пропорциональной зависимостью от масштаба моделирования. Давление газа в системе модели в этом случае можно определить из равенства $[A/(\gamma_r l^4)]_M = [A/(\gamma_r l^4)]_H$ путем подстановки в него значения A , выраженного через основные термодинамические соотношения:

$$\frac{p_{c.H} V_H}{k_H - 1} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_{c.H}} \right)^{\frac{k_H - 1}{k_H}} \right] \gamma_H^{-1} l_H^{-4} = \frac{p_{c.M} V_M}{k_M - 1} \times \\ \times \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_{c.M}} \right)^{\frac{k_M - 1}{k_M}} \right] \gamma_M^{-1} l_M^{-4}$$

Далее при условии геометрического подобия системы $V_M = V_H k_l^{-3}$, принимая, что $\gamma_H = \gamma_M$; $p_a = 0,1$ МПа, полученное выражение используют для определения поправки на несоблюдения подобия по критерию p_a/p в выражении $p_H = p_M k_l \Delta$, где Δ — поправочный коэффициент.

Для приближенных расчетов Δ находят из соотношения

$$\frac{p_H}{p_M} = \frac{p_{H.M} k_l + p_a}{p_{H.M} + p_a},$$

где $p_{H.M}$ — избыточное давление для модели. Откуда величину Δ определяют по формуле

$$\Delta = 1 + \frac{p_a}{p_M} \left(\frac{1}{k_l} - 1 \right)$$

Давление в моделирующей системе

$$p_M = p_H / (k_l \Delta).$$

Следовательно, давление газа в модели с учетом несоблюдения критерия, включающего атмосферное давление, должно быть не только уменьшено пропорционально масштабу моделирования k_l , но и повышено на некоторую величину, так как при $k_l > 1$ коэффициент $\Delta < 1$.

При переходе от параметров модели к параметрам оригинала используют формулу

$$p_n = p_m k_l \Delta.$$

Отсюда давление газа в оригинале должно быть увеличено по сравнению с давлением газа в модели пропорционально масштабу моделирования и уменьшено на некоторую величину, которая зависит от масштаба моделирования и давления газа в модели.

Моделирование при несоблюдении геометрического подобия выпускного отверстия. Для соблюдения критерия gt^2/l при физическом моделировании необходимо выполнение равенства

$$\left(\frac{gt^2}{l}\right)_m = \left(\frac{gt^2}{l}\right)_n \quad \text{или} \quad \left(\frac{v^2}{gl}\right)_m = \left(\frac{v^2}{gl}\right)_n$$

При $g = \text{const}$ $t_m = t_n k_l^{-1/2}$; $v_m = v_n k_l^{-1/2}$.

Уравнение секундного массового расхода газа при истечении его из замкнутого сосуда через отверстие постоянного сечения имеет вид

$$G = f \mu_o \sqrt{\frac{2gk}{k-1} p_c \gamma r_s \left[\left(\frac{p_o}{p_c}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_o}{p_c}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

где μ_o — коэффициент расхода отверстия.

Следовательно, время истечения газа при прочих равных условиях зависит от противодавления окружающей среды p_a . Для обеспечения условий, определяемых критерием $v^2/(gl)$, необходимо в модели уменьшить в k_l раз противодавление p_o , включая и атмосферное давление. В случае, если при моделировании атмосферное давление остается неизменным, указанное условие может быть выполнено соответствующим изменением площади сечения выпускного отверстия f_m модели. Значение f_m в этом случае определяется критерием gt^2/l путем подстановки в него значений t_m и t_n , которые определяются из уравнения расхода. Тогда площадь выпускного отверстия модели

$$f_m = f_n k_l^{-2} \lambda,$$

где λ — коэффициент, определяемый из уравнения для расхода газа при истечении через отверстие G .

Условия приближенного моделирования продуктов сгорания. Из анализа полученных зависимостей следует, что если коэффициент λ стремится к единице, то изменение площади сечения выпускного отверстия при физическом моделировании подчиняется закону геометрического подобия. Это можно наблюдать при $\mu_{2n} = \mu_{2m}$ и неизменных свойствах газа: $R_m =$

$= R_H; k_M = k_H$, если температура газа в модели уменьшается пропорционально масштабу моделирования. При физическом моделировании процесса разработки грунтов оборудованием со взрывными устройствами могут быть два случая.

Первый случай характеризуется неизменными свойствами и температурой газа в модели и оригинале ($T = 2300 \div 2500$ К; $R_M \simeq \simeq R_H; k_M = k_H$). Во втором случае в системе модели используется газ, свойства которого близки к свойствам газа оригинала, а температура равна температуре окружающей среды ($T = 290 \div 300$ К; $R_M = R_H; k_M = k_H$).

Подобие процесса при физическом моделировании в каждом случае определяется степенью приближения к геометрическому подобию исследуемых систем. В первом случае геометрическое подобие нарушается с увеличением масштаба моделирования и выбор масштаба определяется ошибкой физического моделирования. При $k_l \geq 5$ ошибка превышает 20%. Во втором случае геометрическое подобие сохраняется при масштабе моделирования порядка $k_l = 8$ ($k_l = k_{TК} = \frac{2300 \div 2500}{280 \div 300} = 8 \div 8,5$), так как выполняется условие по изменению температуры газа. Геометрическое подобие в данном случае будет нарушено лишь при отклонении от ошибки не более 10 ÷ 15%.

Ограничения линейных размеров модели по предельному объему грунта перед моделью. Предельно допустимый объем грунта определяют исходя из того, что при числе компонентов, составляющих грунт, $n \geq \geq 400$ в указанном объеме содержится характерное для данного грунта количество компонентов, определяющих структуру. Исследования показали, что линейные размеры моделей рабочего оборудования землеройных машин взрывного действия можно установить по размерам воронки, образующейся после взрыва перед отвальной поверхностью рабочего органа.

Масштабный коэффициент $k_l = l_H/l_M$ рекомендуют устанавливать на основании следующей зависимости:

$$k_l \leq \frac{B_H}{40d} \sqrt{\frac{h}{d}}$$

Ограничения линейных размеров модели по режиму истечения газа. Линейные размеры модели для соблюдения режима истечения газа определяют на основании анализа характера истечения газа из замкнутого сосуда через отверстия постоянного сечения. Режим истечения определяют отношением p_0/p_c (где p_0 — давление окружающей среды; p_c — давление газа в сосуде) и критическим отношением давлений $\varphi_{кр}$, при котором скорость истечения газа равна скорости звука (для двухатомных газов показатель адиабаты $k = 1,4$ и $\varphi_{кр} = 0,53$, для многоатомных — $k = 1,29$ и $\varphi_{кр} = 0,55$).

При нарушении условий необходимо вводить поправочные коэффициенты или углублять анализ исследуемого механизма.

Ограничения линейных размеров модели по ошибке измерительной аппаратуры. Ограничения линейных размеров по предельно допустимой ошибке измерения с учетом точности измерительной аппаратуры определяют по формуле, рассмотренной ранее. В ряде случаев значения k_l определяются возможностью практической реализации конструктивных параметров взрывного устройства — выпускных клапанов и регулирующей арматуры.

Формулы приближенного физического моделирования процессов взаимодействия сжатого газа с грунтом приведены в табл. VI.2.

Таблица VI.2

Формулы для определения параметров модели и перехода от параметров модели к оригиналу моделирования процесса взаимодействия сжатого газа с грунтом

Параметры	Расчетная формула	
	для определения параметров модели	для определения параметров оригинала
Глубина копания	$h_M = h_H k_l^{-1}$	$h_H = h_M k_l$
Ширина копания	$B_M = B_H k_l^{-1}$	$B_H = B_M k_l$
Линейные размеры	$l_{iM} = l_{iH} k_l^{-1}$	$l_{iH} = l_{iM} k_l$
Угловые размеры	$\alpha_{iM} = \alpha_{iH}$	$\alpha_{iH} = \alpha_{iM}$
Объем камеры взрывного устройства	$V_{с.м} = V_{с.н} k_l^{-3}$	$V_{с.н} = V_{с.м} k_l^3$
Давление газа	$p_{с.м} = p_{с.н} k_l^{-1} / \Delta$	$p_{с.н} = p_{с.м} k_l \Delta$
Площадь сечения выпускного отверстия	$f_M = f_H k_l^{-2}$	$f_H = f_M k_l^2 \lambda^{-1}$
Коэффициенты трения	$\mu_{iM} = \mu_{iH}$	$\mu_{iH} = \mu_{iM}$
Показатель адиабаты	$k_M = k_H$	$k_H = k_M$
Газовая постоянная	$R_M \approx R_H$	$R_H \approx R_M$
Скорость процесса	$v_M = v_H k_l^{-\frac{1}{2}}$	$v_H = v_M k_l^{\frac{1}{2}}$
Масса оборудования	—	$m_H = m_M k_l^3$
Тяговое усилие	—	$P_H = P_M k_l^3$
Мощность	—	$N_H = N_M k_l^{3,5}$
Параметр времени	$t_M = t_H k_l^{-\frac{1}{2}}$	$t_H = t_M k_l^{\frac{1}{2}}$
Динамическая нагрузка	—	$P_{д.н(н)} = P_{д.н(м)} k_l^3$
Объем грунта	—	$V_{г.н} = V_{г.м} k_l^3$
Предел прочности грунта	$\sigma_M = \sigma_H k_l^{-1}$	$\sigma_H = \sigma_M k_l$
Число ударов	$C_{уд.м} = C_{уд.н} k_l^{-1}$	$C_{уд.н} = C_{уд.м} k_l$

Оборудование для моделирования процессов взаимодействия сжатого газа с грунтом. Выбор такого рабочего тела, как сжатый воздух, используемого в модели взрывного устройства, обоснован анализом свойств продуктов сгорания бензино-воздушной смеси, являющихся рабочим телом во взрывном устройстве оригинала. За объект исследования принимается наиболее распространенный на территории

СССР тип грунта — средний суглинок (см. табл. II.6). Основные физико-механические свойства моделирующего грунта приведены в табл. IV.5.

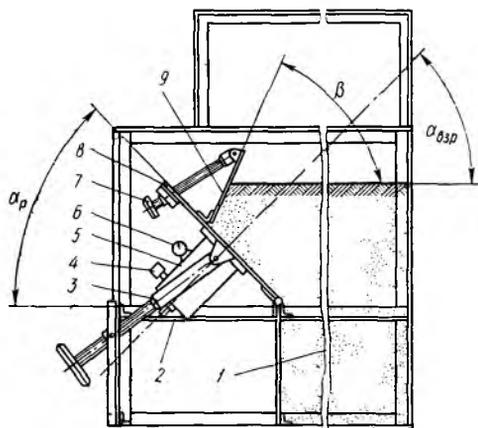


Рис. VI.20. Стенд для исследования процесса разрушения грунта потоком сжатого газа

Схема стенда для проведения лабораторных исследований приведена на рис. VI.20. Стенд состоит из металлического контейнера с грунтом 1 размером 1500 × 1000 × 1000 мм, каркаса ограждения 2, имитатора взрывного устройства 5 с манометром 6, датчиком давления 4 и обратным клапаном, установочной плиты 8, поворачивающейся пластины 9, механизма 3 изменения наклона установочной плиты

и механизма 7 изменения наклона поворачивающейся пластины. Угол установки пластины относительно установочной плиты может изменяться. Имитатор взрывного устройства 5 представляет собой цилиндр, закрытый при помощи болтов крышкой, в которую вставляют сменную шайбу с выпускным отверстием нужного диаметра. Между крышкой и торцовой плоскостью цилиндра положены уплотнительное кольцо и целлофановая пленка, с которой по окружности соприкасается нихромовая проволочка. Один конец проволочки соединен с цилиндром, а другой — через дополнительное отверстие в крышке выведен за пределы контейнера и включен в электрическую цепь.

Изучение методом скоростной киносъемки процесса разрушения грунта потоком сжатого газа. Для составления расчетной схемы взаимодействия струи сжатого газа с грунтом проведена скоростная киносъемка процесса. Рассмотрен характер движения свободной поверхности грунта перед отвальной поверхностью рабочего органа от момента выхода газа из выпускного отверстия до начала разлета грунта в виде отдельных кусков. Установлен характер разрушения грунта и механизма образования воронки перед отвальной поверхностью [30].

Соответствующие опыты проводили на модели грунта (супесь, $\gamma_n = 1,74 \text{ т/м}^3$, $C_n 4 \div 5$, $\omega_n = 13\%$) при постоянных параметрах

модели взрывного устройства ($V_{с.м} = 1000 \text{ см}^3$, $p_{с.м} = 0,7 \text{ МПа}$). Угол выхода струи газа к горизонту изменялся от 0 до 30° . Угол наклона отвальной поверхности к горизонту составлял 90 и 60° . Глубина копания изменялась от 5 до 20 см . Киносъемка производилась камерой СКС-1М16 с частотой 1400 кадров в секунду.

Анализ фильма, кинограмм, а также изучение увеличенных фотографий отдельных моментов процесса позволили установить характер протекания процесса. Установлено, что при взрыве свободная поверхность массива перед отвалом поднимается в виде купола (рис. VI.21, а). В дальнейшем купол увеличивается, вершина его располагается на отвальной поверхности рабочего органа. При увеличении объема и высоты купола на его поверхности появляются трещины. Процесс завершается разрывом поверхности купола и разлетом кусков грунта под воздействием накопленной энергии.

Характер формирования купола и его разрыв зависят от глубины копания, направления действия струи газа, а также от угла наклона отвальной поверхности к горизонту. При малых глубинах копания,

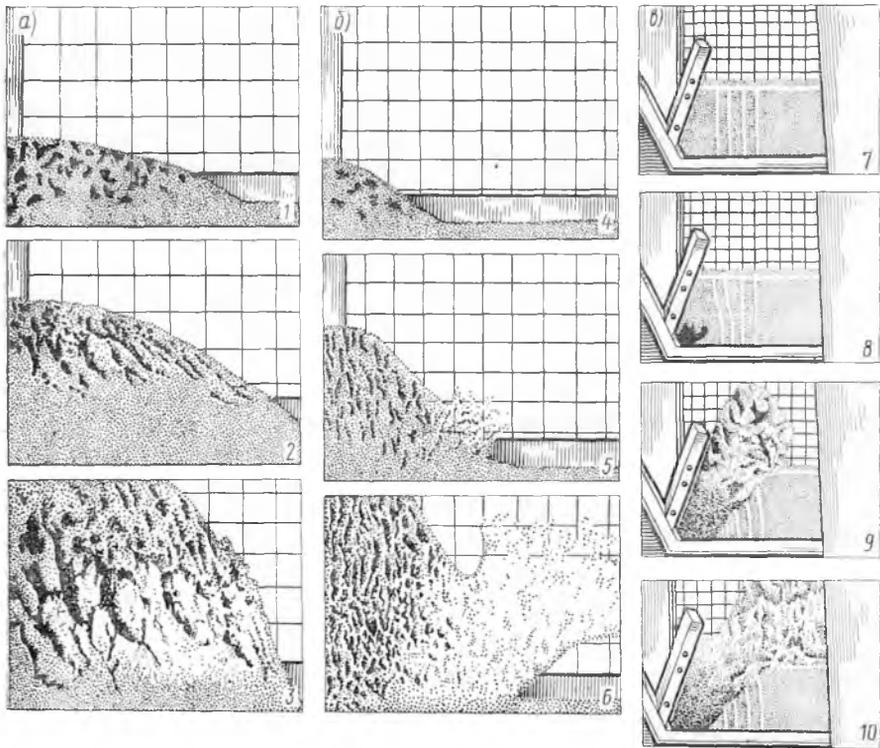


Рис. VI.21. Кинограммы развития процесса разрушения грунта потоком сжатого газа:

а — $\alpha_{взр} = 0^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $h = 20 \text{ см}$; 1 — $0,013 \text{ с}$; 2 — $0,032 \text{ с}$; 3 — $0,067 \text{ с}$; б — $\alpha_{взр} = 30^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $h_M = 10 \text{ см}$; 4 — $0,003 \text{ с}$; 5 — $0,01 \text{ с}$; 6 — $0,016 \text{ с}$; в — $\alpha_{взр} = 20^\circ$, $\beta = 75^\circ$, $h_M = 15 \text{ см}$; 7 — 0 с ; 8 — $0,007 \text{ с}$; 9 — $0,14 \text{ с}$; 10 — $0,027 \text{ с}$

которые для исследуемых условий составляли $h_M = 5 \div 10$ см, купол имеет сравнительно небольшие размеры, и разрыв его сопровождается интенсивным измельчением грунта. При большой глубине копания ($h_M = 25$ см) энергия газа недостаточна для подъема массы грунта на высоту, необходимую для образования воронки и последующего отброса грунта в сторону. Движение грунта в этом случае заканчивается формированием купола с трещинами на его поверхности, в конце цикла поднятый грунт вновь оседает в воронку.

При $\alpha_{взр} = 0^\circ$ и $\beta = 60^\circ$ размеры воронки значительно меньше, чем при $\alpha_{взр} = 0^\circ$ и $\beta = 90^\circ$. При $\beta = 60^\circ$ купол начинает разрушаться непосредственно у отвальной поверхности. Основная масса грунта при этом обрушивается спереди от поверхности отвала. При $\alpha_{взр} = 90^\circ$ разрушение купола происходит в стороне от отвальной поверхности и сопровождается разлетом грунта во все стороны от отвала. При взрыве на глубине $h_M = 10$ см с $\alpha_{взр} = 30^\circ$ и $\beta = 90^\circ$ процесс начинается аналогично. Разрыв купола происходит в его нижней части со стороны, противоположной отвальной поверхности. При дальнейшем увеличении купола газ увлекает в движение грунт в направлении первоначального разрыва (рис. VI.21, б). Кинограмма развития процесса и образования воронки перед отвальной поверхностью рабочего органа, полученная посредством скоростной киносъемки через прозрачную стенку, показана на рис. VI.21, в. В начальный момент выхода газа из камеры взрывного устройства перед выпускным отверстием образуется небольшая полость (каверна), обусловленная частичным уплотнением грунта. При этом подъема свободной поверхности грунта в виде купола не наблюдается. Дальнейшее развитие процесса сопровождается увеличением полости в направлении действия струи газа и вверх.

Полученный экспериментальный материал и анализ результатов скоростной киносъемки позволяют условно разделить процесс взаимодействия потока газа с грунтом на три характерные для данного способа разрушения стадии:

1. Период от момента выхода газа из выпускного отверстия до начала подъема свободной поверхности грунта характеризуется расходом энергии на уплотнение грунта и образованием перед выпускным отверстием полости. На этом этапе ($t \leq 0,007$ с) интенсивного движения свободной поверхности грунта не наблюдается.

2. Период от начала подъема свободной поверхности до полного разрушения полукупола ($t \approx 0,08$ с). Энергия сжатого газа расходуется на преодоление сил сцепления и трения как внутри выбрасываемого объема грунта, так и на границе с окружающим массивом и отвальной поверхностью рабочего органа. Увеличение полости в направлении действия струи газа в начальный момент взрыва происходит быстрее, чем увеличение полости в направлении к свободной поверхности. По указанной схеме процесс происходит до тех пор, пока струя газа имеет достаточный запас энергии для разрушения грунта в заданном направлении. Процесс сопровождается образованием характерного купола из поднимающегося грунта, который в конце стадии начинает разрушаться.

3. Заключительная стадия продолжается десятые доли секунды (от $t \approx 0,2$ до $t \approx 0,5$ с). При этом наблюдается инерционный разлет кусков грунта в поле силы тяжести. Дальность разлета определяется запасенной в кусках грунта кинетической энергией, силой сопротивления воздуха и углом направления вылета к горизонту.

При формировании критериев подобия процесса образования воронки перед отвальной поверхностью рабочего органа можно исключить из рассмотрения первую и третью стадии и принять за основу анализ протекания процесса на второй стадии. Расчетная схема с учетом энергетического баланса разрушения и перемещения грунта должна включать вторую стадию протекания процесса. В этом случае для составления энергетического баланса процесса разработки грунта необходимо учитывать следующие составляющие: энергию, расходуемую на уплотнение грунта; энергию, затрачиваемую на преодоление сил сцепления и сил трения грунта; энергию, затрачиваемую на подъем грунта и на преодоление сил инерции.

Закономерности, характеризующие процессы отбрасывания и транспортировки грунта в заданном направлении, могут быть установлены при изучении третьей стадии процесса.

Исследование влияния определяющих параметров оборудования на процесс выброса грунта. При определении влияния рабочих органов землеройных машин со взрывными устройствами, работающими на жидком топливе, на процесс выброса грунта объектом исследований были устройство с камерой объемом $V = 8000 \text{ см}^3$, которое рассматривалось в качестве оригинала, и две модели, выполненные геометрически подобными в 1,2 и 1/4 натуральной величины.

Формирование модели осуществляли по критериям $c_{\omega}/(\gamma_{\Gamma} l)$, $v^2/(gl)$, $A/(\gamma_{\Gamma} l^4)$ в соответствии с зависимостями, приведенными в табл. VI.2. Анализировались объем воронки V , форма воронки, определяемая отношением D/R , и время истечения газа t из камеры взрывного устройства.

На рис. VI.22 приведены зависимости объема воронки от глубины копания $V = f(h)$, полученные при различных конструктивных и

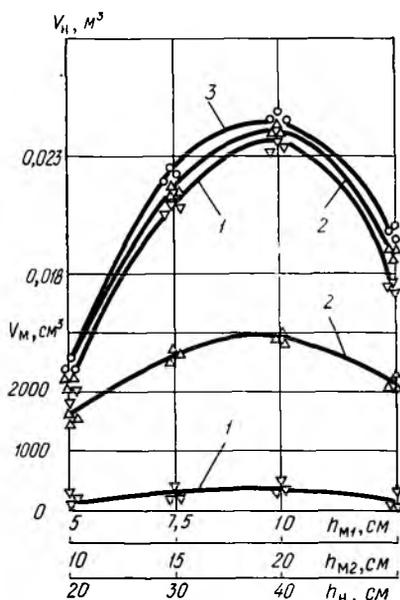


Рис. VI.22. Сопоставление результатов моделирования с оригиналом процесса газодинамического воздействия на грунт при разрушении супесчаного грунта:

$C_{уд.н} = 5$, $\omega = 13\%$, $\alpha_{взр} = 15^\circ$,
 $\beta = 67^\circ$, $\varphi_{в} = 90^\circ$; 1 — модель, $k_l = 4$;
 2 — $k_l = 2$; 3 — оригинал, $k_l = 1$;
 $V_{н} = 8000 \text{ см}^3$, $p_{н} = 0,2 \text{ МПа}$,
 $f_{н} = 8 \text{ см}^2$

энергетических параметрах взрывного устройства и грунтовых условиях. Эксперименты показали хорошую сходимость результатов, полученных на физических моделях, с результатами испытаний оригинала: относительная ошибка не превышает $\pm 15\%$.

Исследование влияния на разрушение грунта струей сжатого газа комплекса определяющих параметров — давления газа, направления действия струи, глубины копания, наклона отвальной поверхности, прочности и влажности грунта и ряда других — проводили на модели взрывного устройства с объемом камеры $V_{с.м} = 1000 \text{ см}^3$, выполненной в $1/5$ натуральной величины, с параметрами $V_{с.н} = 0,125 \text{ м}^3$, $f_n = 50 \text{ см}^2$. В качестве среды использовалась модель «грунт — супесь» с параметрами: $\gamma_r = 1,74 \text{ т/м}^3$, $C_{уд.н} = 4 \div 5$, $\omega_n = 13\%$. Давление сжатого воздуха в модели $p_{с.м} = 0,7 \text{ МПа}$, что соответствует давлению продуктов сгорания в оригинале, т. е. $p_{с.н} = 2,2 \text{ МПа}$. Исходные параметры модели (грунтовые условия, давление газа и др.) обуславливались соблюдением критериев подобия, определяющих процесс, трудоемкостью экспериментов и удобством их проведения.

За анализируемый параметр процесса, которым оценивался получаемый эффект, принят объем воронки, поскольку при прочих равных условиях эффективность работы взрывного устройства определяется именно этим параметром.

Параметрами, определяющими протекание процесса взаимодействия сжатого газа с грунтом применительно к рабочим органам землеройных машин взрывного действия, являются угол между направлением хода струи газа и горизонтом, глубина копания, угол наклона отвальной поверхности к горизонту, давление газа, прочностные характеристики грунта, площадь сечения выпускного отверстия, расстояние между выпускными отверстиями.

По результатам последований угол между направлением выхода струи газа и горизонтом $\alpha_{взр} = 0 \div 15^\circ$; угол наклона отвальной поверхности к горизонту $\beta = 60 \div 75^\circ$, расстояние между выпускными отверстиями $b = 60 \div 75 \text{ см}$ (для взрывного устройства с $V_{с.н} = 0,125 \text{ м}^3$, $f_n = 50 \text{ см}^2$). Энергоемкость процесса зависит от глубины резания и давления; она увеличивается с уменьшением глубины. С ростом прочности грунта объем воронки уменьшается. Объем воронки зависит также от площади сечения выпускного отверстия камеры, увеличиваясь с ростом последнего. Расстояние между выпускными отверстиями $b = 0,5 D$.

Разрушение грунта потоком сжатого газа определяется условием

$$p_{\text{газ}} \geq kp_r,$$

где $p_{\text{газ}}$ — давление газа в подрешетчатой полости; p_r — давление грунта на поверхности рабочего оборудования.

Давление на рабочее оборудование и отдача определяются силами сопротивления грунта при разрушении.

Энергоемкость процесса газодинамической разработки грунта при $\Pi = 3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и мощности базовой машины в пределах 76 кВт достигает $0,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ и колеблется в зависимости от типа грунта

в пределах от 0,3 до 1,2 кВт·ч/м³, а себестоимость разработки грунта составляет 0,03 руб/м³. Резко снижается и материалоемкость. Для газодинамических систем, работающих на порохах, себестоимость разработки грунта определяется главным образом стоимостью пороха. При стоимости его 1,8 руб/кг себестоимость разработки грунта составляет 1,6 руб/м³. Использование дешевых взрывчатых веществ позволяет снизить ее до 0,02 руб/м³.

Системы и оборудование газодинамического действия являются перспективными при реализации энергонасыщения машин и разработки грунтов за счет энергии, подводимой непосредственно к рабочему оборудованию, минуя движитель.

Исследование рыхления мерзлых грунтов однозубым рыхлителем с газодинамическим интенсификатором. Исследования указывают на необходимость изучения вопросов перспективности использования для интенсификации процессов разработки мерзлых грунтов рабочих органов на основе комбинирования механического разрушения с воздействием на грунт потока сжатого газа или воздуха. Активизация процесса в этом случае достигается путем подвода дополнительной энергии сжатого газа непосредственно в зону механического разрушения, минуя движитель.

Для угла заострения клина в плане, равном 7—8°, зарегистрирована наименьшая удельная энергоемкость процесса. Наличие некоторого заострения в плане обеспечивает плотное прилегание поверхности инструмента к среде и повышает эффективность оборудования такого типа. Удельная энергоемкость рыхления одностойковым рыхлителем с газодинамическим интенсификатором составляет величину 0,15—0,16 кВт·ч м³, что соответствует удельной энергоемкости традиционного рыхлителя статического действия.

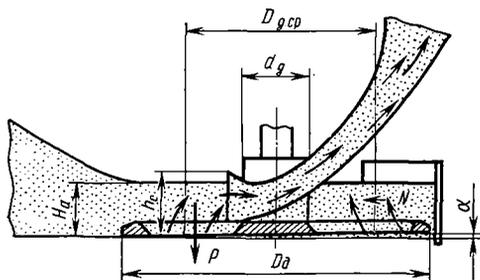
Газодинамическая интенсификация более эффективна на пластично-мерзлых грунтах. С увеличением хрупкости грунта в зависимости от параметров и условий средняя площадь поперечного сечения борозды разрушения несколько уменьшается. По сравнению с традиционным рыхлителем средняя площадь поперечного сечения борозды рыхления, а следовательно, и производительность процесса увеличиваются в 3—4 раза.

§ VI.4. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ПНЕВМОРАЗГРУЗЧИКОВ С ДИСКОВЫМ ЗАБОРНЫМ УСТРОЙСТВОМ

Важным этапом создания пневмоустановок высокой производительности является разработка соответствующих заборных органов. Перфорированные диски питателя осуществляют забор сыпучего материала из насыпи и подачу его в зону всасывания сопла, одновременно придавая материалу некоторую начальную скорость и частично насыщая его воздухом. Явления, протекающие при этом, характеризуются совместным действием сил тяжести, сцепления, внутреннего и внешнего трения, инерции (рис. VI.23). Аналитическое определение высоты слоя цемента, перемещаемого дисками, и производительности питателя базируется на ряде допущений, что не поз-

воляет получить точного результата. Предполагается, что сыпучий материал является несжимаемым, не учитываются влияние разрежения в зоне заборной кромки сопла и неравномерная загрузка дисков при маневрировании заборного устройства.

Исследование дисковых питателей возможно методами приближенного физического моделирования. При моделировании процессов, связанных с перемещением насыпных грузов, необходимо соблюдать ряд критериев подобия, характерных и для подсистемы «сыпучая среда — дисковый питатель»:



$$\frac{v_{ц.д}}{gl_i}; \zeta; \frac{\omega_{д.д}^2 D_{д.д}}{2g}; \omega_{д.д} t; f_{д.д};$$

$$\frac{l_i}{D_{д.д}}; \frac{N_{д.д}}{v_{ц.д.д}^2 G_{д.д} \rho_{м.д.д}};$$

$$\frac{\rho_{м.д.д} v_{ц.д.д}}{E},$$

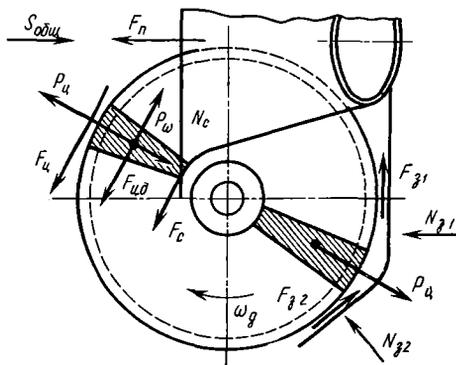


Рис. VI.23. Расчетная схема дискового питателя заборного устройства

где l_i — определяемый линейный размер; $N_{д.д}$ — мощность дискового питателя; ζ — текущий угол поворота диска; t — время; g — ускорение свободного падения; $v_{ц.д.д}$ — средняя скорость подачи перемещаемого материала диском; E — модуль деформации; $\rho_{м.д.д}$ — плотность материала, находящегося на диске; $f_{д.д}$ — коэффициент трения материала о диск.

Определяющими критериями процесса являются: $П_{Fr} = v_{ц.д.д}^2 / (gl_i)$ — критерий Фруда; $П_{Co} = \rho_{м.д.д} v_{ц.д.д}^2 / E$ — критерий Коши.

Формирование физической модели при соблюдении указанных критериев подобия требует изменения свойств среды. Это сопряжено с трудностями и приводит к нарушению физической картины процесса. Метод моделирования, при котором не требуется изменять прочностные свойства среды и учитываются все основные силы, определяющие процесс, здесь является предпочтительным. Нарушение критериев подобия компенсируется коэффициентом.

При выбранном методе моделирования необходимо выдержать условия кинематического и материального подобия, т. е.

$$\frac{t_{н.д}}{t_{м.д}} = k_t; \quad \frac{v_{н.д}}{v_{м.д}} = k_v; \quad \frac{\omega_{н.д}}{\omega_{м.д}} = k_\omega; \quad \frac{t_{н.д}}{l_{м.д}} = k_l; \quad \frac{m_{н.д}}{m_{м.д}} = k_m,$$

где v — скорость; ω — ускорение; l — определяющий линейный размер; m — масса; k_l , k_v , k_ω , k_l , k_m — соответствующие масштабные коэффициенты.

$$k_t = \frac{k_l}{k_v}; \quad \frac{k_l}{k_t} = k_v; \quad k_\omega = \frac{k_v^2}{k_l} = \frac{k_l}{k_t^2}; \quad k_m = k_l^3.$$

Соотношение между параметрами процесса, имеющими размерность силы для оригинала и модели, имеет вид

$$P_n = P_m k_l^n,$$

где n — показатель, учитывающий несоблюдение подобия в случае, когда подобные процессы протекают в геометрически подобных системах при неизменяющихся прочностных свойствах среды; определяется на основании экспериментов с моделями разных масштабов.

Общее сопротивление перемещению материала диском питателя можно условно представить так:

$$S_0 = S_1 + S_2,$$

где S_1 — сопротивление, обусловленное действием объемных сил (сила давления массы среды на диск, сила давления заборного устройства на опору диска); S_2 — сопротивление, обусловленное действием поверхностных сил (силы сцепления, сдвига, давление воздуха и т. д.).

Составляющие $S_{1м}$ и $S_{2м}$ определяют на базе экспериментов с двумя моделями разного масштаба. И далее по методике, рассмотренной выше, определяют показатель степени n . Исследованы две модели заборного устройства с диаметрами дисков питателя 0,496 и 0,195 м. Питатель с дисками диаметром 0,682 м был принят в качестве оригинала.

В качестве одной модели ($k_l = 1,37$) использовано заборное устройство пневморазгрузчика цемента всасывающе-нагнетательного действия ТА-26, в котором были выполнены незначительные изменения, обеспечивающие полное его соответствие принятому масштабному коэффициенту. Вторая модель изготовлена в масштабе $k_l = 3,5$.

Исследования модели заборного устройства в масштабе $k_l = 3,5$ проводились на стенде физического моделирования, содержащем всасывающий трубопровод, осадительную камеру пневмоустановки, вакуум-насос и мерный лоток, установленный на платформенных циферблатных весах (Морозов А. Д. и др.). Перемещение модели заборного устройства с заданной скоростью вдоль лотка осуществляется приводным тяговым устройством.

Целевой функцией является производительность дискового питателя при варьировании частоты вращения дисков, высоты слоя перемещаемого цемента и коэффициента перфорации дисков.

Пересчет основных параметров с модели на натурный образец осуществляют по формулам: для скорости $v = k_v D^{\frac{n}{2} - 1}$ для ус-

кореня $\omega = k_{\omega} D^{n-3}$; для силы $P = k_p D^n$; для мощности $N = k_N D^{\frac{3n}{2}-1}$; для производительности $G = k_G D^n \rho_{м.д} \omega_d$, где k_{ω} ; k_p ; k_N ; k_G ; n — экспериментальные коэффициенты, значения которых в зависимости от производительности пневморазгрузчика приведены ниже:

Производительность пневморазгрузчика, т/ч	10÷20	30÷50	60÷90
k_{ω}	1,04	1,15	1,25
k_p	2,18	2,2	2,4
k_N	3170	3050	2060
k_G	12,6	13,2	14,0
n	3,6	4,1	5,7
	2,74	2,74	2,8

Указанные коэффициенты дают хорошую сходимость в интервале производительностей 10 ÷ 90 т/ч при транспортировании портландцемента, поступающего навалом в железнодорожных вагонах. При сравнении с результатами испытаний натуральных образцов заборных устройств пневморазгрузчиков цемента установлено, что отклонение расчетных значений, полученных с применением формул перехода, от действительных составляет: для мощности — до 6%, для сил — до 7%, для производительности — 12—18%.

§ VI.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАЛОЖЕНИИ НА РАБОЧЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Применение колебаний высокой частоты является одним из направлений технического прогресса в различных отраслях промышленности. Современный этап развития для генерирования колебаний техники высокой частоты характеризуется совершенствованием ранее разработанных способов и расширением числа областей применения такой техники. Внедрение ультразвука с частотой 18—44 кГц в процессы металлообработки позволило резко повысить производительность труда с одновременным повышением качества продукции. Удалось значительно снизить сопротивления металлов обработке. Ультразвуковые колебания расплавов металлов способствуют повышению качества отливок. Ультразвуковые колебания используются при пластической деформации металлов и их поверхностному упрочнению. В химии возникло новое направление — ультразвуковая химия, позволяющее ускорить многие химико-технологические процессы. К наиболее перспективным областям применения ультразвуковых колебаний относятся повышение эффективности технологических процессов и создание с их помощью новых материалов.

Колебания высокой частоты могут рассматриваться как один из возможных новых методов воздействия на среду применительно к рабочим процессам дорожно-строительных машин, для повышения их эффективности и интенсификации. Изучение методов наложения частот звукового и ультразвукового диапазона на рабочие процессы

дорожно-строительных машин позволяет сделать следующие выводы.

Резание грунтов и горных пород с наложением на резец колебаний высокой частоты приводит к снижению сопротивления резанию в пределах от 1,5 до 5 и более раз при наложении колебаний в направлении движения профиля. Механизм наблюдаемого явления окончательно не установлен. Ультразвуковая активизация приготовления цементного теста способствует повышению прочности цементного камня в 1,5—2 раза при увеличении объемной массы на 5,5—9,5%. Активизируются диффузионные процессы и массообмен. Резко ускоряется образование центров кристаллизаций. Активизация битума ультразвуком непосредственно перед смешением его с минеральными материалами увеличивает сцепление битума с поверхностью заполнителя в 1,4—2,5 раза. Прочность асфальтобетона после длительного водонасыщения повышается в 1,5—2 раза. Ультразвуковая обработка тонкого слоя эпоксидной смолы, нанесенной на металлическую поверхность, повышает адгезию и прочность на 30—60%.

Условия физического моделирования рабочего процесса при наложении на инструмент колебаний высокой частоты. Основными сопротивлениями движению инструмента в среде являются: сопротивление сжатию, отрыву и смятию среды; трение инструмента о среду; сдвиг слоев среды относительно друг друга; сопротивление от преодоления веса среды. Эти сопротивления зависят от параметров и режима работы инструмента, размеров углов, установки, скорости движения, от физических свойств среды и др. Воздействие колебаний приводит к изменению сил вязкостного трения, вызывая в определенных условиях появление эффекта тиксотропии.

Уравнение движения инструмента составляют на основании общей расчетной схемы для элементарного объема (рис. VI.24) с учетом действующих на него сил.

Сопротивление сил трения элемента среды об основание

$$dT_1 = \gamma_{\text{см}} \operatorname{tg} \delta' dx dy dz,$$

где $\operatorname{tg} \delta'$ — коэффициент трения среды об основание при наложении на него колебаний; $\gamma_{\text{см}}$ — объемная масса среды; dx , dy , dz — линейные размеры элементарного объема.

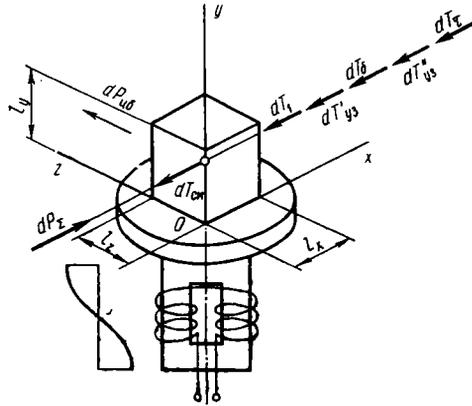


Рис. VI.24. Схема модели процесса взаимодействия элемента среды с поверхностью, излучающей колебания высокой частоты звукового и ультразвукового диапазона

Сопrotивление сил трения элемента о неподвижные участки, вызываемое действием центробежной силы инерции,

$$dT_{\text{ц}} = \frac{\gamma_{\text{см}} dx dy dz}{g} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 y \operatorname{tg} \delta',$$

где g — ускорение силы тяжести; n — частота вращения лопасти; y — расстояние от центра вращения до центра тяжести перемещаемого материала. Сопrotивление сил трения боковой грани инструмента о материал

$$dT_{\text{б}} = \gamma_{\text{см}} \operatorname{tg} \delta' z dx dz.$$

Сопrotивление сдвига материала, перемещаемого инструментом,

$$dT_{\tau} = \eta' \frac{dv_x}{dz} dx dy.$$

Сопrotивление сил трения материала о неподвижные участки

$$dT_{\text{см}} = \gamma_{\text{см}} \operatorname{tg} \rho' z dy dz \sin \beta,$$

где $\operatorname{tg} \rho'$ — коэффициент внутреннего трения среды при наложении колебаний.

Сопrotивления сил трения от действия давления ультразвуковой волны:

$$dT'_{y_3} = 2\pi f'_{y_3} dA'_{y_3} c' dx dy \frac{\gamma_{\text{см}}}{g} \operatorname{tg} \delta';$$

$$dT''_{y_3} = 2\pi f''_{y_3} dA''_{y_3} c dx dy \frac{\gamma_{\text{см}}}{g} \operatorname{tg} \delta'.$$

Суммарная движущая сил dP равна сумме всех сопротивлений:

$$dP = dT_1 + dT_{\text{ц}} + dT_{\text{б}} + dT_{\tau} + dT_{\text{см}} + dT'_{y_3} + dT''_{y_3}.$$

Для описания процесса распространения звуковых волн в смеси используют общее уравнение распространения упругих волн в среде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(\lambda + 2G) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] = \frac{\gamma_{\text{см}} \partial^3 u}{g \partial t^3} + \frac{\gamma_{\text{см}} \partial^2 u}{g T_2 \partial t^2} + \frac{k \partial^2 u}{T_2 \partial x^2},$$

где λ , G — константы Ляме; u — перемещение; $\gamma_{\text{см}}$ — объемная масса среды; k — модуль объемного сжатия; T_2 — время релаксации (для данного процесса $T_2 = G/\eta'$); η' — вязкость среды для случая воздействия ультразвука на среду.

Уравнение неразрывности движения массы материала при распространении упругой волны

$$\begin{aligned} \frac{\partial \gamma_{\text{см}}}{\partial t} + \gamma_{\text{см}} \left(\frac{\partial v'_x}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v'_x \frac{\partial \gamma_{\text{см}}}{\partial x} + v'_z \frac{\partial \gamma_{\text{см}}}{\partial z} + \\ + \gamma_{\text{см}} \left(\frac{\partial v''_y}{\partial y} + \frac{\partial v''_z}{\partial t} \right) + v''_y \frac{\partial v_{\text{см}}}{\partial y} + v''_z \frac{\partial \gamma_{\text{см}}}{\partial z} = 0. \end{aligned}$$

Уравнение состояния среды принимают в соответствии с известной моделью вязкой жидкости:

$$d\tau = \eta' \frac{dv_x}{\partial z}.$$

Начальные и конечные условия формулируются в следующем виде: при $t = 0$; $\eta' = \eta$; $\delta' = \delta$; $\rho' = \rho$;
при $t = t$; $\eta' = \eta_{y3}$; $\delta' = \delta_{y3}$; $\rho' = \rho_{y3}$.

На основании рассмотренных уравнений получают систему критериев подобия процесса:

$$\frac{l_x l_y l_z \gamma_{cm}}{\rho}; \quad \frac{n^2 l_y}{g}; \quad \frac{cfA}{gl}; \quad \frac{\eta' v_x}{l_y l_x \gamma_{cm}}; \quad \delta'; \quad \rho';$$

$$\frac{\eta' t}{G}; \quad \frac{v_x^2 \gamma}{g\lambda}; \quad \frac{k}{\lambda}; \quad \frac{G}{\lambda}; \quad \frac{v_y t}{l_y}; \quad \frac{v_z t}{l_z}; \quad \frac{\eta' v_x}{l_z \tau}; \quad \alpha \lambda_{y3}.$$

Определяющие критерии дополняют критерием подобия затухания и сводят в таблицу. Критерий затухания — это логарифмический декремент затуханий $D = \alpha \lambda_{y3}$ (где λ_{y3} — длина волны, α — коэффициент затухания) — величина, обратная расстоянию, на котором начальная амплитуда колебаний уменьшается. При моделировании процессов с наложением колебаний целесообразно сохранять скорость распространения волн в модели, тождественную натурной.

Рассмотрим случай $C_H = C_M$, т. е. масштаб $k_C = 1$. Тогда для соблюдения условий распространения (затухания) волн в модели необходимо масштаб частоты колебаний k_f выбирать равным масштабу коэффициента затуханий k_z . Это условие вытекает из соблюдения критерия $\alpha C/f$, т. е. равенство $(\alpha C/f)_H = (\alpha C/f)_M$ выполняется при $k_f = k_z$. Однако величина коэффициента затухания зависит от частоты, и изменение при моделировании частоты колебаний ведет к изменению коэффициента затуханий. Возникают противоречия при соблюдении уравнения масштабов

$$k_{fy3} = k_\alpha = \frac{1}{k_{\lambda_{y3}}}; \quad k_{fy3}^2 = k_\alpha = \frac{1}{k_{\lambda_{y3}}}.$$

Критерий Маха в этом случае соблюдается при условии $k_C = k_{v_{y3}} = 1$. Критерии, рассмотренные выше в модели, могут сохраниться равными натуре при $k_{ly} = 1$. Это условие позволяет использовать в модели рабочую среду с естественными свойствами, т. е. $k_{\gamma_{cm}} = k_{\gamma'} = k_G = k_{c_\omega} = k_{\rho'} = k_{z'} = 1$. Масштабы параметров ультразвуковых колебаний k_{fy3} , k_{vy3} и другие выбирают при моделировании равными единице. Из этого следует, что исследование наложения ультразвуковых колебаний на рабочие процессы дорожно-строительных машин можно осуществлять методами приближенного физического моделирования с разделением масштабов по осям координат. Геометрический масштаб k_{ly} вдоль направления рас-

пространения волн следует сохранять равным единице. Величину масштабов k_{l_x} , k_{l_z} ограничивают на основании анализа размеров поверхности излучателя и образца. При этом масштаб усилия определяется, как $k_T = k_{l_x} k_{l_z}$.

Применение метода моделирования с использованием эквивалентных материалов в данных условиях затруднено. Ультразвук воздействует на процессы формирования структуры среды и протекание химических процессов. Изменение акустических характеристик среды при использовании эквивалентных материалов приводит к нарушению качества изучаемого процесса.

Использование приближенного метода моделирования с разделением масштабов по осям координат позволяет вести исследование без изменения свойств среды [3]. Необходимо сохранять равными единице масштабы геометрических параметров системы вдоль направления распространения колебаний. Ограничения накладываются на масштабы в перпендикулярной плоскости. Условия ограничения определяют спецификой изученного явления и уточняют для каждого исследуемого процесса экспериментально. Основным требованием является создание условий распространения волн колебательного процесса в модели, тождественных натуре.

Стенд для исследования влияния колебаний высокой частоты на сопротивление движению грунта по металлической поверхности состоит из устройства для сдвига образца, которое является источником колебаний, например в виде магнитострикционного преобразователя, оборудования для питания источника колебаний, контроля его параметров и системы измерения сопротивления движению образца.

Размер площади сдвига устанавливают из условия получения значений сопротивления движению грунта в модели, пересчитанное на натуру по зависимости $T_{II} = T_M \times k_{l_x} k_{l_z}$ с ошибкой, не превышающей 15%. Ограничение площади справа (по минимуму) дополняется ограничением слева (по максимуму) в пределах $F_2 > F_{доп} > F_3$. Этому удовлетворяет площадь рамки 10×10 см. Высота слоя определяется диапазоном распространения волн и задачами исследования.

Наложение ультразвуковых колебаний на металлическую поверхность снижает сопротивление грунтов сдвигу. При сохранении неизменными параметров источника колебаний (частота 22,5 кГц, мощность 1,3 кВт) эффект снижения сопротивления сдвигу зависит от типа грунта, его состояния, скорости процесса сдвига и величины внешней нагрузки. Песчаные грунты при влажности до 15% характеризуются двукратным снижением сопротивления. Для сухого песка при увеличении скорости сдвига от 0,5 до 10 см/с эффект снижения сопротивления сдвигу от действия ультразвуковых колебаний уменьшается на 75% (Бакатин Ю. П.).

Применение ультразвука при обработке полимербетонной смеси в процессе ее приготовления повышает прочность полимербетона в 1,4–1,5 раза и износостойкость на 15–25%.

§ VI.6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПЛОТНЕНИЯ

Приближенные физические модели успешно применяются для исследования процессов трамбования грунтов. Широкое развитие получили теоретические методы расчета, которые характеризуются использованием логико- и предметно-математических моделей. При уплотнении грунтов действительны основные уравнения пластического подobia:

$$P_n = P_m k_l^2; \quad A_n = A_m k_l^3.$$

Работа трамбования зависит от веса падающих частей G , высоты падения рабочего инструмента H , числа ударов n , КПД удара $k_{уд}$.

$$A = GHnk_{уд}.$$

Теоретически работа одного удара $A = GH$ или $A = Gv^2/(2g)$, где v — скорость рабочих органов в момент удара; $g = v^2/(2H)$ — ускорение свободного падения.

Вес падающих частей можно выразить через их линейные размеры:

$$G = lbh\gamma,$$

где γ — объемная масса.

Подставляя соответствующие значения в уравнение, получаем:

$$A = \frac{lbh\gamma v^2}{2g}$$

При моделировании необходимо выполнить определенные требования, которые вытекают из следующего:

$$\frac{G_n v_n^2}{G_m v_m^2} = k_l^3, \quad \text{откуда} \quad \frac{l_n b_n h_n \gamma_n v_n^2 g_m}{l_m b_m h_m \gamma_m v_m^2 g_n} = k_l^3,$$

поскольку всегда $g_n = g_m$.

При моделировании это равенство может удовлетворяться различным образом. Если модель падающих частей выполнена из того же материала, что и натура, то $\gamma_n = \gamma_m$; $k_\gamma = 1$. В этом случае масштабное соотношение справедливо при $v_n = v_m$, когда вес падающих частей модели будет уменьшен в k_l^3 раза. Примем, что вес падающих частей модели уменьшается в k_l^2 раза (что возможно, когда k_l или k_b и т. д. равно единице или они все находятся в соответствующем отношении друг к другу), тогда $v_n^2/v_m^2 = k_l$, откуда $v_n = v_m \sqrt{k_l}$. Если вес модели $G_m = G_n / \sqrt{k_l}$, то должно обеспечиваться равенство $k_\gamma^2 = k_l^2$, что возможно при $v_m = v_n / k_l$. Если вес модели $G_m = G_n / k_l^{1.5}$, тогда $(v_n/v_m)^2 = k_l^{1.5}$ или $v_m = v_n k_l^{-1.5/2}$.

Создавая специальные условия, при которых обеспечивается равенство

$$\gamma_m = \gamma_n k_l,$$

согласно которому объемная масса модели падающих частей больше

объемной массы природы в k_l раз, исходное уравнение можно выполнить, например, при

$$G_M = G_n k_l^{-3}$$

и при $v_M = v_n k_l^{-1/2}$.

Принимая $\gamma_M = \gamma_n k_l^2$; $G_M = G_n k_l^{-3}$, получим $v_M = v_n k_l$. При $\gamma_M = \gamma_n k_l^3$, $G_M = G_n k_l^{-3}$ значение $v_M = v_n / \sqrt{k_l^3}$ и т. д.

Скорость падающих частей связана с высотой их падения следующими зависимостями:

$$v = \sqrt{2gH}, \quad H = v^2 / (2g),$$

а время падения $t = \sqrt{2H/g}$

Учитывая эти зависимости и имея в виду, что $g_n = g_M$, условия, при которых обеспечивается приближенное подобие удара в процессе уплотнения, можно систематизировать, как показано в табл. VI.3.

В каждом из вариантов точно фиксируются количественно различные скоростные условия процесса. Для обеспечения пластического или динамического подобия скоростные условия должны быть определенными:

$$\eta v / (\sigma t), \quad \gamma v^2 / (\sigma g).$$

При $\eta / \sigma = \text{const}$ в выражении $\eta v / (\sigma t)$ (что имеет место, когда уплотняемая среда модели и природы изготовлена из одного и того же материала) для обеспечения подобия по скоростному критерию должно быть выполнено равенство $v_n / v_M = k_l$, или $v_M = v_n / k_l$.

Когда уплотняемая среда модели и природы изготовлена из одного и того же материала, т. е. при $\gamma / \sigma = \text{const}$, для обеспечения подобия по скоростному критерию $\gamma v^2 / (\sigma g)$ должно выполняться равенство $v_n^2 / v_M^2 = 1$, что равносильно $v_n = v_M$.

Из рассмотренных десяти вариантов зависимость $v_n / v_M = k_l$ выполняется только в вариантах 4 и 6, а зависимость $v_n = v_M$ только в вариантах 1 и 10. В остальных вариантах наблюдаются отступления от скоростных критериев пластического или динамического подобия, поэтому для соблюдения условий подобия необходимо воздействовать на свойства среды.

При моделировании выполнение условий, следующих из табл. VI.3, связано с различными трудностями. Условия по вариантам 5—10, когда $\gamma_n < \gamma_M$, могут выполняться только при наличии эквивалентного материала или при наличии специального оборудования, например для центробежного моделирования, на котором осуществляется вращение модели вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью. Выбирая значения угловой скорости вращения, можно получить большие значения ускорения.

Для выполнения условий моделирования по вариантам 1—4 такого специального оборудования не требуется. Вместе с тем эти условия в ряде случаев делают невозможным или нецелесообразным их выполнение. Сравнение результатов выполнено на базе иссле-

Условия моделирования процесса уплотнения трамбованием

№ варианта	Параметры трамбуемого оборудования					Параметры модели среды											
	Объем падающего груза	Удельный вес материала падающих частей	Скорость падающих частей	Высота падения	Время падения	эластической				пластической							
						$\eta v'(z)$ при $\gamma_{Г.Н} = \gamma_{Г.М}$								$v^2 \gamma_{Г.Н}/(zg)$ при $g_{II} = g_M$			
						V_{II}/V_M	γ_{II}/γ_M	v_{II}/v_M	H_{II}/H_M	t_{II}/t_M	l_{II}/l_M	σ_{II}/σ_M	η_{II}/η_M	v_{II}/v_M	l_{II}/l_M	σ_{II}/σ_M	$\gamma_{Г.Н}/\gamma_{Г.М}$
1	k_l^3	1	1	1	1	—	—	—	—	k_l	1	1	1				
2	$k_l^{2,5}$	1	$\sqrt{k_l^{0,5}}$	$\sqrt{k_l}$	$\sqrt{k_l^{0,5}}$	—	—	—	—	k_l	k_l	$\sqrt{k_l}$	$\sqrt{k_l^{0,5}}$				
3	k_l^2	1	$\sqrt{k_l}$	k_l	$\sqrt{k_l}$	k_l	1	$\sqrt{k_l}$	$\sqrt{k_l}$	k_l	k_l	1	$\sqrt{k_l}$				
4	k_l	1	k_l	k_l^2	k_l	k_l	1	1	k_l	—	—	—	—				
5	k_l^3	k_l^{-3}	$\sqrt{k_l^3}$	k_l^3	$\sqrt{k_l^3}$	k_l	k_l	$\sqrt{k_l}$	$\sqrt{k_l^3}$	—	—	—	—				
6	k_l^3	k_l^{-2}	k_l	k_l^2	k_l	k_l	1	1	k_l	k_l	1	k_l^{-2}	k_l				
7	k_l^2	$1/\sqrt{k_l}$	$\sqrt{k_l^{1,5}}$	$k_l^{1,5}$	$\sqrt{k_l^{1,5}}$	—	—	—	—	—	—	—	—				
8	k_l^3	k_l^{-1}	$\sqrt{k_l}$	k_l	$\sqrt{k_l}$	—	1	$\sqrt{k_l}$	$\sqrt{k_l}$	k_l	k_l	1	$\sqrt{k_l}$				
9	k_l^3	$1/\sqrt{k_l}$	$\sqrt{k_l^{0,5}}$	$\sqrt{k_l}$	$\sqrt{k_l^{0,5}}$	—	—	—	—	k_l	k_l	$\sqrt{k_l}$	$\sqrt{k_l^{0,5}}$				
10	k_l^4	k_l^{-1}	1	1	1	—	—	—	—	k_l	1	1	1				

Примечание. Для всех вариантов критерий $\rho_{уд}/\sigma_{кр} = 1$.

дований трамбующей машины с площадью плиты $0,2 \text{ м}^2$, рассматриваемой как натуральный образец, и плит-моделей. Исследовались четыре плиты, выполненные в масштабе 1:1, 1:1,4; 1:2; 1:3 с замером напряжения в грунте σ , время напряженного состояния грунта t , деформация (осадка) грунта y . Изучены 1, 3 и 5 варианты моделирования.

Режим уплотнения для 1 варианта характеризовался условиями:

$$Q_M = Q_H/k_i^3; \quad H_M = H_H; \quad v_M = v_H; \quad i_M = i_H/k_i,$$

где i — удельный импульс;

$$i = \frac{Q \sqrt{2gH}}{gF}.$$

Процесс уплотнения грунта плитами-моделями и натурной плитой происходит при одинаковых скоростях удара. Качественные зависимости влияния числа ударов на осадку грунта натурной плиты и плит-моделей идентичны. Ошибка моделирования не превышает 16%. Ошибка по напряжению в грунте от числа ударов для плит-моделей и натурной плиты с учетом формул перехода от модели к натуре составляет 20% при $k_l = 3$. Наибольшее расхождение до 40% при $k_l = 3$ результатов моделирования и экспериментов отмечается для времени напряженного состояния грунта при ударе (рис. VI.25). Увеличение ошибки по времени напряженного состояния грунта при моделировании по 1 варианту связано с несоблюдением подобия по критерию $v^2/(gl)$.

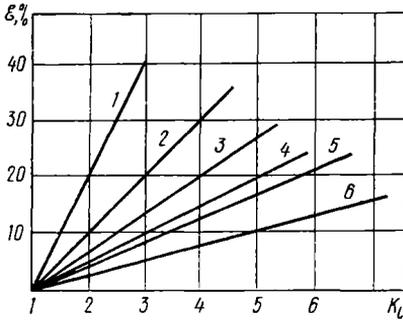


Рис. VI. 25. Зависимость изменения ошибки моделирования процесса уплотнения грунта трамбованием от коэффициента уменьшения линейных размеров k_l по напряжению ε_σ , деформации ε_y , времени напряженного состояния ε_t для 1 и 3 вариантов моделирования:

1 — ε_t (1); 2 — ε_σ (1); 3 — ε_y (1); 4 — ε_y (3);
5 — ε_σ (3); 6 — ε_t (3)

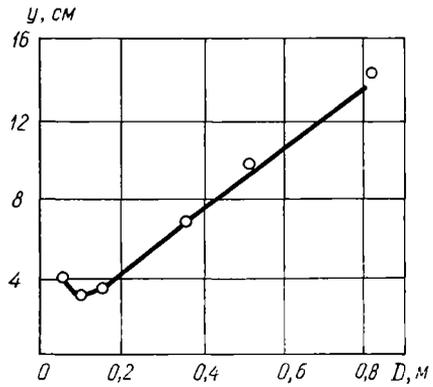


Рис. VI.26. Характер изменения осадки грунта при трамбовании от диаметра модели трамбующей плиты

Режим уплотнения по 3 варианту характеризовался условиями:

$$Q_m = Q_n/k_l^2; H_m = H_n/k_l; v_m = v_n/\sqrt{k_l}; i_m = i_n/\sqrt{k_l}.$$

Качественная картина процесса уплотнения моделями и натурной плитой имеет идентичный характер. Погрешность моделирования по напряжениям и осадке грунта от числа ударов не превышала 10% при $k_l = 3$. По времени напряженного состояния испытание показало хорошую сходимость при ошибке моделирования $\pm 5\%$ при $k_l = 3$ (рис. VI.25). Возможно физическое моделирование процесса уплотнения грунта по 3 варианту

Проверка условий моделирования по 5 варианту проводилась с теми же моделями. Опыты показали значительные погрешности по всем регистрируемым параметрам σ , t , y .

Физическое моделирование процесса взаимодействия трамбующей плиты с грунтом наиболее целесообразно по системе критериев приближенного подобия $v^2/(gl)$; $Ql/(mv^2)$; y/l . При этом наблюдается небольшая сходимость по основным параметрам режима уплотнения.

В 3 варианте соблюдается подобие по большому числу критериев, чем в других вариантах. Максимальный линейный масштаб моделирования для 1 варианта составляет $k_l = 2$, для 3 варианта — $k_l = 5$ при ошибке, не превышающей 18%. Исследования изменения остаточной деформации грунта при ударе трамбующей плиты показали, что для плит $D = 0,1$ м и $D = 0,05$ м наблюдается увеличение осадки грунта, характер кривой «размер штампа — осадка» резко меняется (рис. VI.26).

При ударе плит малых диаметров происходит выпирание грунта из-под плиты и она в этом случае работает как свая, что не соответствует механизму процесса уплотнения грунта. Размер модели при физическом моделировании без изменения прочностных свойств грунта процесса трамбования не должен быть меньше 0,1 м.

Переход от модели к оригиналу в условиях нарушения критериев подобия целесообразно осуществлять на основании рассмотренных второго следствия и анализа выдвинутых теоретических моделей описаний. Напряжение в зоне действия уплотняющего устройства

$$\sigma_n = \sigma_m k_l$$

Величина коэффициента k_σ может быть установлена на основании анализа системы в виде соответствующей реологической модели. Для схемы, показанной на рис. III.4, пренебрегая элементом вязкого сопротивления, величину k_σ можно определить по формуле

$$k_\sigma = k_l \frac{\varphi_m l_m a_m k_\varphi k_a + c_{om} \frac{k_c}{k_l} + \gamma_m \operatorname{tg} \varphi_m l_m k_\gamma k_\varphi}{\varphi_m l_m a_m + c_{om} + \gamma_m \operatorname{tg} \varphi_m l_m}$$

Силовое уплотняющее воздействие

$$P_n = P_m k_p,$$

где

$$k_p = k_l^3 \frac{\left(\rho_M l_M^3 a_M k_l k_a + c_{\omega M} l_M^2 \frac{k_{c\omega}}{k_l} + \gamma_M \operatorname{tg} \varphi_M l_M^3 k_l k_\varphi \right)}{\left(\rho_M l_M^3 a_M + c_{\omega M} l_M^2 + \gamma_M \operatorname{tg} \varphi_M l_M^3 \right)};$$

ρ — плотность уплотняемой среды для модели; a — ускорение модели; φ — угол внутреннего трения для моделирующей среды; k_p , k_a , k_φ — масштабные коэффициенты соответствующих параметров; остальные обозначения приведены выше.

Надежное прогнозирование соответствующих характеристик требует четкой и достоверной фиксации соответствующей величины на модели и достаточно близкой теоретической гипотезы в виде математической модели-описания.

§ VI.7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СПЕЦИАЛЬНЫХ МАШИН С БЫТОВЫМИ И ПРОМЫШЛЕННЫМИ ТВЕРДЫМИ ОТХОДАМИ

Охрана окружающей среды от бытовых и промышленных отходов является важной задачей народного хозяйства. Создание высокопроизводительных машин для переработки мусора связано с развитием исследования процессов взаимодействия рабочих органов соответствующих машин с такой специфической средой, как твердые бытовые и технические отходы. Выполнение исследований в этой области методами физического и комбинированного моделирования позволяет повысить качество эксперимента и темпы поиска новых решений. Для этих целей весьма перспективным является метод физического моделирования без изменения свойств среды с компенсацией несоблюдения определяющих критериев подобия.

Моделирование процесса уплотнения твердых бытовых отходов выполнено в АКХ. В качестве натурального образца принят большегрузный мусоровоз М-50 с гидравлическим уплотнением. Экспериментальный стенд (рис. VI.27) позволяет проводить исследования моделей процессов и машин различного масштаба с вариантами конструкций уплотняющих устройств.

Стенд имеет раму 11, на которой устанавливаются исследуемые модели. Последние состоят из кузова 5, загрузочно-уплотнительного устройства 7, выталкивающей плиты 3. Кузов представляет собой сборную металлоконструкцию, оснащенную направляющими для выталкивающей плиты 15. Боковая стенка кузова выполнена прозрачной из органического стекла толщиной 20 мм. Для удобства наблюдения за процессом заполнения на боковую стенку нанесена координатная сетка. Загрузочно-уплотнительное устройство навешивается на заднюю часть кузова и крепится к нему болтами. Затем на раму устанавливаются гидравлические цилиндры привода уплотняющей плиты 10.

При разгрузке кузова загрузочно-уплотнительное устройство поднимается вверх лебедкой 9, освобождая при этом загрузочный

проем кузова для выталкивания из него материала. В целях облегчения перехода на новый тип уплотнителя гидроцилиндры привода плит устанавливают на съемных опорах. Выталкивающая плита состоит из двух массивных боковин, оснащенных с наружной стороны прорезями для направляющих и скрепленных между собой тремя винтовыми стяжками, которые позволяют регулировать боковые за-

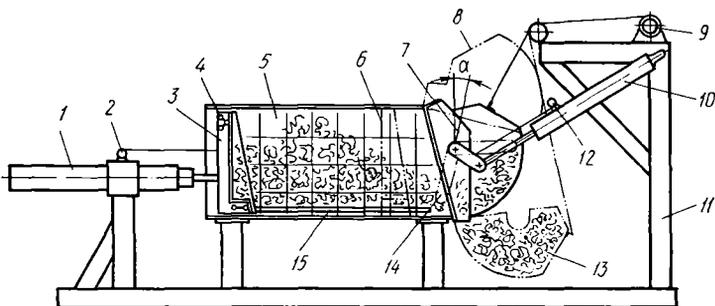


Рис. VI.27. Схема стэнда для исследования процессов уплотнения твердых отходов:

1, 10 — гидроцилиндры выталкивающей и уплотняющей плит; 2, 12 — отметки перемещений выталкивающей и уплотняющей плит; 3, 14 — выталкивающая и уплотняющая плиты; 4 — тензометрические опоры выталкивающей плиты; 5 — кузов; 6 — выталкивающая плита и момент выгрузки; 7 — грузочно-уплотнительное устройство; 8 — грузочный ковш в момент выгрузки; 9 — ледbedка; 11 — рама стэнда; 13 — грузочный ковш в момент загрузки; 15 — направляющие выталкивающей плиты

зоры. Наличие шести тензопор позволяет определить равнодействующую усилий уплотнения и место ее приложения в плоскости выталкивающей плиты. Последняя имеет привод от гидроцилиндра.

Гидравлическое оборудование стэнда — стандартное. Насос НШ-32У, дроссель Г-55-44, распределитель Р-75В смонтированы в одном блоке передвижной насосной станции. Наличие дросселя позволяет плавно изменять скорости перемещения рабочих органов в широких пределах — от 0,5 до 150 мм/с. Измерительная часть стэнда состоит из тензометрических датчиков давления в рабочих полостях гидроцилиндров (ГДЦ-100), тензодатчиков выталкивающей плиты, отметчиков перемещений рабочих органов, усилителя УНЧ-7М и шлейфвого осциллографа Н-041.

Стенд позволяет: выявить физические особенности процессов заполнения кузова мусоровозных машин и твердыми отходами; провести сравнение различных типов уплотняющих устройств; определить усилия на рабочих органах; оценить возможность максимального уплотнения отходов в кузове и возможность его наилучшего заполнения; оптимизировать рабочие процессы по скорости перемещения рабочих органов времени выдержки материала под давлением, периодичности приложения давления, положению выталкивающей плиты, углу поворота рабочего органа (угол наклона плиты) и форме выталкивающей плиты.

Важным этапом исследования является определение силовых и энергетических характеристик процесса при условиях оптимальности его параметров и достижения наибольшей степени уплотнения отходов.

Моделирование без изменения свойств среды упрощает эксперимент и повышает достоверность результатов моделирования. В соответствии с рассмотренным ранее следствием из первой теоремы подобия величину действующего усилия можно определить по величине усилия, зафиксированного на модели с учетом компенсации на несоблюдение критериев подобия:

$$P_{и} = P_{м} k_p$$

где $P_{м}$ — величина, регистрируемая при моделировании.

Коэффициент k_p устанавливается на базе анализа теоретических моделей-гипотез. Исследования, выполненные на моделях, позволяют в качестве теоретической модели использовать одну из реологических моделей, обладающей упруговязкопластическими свойствами. Для ориентировочных расчетов k_p можно рекомендовать зависимость

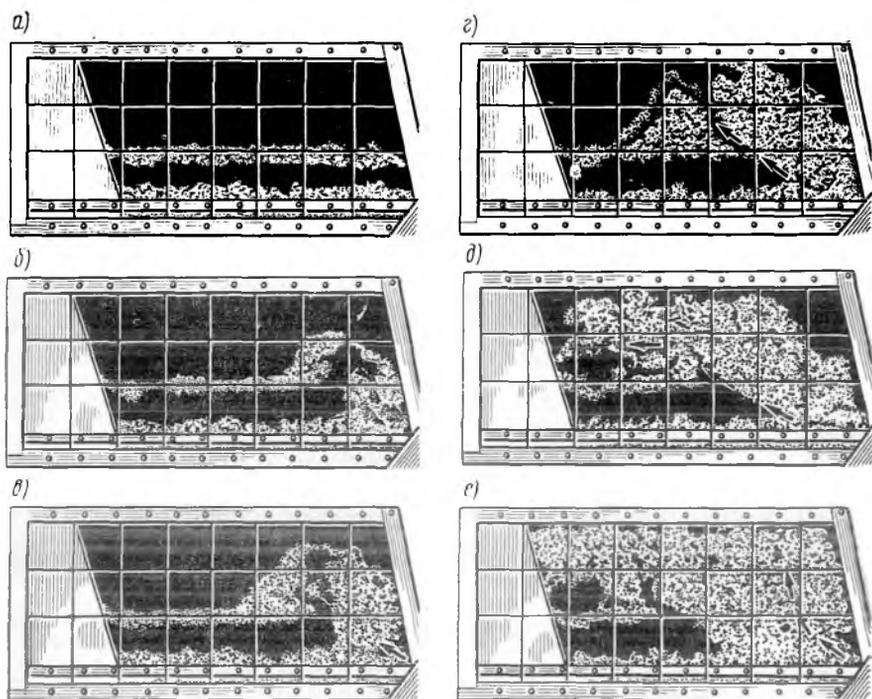


Рис. 1.28. Фотограмма развития процесса уплотнения твердых отходов в кузове специальной машины:

а) — исходное состояние; б) — развитие процесса; в) — развитие процесса; г) — развитие процесса; д) — развитие процесса; е) — развитие процесса; ж) — развитие процесса; з) — развитие процесса

$$k_p = k_l^3 \frac{\gamma_M f_M^3 k_\gamma k_f + \frac{c_{\omega M} l_M^2 k_{c_{\omega}}}{k_l} + \tau_{lM} \frac{dv_M}{dl_M} \frac{k_\eta k_v}{k_l^2}}{\gamma_M f_M^3 + c_{\omega M} l_M^2 + \tau_{lM} \frac{dv_M}{dl_M} l_M^2},$$

где l_M — обобщенный линейный размер системы $l_M = \sqrt[3]{q_n / k_l}$; q_n — вместимость кузова, принятого за оригинал; γ_M — объемный вес среды; f_M — коэффициент трения; $c_{\omega M}$ — сцепление между частицами среды; τ_{lM} — вязкость среды; v_M — скорость процесса уплотнения; $k_l, k_\gamma, k_f, k_{c_{\omega}}, k_\eta, k_v$ — масштабные коэффициенты соответствующих величин.

Мощность, необходимая на уплотнение,

$$N_n = N_M k_p k_v,$$

где N_M — величина мощности, регистрируемая на моделирующей установке; k_v — масштабный коэффициент скорости; зависит от свойств среды и линейных размеров системы.

Для ориентировочных расчетов можно принимать $k_v = k_l^\alpha$. Показатель α изменяется от 0 до 1; для установившихся процессов и уплотнения пластичной среды $\alpha = 0$; для вязкой среды $\alpha = 1$; для неустановившихся процессов $\alpha = 1/2$.

Исследования моделирующего процесса на стенде проводились на трех материалах: 1) с твердыми бытовыми отходами с относительным размером включений $\Pi_d = 2,4$; 2) с измельченными включениями при $\Pi_d = 8-10$; 3) с древесной стружкой, для которой $\Pi_d = 22$, как идеализированная среда.

Для выявления физических особенностей процесса закладывались цветные слои материала и фиксирующие маяки. После продвижения порции отходов проводилось фотографирование через прозрачную стенку. Анализ полученных зависимостей, фотограмм (рис. VI.28, VI.29) позволяет сделать вывод, что для соблюдения качественных характеристик процесса необходимо измельчать материал отходов таким образом, чтобы критерий $\Pi_{dmax} \leq 8 \div 10$. Процесс заполнения сопровождается уплотнением отходов и сдвигом их в свободное пространство при напряжениях сжатия, превышающих предельные. Зафиксированы траектории сдвига под углом, равным углу внутреннего трения отходов. Развитие исследований в этом направлении имеет большое научное и практическое значение.

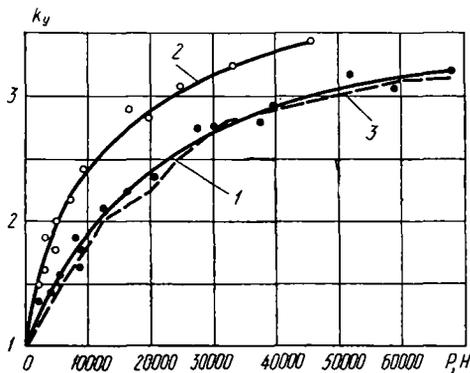


Рис. VI.29. Зависимость изменения коэффициента уплотнения от величины действующего усилия P_y :

1 — для оригинала $P_{y.n}$; 2 — для модели $P_{y.m}$ при $k_l = 1,43$; 3 — расчетная по формуле $P_{y.n.p} = P_{y.m} k_p$

§ VI.8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЯ С ГРУНТОМ

Методам физического моделирования взаимодействия движителя с грунтом уделяется в последнее время большое внимание. Появились работы по уточнению и развитию методов моделирования подсистем «двигатель — грунт». Рассмотрены методы моделирования при изучении характеристик автомобильных шин, взаимодействующих с недеформируемой поверхностью.

В общем комплексе вопросов моделирования рабочих процессов большое значение имеет разработка методов приближенного физического моделирования процессов взаимодействия движителя со средой. Условия подобия таких процессов, как установлено, в значительной степени определяются критериями, в которые входят параметры сопротивления передвижению и сцепления движителя с поверхностью дороги.

Критерии, определяющие приближенное подобие процесса взаимодействия движителя с грунтом имеют вид:

$$\Pi_v = v^2/(gl); \quad \Pi_{сп} = C_{пр}l/G; \quad \Pi_{\varphi_{сц}} = \varphi_{сц}; \quad \Pi_f = f,$$

где v — скорость протекания процесса; g — ускорение свободного падения; l — определяющий линейный размер системы; $C_{пр}$ — приведенная жесткость системы; G — вес системы; $\varphi_{сц}$ — коэффициент сцепления; f — коэффициент сопротивления передвижению.

Для дополнительного контроля подобия системы рассмотренные критерии могут быть при необходимости дополнены критериями, которые при геометрическом подобии системы следуют из соблюдения рассмотренных определяющих критериев подобия:

$$\Pi_{\varphi_{сц}} = \varphi; \quad \Pi_{\delta} = \delta; \quad \Pi_{k_{сц}} = k_{сц}; \quad \Pi_{\eta_m} = \eta_m; \quad \Pi_{k_m} = k_m,$$

где φ — относительная тяга на крюке ($\varphi = P_k/G$); δ — буксование; $k_{сц}$ — коэффициент распределения сцепного веса; η_m — механический КПД системы; k_m — коэффициент приведения массы.

Условия подобия, вытекающие из критериев $\Pi_{\varphi_{сц}}$ и Π_f , следует рассматривать как необходимые. Важно дополнить указанные выше критерии условиями, которые бы гарантировали соблюдение указанных критериев. Критерии $\Pi_{\varphi_{сц}}$ и Π_f рассматриваются как обобщенные.

Для критерия, определяющего подобие по коэффициенту сцепления, получены выражения при движении по сыпучей среде без сцепления и при движении по среде, обладающей сухим трением и сцеплением, обусловленным наличием в нем вязкой жидкости.

Для первого случая обобщенный критерий

$$\Pi_{\varphi_{сц}} = \Pi_{\varphi_1} \left[2 + \frac{\Pi_{\varphi_1}^{-1} (\Pi_{\varphi_1}^2 + 1)}{\Pi_d (1 + \Pi_{\delta} \Pi_{\varphi})} \right]$$

Для второго случая

$$\Pi_{\varphi_{\text{сц}}} = \Pi_{\varphi_1} \left[2 \frac{\Pi_{\varphi_1}^{-1} (\Pi_{\varphi_1}^2 + 1)}{\Pi_d (1 + \Pi_{\sigma_{\text{к}}} \Pi_{\varphi} + \Pi_{\tau})} + \Pi_{c_{\omega}} \right],$$

где

$$\Pi_{\varphi_1} = \varphi_1; \quad \Pi_d = 2 \left/ \left(a - \frac{d}{2} \right) \right.; \quad \Pi_{\sigma_{\text{к}}} = k_{\sigma_{\text{к}}};$$

$$\Pi_{\tau} = \frac{\eta v}{ql}; \quad \Pi_{c_{\omega}} = \frac{c_{\omega}}{q}$$

Здесь приняты следующие обозначения: φ_1 — угол трения грунта; η — коэффициент динамической вязкости; q — удельное давление на грунт; a — расстояние между частицами; d — средний диаметр частиц, составляющих грунт; $k_{\sigma_{\text{к}}}$ — коэффициент бокового давления; c_{ω} — сцепление между частицами грунта.

Условием детерминированного подобия процесса взаимодействия движителя с грунтом является равенство средних значений соответствующих критериев подобия. При этом средние значения обобщающего критерия

$$\left(\bar{\Pi}_{\varphi_{\text{сц}}} \right)_{\text{м}} = \left(\bar{\Pi}_{\varphi_{\text{сц}}} \right)_{\text{н}}$$

Стохастическое подобие указанных процессов следует из тождественности соответствующих плотностей вероятностей:

$$f \left(\Pi_{\varphi_{\text{сц}}} \right)_{\text{м}} = f \left(\Pi_{\varphi_{\text{сц}}} \right)_{\text{н}}.$$

Полученные соотношения положены в основу определения областей доминирования частных критериев подобия. Исследования условий физического моделирования процессов взаимодействия ходовых систем с грунтом, выполненные МАДИ, показали, что основной составляющей сопротивления при движении машины является сопротивление, возникающее вследствие уплотнения грунта опорной поверхностью движителя при образовании колес. Как известно, эта сила P_f определяется работой, затрачиваемой на вертикальную деформацию грунта, и пропорциональна осадке опорной поверхности. Определяющим параметром, характеризующим зависимость между нагрузкой и осадкой, является модуль деформации E . В условиях, когда E не зависит от линейных размеров системы, определяющим критерием подобия процесса является

$$E/q = \text{idem},$$

где q — удельное давление на грунт.

При $E = \text{const}$ соответствующее условие моделирования $q_{\text{м}} = q_{\text{н}}$.

Из обобщенного критерия подобия и равенства

$$\frac{P_f}{ql^2} = \text{idem}$$

получают:

$$P_{f\text{м}} = P_{f\text{н}} k_l^{-2}$$

Это положение обосновано экспериментами по вдавливанию геометрически подобных штампов в грунт. Результаты опытов, проведенных на песчаном и суглинистом грунтах, приведены на рис. VI.30.

Анализ полученных результатов показывает, что существуют два критических значения площади опорной поверхности — $F_{кр1}$ и $F_{кр2}$. Это указывает на наличие трех качественно различных зон.

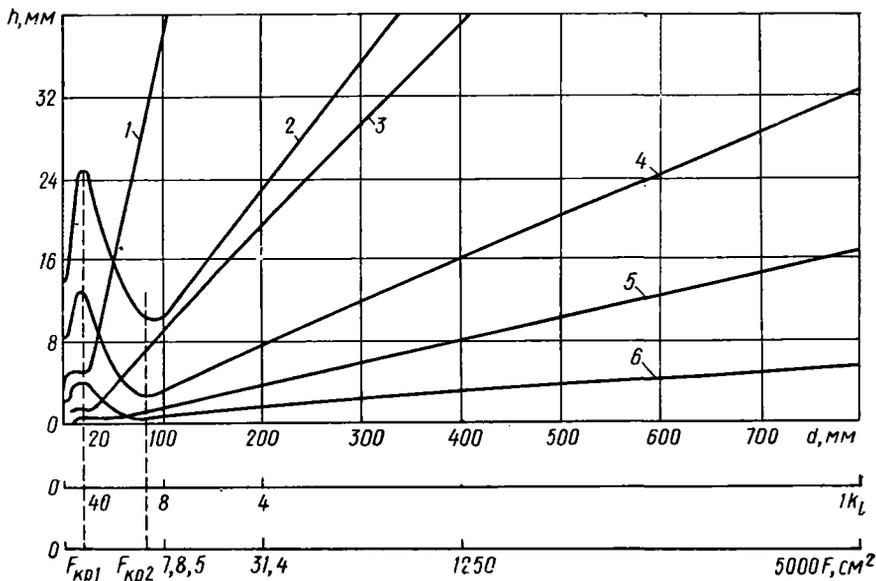


Рис. VI.30. Зависимость осадки штампа h от его диаметра d , коэффициента уменьшения линейных размеров k_l , площади и удельного давления штампа на грунт q (МПа):

1 — $q = 0,2$ (супесчаный грунт); 2 — $q = 0,14$ (песчаный грунт); 3 — $q = 0,08$; 4 — $q = 0,07$; 5 — $q = 0,04$; 6 — $q = 0,02$

Прямо пропорциональная зависимость между осадкой штампа и его линейным размером наблюдается только при $F > F_{кр2}$ и $q < q_{упд}$ ($q_{упд}$ — максимальное давление, соответствующее фазе уплотнения). Значение $F_{кр2}$ резко уменьшается при увеличении числа пластичности грунта. Эксперименты показали, что моделирование процессов взаимодействия движителя с грунтом без изменения свойств среды возможно для различных грунтов в широком диапазоне изменения их свойств с учетом следующих ограничений: $F > F_{кр2}$; $k_l > [k_l]$, $q_m < q_{упд}$. Эти условия являются ограничениями при выборе предельного масштаба моделирования опорной поверхности движителя. В диапазоне скоростей нагружения $dq/dt = 0,001 \div 0,1$ МПа/с модуль деформации грунта является инвариантным к линейным размерам штампа только при соблюдении установленных условий моделирования.

Приближенное моделирование касательной силы тяги движителя без изменения свойств среды возможно, если не учитывать влияния

неустановившихся процессов. Для соблюдения подобия при равенстве удельного давления в натуре и модели масштаб сцепного веса и касательной силы тяги должен быть равен квадрату линейного масштаба. Наличие предельных значений площадей опорной поверхности определяет условия возникновения масштабного эффекта при моделировании процесса взаимодействия ходовых систем с грунтом. Условия приближенного подобия в моделировании процесса взаимодействия ходовых систем с грунтом справедливы при ограничениях $F_M > F_{кр2}$.

Эксперименты, выполненные в МАДИ на физической модели трактора Т-180 в $1/7$ натуральной величины, и их сопоставление с материалами испытаний оригинала подтверждают рассмотренные условия моделирования. Аналогичные результаты получены фирмой «Терекс» при изучении на моделях гусеничных тракторов зависимости тягового усилия от буксования при работе на песчаных и глинистых грунтах (рис. VI.31).

Профиль преодолеваемого препятствия должен быть подобен натурному профилю, масштаб скорости перемещения системы должен быть равен масштабу линейных размеров в степени $1/2$. Частота свободных колебаний системы будет моделироваться при этом в масштабе, равном масштабу линейных размеров системы в степени $1/2$.

Подобие режима движения по периодически чередующимся неровностям требует в дополнение к рассмотренным соблюдению соотношений

$$\frac{k_{l_{1н}}}{k_{l_{1м}}} = \frac{k_{l_{1н}}}{k_{l_{1м}}} = k_l,$$

где $l_{1н}$, $l_{1м}$ — размеры, характеризующие размещение неровностей на реальном и модельном маршрутах. Масштаб моделирования продольной реакции опорной поверхности равен масштабу моделирования нормальной нагрузки, так как в исследуемых процессах величина коэффициента сцепления при взаимодействии колесного движителя с рыхлым малосвязным грунтом не зависит от удельных давлений в контакте.

Величина ошибки приближения не превышает 10%. Сопротивление качению колеса пропорционально образующей глубине колеи. Подобие сопротивления движению колеса модели и оригинала анализируют на основании опытов с геометрически подобными деформаторами. Условия моделирования нормальной нагрузки на колесо

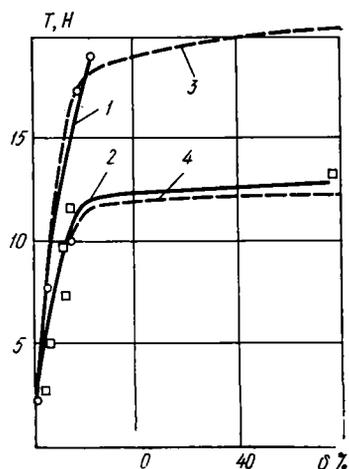


Рис. VI.31. Зависимость тягового усилия T от буксования δ для трактора С-6 и его модели в $1/7$ натуральной величины:

1 — трактор С-6 на песке; 2 — то же, на глине; 3 — модель трактора на песке; 4 — то же, на глине

определяют положения, следующие из графика, приведенного на рис. VI.30.

При нарушении критериев подобия переход от модели к оригиналу осуществляют по формулам, компенсирующим ошибку от несоблюдения критериев подобия.

Тяговое усилие, развиваемое двигателем на соответствующем этапе движения, определяемое величиной буксования, можно рассчитать на основании следующего соотношения:

$$T_{б.н} = T_{б.м} k_{Тб}.$$

Величину $k_{Тб}$ для пластической среды устанавливают по формуле

$$k_{Тб} = k_l^3 \frac{\gamma_m \operatorname{tg} \varphi_m l_m^3 k_\gamma k_\varphi + c_{\omega m} l_m^2 \frac{k_{c_{\omega}}}{k_l}}{\gamma_m \operatorname{tg} \varphi_m l_m^3 + c_{\omega m} l_m^2}$$

Надежное прогнозирование соответствующих величин на базе рассмотренных соотношений определяется степенью достоверности величин, зафиксированных на модели и используемых для расчета коэффициента перехода математических моделей-описаний.

В заключение необходимо подчеркнуть следующее основное положение.

При изучении процессов взаимодействия инструмента со средой на физической модели соответствующего процесса необходимо использовать комплексный подход при формировании закономерностей количественного прогноза на условия оригинала с использованием как метода эквивалентного материала, так и методов испытания нескольких масштабных моделей и методов учета нарушения критериев подобия соответствующим поправочным коэффициентом. Сопоставление получаемых в каждом случае результатов позволяет повысить надежность формируемого прогноза.

Если в моделируемой системе воздействие инструмента приводит к существенному изменению физических свойств среды, моделирующую среду нецелесообразно представлять в качестве эквивалентного материала.

Глава VII

ПРИБЛИЖЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ, РАБОТАЮЩИХ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

§ VII.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДСИСТЕМ «ГРУНТ — РАБОЧИЙ ОРГАН — ДВИЖИТЕЛЬ — ГРУНТ» В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ПОД ВОДОЙ

Освоение континентального шельфа, разработка нефтяных и месторождений других полезных ископаемых на дне морей и океанов, реконструкция портовых сооружений ставят перед наукой и промышленностью задачи по разработке теоретических основ и созданию специальной техники для работы в условиях погружения инструмента на значительные глубины — 100, 1000 м и более. Основной тенденцией сегодняшнего дня является создание специальных машин и аппаратов и машин-роботов для работы в воде в погруженном состоянии.

Одна из первых самоходных машин для подводной разработки грунта могла работать на глубине до 7 м. Такой бульдозер-амфибия с гусеничным движителем был оборудован дизелем с турбонаддувом мощностью 150 кВт и моторным отделением, закрытым водонепроницаемым кожухом. Специальная вертикальная труба обеспечивала подачу воздуха к двигателю при работе под водой. Разработка грунта осуществлялась бульдозерным отвалом и рыхлителем, установленными по традиционной схеме. Отвал шириной 3,8 м был оборудован открылками и захватом грейферного типа. На основании опы-

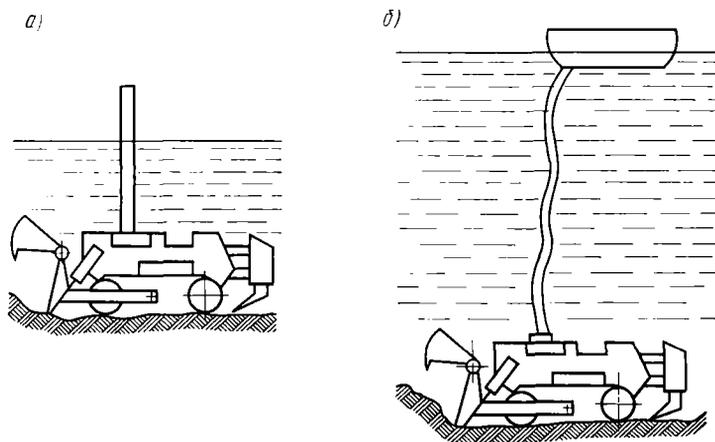


Рис. VII.1. Схемы работ землеройной машины под водой:
а — на глубине до 6–7 м; б — на глубине не более 20 м

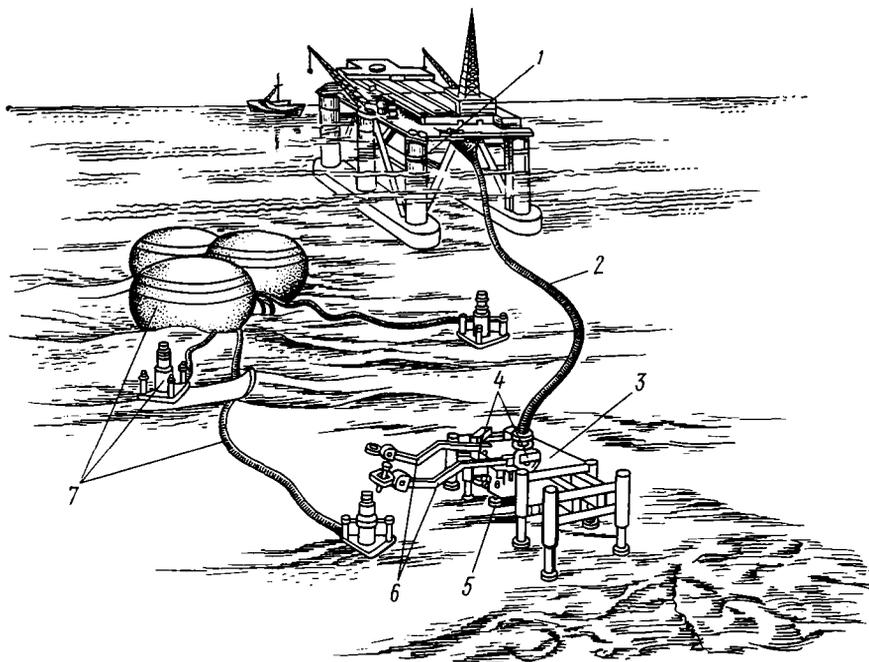


Рис. VII.2. Расположение землеройного робота и системы управления под водой:

1 — понтон; 2 — кабель; 3 — робот; 4 — телекамеры; 5 — бурильное оборудование; 6 — манипулятор с инструментом; 7 — специальное оборудование

та, накопленного при создании мелководных бульдозеров, разработан подводный бульдозер мощностью 150 кВт с электроприводом для работы на дне океанов при глубине до 60 м. Наиболее эффективно с производительностью 35—160 м³/ч такой подводный бульдозер может выполнять работы, связанные с копаньем и транспортировкой грунта при разработке котлованов, возведении дамб, планировочных работах под водой и др. Варианты применения такого оборудования даны на рис. VII.1.

Робот для землеройных работ под водой на глубине до 500 м создан на базе бульдозера-амфибии с дистанционным управлением (рис. VII.2). Робот может использоваться для рытья траншей на дне моря и прокладки в них трубопроводов и кабеля. Землеройная машина-робот состоит из: понтона; подводного робота; стрел-манипуляторов с гидравлическим приводом, оборудованных захватами; устройства для бурения грунта, смонтированного в нижней части рамы и установленного на восьми телескопических опорах. Робот оборудован телекамерами. При работе под водой управление рабочими механизмами и энергопитание осуществляются дистанционно — с понтона, на котором установлена вычислительная машина

с программным управлением и монитор, позволяющий следить за выполнением всех рабочих операций. Робот можно также использовать и в наземных условиях, особенно при работе на уклонах до 30° .

Актуальными вопросами создания и совершенствования таких машин являются: повышение безопасности и надежности ведения работ, точности операций; снижение энергоемкости и материалоемкости; модернизация и создание нового рабочего и ходового оборудования; выявление областей применения машин такого типа и др. Решить ряд научных и практических задач можно методами физического, математического и комбинированного моделирования.

Расчет сопротивлений копанию под водой рабочим органом с традиционным механизмом взаимодействия с грунтом можно выполнить на основании реализации моделей-описаний процессов резания на поверхности при атмосферном давлении (см. табл. III.4). Однако рассмотренные модели требуют корректировки, обусловленной фактом проявления гидростатического давления. Соответствующие уточнения просто и с достаточной степенью точности могут быть выполнены на основе изучения процесса резания под водой на больших глубинах методами физического моделирования.

Условия моделирования процесса взаимодействия инструмента с грунтом под водой. Для формирования физической модели в границах приближенного моделирования достаточно выявить основной набор определяющих критериев подобия на базе анализа уравнений процесса. Закономерности разрушения грунта под большими толщинами воды изучены недостаточно. Поэтому на этапе первого приближения процесс деформирования грунта под водой представлялся в виде деформирования жесткопластической вязкой модели (рис. VII.3).

Уравнения равновесия сил, действующих в элементах механической модели в горизонтальной плоскости, в векторной форме имеют вид:

$$\bar{P}_{к1} = \bar{P}_y; \quad \bar{P}_y = \bar{P}_{y,гр} + \bar{P}_{вд};$$

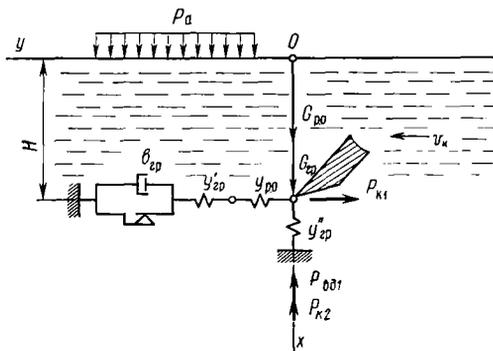


Рис. VII.3. Схема модели системы «грунт — рабочий орган» процесса разработки грунта под водой:

$y_{р.о}$ — упругий элемент, характеризующий приведенную жесткость рабочего органа; $y'_{гр}$ — упругий элемент, характеризующий свойства грунта; $v_{гр}$ — элемент, характеризующий вязкие свойства грунта; $y''_{гр}$ — упругий элемент, характеризующий свойства грунта в вертикальном направлении; $P_{вд1}$ — сила потери веса тела при погружении

$$\bar{P}_{к1} \simeq \bar{P}_{ж.гр} + \bar{P}_{вяз. гр} + \bar{P}_{вд},$$

где $\bar{P}_{к1}$ — горизонтальная составляющая сопротивления копанию; \bar{P}_y — сопротивление упругого элемента, характеризующего приведенную жесткость рабочего органа; $P_{y.гр}$ — сопротивление, характеризующее свойства грунта как упругого линейно-деформирующего тела; $\bar{P}_{ж.гр}$ — сопротивление элементов, характеризующих жесткопластические свойства грунта; $\bar{P}_{вяз.гр}$ — сопротивление, характеризующее вязкие свойства грунта; $\bar{P}_{вд}$ — сопротивление движению инструмента в воде.

Уравнение равновесия сил в проекции на вертикальную ось

$$\bar{P}_{к2} \simeq \bar{G}_{р.о} - \bar{G}_{гр} - \bar{P}_{вд},$$

где $\bar{P}_{к2}$ — вертикальная составляющая сопротивления копанию; $\bar{G}_{р.о}$ — сила тяжести рабочего органа; $\bar{G}_{гр}$ — сила тяжести грунта, перемещаемого инструментом; $\bar{P}_{вд1}$ — сила потери веса тела при погружении.

Условия однозначности для рассматриваемого случая имеют вид: при $x = x_0$, $p = p_a$; при $x = H$, $p = p_{max} = H\gamma_{в}$.

Рассматривая установившееся движение инструмента, имеем: при $t = t_0$, $v = v_1$; при $t = t_1$, $v = v_1$, где p_a — атмосферное давление; p_{max} — давление воды на глубине H ; H — глубина погружения инструмента; v — скорость движения.

После того как соответствующие составляющие будут выражены через определяющие параметры реологических элементов, получают критерии подобия в виде следующей системы:

$$\frac{P_{к1}}{c_{\omega} l^2}; \frac{k}{c_{\omega} l}; \frac{\gamma_{гр} l}{c_{\omega}}; f_{гр}; \frac{c_{\omega}}{E_{гр}}; \frac{\gamma_{вд} l}{c_{\omega}}; \frac{\eta_{гр} v}{c_{\omega} l};$$

$$\frac{\eta_{вд} v}{c_{\omega} l}; \frac{\eta_{гр}}{\eta_{вд}}; \frac{G_{р.о}}{c_{\omega} l^2}; \frac{\gamma_{гр} l}{c_{\omega}}; \frac{\gamma_{гр}}{\gamma_{вд}}; \frac{p}{p_a}; \frac{l}{H}; \frac{v}{v_0},$$

где k — приведенная жесткость; $\gamma_{гр}$, $\gamma_{вд}$ — объемный вес грунта и воды; $E_{гр}$ — модуль линейной деформации грунта; c_{ω} — сцепление частиц грунта; $f_{гр}$ — коэффициент трения грунта по грунту; $\eta_{гр}$, $\eta_{вд}$ — коэффициент вязкости грунта и воды; l — обобщенный линейный размер инструмента.

При $k_{y_{гр}} = k_{y_{вд}} = 1$ соотношения между масштабами величин p , p_a , l , H имеют вид: $k_{p_a} = k_p$; $k_l = k_H$. Это имеет важное значение при формировании физической модели процесса подводного копания, резания и рыхления грунтов. При условии, что атмосферное давление в модели не изменяется, т. е. $k_{p_a} = 1$, важно, чтобы и масштаб давления на глубине для модели был равен оригиналу, т. е. $k_p = 1$. Для оригинала давление на глубине определяется гидростатическим давлением воды: $p_H = H\gamma_{вд}$.

Из условия $k_p = 1$ следует, что $p_M = p_{II} = H_{II} \gamma_{вд}$. Определяя величину H_{II} через H_M , как $H_{II} = H_M k_l$, имеем:

$$p_M = p_{II} = H_M k_l \gamma_{вд}.$$

Анализ полученных критериев показывает, что для их полного соблюдения необходимо использовать в качестве грунта в модели эквивалентный материал с параметрами $c_{ом} = c_{он}/k_l$; $\eta_{гр.м} = \eta_{гр.н}$. Соблюдение этих соотношений практически трудно реализовать и контролировать.

Приближенное моделирование копания грунта под водой в условиях несоблюдения отдельных критериев подобия $\gamma_{гр} l/c_{ом}$; $f_{гр}$; $\gamma_{гр} v(c_{ом} l)$; $\eta_{вд} v(c_{ом} l)$; $\gamma_{вд} l/c_{ом}$ характеризуется в общем виде проявлением следующих неравенств для масштабов определяющих величин:

$$k_{c_{ом}} \neq k_l; \quad k_{\gamma_{гр}} \neq 1; \quad k_{\gamma_{гр}} \neq k_l.$$

Практический интерес представляет рассмотрение случая разработки масштабной моделью инструмента естественных грунтовых пород под водой в условиях действия гидростатического давления. При этом для воды имеют место соотношения $k_{\gamma_{вд}} = 1$ и $k_{\tau_{вд}} = 1$. Основные условия моделирования заключаются при этом в соблюдении только геометрического подобия инструмента и критериев, вытекающих из условий однозначности:

$$k_{p_a} = k_{p_{вд}}; \quad k_{p_{вд}} = 1; \quad p_M = p_{II} = H_M k_l \gamma_{вд}.$$

Соответствующие составляющие сопротивления копанию определяются на основании замеров каждой из них в условиях моделирования и умножения полученной величины на поправочный коэффициент, учитывающий нарушение соответствующих критериев подобия. Для расчета горизонтальной составляющей рекомендуется следующая зависимость:

$$P_{к II} = P_{к I M} k_{P_{к I}},$$

где $k_{P_{к I}}$ — коэффициент, учитывающий несоблюдение подобия по ряду определяющих критериев.

Величина $k_{P_{к I}}$ рассчитывается на основании гипотезы о возможности описания процесса одной из реологических моделей, на базе параметров модели и известных масштабных коэффициентов соответствующих параметров. Упрощенная зависимость, которая может быть использована для ориентировочного прогноза сопротивлений оригинала по данным, полученным на модели, имеет вид

$$k_1 = \frac{P_{к II} = P_{к I M} k_1^3;}{\gamma_{гр.м} l_M^3 f_{гр.м} + k_2/k_l},$$

$$\gamma_{гр.м} l_M^3 f_{гр.м} + c_{в.м} l_M^2 + \gamma_{гр.м} \frac{dv_M}{dy_M} l_M^2 + \tau_{вд.м} \frac{v_M l_M}{2}$$

где

$$k_2 = c_{\text{взм}} l_M^2 - \eta_{\text{гр.м}} \frac{dv_M}{dy_M} l_M^2 - \eta_{\text{вд.м}} v_M \frac{l_M}{2}$$

Вертикальная составляющая определяется аналогично по замеренной на модели величине $P_{\text{к2м}}$:

$$P_{\text{к2н}} = P_{\text{к2м}} k_1 k_2^3.$$

Мощность, потребляемая на разрушение грунта инструментом под водой, определяется с учетом принятого масштаба скоростей:

$$N_H = N_M k_p k_v,$$

где $k_p = k^3/k_1$; $k_v = v_H/v_M$.

Анализ рассмотренных положений показывает, что гидростатическое давление является важным показателем, моделированию которого необходимо уделять первостепенное внимание, так как этот параметр входит в условия однозначности.

Эксперименты с системами, моделирующими резание грунта под водой, проведены с целью изучения влияния характера изменения сил сопротивления резанию в зависимости от величины гидростатического давления в условиях, характерных для процессов разработки траншей методом «стена в грунте». Важным является экспериментальная проверка формул перехода от параметров модели $P_{\text{к1м}}$, $P_{\text{к2м}}$, N_M к оригиналу в условиях нарушения критериев подобия. На основании рассмотренных выше методов моделирования экспериментальные исследования указанных вопросов с моделями инструмента выполнены в лаборатории ЦНИИС. В лаборатории создан стенд*, основным блоком которого является рабочая камера (рис. VII.4). Последняя выполнена в виде герметичного корпуса с верхними иллюминаторами для монтажа и регулировки механического инструмента — рабочего органа — и освещения внутри рабочей камеры. Визуальное наблюдение ведут через боковой иллюминатор. Имеется люк установки контейнера с грунтом. В торцы корпуса пропущен продольный направляющий шток, на котором закреплен режущий механический инструмент и тензозвено. Эксперименты по изучению процесса резания под гидростатическим давлением выполнены на суглинистом грунте без включений. Объемная масса скелета грунта $1,97 \text{ т/м}^3$, пористость $27,3\%$, при коэффициенте пористости $0,376$ и степени водонасыщения $0,87$.

Резание осуществлялось плоским ножом двух размеров. Нож, принятый за оригинал, имел ширину 100 мм ; ширина ножа модели 40 мм при линейном масштабе $k_1 = 2,5$. Грунт закладывался в контейнер и уплотнялся на станке. Прочность грунта оценивалась числом ударов плотномера. План эксперимента составлялся для пяти факторов: прочности грунта C , глубины резания h , угла резания α_r , скорости резания v и гидростатического давления p . В качестве це-

* Авторы В. И. Баловнев, А. Б. Ермилов, И. А. Недорезов, Д. Д. Тургумбаев, Э. А. Малоян.

левой функции рассматривалась горизонтальная составляющая усилия резания. Установлено, что гидростатическое давление оказывает существенное влияние на усилие резания, степень проявления которого растет с повышением прочности грунта, увеличением угла и глубины резания. При $\alpha_p = 50 \div 55^\circ$ наблюдается максимальное

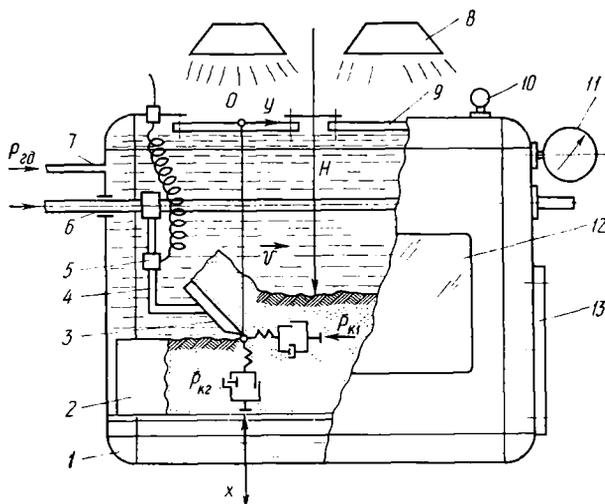


Рис. VII.4. Барокамера для физического моделирования процесса резания грунтов под водой при гидростатическом давлении различной величины:

1 — герметичный корпус; 2 — контейнер с грунтом; 3 — режущий инструмент; 4 — тензометрическое звено; 5 — тензодатчик; 6 — направляющий шток; 7 — трубопровод подачи сжатой жидкости от рабочей камеры; 8 — лампы освещения; 9 — верхний иллюминатор; 10 — тензодатчик давления; 11 — манометр; 12 — боковой иллюминатор; 13 — люк для размещения контейнера с грунтом

значение усилия резания. Дальнейшее увеличение его приводит к некоторому снижению усилия. Изменение усилия резания от прочности грунта характеризуется линейной зависимостью. В исследуемом диапазоне $0,01 \div 8$ см/с влияние скорости на увеличение усилия резания незначительное.

Результаты исследований представлены на рис. VII.5. Как видно из графика, ошибка перехода от параметров модели к оригиналу не превышает $15 \div 18\%$ с вероятностью 95, что показывает достаточное соответствие рассматриваемого метода моделирования.

Анализ экспериментов показывает, что для расчета сопротивлений резанию и копанью грунта под водой на этапе ориентировочных расчетов целесообразно в качестве математической модели — описания использовать модели табл. III.4. Для расчета можно использовать формулу

$$P_{к1гд} \simeq k_{гд} P_{к1},$$

где $P_{к1}$ — горизонтальная составляющая сопротивления копанью

при атмосферном давлении на поверхности; $k_{гд}$ — эмпирический коэффициент, учитывающий влияние на протекание процесса гидростатического давления воды.

Коэффициент влияния гидростатического давления определяют по результатам физического моделирования в барокамере по рассмотренной методике:

$$k_{гд} = \bar{P}_{к.гд.м} / \bar{P}_{км},$$

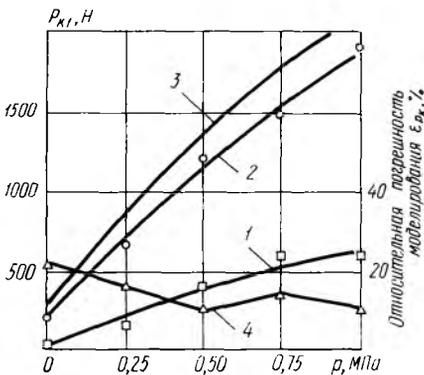


Рис. VII.5. Зависимость изменения горизонтальной составляющей сопротивления резанию грунта $P_{к1}$ от величины гидростатического давления p :

1 — график для модели с масштабом $k_l = 2,5$; 2 — график для оригинала с масштабом $k_l = 1$; 3 — график для оригинала, полученный теоретически по формуле $P_{к1.т} = P_{к1.м.э} k_l^3 k_i$; 4 — относительная ошибка перехода от модели к оригиналу

где $\bar{P}_{к.гд.м}$ — соответствующая составляющая сопротивлению копанию (резанию) под водой, зафиксированная на модели; $\bar{P}_{км}$ — соответствующая величина сопротивления при атмосферном давлении, зафиксированная на модели.

Величина $k_{гд}$ зависит от свойств грунта, гидростатического давления и конструкции режущего инструмента. При давлении воды $0,8 \div 1,0$ МПа и разработке суглинистого грунта плоским клином $k_{гд} \approx 1,5 \div 5$. В дальнейшем для упрощения соответствующих расчетов величина $k_{гд}$ может быть табулирована в зависимости от типа грунта, режимов копания, вида инструмента, величины гидростатического давления и др.

В условиях гидростатического давления горизонтальная составляющая сопротивления

$$P_{к1гд} = P_{к1} (1 + k p_i),$$

где p_i — величина гидростатического давления, МПа; k — эмпирический коэффициент, зависящий от типа грунта и параметров инструмента, $1/\text{МПа}$ (для суглинка и глины в среднем можно принимать $k = 1,1 \div 2,1$ $1/\text{МПа}$); остальные обозначения даны выше.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что сила сопротивления резанию, копанию, рыхлению при разработке связанных грунтов типа суглинок, глина под водой существенным образом зависит от величины гидростатического давления. В условиях, когда гидростатическое давление действует на обнаженную поверхность забоя одновременно с действием механического инструмента, а внутренние поры отделяемого грунта не успевают заполниться водой с давлением, равным давлению воды на заданной глубине, увеличение

касательной составляющей сопротивления копанию достигает 7-кратной величины.

Величина сопротивления копанию находится в параболической зависимости от значения гидростатического давления. При повышении давления на каждые 0,1 МПа сопротивления копанию возрастает в среднем на 15%. Наибольшее влияние гидростатическое давление оказывает при разработке связных глинистых грунтов ($c_w = 0,02 \div 0,12$ МПа, $\rho = 5-30^\circ$).

Уменьшение сопротивления копанию может быть достигнуто применением специальных резцов или рабочих органов, обеспечивающих поступление жидкости на поверхность, контактирующую со средой.

Предложенный метод моделирования без изменения свойств среды и формулы перехода от параметров модели к оригиналу являются работоспособными и не дают высокой погрешности.

§ VII.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДСИСТЕМ «ГРУНТ — РАБОЧИЙ ОРГАН — ДВИЖИТЕЛЬ — ГРУНТ» В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ЕСТЕСТВЕННОМ СПУТНИКЕ ЗЕМЛИ

Разработка методов физического моделирования в условиях движения по лунной поверхности связана с анализом сведений о физико-механических свойствах лунного грунта — реголита и влиянии условий лунного окружения на свойства грунтов-аналогов. Соответствующие сведения получают на базе анализа астрорадиометрических данных, изучения фотоснимков лунной поверхности с космических аппаратов, по данным специальных экспериментов. Большое научное и практическое значение для отработки посадочных устройств космических кораблей, а также для изучения специальных транспортных и грунторазрабатывающих средств имеют испытания соответствующих физических моделей.

Условия подобия процессов в модели и оригинале при изменении гравитационных сил рассмотрены в ряде работ [31]. При использовании методологии центробежного моделирования следует считать процессы, происходящие на Луне, натурными, а процессы при земном ускорении силы тяжести — модельными. Изучение влияния величины гравитации на условия подобия подсистемы «колесный движитель — грунт» показывает, что изменение ускорения силы тяжести можно не учитывать при моделировании параметров прочности грунта. Изменение величины ускорения силы тяжести мало влияет на деформативные процессы, на модуль деформации в фазе уплотнения грунта. По мере приближения процесса к предельному состоянию это влияние увеличивается.

Степень разрежения оказывает значительное влияние на сцепление и угол внутреннего трения грунта (рис. VII.6).

Основными параметрами грунта, определяющими тягово-сцепные качества движителя, являются его деформируемость и сопротивление сдвигу. Деформируемость поверхностного слоя реголита оценивалась по глубине колен в зависимости от нормальной нагрузки,

прикладываемой к девятому колесу аппарата, геометрическим размерам колеса, а также расчетным путем по удельному давлению на жесткий штамп при глубине внедрения в грунт, равной его высоте. Сопротивление сдвигу определялось как отношение максимального вращательного момента, приложенного к площади среза конусо-

лопастного штампа. На глубине до 100 мм реголит обладает более высокими механическими свойствами. Так, несущая способность его составляет около 0,1 МПа, а сопротивление сдвигу — около 0,006 МПа. Структурно-механические свойства реголита важно учесть в модели [19].

Поверхность Луны состоит из материковых участков, лунных морей и водораздела, т. е. зон перехода от материковых районов к морским. Лунные моря занимают 16,2% всей поверхности, причем неравномерность их распределения на видимой и обратной стороне Луны характеризуется следующими цифрами: на видимой стороне

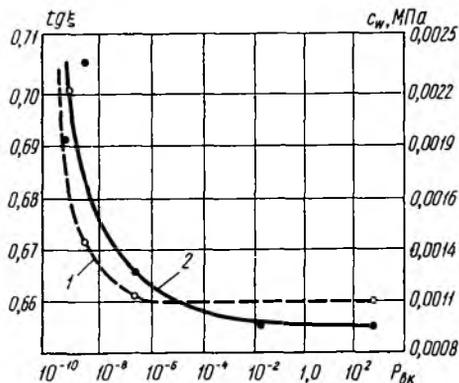


Рис. VII.6. Характер изменения угла внутреннего трения (1) и сцепления (2) грунта-аналога реголита от величины разрежения

площадь морей составляет 29,8%, на обратной — 2,5%. Характеристики реголита одинаковы как на поверхности морей, так и материков. В исследованных районах лунной поверхности доминирующей формой рельефа являются кратеры. Их диаметр изменяется в широких пределах. Кратеры диаметром до 50 м покрывают 30—35% ее территории с реальной плотностью распределения в пределах от 50 до 70 кратеров на 1 км². Площадь с кратерами диаметром до 70 м составляет около 3,3% от всей поверхности [29].

На геометрию кратеров влияют свойства реголита и угол внутреннего трения, равный приблизительно $25 \div 30^\circ$. На склонах кратеров крутизной до 25° для автоматических транспортных аппаратов буксование достигало 80%.

Отмечают склонность реголита к адгезии с теми деталями, которые находятся в непосредственном контакте с ним. Интенсивность налипания частиц грунта может изменяться в достаточно широких пределах и приводит к увеличению коэффициента трения; заклинивание деталей может вызвать дополнительное натяжение гусеничных цепей с открытым шарниром. Предпочтительным являются колесные транспортно-разрабатывающие машины (ТРМ).

При продолжительном взаимодействии рабочих органов с реголитом на поверхности их отвальных частей можно ожидать накопления электростатического заряда, обусловленного чрезвычайно малой электропроводностью лунного вещества в сочетании с высоким ва-

кумом. Структурно-механические свойства реголита даны в табл. VII.1.

Таблица VII.1

Структурные и физико-механические свойства реголита

Методы определения свойств на Луне	Свойства реголита						
	структура	крупность	γ , г/см ³	ρ , г/см ³	c_{ω} , МПа	φ , град	E , МПа
Воздействие на грунт газовых струй, работа манипулятора	Мелкозернистый малосвязанный с гравием	0,02—0,06	1,3—1,8	3,0	0,0003—0,0007	35—37	0,05—0,95
Испытание грунтомера-пенетromетра	Мелкозернистый малосвязанный	0,06	1,2	3,2	0,0005	32	0,058—0,95
Анализ вдавливания станции и обуви космонавтов	То же	0,06	1,36—2,0	2,5—3,1	0,0003—0,0014	35—39	0,2—0,25
Испытания конусно-лопастного штампа		0,01—0,02	1,5—1,7	3,0	0,004—0,005	35—37	—

Условия моделирования подсистем «грунт — рабочий орган» для работы на естественном спутнике Земли. Практический интерес представляет анализ условий формирования физико-математических моделей систем, работающих в особых условиях, например разрушающих грунты космических тел или Луны. Изучение вопросов моделирования условий работы системы на Земле для разработки грунтов на Луне показывает, что для этого можно использовать методы как эквивалентных материалов, так и центробежного моделирования. Причем в последнем случае Земля по отношению к Луне является центрифугой, обеспечивающей изменение масштаба моделирования ускорения силы тяжести в шесть раз:

$$k_g = g_n/g_m; \quad g_n/g_m = g_n/g_a; \quad k_g = 1/6.$$

Возможна реализация нескольких вариантов моделирования. Случай, когда рабочая система находится под действием всего комплекса сил, является наиболее интересным. Соотношения между масштабами имеют вид:

$$k_s = k_p k_g k_l; \quad k_n = k_p k_g^{1/2} k_l^{3/2};$$

$$k_v = k_n / (k_p k_l); \quad k_t = (k_p k_l^2) / k_n.$$

При $k_l = 1/k_g$ возможно применить в качестве моделирующей среду, масштабы параметров прочности которой k_{σ} , $k_{c_{\omega}}$, k_E и дру-

гие равны единице, а масштаб параметра η равен масштабу линейных размеров.

Формирование модели упрощается, если можно не принимать во внимание силы инерции и условия $k_{p_a} = k_\sigma$ в подсистеме «грунт — рабочее оборудование». В этом случае соотношения между масштабами определяющих параметров для всей системы следующие:

$$k_\sigma = k_{c_\omega} = k_p k_g k_l; \quad k_m = k_p k_g k_l^2 k_t^2;$$

$$k_{C_{np}} = k_p k_g k_l^2; \quad k_T = k_p k_g k_l^3.$$

Принимая $k_g = 1/k_l$, получаем:

$$k_\sigma = k_{c_\omega} = k_p; \quad k_{C_{np}} = k_p k_l;$$

$$k_m = k_p k_l k_l^2; \quad k_T = k_p k_l^2.$$

При условии $k_{пер} \approx 1$ (где $k_{пер}$ см. стр. 180) возможен вариант приближенного моделирования в натуральном масштабе времени и испытания модели оборудования в реальной среде в соответствующем эквивалентном материале. Если $k_g = 1/6$; $k_l = 6$; $k_p = 1$; $k_t = 1$, то $k_\sigma = k_{c_\omega} = 1$; $k_{C_{np}} = 1$; $k_l = 1$; $k_v = k_l = 6$; $k_m = 6$; $k_T = k_l^2 = 6^2$.

При $k_{пер} > 1$ необходимо при составлении условий моделирования системы учитывать влияние на протекание процесса сил сопротивления передвижению машины. При этом получаем вариант условий моделирования с масштабом времени, отличным от натурального.

Когда эксперименты проводят в земных условиях с машиной при $k_l = 1$; $k_g = 1/6$; $k_p = 1$, то для общего случая действия сил получают следующие масштабные зависимости: $k_\sigma = k_{c_\omega} = 1/6$; $k_{\tau_1} = \sqrt{1/6}$; $k_t = \sqrt{6}$; $k_v = \sqrt{1/6}$; $k_{C_{np}} = 1/6$; $k_m = 1$; $k_G = 1/6$; $k_T = 1/6$; $k_p = k_\sigma = 1$; $k_{p_{уд}} = 1/6$.

Из полученных соотношений следует, что для исследования натурального оборудования в земных условиях необходимо вести работы с применением эквивалентного материала для соблюдения масштабов k_σ и k_{τ_1} .

Стенды для экспериментальных исследований подсистемы «двигатель — грунт». Установление действительного характера протекания изучаемого процесса, обоснованность допущений, принятых при формировании критериев подобия, пределы применимости рекомендаций осуществляют на специальных стендах.

В лаборатории проводят исследования на геометрически подобных приборах по определению механических параметров грунта; на геометрически подобных элементах колесного движителя (опорные площадки, «колесные» штампы, грунтозацепы); на геометрически подобных колесах; на самоходной масштабной модели колесного движителя соответствующей конструкции. Режимы изменения скорости и нагружения при моделировании назначают с учетом конкретных возможных режимов работы и условий функционирования

многоцелевых машин и, в частности, автоматических самоходных аппаратов [31].

Стенд для исследования подобия взаимодействия с грунтом элементов колесного движителя показан на рис. VII.7 Основными частями установки являются металлический контейнер, в котором помещен грунт-аналог, рычаг, позволяющий прикладывать к колесу (штампу) нор-

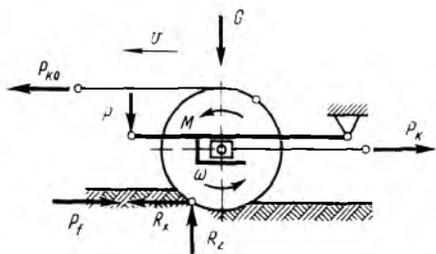


Рис. VII.7. Схема стенда для использования процесса взаимодействия колеса с грунтом

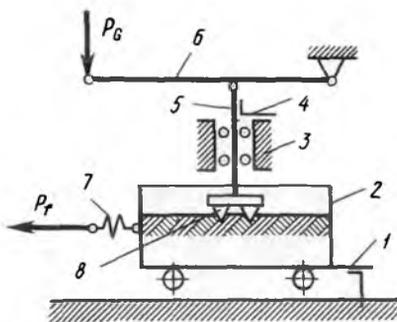


Рис. VII.8. Схема стенда для исследования процесса взаимодействия штампа с грунтом:

1 — датчик для измерения величины сдвига; 2 — грунтовой контейнер; 3 — направляющая обоймы; 4 — датчик для измерения величины осадки; 5 — шток; 6 — нагрузочное устройство; 7 — тензометрическое звено; 8 — штамп

мальную нагрузку, а также системы, обеспечивающие создание крутящего момента на колесе и силы тяги. Испытуемое колесо перемещается по специальным направляющим вдоль рычага, а также может быть закреплено неподвижно на оси. Конструкция стенда позволяет производить сдвиговые испытания колеса при неподвижной оси и испытания колеса в различных режимах работы.

Опыт проводят в определенной последовательности: сначала испытываемое колесо вдавливают в грунт нормальной нагрузкой при фиксировании момента касания грунтозацепов колеса с поверхностью грунта-аналога и измеряют величину осадки. Затем к колесу прикладывают крутящий момент и оно поворачивается на определенный угол или перемещается вдоль специальных направляющих. При этом измеряют и записывают приращение осадки колеса, теоретическое и действительное его перемещение, а также величину окружной силы при соответствующих нормальной нагрузке, прикладываемой силе тяги и сопротивлении перекачиванию колеса.

Стенд для экспериментальных исследований по вдавливанию и сдвигу геометрических подобных жестких штампов и колес. Схема стенда изображена на рис. VII.8. Конструкция стенда включает грунтовой контейнер 2, перемещающийся по рельсам, систему

нагрузки штампов нормальной нагрузкой, а также устройство для реализации сдвигающей нагрузки. Система нагружения состоит из рычага 6, шарнирно закрепленного одним концом специальной направляющей обоймы 3 со штоком 5, перемещающимся в вертикальном направлении. Направляющая обойма закреплена неподвижно. Изменение величины груза на рычаге приводит к созданию на геометрически подобных штампах различных по величине

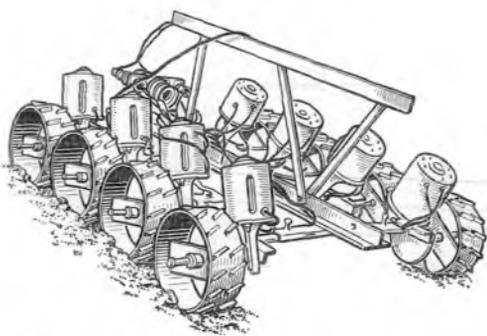


Рис. VII.9. Физическая модель транспортного устройства для передвижения по поверхности Луны

удельных давлений. Штамп погружался в грунт под действием нормальной нагрузки, затем по достижении стабилизации осадки производился равномерный сдвиг грунтового лотка

Многоколесная самоходная масштабная модель двигателя выполнена с линейным масштабом $k_l = 3,25$ (рис. VII.9). Она состоит из основной рамы, восьми мотор-колес с индивидуальным приводом, специального устройства

для распределения нагрузки по осям, буксирного устройства с тензометрической тягой. Рама смонтирована из секций, что позволяет, при необходимости, увеличивать базу модели и изменять колесную формулу двигателя.

Привод модели включает восемь электродвигателей постоянного тока независимого возбуждения. Электродвигатели являются мотор-редукторами и смонтированы вместе с колесами. Мощность каждого двигателя 25 Вт, частота вращения 2300 мин^{-1} , номинальное напряжение 12 В. Питание двигателей осуществлялось четырьмя регулируемыми выпрямителями. Каждый борт масштабной модели имел индивидуальное питание цепей якоря и обмотки возбуждения. Схема позволяет в широком диапазоне регулировать скорость движения модели, осуществлять бортовой поворот с различным радиусом и реверс приводных двигателей. Передаточное число редуктора равно 49. Пластинчатые рессоры переменной жесткости, изготовленные из титанового сплава, позволяют получать широкий диапазон изменения степени эластичности подвески. Вес модели без дополнительных грузов 26,5 кг. Дополнительный груз, который может быть установлен на специальном устройстве, весит 25,0 кг. Нормальная нагрузка на ведущие колеса изменяется в широких пределах. Двигатель модели выполнен с жесткими колесами диаметром 158,0 мм и шириной обода 62,0 мм, колея — 500,0 мм, продольная база модели — 526,0 мм. Перед началом экспериментов определяют нормальную нагрузку на каждую ось.

Методика выбора грунта-аналога и измерение его прочностных и деформативных свойств. Не существует грунтов, которые бы по своим свойствам полностью соответствовали реголиту. Земным аналогом лунного грунта можно рассматривать искусственный пылеватый песок из дробленого базальта. Наибольшее распространение получили эквиваленты, состоящие в основном из песчаных и глинистых частиц на масляной основе. Свойства такого грунта—аналога регулируются процентным содержанием масла и уплотнением. В качестве дополнительного компонента для изготовления низко-модульных грунтов-аналогов можно использовать резиновую крошку и древесные опилки. Резкого снижения величины угла внутреннего трения можно добиться, добавляя в эквивалентный материал молотую слюду (до 10—15⁰); модуль деформации при этом уменьшается незначительно. Добавка мела, слабо влияя на параметры прочности смеси, существенно изменяет величину модуля деформации.

Вид связующего материала влияет в основном на характер деформации и незначительно сказывается на величинах физико-механических характеристик грунтов-аналогов. Применение трансформаторного масла придает эквивалентному материалу особенности, наблюдаемые при разрушении суглинка; технический вазелин вызывает пластические деформации, характерные для глин.

Состав некоторых эквивалентных материалов и их физико-механические характеристики приводятся ниже:

Номер смеси	1	2	3	4	5
Песок кварцевый мелко-зернистый, %	77	81	70	81	78
Технический вазелин,	13	7	5,9	10	9,5
Слюда молотая, %	10	5	4,1	—	2
Автол, "	—	7	5,9	—	2
Мел, %	—	—	14,1	9	8,5
c_{ω} , МПа	0,025	0,03	0,03	0,07	0,05
φ , град	23	25	22	29	26
E , МПа	—	0,9	—	—	4,5
γ , г/см ³	1,63	1,7	1,84	1,9	1,9

Параметры грунта-аналога должны соответствовать условиям равенства в модели и оригинале определяющих критериев подобия процесса. Состав аналога реголита и его физико-механические характеристики приведены в табл. VII.2.

Таблица VII.2

Аналог реголита

Наименование к	Содержание, %	Значения физико-механических параметров
Песок кварцевый мел-козернистый	78	$c_{\omega} = (0,001 \div 0,003)$ МПа
Глинистые частицы	7	$\varphi = (26 \div 30)$ град
Цемент марки 100	10	$E = (0,015 \div 0,25)$ МПа
Веретенное масло	5	$\gamma = 1,65$ г/см ³

Исследование подсистемы «колесный движитель — грунт» на приближенной физической модели осуществлено для выбора рациональной колесной формулы движителей многоцелевых транспортно-разрабатывающих машин. Эксперименты проведены на масштабной модели с различным числом ведущих осей. При постоянном сцепном весе модели число ведущих осей изменялось от 1 до 4. Удельная сила тяги движителя в тяговом режиме

$$\psi = P_K/G.$$

Удельная сила тяги движителя в режиме преодоления уклонов

$$\psi_b = \frac{P_{к.о}^b}{P_N} = \frac{G \sin \theta}{G \cos \theta} = \operatorname{tg} \theta.$$

Испытания проводились на грунте-аналоге различной плотности. Результаты исследований с масштабной моделью колесного движителя представлены зависимостью между максимальной удельной силой тяги движителя и величиной коэффициента буксования (рис. VII.10).

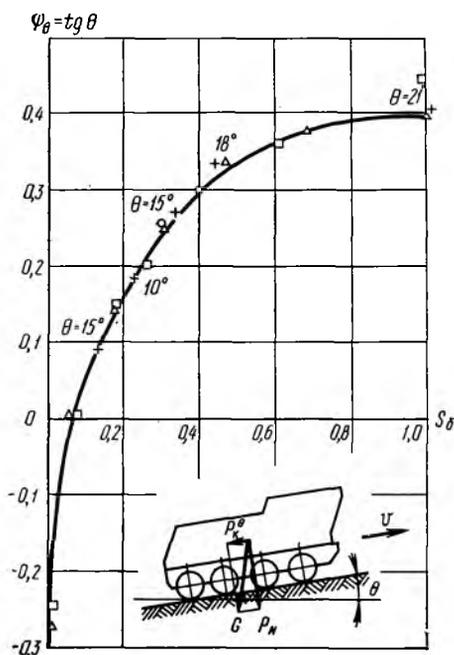


Рис. VII.10 Результаты сравнительных испытаний масштабной модели и оригинала по изменению коэффициента удельной силы тяги $\psi_b = P_K^b/P_N$ от величины коэффициента буксования:

□ — оригинал; △ — модель

ний, описывающих процесс, в модели и оригинал. На первом этапе исследований это требование достаточно соблюдать на уровне приближенных механических аналогий. В систему основных определяющих параметров следует вводить параметр, определяющий соответственно гидростатическое давление или разряжение.

В заключение можно сделать вывод, что исследование рабочих процессов, машин, взаимодействующих со средой в особых условиях при значительном гидростатическом давлении и в условиях высокого разряжения, может быть успешно осуществлено на соответствующих физических моделях приближенного типа. При формировании моделируемых объектов необходимо принимать во внимание требование, касающееся тождественности уравне-

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ МЕТОДАМИ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

§ VIII.1. УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОДЕЛЕЙ

Качество дорожно-строительных машин, построенных с учетом реализации научно-технических достижений, а также машин традиционного типа во многом определяется совершенством металлоконструкций машин. Разработка и развитие методов расчета на базе математического моделирования и реализации машинных программ на ЭВМ открывают широкие перспективы совершенствования металлоконструкций и методов их расчета и проектирования. Однако экспериментальное исследование металлоконструкций и отдельных узлов, включая важный этап проверки полученных машинных решений до изготовления опытного образца машины натуральных размеров, представляет группу задач, имеющих большое научное и практическое значение. Число работ, содержащих анализ подобия или использующих результаты этого анализа при расчетах прочности, велико. Известны многочисленные примеры и систематизированные данные по использованию моделирования при комплексном исследовании металлоконструкций мощных гидротурбин и тяжелых прессов, динамической прочности судового оборудования, прочности металлургических машин, металлоконструкций сельскохозяйственных машин [5] и др. Эти исследования явились основой для разработки методов физического моделирования металлоконструкций дорожно-строительных машин.

Условия подобия работы металлоконструкции при изучении ее напряженного состояния следует находить с использованием дополнительного положения о подобии сложных систем. Металлоконструкцию рассматривают как совокупность отдельных подсистем (балки, стержни, соединения, обшивка, сосредоточенные массы и упругие опоры). Из уравнений напряженного состояния металлоконструкции следует система инвариантов, включающая ряд безразмерных комбинаций, определяющих механическое подобие упругих тел, в форме критериев динамического подобия:

$$\varepsilon, \mu, \frac{\sigma}{E}, \frac{f}{l}, \frac{p}{E}, \frac{\rho l g}{E}, \frac{t^2 E}{\rho l^2}$$

Если объемными силами являются силы тяжести (наличие ускорения свободного падения g) и силы, вызванные неравномерным перемещением тел (наличие ускорения a), а поверхностными — сосре-

доточенные внешние нагрузки P , то критерии динамического подобия принимают вид:

$$\varepsilon, \mu, \frac{\sigma l^2}{P}, \frac{f}{l}, \frac{P}{El^2}; \frac{\rho l g}{E}, \frac{\rho l a}{E}, \frac{t^2 E}{\rho l^2}.$$

Определяющими критериями в этом случае будут:

$$\Pi_1 = \frac{P}{El^2}; \quad \Pi_2 = \frac{\rho l g}{E}; \quad \Pi_3 = \frac{\rho l a}{E};$$

$$\Pi_4 = \frac{t^2 E}{\rho l^2}; \quad \Pi_5 = \mu.$$

Принимая в качестве независимых масштабов геометрического подобия k_l , масштаб модуля упругости k_E и плотности k_ρ , для производных получаем следующие ограничения:

$$k_P = k_E k_l^2; \quad k_g = k_E k_\rho^{-1} k_l^{-1}$$

$$k_l \sqrt{\frac{k_g k_l^2}{k_E}}; \quad k_\mu = 1.$$

Моделирование внешних сил и скорости процесса не представляет затруднений. Равенство единице масштаба ускорений свободного падения при условии выполнения модели и натуры из одного и того же материала возможно при совпадении их линейных размеров, что исключает моделирование. Одно из возможных решений — применение эквивалентных материалов. Для модели и натуры из разных материалов при $k_g = 1$ накладывается условие $k_E = k_l k_\rho$. Если оно не выполняется, то необходимо использовать центробежное моделирование.

Однако особенности ряда рассматриваемых машин позволяют проводить моделирование прочности их металлоконструкций не только при уменьшении линейных размеров моделей и сохранении гравитационного масштаба, но и при сохранении физической природы явления в целом. Это определяется тем, что несущие элементы (балки и тонкостенные стержни) составляют не более 20—25% полной массы машины, и напряженное состояние металлоконструкции определяется весовыми и инерционными нагрузками, относящимися к сосредоточенным массам (в данном случае — это двигатели, рабочие органы, транспортирующие устройства, ковши и т. д.). Названные массы можно моделировать без соблюдения критериев подобия Π_2, Π_3, Π_4 , т. е. пренебрегая весом элементов металлоконструкции. При необходимости масштаб весовых и инерционных нагрузок, обусловленных этими массами, должен равняться масштабу внешних сил, на который накладывается ограничение $k_P = k_E k_l^2$ и который при идентичности материалов несущих элементов модели и натуры равен квадрату геометрического масштаба.

Масштаб сосредоточенных масс находят из критериев Фруда и Коши:

$$\Pi_{Fr} = \frac{P_a}{P_g} = \frac{ma}{mg}; \quad \Pi_{Co} = \frac{P_a}{P_\sigma} = \frac{ma}{\sigma l^2},$$

где P_a , P_g — инерционные и весовые нагрузки; P_σ — сила упругости; m — сосредоточенная масса; σ — компонент напряжения в несущих элементах.

Критерий Фруда требует равенства масштабов ускорений тел и свободного падения, т. е. $k_a = k_g$ и, следовательно, $k_a = 1$.

Критерий Коши при $k_g = 1$ определяет масштаб сосредоточенных масс $k_m = k_l^2$.

Масштаб времени процесса находят из критерия Фруда:

$$\Pi_{Fr} = \frac{l}{gt^2}; \quad \left(\frac{v^2}{gl} \right); \quad k_t = \sqrt{k_l}.$$

Рассмотренные положения иллюстрируют один из простейших примеров физического моделирования металлоконструкций дорожно-строительных машин с указанными выше ограничениями (табл. VIII.1).

Таблица VIII.1

Условия приближенного физического моделирования металлоконструкций и формулы перехода от параметров модели к параметрам оригинала

Наименование параметров	Масштаб	Формулы перехода от параметров модели к параметрам оригинала
Линейные размеры конструкции	k_l	$l_{II} = l_{IM} k_l$
Массы технологических узлов, сосредоточенные массы	$k_m = k_l^2$	$m_{II} = m_{IM} k_l^2$
Жесткость опор	$k_C = k_l$	$C_{II} = C_{IM} k_l$
Внешние силы	$k_P = k_l^2$	$P_{II} = P_{IM} k_l^2$
Время	$k_t = k_l^{1/2}$	$t_{II} = t_M k_l^{1/2}$
Скорость	$k_v = k_l^{1/2}$	$v_{II} = v_M k_l^{1/2}$
Ускорение	$k_a = 1$	$a_{II} = a_M$
Расстояние между неровностями	$k_q = k_l$	$q_{II} = q_{IM} k_l$
Материал модели	$k_\mu = 1; \quad k_E = 1$	$\mu_{II} = \mu_M; \quad E_{II} = E_M$
Деформация	$k_\varepsilon = 1$	$\varepsilon_{II} = \varepsilon_M$
Перемещения	$k_u = k_l$	$u_{II} = u_M k_l$
Напряжения	$k_\sigma = 1$	$\sigma_{II} = \sigma_M$

Дальнейшее уточнение и развитие условий физического моделирования осуществляют расчленением металлоконструкции на отдельные подсистемы, которые можно описать известными соотношениями с требуемой степенью точности. В качестве таких подсистем

рассматривают балки, тонкостенные стержни, разъемные и неразъемные соединения, обшивки, сосредоточенные массы и упругие опоры.

При установлении подобия тонкостенных стержней в общем случае нагружения: 1. Линейный масштаб выбирают произвольно. Выбор масштаба обусловлен сложностью и размерами натурного элемента, возможностью просто и с достаточной точностью изготовить его модель, применяемыми измерительными приборами и удобством проведения испытаний в лаборатории, а также требуемой точностью моделирования.

2. Материал моделей выбирают на основании ряда положений, которые следуют из задачи или анализа условий подобия $k_E = 1$; $k_\rho = 1$.

3. Остальные масштабы определяют на основании соотношений:

$$k_p = k_l^2; \quad k_m = l_l^3; \quad k_q = k_l; \quad k_\tau = 1; \quad k_y = k_l.$$

Колебания стержней рассматривают при следующих допущениях [5]. Масса стержней равномерно распределена по длине, ось стержня является линией центров тяжести его сечений, в положении равновесия ось стержня представляет собой прямую; амплитуда колебаний невелика — постоянно сохраняется пропорциональность между силами упругости и отклонениями стержня от положения равновесия. Критерии подобия определяют соотношение между масштабом времени и масштабом линейных размеров при свободных колебаниях стержней $k_t = k_l$. Система насыщена сосредоточенными массами; массой стержней металлоконструкции пренебрегают; простейшие упругие системы выделяют из общей системы, а их связи с отброшенной системой заменяют условиями закрепления, сформулированными в виде граничных условий.

Масштаб времени при свободных колебаниях одномассовых систем определяют по соотношению $k_t = \sqrt{k_l}$

Следовательно, при рассмотрении подобия колеблющихся однородных стержней постоянного сечения и стержней, несущих сосредоточенные массы, масштабы времени несовместимы. Минимум сосредоточенной массы, при котором можно было бы пользоваться последним соотношением, определяют экспериментально. Полнота условий подобия работы стержней требует рассмотрения граничных условий, что выражается в соответствующем устройстве опорных закреплений, которые зависят от конструкции соединения стержней друг с другом. Условия подобия при этом определяются критериями подобия для соединений.

Динамические нагружения элементов и их моделей дополняют сравнительные исследования напряженного состояния реальных элементов и их моделей при действии статических нагрузок. Эти исследования заключались в анализе свободных колебаний элементов, несущих сосредоточенные массы, и без них. Как следует из рис. VIII.1, зависимость частоты свободных колебаний тонкостенного стержня от сосредоточенной массы, закрепленной на нем, представляет собой кривую, левая ветвь которой пересекает ось

ординат в точке, соответствующей свободным колебаниям однородного стержня, а правая асимптотически приближается к прямой, параллельной оси абсцисс. На графике приведены частоты свободных колебаний моделей, пересчитанных на колебания натурального образца с помощью зависимости $k_l = \sqrt{k_l}$. Ординаты левых ветвей кривых свободных колебаний моделей больше ординат левых ветвей кривых свободных колебаний натуре. Кривые пересекаются и на некотором участке расположены близко друг к другу.

Вид кривых и характер пересечения идентичны для элементов всех исследуемых типоразмеров и не зависят от граничных условий. Исследованиями установлено, что при моделировании свободных колебаний тонкостенных элементов, несущих сосредоточенные массы, можно пользоваться соотношением $k_l = \sqrt{k_l}$ уже в том случае, когда сосредоточенные массы достигают 35—45% полной массы подсистемы. Ошибки в оценке свободных колебаний реальных образцов по результатам моделирования не превышают 12—15%.

В металлоконструкциях машин применяют в основном два типа соединений элементов: разъемные — резьбовые и неразъемные — сварные. Анализ условий прочности элемента разъемного резьбового соединения, например болта (винта) для различных расчетных случаев, выполняют на основании общеизвестных зависимостей, которые дают следующие критерии подобия:

$$\Pi_d = \frac{P}{\sigma_p d_1^2}; \quad \Pi_h = \frac{P}{\sigma_{cm} d h};$$

$$\Pi_{\tau_c} = \frac{P}{\tau_c d_1^2}; \quad \Pi_Q = f \frac{Q_0}{\sigma_p d_1^2}; \quad \Pi_f = f,$$

где P , Q_0 — действующее усилие и сила затяжки; τ_c , σ_p , σ_{cm} — допустимые напряжения при срезе, растяжении и смятии; d и d_1 — диаметр болта и внутренний диаметр резьбы; h — высота поверхности смятия; f — коэффициент трения.

Так как в рассматриваемом случае масштабы напряжений среза,

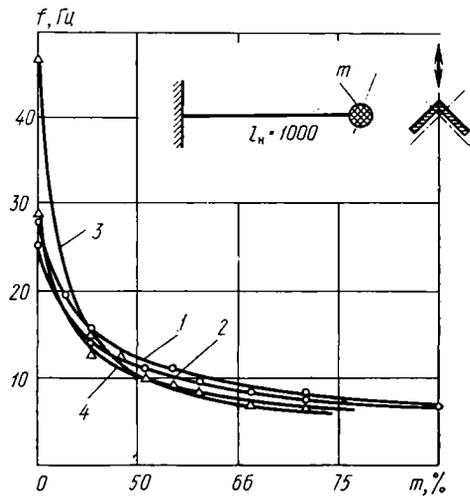


Рис. VIII.1. Зависимость частоты колебания стержня f от значения сосредоточенной массы m ($k_l = l_n/l_m$; $k_m = m_n/m_m = k_l^2$; $k_f = f_n/f_m = 1/\sqrt{k_l}$):
1 — теоретическая кривая; 2 — натуральный образец;
3 — модель, $k_l = 5$; 4 — модель, $k_l = 1,25$

растяжения и смятия одинаковы и равны единице, зависимость для масштаба линейных размеров болтов, стержней и действующих усилий следующая:

$$k_p = k_d^2 = k_{d_1}^2 = k_l^2.$$

Условия подобия группы резьбовых соединений определяют помимо указанных зависимостей дополнительными критериями в виде симплексов:

$$t_\delta/d; \delta_1/\delta_2; \delta/d; \delta/L;$$

где t_δ — шаг болта; d — диаметр болта; δ_1, δ_2 — толщина соединяемых элементов; δ, L — приведенные толщина и ширина нахлестки соединяемых элементов.

Условие подобия сварных соединений, выполненных без подготовки кромок, следует из рассмотрения зависимостей, определяющих прочность валиковых (угловых) швов, и зависимостей, определяющих геометрические параметры соединений в целом:

$$\Pi_1 = \frac{kl\tau'}{P},$$

где k — катет шва; l — длина шва; τ' — напряжение наплавленного металла при срезе; P — действующее усилие.

Критерии, определяющие геометрические параметры соединений, составляют в виде симплексов для каждого конкретного вида соединений. Условия подобия для моделирования опор находят в первом приближении из анализа дифференциального уравнения свободных колебаний системы с одной степенью свободы без учета сопротивлений. Уравнение свободных колебаний дает критерий подобия $m/(t^2 C_{ш})$.

При выполнении условия $k_{ш} = k_l^2$ ограничение на масштаб радиальной жесткости шины определяется выражением $k_{C_{ш}} = k_l$.

Изготовление элементов и соединений моделей. Материал и конструкцию модели выбирают на основании требований, следующих из критериев подобия. Предпочтение обычно отдают стали, так как она обеспечивает идентичность упругих постоянных μ, E, G, g механических характеристик материалов модели и натуры и низкую стоимость модели.

Тонкостенные стержни открытого профиля готовят гибкой, а стержни замкнутого профиля — соединением с помощью газовой сварки нескольких элементов открытого профиля. Неразъемные соединения изготавливают с применением специальных видов сварки с параметрами швов в масштабе изготовления модели, а разъемные резьбовые соединения — с применением мелких болтов в таком же масштабе. Вид и способ крепления обшивки к каркасу остаются такими же, как и в натурной конструкции.

Технологические узлы, весовые и инерционные нагрузки, которые определяют напряженное состояние несущих элементов, выполняют в виде сосредоточенных масс. Координаты опор и центров тя-

жести выполняют в масштабе изготовления модели. Ограничения на размеры элементов, моделирующих массу, на основании соотношения $k_m = k_l^2$ и требования по подобию координат опор и центров тяжести обуславливают выполнение макетов соответствующих узлов в виде отливок из свинца.

Модели тонкостенных элементов замкнутого профиля — квадратные, прямоугольные, треугольные и трубы (бесшовные и электросварные) — изготавливают соединением с помощью газовой сварки нескольких элементов открытого профиля. Систематические ошибки, которые сопутствуют в процессе изготовления моделей, являются следствием неполного геометрического подобия гнутых модельных профилей прокатным натурным, случайные ошибки являются следствием погрешностей толщины материала, размера заготовки, радиуса и угла гибки и сопутствуют изготовлению элементов всех типов. Систематические ошибки необходимо учитывать заранее и соответствующими приемами уменьшать. Если все параметры модели швеллера, выполненной в масштабе $k_l = 5$, высоту стенки, ширину полки и толщину стенки уменьшить согласно масштабу, то ее момент сопротивления в пересчете на натурный, как следует из табл. VIII.2, будет значительно отличаться от последнего. Уменьшить это несоответствие можно несоблюдением масштабов: высоты k_h , ширины k_b , толщины стенки k_δ .

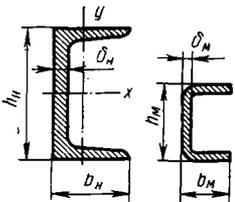
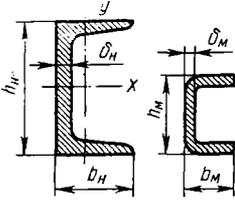
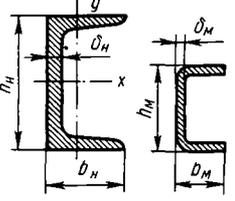
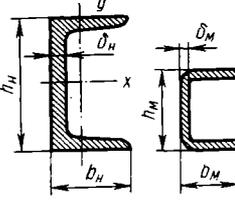
Однако два первых масштаба не рекомендуется изменять, так как их несоблюдение приводит к искажению соединения элементов и узлов и влечет за собой изменение характера работы элементов и конструкции. Целесообразно при изгибной и крутильной деформации осуществлять варьирование толщины стенки. Это позволяет при подобию внешнего контура профиля сечения модели внешнему контуру профиля сечения оригинала не только приблизить к друг другу значения моментов сопротивления модели и оригинала, но и сохранить, что очень важно, равенство отношений изгибной и крутильной жесткости. При 5-м классе точности изготовления моменты сопротивления моделей углового проката отличаются от натуральных в среднем на 8—10%.

§ VIII.2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ НА МОДЕЛЯХ

При моделировании наибольшее влияние на изменение условий трения в элементах разъемных соединений и последующее перераспределение напряжений оказывает различие материалов модели и натурального образца. Различия напряжений для отдельных элементов пластмассовой и металлической моделей траверсы пресса составляет от 20 до 250% [5].

Оценено влияние чистоты сопрягаемых поверхностей на условия работы соединения и напряженность его элементов. Модели рам были выполнены в масштабе $k_l = 5$ с различной высотой микронеровностей сопрягаемых поверхностей: 1,5—2 мкм ($k_l \approx 5$), 4—6 мкм ($k_l \approx 2$), 15—20 мкм ($k_l \approx 1$). Все остальные соотношения при моделировании отвечали критериям подобия. Установлено, что при

Моменты сопротивления элементов металлоконструкции при моделировании

Модель швеллера	Размеры модели	$\frac{W_H}{W_M}$ (xx)	$\frac{W_H}{W_M}$ (yy)
	$h_M = h_H k_l^{-1}$ $b_M = b_H k_l^{-1}$ $\delta_M = \delta_H k_l^{-1}$	1,39	1,04
	$h_M > h_H k_l^{-1}$ $b_M = b_H k_l^{-1}$ $\delta_M = \delta_H k_l^{-1}$	1,20	1,10
	$h_M = h_H k_l^{-1}$ $b_M > b_H k_l^{-1}$ $\delta_M = \delta_H k_l^{-1}$	1,22	1,02
	$h_M = h_H k_l^{-1}$ $b_M = b_H k_l^{-1}$ $\delta_M > \delta_H k_l^{-1}$	1,12	0,94

Примечание. W_H и W_M — моменты сопротивления натуральных и модельных элементов.

моделировании масштаб высоты микронеровностей сопрягаемых поверхностей можно выбирать в диапазоне от единицы до масштаба изготовления модели. Средние значения для исследуемых систем должны быть не менее 0,85.

Подобие неразъемных сварных соединений при моделировании определяется при тождественности материалов геометрическим подобием параметров шва и узла в целом.

Технологические узлы моделируют в виде сосредоточенных масс, масштаб массы которых равен квадрату линейного масштаба. Координаты центров тяжести и точек крепления узлов к несущим элементам выполняют в масштабе изготовления модели. Такие ограничения на массу технологических узлов и их размеры требуют выполнения сосредоточенных масс на моделях из материалов с большой плотностью. Приемлемым материалом является свинец. Упругими опорами моделей так же, как и натуральных образцов, являются колеса с пневматическими шинами. Жесткостные и геометрические параметры этих колес должны быть выполнены в масштабе изготовления модели. При наличии колес с соответствующими геометрическими параметрами подбор необходимой жесткости легко осуществляется изменением давления воздуха в шине или введением пружинных амортизаторов. При тщательном контроле параметров модели универсальными измерительными инструментами обеспечивается достаточная для практических целей точность. Целесообразно делать размеры модели возможно меньшими. При большой разнице в размерах модели и натуре наблюдаются расхождения, обусловленные влиянием масштабного эффекта. Эти расхождения зависят от конструкции машины, свойств материала, технологии изготовления и ряда других причин. Экспериментально обоснованным для исследований работы металлоконструкций является масштаб $k_l \leq 5$.

Тензодатчики сопротивления с узкой решеткой целесообразно использовать как наиболее эффективные для замера напряжений в несущих элементах конструкций моделей. Необходимы тензодатчики с шириной решетки и базой, значения которых близки в масштабе изготовления модели к тензодатчикам, используемым при испытаниях реальных образцов. Важно при этом обеспечить подобие ширины датчиков.

Модель металлоконструкции самоходного шасси СШ-100 была изготовлена в масштабе $k_l = 5$. Упругие элементы подвески выполнили в масштабе $k_{C_{III}} = k_l$. Рессоры и подрессорники заднего моста выполнены из рессорной стали в виде единичных балок равного сопротивления с длиной и стрелой прогиба в масштабе изготовления модели. Упругие элементы передней подвески выполнены в виде цилиндрических пружин с размерами и динамической характеристикой в масштабе изготовления модели.

Анализ результатов исследования рамы модели самоходного шасси СШ-100 показал, что напряжение основных элементов при статических нагрузках от веса силового агрегата, кузова и груза составляет не более 35 МПа. Несущая способность этих же элементов в режиме максимальных пиковых перегрузок достаточно высока. Коэффициенты запаса прочности по пределу текучести для самых напряженных участков превышают 2,1. Влияние подрессоривания заднего ведущего моста на напряженность рамы незначительно. Напряженность элементов рамы для идентичных режимов движения модели

при подрессоренном и неподрессоренном заднем мосте примерно одинакова. Расхождения в значении напряжений до $\pm 10-15\%$.

Последующие испытания натурального образца подтвердили достоверность прочностной оценки рамы, сделанной по результатам моделирования. Характер эпюр напряженного состояния рамы для натурального образца и модели идентичен. Коэффициент сходимости напряжений в сходственных точках достаточно высок. Математическое ожидание коэффициента сходимости для загруженного шасси и модели в режиме максимальных пиковых перегрузок

$$k_{\sigma} = \sum_1^n k_{\sigma_i} p_i = 0,83,$$

где $k_{\sigma} = \sigma_{iH}/\sigma_{iM}$.

В заключение главы подчеркнем, что рассмотренные положения позволяют сформулировать условия приближенного моделирования металлоконструкций дорожно-строительных машин при наложении ряда ограничений.

Несущие элементы металлоконструкции модели и металлоконструкции модели в целом должны быть геометрически подобны элементам и металлоконструкции реального образца. Модель должна быть сделана из материала, аналогичного материалу реального образца, и их характеристики μ , E , G , ρ должны быть идентичны. Масса технологических узлов должна быть пропорциональна квадрату линейных размеров. Физическое подобие явления при нагружении несущих элементов инерционными нагрузками осуществляют перемещением модели по маршруту, подобному натурному в масштабе изготовления модели при $k_c = k_l'$. Условия подобия и установленные критерии дают возможность рассчитать параметры модели по известным параметрам оригинала и принятому линейному масштабу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование и модели в системах автоматизированного проектирования. Перспективы использования моделей в технике определяются широким развитием и использованием в народном хозяйстве систем автоматизированного проектирования (САПР). Автоматизированное проектирование в соответствии с ГОСТ 22487—77 представляет собой процесс преобразования описаний объекта и алгоритма его функционирования, а также представления описания на различных языках, осуществляемый посредством взаимодействия («творческого диалога») человека и ЭВМ.

Одной из форм завершения реализации такого процесса является разработка комплекта расчетной, чертежно-графической и технологической документации. Создание чертежно-графического образа машины требует составления формального описания объекта, его моделирующего алгоритма. Последний представляет систему математических моделей и ограничений, определяющих все параметры объекта, необходимые и достаточные для составления чертежей его общего вида. Такое описание включает систему уравнений: движения, процесса взаимодействия инструмента со средой и условий однозначности. Условия однозначности состоят из физических характеристик объекта, геометрических параметров, определяющих его форму и размеры; начальных и граничных условий, а также специальных требований эксплуатации, не вошедших в систему уравнений. Связь между параметрами объекта и условиями эксплуатации устанавливают на основании анализа целевой функции в виде показателя, определяющего эффективное функционирование машины. Система таких показателей приведена в табл. II.1.

Схемы применения моделей в САПР показаны на рис. 1. При доминировании предметно-математических моделей в системе следует подчеркнуть место и значение физических и комбинированных моделей при формировании новых образцов техники в САПР.

Изучение и оценка эффективности научно-технических предложений в системе «среда — машина — оператор» на базе предметно-математического моделирования встречает определенные трудности при математическом описании составляющих подсистем. Особое место занимает разработка модели подсистемы «рабочее оборудование — среда» и оценка ее технико-экономической эффективности. Для систем, содержащих подсистемы, работающие на новых принципах взаимодействия со средой, математическое описание ее функционирования осуществляют путем последовательного деления системы на части и исследования моделей подсистем на частных физических моделях. При реализации новых принципов взаимодействия со средой целесообразно моделировать отдельные системы нового оборудования на физических и физико-математических моделях.

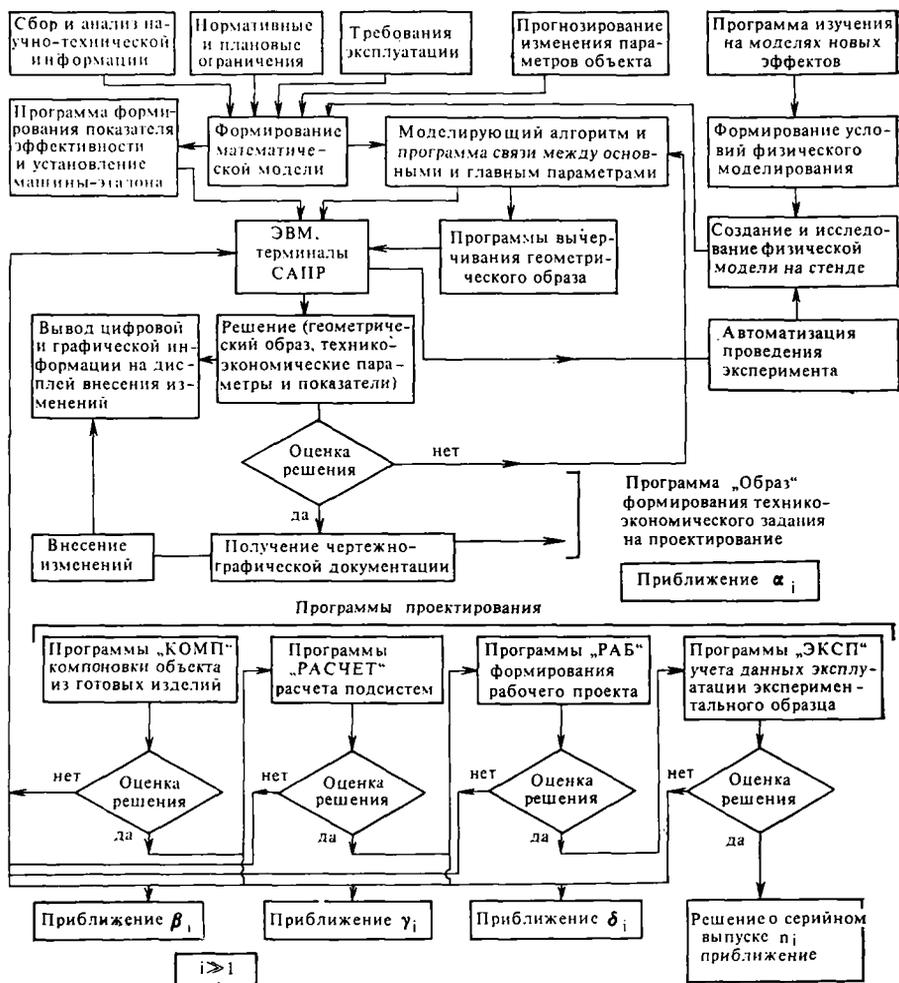


Рис. 1. Система[™]проектирования технического объекта на базе использования САПР в комплексе с физическим моделированием (программа «Комплекс»)

Поиск новых технических решений на основе реализации новых физических эффектов, анализа информации и моделирования систем включает ряд этапов: 1) определяют цели исследования, осуществляют анализ достижений науки и техники, выявляют наиболее перспективные физические эффекты и направления совершенствования машин и методов воздействия их на среду. При формировании цели исследования необходимо описать принцип работы системы, этапы разработки (поисковое исследование, эскизное решение, разработка опытного образца), а также разработку общей структуры показателя оценки эффективности системы и отдельных процессов; 2) устанавливают основные требования, следующие из анализа показателя

телей оценки, и ограничения, накладываемые на систему со стороны технических возможностей и социально-экономических требований; 3) формируют работоспособную математическую или физическую модель (систему моделей), соответствующую характеру объекта и показателю оценки эффективности; 4) анализируют модель; 5) выбирают лучший вариант машины согласно установленному показателю оценки эффективности системы, выявляют области рационального применения и составления практических рекомендаций промышленности; 6) осуществляют контрольную проверку выбранного варианта решений расчета, создают опытный образец и испытывают его в производственных условиях.

В процессе анализа научно-технических предложений с точки зрения развития методов моделирования наиболее важным является третий этап. Представление и исследование системы в виде модели или системы моделей различного вида гарантирует получение достаточно обоснованного решения.

Основные положения, определяющие условия и методы подобия, математического, физического и комбинированного моделирования рабочих процессов и подсистем дорожных машин для исследования традиционного оборудования, а также ряда процессов, основу которых составляют новые методы воздействия на среду, разработаны с достаточной полнотой. Подобие процессов взаимодействия рабочего оборудования определяется основными вариантами подобия, соответствующие критерии которых приведены в табл. IV.3. Возможно моделирование процесса в условиях приближенного подобия систем по ограниченному числу критериев при соответствующей поправке на несоблюдение подобия. В качестве физической модели можно использовать рабочее оборудование и существующие образцы машин малых размеров. Основные условия и методы испытания в этом случае строятся на базе приближенных моделей с внесением компенсации на несоблюдение доминирующих критериев подобия. Это позволяет проводить испытания с моделями рабочего оборудования в среде естественного состояния.

При проектировании тяжелых машин большой мощности и производительности, машин с новым рабочим оборудованием, а также для проверки патентных решений в условиях, близких к эксплуатационным, методы физического и комбинированного моделирования являются по существу единственными, позволяющими проверить результат машинного решения и экспериментально установить оптимальное значение параметров рабочего оборудования на стадии разработки технического задания и эскизного проектирования машин или рабочего оборудования до изготовления экспериментального образца в металле.

Основные задачи развития методов моделирования процессов взаимодействия рабочего оборудования машин со средой. Круг задач, решаемых методами подобия и физического моделирования в области изучения процессов взаимодействия инструмента землеройной, дорожно-строительной и других типов машин со средой, весьма широк. Отметим, что применение и развитие методов математического, фи-

зического и комбинированного моделирования представляет важное направление в области теории, расчета и исследования машин. Отчетливо проявляются тенденции дальнейшего развития методов моделирования и приемов исследований на базе использования моделей различного вида. Прежде всего это касается разработки методов моделирования процессов взаимодействия со средой инструментов с использованием новых физических эффектов (газодинамических при сверхкритических скоростях движения газа, колебаний высоких энергий, сверхвысоких давлений, высоких рабочих скоростей и т. п.).

Важной задачей является развитие методов моделирования подсистем «рабочий орган — среда» при работе на космических объектах, на дне морей и океанов. Большой интерес представляет развитие методов формирования и приемов исследования с применением комбинированных физико-математических моделей машины и комплексов как динамических систем «среда — рабочее оборудование — привод — движитель — среда», подверженных случайным возмущениям и прежде всего для исследования новых рабочих органов типа манипуляторов и дорожно-строительных машин-роботов. Требуют дальнейшего развития методы разработки и создания автоматизированных моделирующих стендов, обеспечивающих управление и обработку результатов в ходе процесса исследования.

Важную группу задач составляют вопросы применения методов подобия и моделирования для анализа информации о технических параметрах машин с целью определения образцов с оптимальным значением параметров, выявления и прогнозирования направлений их развития. Большой производственный интерес представляет развитие методов моделирования для решения задач по испытанию машин и, в частности, их основных подсистем, на надежность и долговечность, а также вопросов оценки технического уровня и конкурентоспособности машин. Это связано прежде всего с развитием статистических методов моделирования в комплексе с физическим моделированием соответствующей подсистемы машины.

Перспективным и актуальным направлением является развитие методов подобия и моделирования применительно к решению задач формирования чертежей общего вида машин и узлов, в том числе с использованием новых физических эффектов в системах автоматизированного проектирования. Интересными задачами этого направления являются разработка вероятностных методов определения возможных конструктивных решений с учетом условий прогнозирования их развития, эксплуатации и технологических процессов машин, а также создание гибридных моделей физических и предметно-математических и их использование в структуре систем автоматизированного проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория подобия и размерностей. Моделирование /Алабужев П. М., Геронимус В. Б., Минкевич Л. М. и др. М., 1968.
2. Баловнев В. И. Физическое моделирование резания грунтов. М., 1969.
3. Бакатин Ю. П. Экспериментальное исследование процесса сдвига бетонной смеси рабочим органом при наложении звуковых колебаний. М., 1978 (Тр. МАДИ, вып. 148).
4. Беккер М. Г. Введение в теорию систем «местность — машина». М., 1973.
5. Бондаренко Г. И. Исследование металлоконструкции сельскохозяйственных машин на физических моделях. — В сб.: Исследование рабочих органов сельскохозяйственных машин. М., 1970.
6. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М., 1968.
7. Веников В. А. Теория подобия и моделирования. М., 1976.
8. Веников Г. В. Подobie стохастически определенных физических систем. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1968, № 1.
9. Ветров Ю. А. Резание грунтов землеройными машинами. М., 1971.
10. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов М., 1971.
11. Гухман А. А. Введение в теорию подобия. М., 1973.
12. Дорожные машины: Ч. 1. Машины для земляных работ /Алексеева Т. В., Артемьев К. А., Войцеховский Р. И., Ульянов Н. А. М., 1972.
13. Ермилов А. Б. Экспериментальное исследование модели скрепера с непрерывной подачей сжатого воздуха внутрь ковша. — В сб.: Улучшение использования дорожных машин. М., 1975 (Тр. МАДИ, вып. 97).
14. Иофик В. З. Исследование условий приближенного физического моделирования процессов резания мерзлых грунтов. М., 1975 (Тр. МАДИ, вып. 97).
15. Инструкция по определению экономической эффективности новых строительных, дорожных, мелиоративных, машин противопожарного оборудования, лифтов, изобретений и рационализаторских предложений. М., 1978.
16. Комир В. М. Моделирование разрушающего действия взрыва в горных породах. М., 1972.
17. Моделирование проявлений горного давления /Кузнецов Г. Н., Будько М. Н., Васильев Ю. И. и др. Л., 1968.
18. Кудайбергенев Р. К. Производительность колесных и гусеничных бульдозеров. М., 1973 (ЦНИИТЭстройдормаш, вып. 6).
19. Результаты исследований физико-механических свойств образца лунного грунта в исследовательском боксе и в среде азота /Громов В. В., Леонович А. К., Дмитриев А. Д. и др. — В сб.: Лунный грунт из Мира Изобилия. М., 1974.
20. Машины для земляных работ /Зеленин А. Н., Баловнев В. И., Кероз Н. П., М., 1975.
21. Назаров А. Г. О механическом подобии твердых деформированных тел (к теории моделирования). Ереван, 1965.
22. Об одном способе моделирования крупных взрывов на выброс. Физика горения и взрыва /Садовский М. А., Адушкин В. В., Родионов В. Н., Старцев Г. Н. — 1967, № 1.
23. Покровский Г. И., Федоров И. С. Центробежное моделирование в горном деле. М., 1969.
24. Растегаев И. К. Показатели, характеризующие сопротивляемость грунтовых сред различного состояния орудиями землеройных машин и установление корреляции между ними. М., 1973 (Тр. ЦНИИЭПсельстроя).
25. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М., 1972.
26. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М., 1960.
27. Федоров Д. И. Рабочие органы землеройных машин. М., 1976.

28. *Хмара Л. А.* Изучение изменения сопротивления копанью грунта отвалом бульдозера с газовоздушной смазкой поверхностей скольжения. М., 1974 (Тр. МАДИ, вып. 78).

29. *Черкасов И. И., Шварев В. В.* Грунт Луны. М., 1975.

30. *Чижик Е. И.* Исследование процесса разработки грунтов рабочими органами землеройных машин, оборудованных взрывными устройствами, методами физического моделирования. М., 1973 (Тр. МАДИ, вып. 54).

31. *Ярлыков В. И.* Условия физического моделирования процесса взаимодействия колеса с рыхлым грунтом. М., 1974 (Тр. МАДИ, вып. 78).

32. *Schuring D. S.* Scale models in engineering. Pergamon press. New York, 1977.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Глава I

Методы моделирования в системе исследования взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин

- § I.1. Системный анализ и методы моделирования. 5
§ I.2. Классификация моделей 11
§ I.3. Основные положения теории подобия и моделирования, критерии подобия 17

Глава II

Модели показателей оценки эффективности рабочих процессов, машин и комплексов

- § II.1. Формирование системы математических моделей для оценки эффективности и условия применения моделей различного уровня 32
§ II.2. Вероятностные модели параметров, определяющих условия эксплуатации машин 45
§ II.3. Определение технического уровня параметров и прогнозирование развития дорожно-строительных машин методами подобия и моделирования 53

Глава III

Математические модели для анализа эффективности процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин

- § III.1. Система уравнений механики сплошной среды как приближенная математическая модель процесса взаимодействия рабочего органа со средой 74
§ III.2. Реологические модели подсистемы «рабочий орган машины — среда» 80
§ III.3. Приближенные математические модели систем типа «среда — рабочий орган — движитель — среда» 87
§ III.4. Процессы взаимодействия рабочих органов землеройных машин с грунтом и модели их описания. 93
§ III.5. Математические модели для анализа эффективности взаимодействия рабочего органа с грунтом, основанные на положениях теории предельного состояния. 128

333

Г л а в а IV

Методы приближенного физического моделирования рабочих процессов дорожно-строительных машин

- | | | |
|---------|--|-----|
| § IV.1. | Условие приближенного моделирования процессов взаимодействия рабочих органов со средой. | 136 |
| § IV.2. | Варианты моделей и вопросы установления областей доминирования критериев подобия | 143 |
| § IV.3. | Приближенное моделирование без изменения свойств среды с компенсацией несоблюдения критериев подобия. | 145 |
| § IV.4. | Моделирование без изменения свойств среды с использованием моделей разного масштаба | 154 |
| § IV.5. | Вероятностные модели процессов взаимодействия рабочих органов со средой. Оценка ошибки моделирования и ограничение линейных размеров физической модели | 162 |
| § IV.6. | Условия построения комбинированных физико-математических моделей | 176 |
| § IV.7. | Эквивалентные материалы для физического моделирования рабочих процессов при механическом воздействии на среду. | 184 |

Г л а в а V

Вопросы организации исследований рабочих процессов и машин методами моделирования

- | | | |
|--------|---|-----|
| § V.1. | Выбор моделей в процессе исследования, основные этапы исследований с моделями | 194 |
| § V.2. | Стенды для моделирования | 202 |
| § V.3. | Обработка и планирование экспериментальных исследований при моделировании | 207 |
| § V.4. | Технико-экономическая эффективность моделирования | 214 |

Г л а в а VI

Исследование рабочих процессов дорожно-строительных машин на физических моделях

- | | | |
|---------|---|-----|
| § VI.1. | Исследование на моделях процессов механического воздействия рабочего органа машины на обрабатываемую среду. | 218 |
| § VI.2. | Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов, оборудованных газовой смазкой. | 238 |
| § VI.3. | Моделирование процессов разрушения грунтов потоком сжатого газа | 265 |
| § VI.4. | Исследование моделей пневморазгрузчиков с дисковым заборным устройством | 279 |
| § VI.5. | Моделирование процессов при наложении на рабочее оборудование колебаний высокой частоты. | 282 |
| § VI.6. | Моделирование процессов уплотнения | 287 |
| § VI.7. | Моделирование процессов взаимодействия рабочих органов | |

специальных машин с бытовыми и промышленными твердыми отходами	292
§ VI.8. Моделирование процессов взаимодействия двигателя с грунтом.	296

Г л а в а VII

Приближенное моделирование систем, работающих в особых условиях

§ VII.1. Моделирование подсистем «грунт — рабочий орган — двигатель — грунт» в условиях работы под водой.	301
§ VII.2. Моделирование подсистем «грунт — рабочий орган — двигатель — грунт» в условиях эксплуатации на естественном спутнике Земли	309

Г л а в а VIII

Исследование работы металлоконструкций методами физического моделирования

§ VIII.1. Условия моделирования металлоконструкций и технология изготовления моделей	317
§ VIII.2. Исследование работы металлоконструкций на моделях.	323
Заключение	327
Литература	331

Владилен Иванович Баловнев

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
СО СРЕДОЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

Заведующая редакцией Акатова В. Г.
Редактор Лохова Л. Б.
Младший редактор Коцбергина Ю. П.
Художественный редактор Дурасова Т. А.
Технический редактор Родичева Р. С.
Корректор Орлова В. А.

ИБ № 2126

Изд. № Стр-352. Сдано в набор 19.06.80. Подп. в печать 02.03.81. Т-00890
Формат 60×90^{1/16}. Бум. тип. № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая.
Объем 21 усл. печ. л. 21,25 усл. кр. отт. 21,40 уч.-изд. л. Тираж 5000 экз.
Зак. № 566. Цена 1 руб.

Издательство «Высшая школа», Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14.
Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете
СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.