

Министерство образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

Булатов Г.Я.

Введение в общую теорию технологий

Учебное пособие

Санкт-Петербург
Издательство СПбГУ
2002

Министерство образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

Булатов Г.Я.

ВВЕДЕНИЕ В ОБЩУЮ
ТЕОРИЮ ТЕХНОЛОГИЙ
(НА ПРИМЕРЕ СТРОИТЕЛЬСТВА)

Учебное пособие

Санкт-Петербург
Издательство СПбГПУ
2002

ИСТОРИЯ УЧИТ
(Чтобы знать предмет, надо знать его историю)

Техника и методы производства находятся в бурном движении.
Они скоро устаревают и заменяются новыми, более прогрессивными.
Н.Н. Семенов

Наука всегда должна работать в запас, впрок,
и только при этом условии она будет находиться
в естественных для нее условиях.
С.И. Вавилов

Из всех услуг, которые могут быть оказаны науке,
введение новых идей является самой важной.
Дж. Дж. Томсон

В науке должно искать идеи. Нет идеи, нет и науки.
Знание фактов только потому драгоценно,
что в фактах скрываются идеи;
факты без идей – сор для головы и памяти.
В.Г. Белинский

Все наше достоинство заключено в мысли.
Не пространство и не время, которое мы не можем заполнить,
возвышают нас, а именно сама мысль.
Будем же учиться хорошо мыслить:
вот основной принцип морали.
Б. Паскаль

УДК 621.87:624.132:69.057:626.002:66.0(075.8)
Б 907

Рецензенты:

Доктор техн. наук, профессор, декан ИСФ СПбГТУ А.И. Альхименко.

Доктор техн. наук, профессор кафедры «Гидротехнические сооружения ИСФ СПбГТУ С.А. Кузьмин.

Старший научный сотрудник, канд. техн. наук (ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева) В.Г. Радченко.

Булатов Г.Я. **Введение в общую теорию технологий** (на примере строительства): Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. 174 с.

Пособие предназначено для студентов вузов всех специальностей по направлению «Строительство» и для студентов всех технологических специальностей по другим направлениям высшего образования. Оно будет полезно, по нашему мнению, инженерам, не только студентам и аспирантам технических вузов, но и инженерам-строителям, эксплуатационникам, проектировщикам и исследователям во многих отраслях, имеющих в наименовании ключевые слова «технология» и «строение». С основами новой классификации технологий, наверное, будет интересно познакомиться и любому современному образованному человеку.

© Булатов Г.Я., 2002.

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2002.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Введение	9
Выбор метода исследования	13

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	25
1.1. Новая обобщенная классификация технологий.....	25
1.1.1. Классификация в общей постановке.....	25
1.1.2. Классификация строительных технологий	18
1.1.3. Краткая характеристика классов.....	19
1.1.4. Понятие о субъекте технологии	20
1.2. Общие закономерности технологической науки.....	21
1.3. Пути развития технологий и технических систем.....	24
1.4. Главные этапы проектирования технологий.....	27
1.5. Обобщенные критерии оптимального выбора технологий и машин	30
1.6. Основы расчета числа машин	33
1.7. Основные траектории движения машин и их рабочих органов.....	34
1.8. Схемы распределения материалов по объектам	38
ГЛАВА 2. ОБОБЩЕННЫЕ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МАШИН.....	41
2.1. Общие положения.....	41
2.2. Продукция одного цикла.....	45
2.3. Продолжительность (время) цикла	46
2.4. Коэффициент сохранности продукции.....	47
2.5. Коэффициент использования времени	49
ГЛАВА 3. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ I-ГО КЛАССА (УМЕНЬШЕНИЕ МАТЕРИИ)	50
3.1. Структура и особенности технологий I-го класса.....	50
3.2. К оценке усилий резания, развиваемых экскаватором «прямая лопата».....	52
3.3. К расчету усилий резания, развиваемых драглайном	54
3.4. К расчету размеров забоев драглайна.....	57
3.5. Работа многоковшовыми экскаваторами (МКЭ).....	59
3.5.1. Классификация МКЭ.....	59
3.5.2. Некоторые соотношения технологических параметров работы МКЭ	59
3.5.3. Применение метода самообрушения при разработке грунтов.....	61
3.6. Меры повышения производительности экскаваторов	62
3.7. Применение землеройно-транспортных машин	63
3.7.1. Расчет усилий резания, развиваемых скрепером.....	63
3.7.2. Схемы работы и оценка рабочих усилий бульдозера	65
3.7.3. Пути повышения производительности землеройно-транспортных машин....	66
3.8. К расчетам производительности отдельных технологий I-го класса	68
3.8.1. Проходка туннелей	68
3.8.2. Уборка камней с поля.....	69
3.8.3. Прокладка дрен	71
ГЛАВА 4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ (ЭКСКАВАЦИИ) МАТЕРИАЛОВ	73
4.1. О критериях разрушения материала	73
4.2. Основные представления о резании грунтов	74
4.3. Оценка давления и сопротивления грунта	76
4.4. Влияние износа ножа и крупности частиц грунта на сопротивление резанию.....	79
4.5. Сопротивление прорезанию щели бестраншейным дреноукладчиком.....	80
4.6. Приближенная оценка устойчивости выемки (полости) в грунте	81
4.7. К расчету усилия корчевания деревьев	82

ГЛАВА 5. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ II КЛАССА (НАРАЩИВАНИЕ МАТЕРИИ)	86
5.1. Структура и особенности технологий II-го класса	86
5.2. Основные принципы возведения (созидания) сооружений. Классификация швов.....	87
5.3. К расчету размеров блоков бетонирования из условия надежности технологических швов	88
5.4. Выбор опалубки и уточнение давления бетонной смеси.....	92
5.5. Классификация и выбор соединений в технологиях II класса.....	95
5.6. Влияние технологии строительства на надежность сооружений	98
5.6.1. Швы и неоднородности в сооружениях как показатель неидеальности исполнения	98
5.6.2. Влияние технологии возведения грунтовых плотин на их надежность.....	99
5.7. Некоторые конструктивно-технологические мероприятия по обеспечению качества грунтовых плотин	108
5.8. Технологии возведения промышленно-гражданских сооружений (ПГС).....	110
5.8.1. Сборные ПГС	110
5.8.2. Монолитные ПГС	111
5.9. Спецтехнологии бетонирования.....	112
5.9.1. Классификация спецтехнологий	112
5.9.2. Пример технологии «горячего» раздельного бетонирования	113
5.10. О плановом расположении шламохранилищ.....	113
5.11. Спецтехнологии строительства на шельфе	115
5.11.1. Особенности и тенденции технологий	115
5.11.2. Технологии удержания плавсредств над точкой	117
5.11.3. Технологии соединения сооружений с грунтом дна моря	117
5.11.4. Технологии защиты акватории от волнения	118
ГЛАВА 6. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ III-ГО КЛАССА (ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МАТЕРИИ)	119
6.1. Структура и особенности технологий III-го класса	119
6.2. Обеспечение прочности бетона в экстремальных температурных условиях.....	119
6.2.1. Уравнение теплового баланса	119
6.2.2. Зимние условия	121
6.2.3. Летние условия	121
6.2.4. Холодный бетон.....	122
6.3. Об оптимальной скорости вращения горизонтального барабана смесителя.....	122
6.4. Технологии формования и уплотнения и выбор машин.....	127
6.5. Армирование материалов.....	129
6.6. Свайные технологии	131
6.6.1. Классификация свайных технологий.....	131
6.6.2. Классификация сваепогружателей.....	132
6.6.3. Особенности погружения полых свай	132
6.6.4. Расчет производительности и оптимизация выбора сваепогружателей	133
ГЛАВА 7. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ IV-ГО КЛАССА (ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ МАТЕРИИ).....	138
7.1. Структура и особенности технологий класса IV. Классификация движителей.....	138
7.2. Классификация и выбор кранов	140
7.3. Выбор автомобилей	143
7.4. Выбор технологий строительства каналов в выемке и насыпи.....	143

7.5. Оптимизация некоторых параметров транспортирования грунтов	145
7.5.1. Расчет шага выездов скреперов	145
7.5.2. Расчет оптимальных размеров скреперного отвала	147
7.6. Колесо и почва	147
ГЛАВА 8. К ТЕОРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЯ СО СРЕДОЙ	149
8.1. Общие положения	149
8.2. Взаимодействие в режиме ведомого (свободного) колеса	149
8.3. Взаимодействие в режиме ведущего колеса	151
8.4. Учет явления буксования	153
8.5. К теоретической оценке коэффициента сцепления	152
8.6. Мероприятия по повышению проходимости машин	155
8.7. Практические тяговые расчеты машин	156
ГЛАВА 9. ТЕХНОЛОГИЯ ОТСЫПКИ ГРУНТОВ В ВОДУ	158
9.1. Основы технологии	158
9.2. Оптимизация технологии отсыпки грунтов в воду	159
9.2.1. Расчет основных параметров технологии	159
9.2.2. Назначение требуемой плотности укладки грунта	161
9.2.3. Основы и критерии оптимизации технологии	162
9.2.4. Рекомендации по определению оптимальных параметров технологии из опытной отсыпки грунта	164
9.3. К динамике уровня воды в прудке	165
9.4. К оценке размокания грунтовых комьев	167
9.4.1. Условия и формы размокания комьев	167
9.4.2. К оценке разрушения комьев в идеализированных условиях	168
9.5. Метод заливки экрана плотины в прудок	170
Литература	172

Предисловие

До сих пор учебная литература по дисциплинам «Технологии строительства» отличается преимущественно описательным характером и рецептурностью изложения учебного материала. В ней преобладают качественные характеристики и лишь изредка используются элементарные количественные оценки параметров технологических процессов, основанные на полуэмпирических зависимостях. Содержание состоит из набора множества элементов под названиями «Производство таких-то работ», практически не связанных друг с другом, не объединенных каким-либо стержнем, что существенно затрудняет обучение.

Разумеется, это положение не случайно. Оно прежде всего обусловлено спецификой дисциплины, которую отличает комплексность (полимерность) содержания.

Достаточно отметить, что здесь концентрируются знания дисциплин таких секторов, как все сооружения, все материалы и все строительные машины, включая все виды транспорта, не говоря уже об экономике, экологии и человеческом факторе. Кроме обеспечения прочности и устойчивости сооружений и машин (в каждый момент такого динамичного процесса, каким является строительство) технологю еще нужно знать и теории их разрушения, например, при экскавации и переработке грунтов и скальных пород, демонтаже конструкций и машин и т. д., и т. п.

С другой стороны, «строительное искусство» составляет подавляющую часть человеческой культуры, и здесь цивилизацией накоплены «монбланы» (в основном эмпирической) информации.

В этих условиях выбор содержания дисциплины существенно усложнен. С этими трудностями встретился и автор, начав читать в 1964 г. курс «Производство гидротехнических работ». Накапливавшийся опыт и влияние высокого теоретического уровня научных школ гидротехнического факультета ЛПИ позволили к 1969 г. разработать принципы программы нового курса «Теоретические основы технологии строительства», базирующегося на новой классификации технологий, и решить отдельные задачи оптимизации.

Уже в «Методических указаниях по туннельным работам», изданных в 1970 г., была усилена расчетная часть их содержания [6]. Рекомендации заседания Совета ЛПИ 27.11.78 о введении в технологические курсы раздела «Теоретические основы технологии» укрепили автора в правильности выбранного пути.

К 1979 г. была подготовлена рукопись «Оптимизация некоторых технологических процессов гидротехнического строительства», к 1988 г. – «Основы обеспечения технологической надежности грунтовых плотин», к 1990 г. – «Технология отсыпки грунтов в воду» и «Технология возведения грунтовых плотин». Последняя и была издана в 1994 г. [5].

Опубликованная в 1994 г. работа Н.В. Романенко «Принципы общей теории технологий» [21] показала, что в СПбГАСУ созданию научной классификации технологий придают самое серьезное внимание и добились на этом пути несомненных результатов... К 1995 г. и была закончена подготовка первой редакции рукописи настоящего пособия, в которой автор развивает положения предыдущей работы [5] и обобщает опыт многолетнего преподавания дисциплины «Технология строительства», а также дисциплин: «Соппротивление материалов» и «Основания и фундаменты».

В учебном пособии приведена новая обобщенная классификация технологий, которая позволяет бесконечное их число разделить всего на четыре класса так, что огромное множество технологий одного класса описывается едиными зависимостями, поскольку они обладают существенным родством (одной сутью и знаком) и отличаются лишь количественно,

что позволяет сделать обобщение высокого уровня, значительно сжать необъятную доселе информацию и облегчить обучение технологическим наукам.

Этой же цели подчинены и положения, общие для всех классов технологий: закономерности и пути их развития, критерии выбора машин и траектории их движения, аналитические представления и расчеты, что открывает широкие возможности для дальнейшего творческого развития технологических наук и создания новых технологий и строительных машин.

Значительно развиты, обобщены и уточнены расчеты эксплуатационной производительности машин в технологиях разных классов и приведены пути ее повышения.

Уточнены расчетом и параметры многих технологий: усилия резания грунтов различными машинами, включая учет износа и крупности частиц; сопротивление корчеванию, условия буксования и проходимости машин и пр.

Выделены принципы возведения сооружений; отмечены неидеальности их исполнения и меры по обеспечению их надежности.

Применение модели «грунтовой массы» в технологии бетонов может оказаться весьма перспективным.

Пособие может рассматриваться и как «Теоретические основы строительных технологий» и будет полезно не только студентам, магистрантам и аспирантам технических вузов, но и инженерам, работающим в области проектирования, строительства и эксплуатации сооружений самого широкого круга, а также и в области совершенствования и оптимального использования строительных машин. Автор выражает надежду, что пособие может оказаться полезным и для любого творческого человека, поскольку вся наша жизнь по сути и есть непрерывная цепь выбора и осуществления бесконечного множества технологий.

Автор выражает глубокую благодарность профессору Н.И. Ватину – зав. кафедрой «Технология, организация и экономика строительства» и её сотрудникам: В.И. Телешеву, В.Т. Белоликову, В.М. Галузину, М.В. Комаринскому, В.А. Кукушкину, Н.Б. Колосовой, И.С. Птухиной, А.М. Бондарю, Т.Ф. Морозовой, А.А. Бугаеву, О.О. Осиповой и др., общению и помощь которых неизменно создают творческую атмосферу.

Автор искренне благодарен рецензентам – декану ИСФ профессору А.И. Альхименко, профессору С.А. Кузьмину и старшему научному сотруднику В.Г. Радченко за их труд по просмотру рукописи и ценные замечания.

Особую благодарность автор приносит профессору кафедры «Высшая математика» М.Ф. Романову за моральную поддержку и всестороннюю помощь при подготовке рукописи к изданию и доценту А.В. Ястребову, благодаря высококвалифицированному труду которого рукопись приобрела настоящий вид.

Введение

Однажды добытые наукой положения
вовсе не груда достоверного знания,
снабженного печатью истины,
а непрерывно обновляемый, пополняемый
и пересматриваемый фонд.

В.А. Третьяков

В настоящее время назрела необходимость качественного изменения преподавания дисциплин технологического цикла. Это вызвано общеизвестными положениями, такими как нехватка времени для изложения обширной лавинообразно нарастающей информации по всем вопросам технологии и в то же время необходимость повышения уровня технологического образования современных инженеров и магистров.

Наибольшие успехи в решении указанной проблемы могут быть достигнуты следующими путями:

- 1) систематическим изложением основных общих закономерностей технологии;
- 2) повышением теоретического уровня изложения материала;
- 3) отысканием оптимальных параметров технологических процессов;
- 4) определением эксплуатационной производительности непосредственно из характеристик машин и условий технологии.

Первый путь позволит дать основные фундаментальные законы технологической науки, изложить ее широко и всесторонне. Это избавит от многочисленных неизбежных в настоящее время повторений и излишней детализации изложения.

Но это потребует существенного изменения и структуры курса, в основу которой должны быть положены наиболее существенные стороны предмета.

Второй путь придает изложению предельную точность, лаконичность, компактность. Следуя общим закономерностям развития всех отраслей знаний, строительное искусство в настоящее время также превращается в науку путем его широкой математизации, так как общеизвестно, что любая мысль наиболее точно и наиболее коротко может быть записана лишь с помощью математической формулы.

В этой связи представляет интерес следующее любопытное признание В. Е. Жвирблиса:

«Еще со школьной скамьи, изучив основы физики, мы обретаем более или менее крепкую веру в то, что явления природы могут быть описаны математически. Однако, как правило, мы в гораздо более зрелом возрасте не очень-то способны понять важную особенность теории: оперируя символами, мы можем получить какое-либо новое математическое выражение, на его основе предсказать еще неизвестное свойство объекта и, что самое удивительное, обнаружить затем это свойство экспериментально.

Создается впечатление, что формулы как бы повелевают миром, вынуждают природу поступать именно так, как ей предписал теоретик.

Разумеется, тут нет никакой мистики: не природа послушна формулам, а формулы послушны природе. И теория представляет собой лишь особый инструмент исследования, не более таинственный, чем термометр или микроскоп».

Как-то Д.И. Менделеев сказал: «Основная и конечная цель всякой науки – это предвидение и польза».

Предвидение – это видение будущего, а это уже задача прогнозирования.

Прогнозирование, как это ни парадоксально, характеризуется теми же показателями, что и, например, стрельба по мишени. Эти показатели (или критерии) следующие:

- а) точность,
- б) дальность,
- в) важность цели,

- г) универсальность,
- д) простота,
- е) экономичность.

В конечном счете задачей любой науки непременно является возможность с ее помощью предсказания, прогнозирования тех или иных явлений материального мира, и наиболее ценными здесь будут, естественно, количественные предсказания... Здесь вспоминаются слова Леонардо да Винчи: «В каждой науке столько истины, сколько в ней математики» и выражение, часто цитируемое академиком А. Н. Крыловым: «Нет ничего более полезного для практики, чем хорошая теория», а также высказывание Вильяма Томсона лорда Кельвина: «Математика – это квинтэссенция здравого смысла».

Третий путь резко повысит прикладное практическое значение технологической науки. Он вооружит инженера умением искать и находить в каждом технологическом процессе именно те величины параметров, которые обеспечивают наибольшее значение получаемого положительного эффекта. Оптимизация же строительных процессов позволит вскрыть новые резервы повышения производительности труда в строительстве. И именно этому должен обучаться современный инженер. Он должен уметь поставить машину в такие условия, в которых она даст максимум того, что она может дать.

Четвертый путь позволяет существенно уточнить производительность машин и тем самым повысить экономичность строительных процессов. Существующие методики предусматривают применение ряда нормативных коэффициентов, которые недостаточно дифференцированно и точно отражают конкретные особенности, а главное – усовершенствования машин, а также многообразие условий их работы и обрабатываемых материалов. Всякий расчет и проект это по сути своей прогноз, а прогноз требует конкретного всестороннего системного подхода. И наиболее плодотворным путем здесь будет синтез теорий механики машин и механики материалов. И новые машины появятся быстрее, чем нормативные коэффициенты для них.

Структуру курса «Технологии» предлагается строить не по видам возводимых сооружений (или комплексов работ), а по основным технологическим процессам, базирующимся на том или ином физическом явлении, независимо от того, для какого сооружения и при каком материале этот процесс применяется.

Таким образом, в основу структуры курса предлагается положить не внешние признаки (тип сооружения, материал), а основные, присущие только изучаемой дисциплине, внутренние явления и закономерности. Например, общие закономерности процесса уплотнения можно с успехом рассматривать независимо от того, что уплотняется – песок, глина, бетонная смесь или порошки пластмасс или металлов, так как различия здесь только лишь количественные. В заключение можно будет давать лишь краткие замечания по особенностям того или иного конкретного строительного материала или возводимого сооружения.

Технология строительства до недавнего времени оставалась частью искусства. Учебная дисциплина так и называлась: «строительное искусство». Это «искусство» обходилось минимумом алгоритмов для количественных оценок и в основном полагалось на интуицию и практический опыт. В работе академика Б. В. Гнеденко и др. («За советом в природу». – М.: Знание, 1997) приводится следующее высказывание:

«Надо отметить, что медицина не является единственной наукой, в которую проникновение математики связано с большими или меньшими трудностями. Подобные же трудности возникают, например, при «математизации» технологии. И здесь мы слышим тот же довод, те же разговоры об интуиции и опыте (недаром возникло почтительное выражение «хороший практик»). Ошибка здесь, разумеется, та же самая.

Возникновение проблемы научного анализа и прогнозирования дефектов в технике, равно как и проблемы повышения точности и надежности диагнозов медицины, не могло не повлечь за собой проникновение математики в технологию и медицину».

Аналогичные соображения приводятся в работе «Будущее науки» (Международный ежегодник, вып. 8. – М., Знание, 1975.):

«Из опыта я могу заключить, что технология с некоторого момента времени стала настоящей наукой: с тех пор, как она рационально вобрала в себя (закодировала) лучший опыт техники, прогресс которой она обеспечивала. Научное доказательство этой кодификации представляет собой саму базу настоящей механики...»

Если верно, что технология в своей высшей форме научна по природе и свойствам, то не менее верно также, что ее изучение гораздо более затруднено, чем изучение какой-либо теоретической науки, так как первое требует знания реальностей, которое приобретается только непосредственной практикой в компетентной среде...

Современная технология сконцентрирована в индустриальных операциях крупного производства, использующего мощные средства, и, без сомнения, важно поддерживать достаточные усилия по воспитанию (или образованию) и по исследованиям в этом направлении». Современная же «механика, например, в результате естественно необходимой эволюции стала наукой о трансформации положения, геометрической конфигурации и внутреннего состояния тел природы в соответствии с обобщенными силами или действиями разного рода (механическими, физическими), которые определяют эту трансформацию».

Отсюда ясно усматривается такое важное положение, что основой технологии является механика, а специалист-технолог должен быть образован как физико-механик по проблемам обработки (переработки) строительных материалов, элементов, изделий...

Таким образом, вызываемая общим развитием технического прогресса необходимость прогнозирования технологических процессов требует отыскания и установления связей между параметрами этих процессов. Однако процесс может протекать в различных режимах. И представляется весьма важным отыскание области определяющих параметров, отвечающих оптимальному режиму протекания технологического процесса. Оптимизация технологических процессов несет с собой существенный экономический эффект уже только потому, что она не требует каких-либо дополнительных капиталовложений на ее осуществление. Так, например, только за счет изменения на несколько метров ширины забоя, разрабатываемого экскаватором, можно существенно увеличить производительность землеройных машин. Учитывая же громадные объемы землеройных работ (по данным академика А. Яншина эти объемы в мире составляют около $60 \text{ км}^3/\text{год}$ (объемы вулканической деятельности – 16)), общий эффект от оптимизации будет значительным. И если не считать затрат на постановку задачи и соответствующие расчеты, все это достигается с легкостью находки.

В настоящей работе и в [5] приведено несколько приближенных решений задач по оптимизации отдельных технологических процессов, относящихся в основном к строительной технологии грунтов. Разумеется, приведенные решения не могут претендовать на исчерпывающую точность – это лишь первые оценки.

В качестве критерия оптимизации принято, как правило, достижение максимума производительности той или иной рассматриваемой машины или технологического процесса в целом.

В большинстве случаев производительность труда является универсальным критерием эффективности технологических процессов, особенно в задачах оптимизации, где ресурсы остаются практически неизменными и где этот критерий совпадает с критерием экономичности. Здесь уместно вспомнить известные положения о том, что производительность труда есть определяющая характеристика общества, и о том, что всякая экономия сводится в ко-

нечном счете к экономии времени. В этом отношении повышение производительности и ведет непосредственно к снижению затрат времени, к сокращению сроков строительства.

Постановки задач и их решения были вызваны как нечеткостью (и даже иногда противоречивостью) рекомендаций в существующей технической литературе, так и непосредственно запросами практики проектирования.

Одновременно представлены некоторые общие подходы к проблемам выбора строительных машин и оценке их эксплуатационной производительности.

Предлагаемая работа может оказаться полезной не только для студентов строительной и горной специальности, но, по-видимому, также и для инженеров, занятых проектированием технологии, и естественно, для строителей-производственников, непосредственно решающих проблемы интенсификации технологических процессов. Научный же сотрудник (а равно и любой другой читатель) может практически подойти к предложенным решениям и усовершенствовать их или же поставить новые задачи оптимизации строительной технологии и выполнить их оригинальные решения.

И это будет вполне закономерно, поскольку, во-первых, нет такой задачи, решение которой нельзя было бы уточнить, а во-вторых, в области оптимизации технологии – непочатый край, и решение (хотя бы приближенное) даже некоторой части из них является проблемой, весьма благодарной для любого инженера, поскольку полученное решение может способствовать главной цели – повышению производительности человеческого труда.

Содержание данного пособия является продолжением и развитием положений, изложенных в источниках [6] и [5].

Выбор метода исследования

Системный подход базируется на следующих положениях.^{*)}

1. Чем полнее множество осознанных альтернативных вариантов решений, тем больше вероятность нахождения среди них наиболее удачного.

2. Возможно все то, что не противоречит здравому смыслу. Поэтому применимы аналогии любой степени близости.

3. Выигрывая в одном, мы неизбежно проигрываем в другом. Оптимальное решение является компромиссным.

4. Мир полон случайностей. Поэтому не должны игнорироваться даже маловероятные события.

Методы научного познания (исследования):

1) натурный эксперимент (или испытания выделенного натурального объекта),

2) моделирование:

а) физическое,

б) математическое.

Физическое моделирование основано на теории подобия.

Математическое моделирование – это изучение поведения объекта в тех или иных условиях путем решения уравнений его математической модели.

Эти модели делятся на:

А) аналитические (теоретические), базирующиеся на основных законах механики;

^{*)} 1. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.

2. Сухарев Э.А., Медвидь С.Ф. Оптимизация рабочих процессов и параметров строительных и мелиоративных машин. – Киев: УМК ВО, 1992. – 82 с.

Б) статистические (эмпирические), полученные формальной аппроксимацией результатов некоторых экспериментов, без выявления причинно-следственных связей.

Единственным критерием качества (достоверности) модели является достоверность полученных на ней прогнозов поведения реального объекта.

Проверка адекватности – это оценка достоверности модели на тестовых экспериментах. Здесь же устанавливаются и границы применимости модели.

Основной этап в построении модели – идентификация математического описания объекта. Задача идентификации – найти неизвестные параметры (отдельные константы или их комплексы), характеризующие свойства объекта. Иначе говоря, любая модель – это лишь только жернова, и при неточных исходных данных никогда не получить удовлетворительного прогноза.

Качественный анализ модели, осуществляемый аналитическими методами исследования уравнений, позволяет получить без расчетов общую картину поведения объекта.

В вычислительном эксперименте, с использованием моделирующего алгоритма, роль опытной установки отведена ЭВМ, выполняющей вычисления по заданной программе. Для этого разрабатывается и план вычислительного эксперимента.

Преимущества математического моделирования перед натурным экспериментом:

- 1) расширяет исследования (предоставляет большее число вариантов),
- 2) дает информацию о будущем (прогноз),
- 3) дает дополнительные знания об объекте,
- 4) позволяет изучить другие объекты со сходным математическим описанием.

Вывод: на основании изложенного в качестве основного метода научных исследований предполагается использовать математическое моделирование в аналитическом представлении.

Разумеется, в работе дана лишь первая попытка некоторых обобщений и количественных оценок в столь обширной и необъятной области знаний, какой является технология.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Всякая наука начинается с классификации.

Р.Р. Чугаев

1.1. Новая обобщенная классификация технологий

1.1.1. Классификация в общей постановке.

Вещества и поля (веполы) составляют все сущее (т. е. материю). Выделим следующие состояния **вещества**:

Т – твердое,	Г – газообразное,
С – сыпучее,	П – плазма.
Ж – жидкое,	

Состояния (классы) веществ (материалов) можно далее разделить на роды, например:

Т (хрупкий – ХР, пластичный – ПЛ, ползучий – ПЗ, текучий – ТК и т. д.),
С (несвязный – НС, малосвязный – МС, связный – СВ, трехфазный – ТФ и т. п.),
Ж (идеальная – ИД, вязкая – ВЗ, шведовская – ШВ),
Г (воздух – ВЗ, спецгаз – СГ, сжатый – СЖ, вакуум – ВК и др.).

Физические **поля** разделяются на следующие:

а) Классические:

Г* – гравитационное,

Э* – электрическое,

М* – магнитное,

ЭМ* – электромагнитное,

Я* – ядерное.

б) Условные дополнительные (частные):

МХ* – механическое,

Т* – тепловое,

А* – акустическое,

О* – оптическое,

Х* – химическое,

АР* – ароматическое,

Б* – биологическое.

Указанные выше вещества и поля (веполя) находятся в постоянном взаимодействии друг с другом. При этом взаимодействия, не зависящие от воли человека, называются природными, а зависящие – технологическими. Выделим основные составляющие части любых технологий:

Объект (ОБ) – часть материи (веполя), которая подвергается воздействию, изменению (обработке) и рассматривается как пассивная (ось X),

Субъект (СБ) – другая часть материи (веполя), которая воздействует на объект и представляется как активная (ось Y),

Окружающая среда (ОС) – остальная часть материи, поскольку в мире отсутствует пустота (ось Z).

Рис. 1.1.1. Пространство возможных технологий:
 X – объект, Y – субъект, Z – окружающая среда.

Эти составляющие могут образовать пространство возможных технологий (представленное на рис. 1.1.1), каждая точка которого детерминирована и соответствует определенной технологии, отличной от других.

Сюда же входят и все природные явления (взаимодействия). В основе своей пространство технологий четырехмерно, так как технология всегда является процессом и протекает во времени. Это пространство содержит около 5 тысяч простейших (элементарных) технологий. Количество же сложных (комбинированных) технологий ограничений не имеет.

Освоение и даже изучение такого множества представляет трудности, поэтому человечество давно разделило это множество на отрасли: строительство, машино-, приборо-, авиа-, космостроение... В свою очередь каждая из отраслей разделена на более мелкие части и т. д.

Более существенно разделение технологий по областям знаний (механические, физические, химические, биологические и т. д.), которые дробятся далее по эффектам (например, плазменные, лазерные и др.).

Разумеется, эти классификации можно углублять и конкретизировать и далее. В каждой отрасли применяется собственное множество классификаций технологий по самым различным признакам. Например, известны классификации технологий строительства по назначению сооружений (ГТС, ГМС, ПГС, ТС, ПС и т. д.), по материалам (земляные, бетонные, металлические, монтажные и другие работы), по типам сооружений и др.

Одним из основных вопросов при разработке общей теории является более универсальная классификация технологий, по которой было бы возможно более точное и объективное (сущностное) разделение необъятного множества технологических процессов. В качестве основания такой классификации рекомендуется принять **характер изменения материи в некотором заданном (рассматриваемом) объеме пространства** в предположении, что материя распределена в пространстве не равномерно.

Итак в обобщенном виде все технологии (а также и природные процессы) предлагается разделить **на четыре класса**:

- I – технологии, приводящие к уменьшению материи в некотором наперед заданном (рассматриваемом) объеме пространства,
- II – технологии, приводящие к ее возрастанию,
- III – технологии, приводящие к преобразованию материи без существенного изменения ее количества,
- IV – технологии, обеспечивающие перенос (транспортирование) и сохранение (складирование) материи.

При этом под материей в широком смысле понимаются как вещества, так и поля, т. е. масса, энергия, информация...

1.1.2. Классификация строительных технологий.

Строительные технологии как часть (отрасль) народного хозяйства в качестве объекта воздействия (обработки) имеют в основном вещество, определяемое, главным образом, массой и состоянием строительного материала, поэтому здесь практически возможно представление приведенной выше классификации в более простом (частном) виде.

И здесь все технологии (процессы) предлагается разделить на четыре класса в следующем их определении:

- Класс I – процессы, приводящие к уменьшению массы строительного материала в заданном объеме пространства,
- Класс II – процессы, приводящие к нарастанию его массы,
- Класс III – процессы, связанные с изменением формы или свойства материала,
- Класс IV – процессы, не связанные с существенным изменением материала.

Класс I включает:

1. Демонтаж (разборка любой природы),
2. Резание, черпание,
3. Откачка,
4. Извлечение (очистка, удаление),
5. Бурение,
6. Взрывание,
7. Выжигание,
8. Износ,
9. Размыв,
10. Суффозия,
11. Вытеснение,
12. Выдувание,
13. Выщелачивание,
14. Распыление,
15. Вакуумирование,
16. Испарение,
17. Извержение,
18. Излучение, и т. д.

Класс II включает следующие технологические процессы:

1. Монтаж (сборка любой природы),
2. Отсыпка,
3. Отливка (и намыв),
4. Забивка,
5. Нагнетание,
6. Инъекция (и замыв),
7. Погружение,
8. Втапливание,
9. Кольматаж,
10. Напыление,
11. Поглощение,
12. Кристаллизация,
13. Наварка,
14. Конденсация,
15. Седиментация,
16. Наклейка,
17. Окраска (письмо),
18. Лепка,
19. Намораживание,
20. Электроосаждение,
21. Прядение,
22. Ткачество,
23. Впрыскивание и др.

Класс III включает:

1. Уплотнение,
2. Рыхление (вспашка),
3. Дробление,
4. Замораживание,
5. Оттаивание (обжиг, плавление),
6. Смешение,
7. Сегрегация (сепарация),
8. Разделение (селекция),
9. Растворение,
10. Штамповка,
11. Разжижение, расслабление,
12. Напряжение, сгущение,
13. Облучение, зарядка, обработка другими физическими полями.

Класс IV – транспортные процессы.

Каждый класс характеризуется общими основными принципами и общими технологическими схемами движения строительных машин.

Некоторые же закономерности технологии являются справедливыми для многих технологических процессов, независимо от их класса.

И только этим можно, например, объяснить такое поразительное сходство траекторий движения таких далеких друг от друга во всех отношениях устройств как «конец» электрода при наплавке металла и грунтозаборное устройство земснаряда при разработке грунта.

Транспортные процессы пронизывают все строительные операции, и их закономерности могут быть рассмотрены отдельно. Складские же являются частным случаем транспортных (при скорости, равной нулю). При этом существенными с точки зрения технологии представляются состояния материалов.

1.1.3. Краткая характеристика классов.

Класс I – характеризуется отрывом, отделением части массы от монолита, для чего необходимо преодолеть сопротивление (прочность) материала, разрушить его. Разрушение ма-

териала можно вызвать деформациями растяжения – Р, сжатия – СЖ, сдвига – С, изгиба – И, кручения – К...

Практически приходится иметь дело со сложными деформациями, составленными из нескольких элементарных, какими являются резание, демонтаж и т.п. Таким образом, здесь полностью применимы теории сопротивления и разрушения материалов, а инженер-технолог должен владеть фундаментальными основами физико-механики.

Следует отметить, что все технологии класса IV (транспортирование) также связаны именно с преодолением сопротивления среды, в данном случае перемещению (движению) транспортного средства, т. е. транспортные технологии сопровождаются элементами технологий классов I, II, III.

Технологии **класса II** (созидание, рост, уменьшение энтропии) не существуют без технологий **класса I** (разрушение, деградация, увеличение энтропии (энтропия – это, упрощенно, степень разупорядоченности системы)).

В этом обнаруживается свойство внешней (между классами) парности технологий, как проявления всеобщего закона дуализма явлений. Существует свойство внутренней (например, внутри **класса III**) парности технологий, отличающихся знаком «+» или «-» направленности процесса (например, нагрев – охлаждение, намагничивание – размагничивание и т. п.). Эти процессы связаны с изменением энергетического уровня объекта. Строго говоря, здесь присутствует и внешняя парность, например, если охлаждается объект, то одновременно нагревается субъект и (или) окружающая среда.

Нельзя не отметить, что всеобщему закону (т. е. относительности познания) подчиняются и технологии. Так, относительно и само понятие объекта обработки, поскольку в качестве последнего в равной степени могут рассматриваться и другие составляющие элементы (участники) технологии: субъект (рабочий орган) и окружающая среда. Например, работа бульдозера под водой может рассматриваться как обработка (минимум трех) объектов: 1) грунта, 2) ножа и 3) воды, одновременно, т. е. объективно существует лишь **взаимодействие** на границе соседних (соприкасающихся) сред (объектов). Таким образом, объект обработки выделяется в технологии на основании лишь конкретной цели. И здесь важнейшее значение имеет точка отсчета, или, точнее, система координат.

Взаимодействия же можно разделить на:

- а) поверхностные (внешние, граничные),
- б) объемные (внутренние),

однако в большинстве случаев и внутренние (проникающие) взаимодействия можно привести к граничным. Например, внутренние напряжения в массиве грунта можно рассматривать как внешнюю нагрузку на его отдельные частицы.

1.1.4. Понятие о субъекте технологии.

Субъектом (активным началом) технологии также может быть вещество и поле, т. е. любая составляющая материи или их комбинация.

Субъектом (элементом воздействия) называем рабочий орган, носителем которого является машина (строительная, станок, оборудование, обрабатывающий центр, инструмент, ЭВМ...).

В развитой машине выделим следующие основные составные части:

- | | |
|---|---|
| 1) РО – рабочий орган (субъект технологии), | 8) УПЩ – управляющий машиной (оператор), |
| 2) ТРМ – трансмиссия, | 9) НЭ – несущий элемент (скелет, каркас), |
| 3) ДВГ – двигатель, | 10) ИО – изолирующая (защитная) обложка, |
| 4) ДВЖ – движитель, | 11) СО – система отвода «лишней» |
| 5) УПРО – система управления РО, | |
| 6) УПДВЖ – система управления ДВЖ, | |

7) ИЭ – источник энергии, энергии.

Машина служит для преобразования энергии и ее направления от источника на объект технологии. Во всех частях своих она может использовать любые вещества и поля материального мира (см. Пространство технологий).

1.2. Общие закономерности технологической науки

Знание некоторых принципов легко возмещает незнание некоторых фактов.

Клод Адриан Гельвеций

Как и в любой науке, в технологии можно выделить некоторые обобщающие закономерности.

1. Масса удаленного из выемки материала (за вычетом потерь при транспортировании и отходах) равна массе его в насыпи, т. е.

$$\boxed{M^B \cdot K_C \cdot K_H = M^H} \text{ при } 0 \leq K_H \leq 1,0, \quad (1)$$

где K_C – коэффициент сохранности материала при его перемещении (транспортировании) и по истечении времени,

K_H – коэффициент использования материала в насыпи.

В объемном выражении это запишется в виде

$$\boxed{V^B \cdot K_C \cdot K_H \cdot K_P = V^H}, \quad (2)$$

где K_P – коэффициент разрыхления материала в насыпи по сравнению с выемкой:

$$K_P = \frac{\rho_{\text{сух}}^B}{\rho_{\text{сух}}^H}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{сух}}$ – соответствующие плотности материалов.

Закономерности (1) справедливы для потоков как материалов, так и энергии и информации ... и зарядов и магнитных диполей... Отсюда вытекает вывод о том, что поток материалов изменится по пути следования и во времени.

2. Продолжительность (время) любой работы (процесса) равна объему работы (или длине пути), разделенному на интенсивность (или скорость) ее выполнения, т. е.

$$\boxed{T = \frac{V}{J}} \text{ или } \boxed{T = \frac{L}{v}}. \quad (4)$$

Отсюда могут быть определены и другие входящие величины, так как эти выражения обратимы. При этом объем может быть измерен в любых единицах, а интенсивность – в соответствующих ему и измерителю времени. Например, измеритель объема – m^i (метр в i -й степени), где $i = 3, 2, 1, 0$, а также единицы веса, массы... , а измеритель времени – с, мин, ч, сут, нед, мес, год, Заметим, что на практике в расчетную продолжительность работ следует вводить соответствующий коэффициент запаса.

По аналогии с гидравликой интенсивность работ некоторые авторы называют **потоком**.

Линейная скорость потока материалов по любому из направлений

$$\boxed{v = \frac{J}{\Omega}}, \quad (5)$$

где J – объемная скорость потока материала, называемая просто интенсивностью или потоком (аналогичная расходу воды по трубе в гидравлике),

Ω – площадь сечения потока материала (аналогичная площади сечения водовода), при этом сечение перпендикулярно вектору скорости.

Для описания технологических процессов в линейной постановке введем следующие дифференциальные зависимости:

$$\boxed{v = \frac{dL}{dT}}, \quad (6)$$

$$L = \int_0^T v \cdot dT + L_0, \quad (6a)$$

$$T = \int_0^L \frac{dL}{v} + T_0. \quad (6b)$$

При этом величина L здесь может рассматриваться как путь по любому (X, Y, Z, S, \dots) из направлений строящегося сооружения (для любого класса технологии) или движения строительной машины или ее элемента (рабочего органа).

И для объемного как наиболее обобщенного представления:

$$\boxed{J = \frac{dV}{dT}}, \quad (7)$$

$$V = \int_0^T J \cdot dT + V_0, \quad (7a)$$

$$T = \int_0^V \frac{dV}{J} + T_0. \quad (7b)$$

Последние выражения применимы и при любых других измерителях объема работ (площади, штуки, единицы, ...).

Здесь V_0 , L_0 и T_0 – постоянные интегрирования, отражающие начальные условия расчета (ранее выполненный объем, задел в строительстве...)

Граничные условия расчета:

$$\text{при } T = T_{СТР} \text{ имеем } L = L_{СООР} \text{ и } V = V_{СООР}. \quad (8)$$

Здесь $T_{СТР}$ – продолжительность выполнения любых работ (или процессов), объемы которых соответствуют $L_{СООР}$ и (или) $V_{СООР}$.

3. Возведение любых сооружений, включая и обработку материала, выполняется по частям. Например, в выемке: частица, агрегат (ком, кусок), стружка, слой, элемент забоя, лента проходки, ярус, участок, карьер... В насыпи: частица, агрегат, порция, кирпич, лента (ряд), панель, слой (карта), блок (участок), насыпь (сооружение, склад)...

Здесь минимальный неделимый технологический объем (часть, порцию) назовем **техатомом**, а их объединения – **техмолекулами**.

При этом объем сооружения будет

$$V_{COOP} = \sum_{k=1} \dots \sum_{j=1} \sum_{i=1} q_i, \quad (9)$$

где q_i – объем низшего (принятого в качестве исходного, неделимого) элемента (**техатома**), $j \dots k$ – номера элементов высших порядков, т. е. **техмолекул**, составляемых из низших элементов (техатомов).

Аналогично разделяются и суммируются составляющие (т. е. элементы) технологий. При этом любую технологию можно разложить на сколь угодно малые элементы.

4. Всегда возможна **оптимизация** состояния (характеристик) материала перед его обработкой: изменение плотности, влажности, температуры, зернового состава и т. д. перед экскавацией, перед уплотнением и т. п., что позволит снизить затраты ресурсов.

Оптимизация параметров технологии, в т. ч. и размеров частей сооружений, позволяет повысить производительность труда.

5. Любая характеристика любого процесса в первом приближении может быть представлена как функция времени

$$f(T) = A \sin(B + C \cdot T) + D \quad (10)$$

при $C = 2\pi/T_0$.

6. Значение любого коэффициента может быть уточнено представлением его в виде произведения частных коэффициентов

$$K_0 = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \quad (11)$$

7. Закономерности развития технологий (строительства, машино-, самолето-, корабле-, ракетостроения...) едины, а параметры технологий отличаются лишь количественно. Так, например, резание грунтов, древесины, металлов, пластмасс... отличается лишь значением усилия, а стружка там и там завивается в спираль (!).

Любая технология использует природные явления и поэтому описывается соответствующими физическими (в широком смысле) законами на основе системного подхода.

При этом уровень описания технологии может быть различным:

- 1) нормальный уровень – системный;
- 2) более высокий уровень – надсистемный (назовем его «макротехнология»);
- 3) более низкий – подсистемный («микротехнология»).

Хотя микротехнология и является основой всего здания технологии, она пока менее всего исследована.

Но уже в настоящее время технологии разделяются на механические, физические, химические, биологические, космические, социальные... В последние годы особо выделяются высокие интеллектуальные технологии науки и образования.

8. Все технологические процессы сопровождаются как потерями (в т. ч. отходами), так и примесями (в т. ч. загрязнениями) и отличаются друг от друга качеством основного продукта и степенью экологической чистоты.

9. Все технологические процессы сопровождаются **износом субъекта** (рабочего органа).

10. Интенсивность работы технологической цепи (комплекта машин) определяется ее наиболее **слабым звеном**, характеризующимся минимальной производительностью.

1.3. Пути развития технологий и технических систем

И самое малейшее зерно, посаженное наукою, рано или поздно, но непременно принесет плоды.

Б.С. Якоби

Технические системы развиваются, в значительной мере повторяя пути развития биологических систем, но только более быстрыми темпами и тоже по определенным путям и в соответствии с общими закономерностями. По аналогии с живой природой в развитии технологий также действует закон Дарвина, но только при искусственном отборе. Часть направлений развития технических систем приведена ниже.

1. Спаренная работа машин (принцип взаимопомощи):¹

- 1.1. параллельное соединение (типа «катамаран») – бульдозеры, идущие параллельно, в т. ч. работающие с одним отвалом,
- 1.2. последовательное соединение:
 - автомобили в сцепе, перешагивающие через валежник и канавы,
 - скреперы, применение толкачей,
- 1.3. комбинированное – например, вальцы катков,
- 1.4. ...

Эти пути развития вызваны еще тем, что комбинирование (объединение, кооперация) машин приводит к большей производительности или меньшей стоимости (цены) по сравнению с индивидуальными (работающими отдельно) машинами, что можно записать в виде фундаментальных неравенств развития природы, общества и техники

$$P_{1-2} \gg P_1 + P_2, \quad (1)$$

$$C_{1-2} \ll C_1 + C_2. \quad (2)$$

Это относится и ко многим последующим положениям.

2. Комбинированные машины (принцип дополнительности):

2.1. соединения технологических машин с транспортными:

- 1) прицепные (скрепер с трактором и т.п.),
- 2) полуприцепные,
- 3) самоходные,
- 4) ...

2.2. соединение технологических машин друг с другом (тип комбайна):

- 1) бульдозер с рыхлителем, со скрепером и пр.,
- 2) плуг + борона + сеялка,
- 3) экскаватор + трубоукладчик + засыпатель траншей,
- 4) бульдозер + каток (или бетоноуплотнитель глубинный),
- 5) ...

2.3. дублирование рабочих органов:

- 1) экскаваторы с двумя ковшами на одной стреле, землеройно-транспортные машины с двойными ковшами, отвалами...,
- 2) буровые установки с четырьмя бурильными машинами ...,
- 3) ...

3. Универсализация и автономизация машин:

3.1. бульдозер-корчеватель-собиратель,

¹ Этот принцип эффективно применен и при строительстве кораблей и при создании многоступенчатых ракет.

- 3.2. машины-амфибии, в т.ч. на воздушной подушке, на подводных крыльях и т. п.,
- 3.3. машины двухстороннего действия, т. е. с исключением холостого хода, например, бульдозер с перекидным (назад) отвалом, с поворотным (двухножевым) отвалом, с двумя отвалами... ,
- 3.4. экскаватор с ЭВМ, с механической мастерской, с ковшом в виде цилиндрического грохота...
4. Дополнительные меры по повышению эффективности:
 - 4.1. для снижения сопротивлений:
 - 1) смазка (в т. ч. воздушная подушка),
 - 2) вибрация,
 - 3) переход к трению качения,
 - 4) магнитная подвеска,
 - 5) использование явления резонанса,
 - 6) ...
 - 4.2. Дополнительные двигатели и устройства:
 - 1) мотор-колеса,
 - 2) загрузочные скребковые конвейеры ковшей скрепера, экскаватора...,
 - 3) инерционные двигатели-аккумуляторы в виде маховика (волчка) на скреперах и др.,
 - 4) увеличение пригрузки и устойчивости:
 - а) вакуумирующие колокола на катках и щиты опалубки... ,
 - б) воздушный винт: для увеличения сцепного веса тягачей, бульдозеров, для повышения эффективности катков,
 - для подъема части груза кранами и т.п.,
 - для пригрузки ковша драглайна,
 - для устойчивости башен и труб, что позволяет строить «лестницу в небо»,
 - в) антикрыло на скоростных автомобилях ...
 - 5) использование спутников, носителей (например, по принципу кенгуру или ракеты-носителя «Энергия» с космическим кораблем «Буран» на «спине»)...
5. Превращение детали, инструмента, здания – в машину.*)
6. Превращение машины в автомат (усложнение машин).
 - 6.1. Переход от циклических к непрерывным процессам.
 - 6.2. Применение роторно-конвейерных линий.
 - 6.3. Использование эффекта автоколебаний...
7. Снижение относительного веса движущихся частей в машине.
8. Переход к высокоинтеллектуальным машинам и технологиям: введение элементов обратной связи, самоорганизации, создание автоматов, роботов, искусственного интеллекта... Высшая степень развития технических систем – их самовоспроизведение. Итак, всякое развитие в природе и обществе идет в направлении вектора усложнения.
9. Замена материалов энергией (и наоборот):
 - 9.1. бульдозеры со «взрывным» отвалом,
 - 9.2. тепловоздушная завеса дверных и оконных проемов,
 - 9.3. сваи из плавленого грунта...
10. Ветвление технических устройств и технологических процессов, развитие в сторону многообразия (принцип специализации и выбор свободных ниш):

*) «Дом – это машина для житья», – Корбюзье.

- 10.1. например, бетонная смесь разветвляется на жесткую, пластичную, литую, текучую, супертекучую (рис. 1.3.2),
 - 10.2. технология отсыпки грунтов делится на сухую, мокрую, полумокрую, полусухую, намыв, замыв, инъекцию...
 - 10.3. даже экскаваторы делятся на одно- и многоковшовые (см.п. 3.5.1),
 - 10.4. см. п.п. 3.7.2; 5.4; 7.2.
11. Главным ресурсом развития технологий и технических систем конечно же является природа с ее бесконечным разнообразием процессов и форм. И человечество со времени своего рождения прежде всего использует ресурсы бионики для своих собственных целей. А ведь есть еще и Земля и ... Космос. И эта кладовая богатств природы неисчерпаема. Но прежде всего человек делает машины по своему образу и подобию.
12. Главный закон развития техники: развитие всех систем идет в направлении увеличения степени идеальности, а идеальная техническая система – это система, которой нет, а функция ее выполняется. Стремление к идеалу бесконечно, поэтому бесконечно и развитие технологий в направлении расширения их разнообразия и повышения качества (идеальности исполнения).

Рис. 1.3.2. Развитие технологий бетона: зависимости частоты применения V от осадки конуса OK во времени (периоды 1; 2; 3; ...)

1.4. Главные этапы проектирования технологий

Проектирование технологии осуществляется **вариантно** и по схеме спирали, уточняя решение на каждом ее витке.

Этап 1. Что строить (производить)?

Выбор объекта.

Ответ на этот вопрос дается на основании анализа потребностей общества, в надсистеме, с учетом, основных проблем и показателей технологии.

Выбор объекта, как и везде, производится вариантно, на основе принятых ранее критериев. Обобщенные критерии оптимального выбора, разумеется, не претендующие на абсолютную полноту и достаточность, приведены ниже, в п. 1.5.

Этап 2. Где строить (производить)?

Выбор места (среды).

Выбор среды – это выбор состояния веществ и полей, в которых осуществляется технология (см. п. 1.1). Ведь строить можно в газовой среде (воздух), в космосе (вакуум и невесомость), под водой (в жидкости), в искусственных средах...

Этап 3. Когда строить?

Выбор времени (сезона) и сроков.

Этот выбор также определяется потребностями общества (заказчика). Здесь играет роль и ресурс времени, включая разработку проекта, и сезон выполнения работ (зима, лето...) и, естественно, сроки получения продукции.

Этап 4. Каким способом строить?

Выбор материала и класса технологий.

Как известно, объекты близкого потребительского качества можно получить двумя противоположными технологиями (относящимися даже к разным классам) по принципу: 1 класс – убрать все лишнее, или 2 класс – добавить все необходимое.

Например, известны два класса методов получения коллоидных частиц:

1) диспергирование или измельчение грубодисперсных частиц (в мельницах, ультразвуком, высоковольтным разрядом в жидкости ...)

2) конденсация или выращивание из молекулярного состояния (с применением зародышей, которые «собирают» вокруг себя ионы и молекулы из раствора и вырастают в настоящие кристаллы...).

Но ультразвук может не только диспергировать, но и резать и сваривать.

Излучатели ультразвука:

А) пьезоэлектрические,

Б) магнитострикционные,

при этом во втором случае может быть использована капля магнитной жидкости, которая колеблется в режиме резонансных частот.

Выбор осуществляется в соответствии с классификацией технологий (п. 1.1) и наличием ресурсами.

Этап 5. Каким методом строить?

Выбор оптимальной технологии.

Каждый из классов содержит множество технологий, так как пространство технологий (см. рис. 1.1.1) применимо для каждого из четырех классов. Например, грунтовая плотина может быть возведена и отсыпкой насухо, и намывом и т. д., но при этом качество сооружений будет различным. И поэтому выбор технологии для конкретного объекта представляется достаточно важной задачей.

Этап 6. Чем строить ?

Выбор типа строительных машин.

Даже при выбранной конкретной технологии выполнения работ можно применить машины, существенно отличающиеся друг от друга прежде всего типом рабочего органа.

Например, при технологии резания (копания) грунтов в траншее можно применить как одно-, так и многоковшовые и даже плужные экскаваторы. При этом одноковшовые, в свою очередь, делятся на прямую и обратную лопаты, драглайн, грейфер... И каждая машина имеет свои преимущества и недостатки, которые необходимо оценить и выбрать наиболее подходящий для конкретных условий вариант по критериям выбора, приведенным, например, в п. 1.5.

Этап 7. Сколько нужно ресурсов?

Выбор марки и числа машин.

Даже один тип машин, например, экскаваторы «прямая лопата», включает десятки различных марок, отличающихся не только главным параметром (геометрическая емкость ковша), но и силовыми и ходовыми и другими устройствами.

Необходимо также выбрать и число машин, которое, как правило, связано с маркой, т. е. работа может быть выполнена или одной машиной большей мощности или несколькими машинами, но соответственно меньшей мощности (см. п. 1.6).

При этом желательно достичь оптимального сочетания мощности машин и в составе технологической цепи.

Этот выбор также должен соответствовать определенным критериям, приведенным в п.1.5.

Этап 8. Какие параметры технологии применить?

Выбор и оптимизация параметров технологии и уточнение сроков работ.

И уже после выбора марки машины можно существенно улучшить будущие результаты работы, если выбрать количественные характеристики (показатели) параметров технологии таким образом, чтобы обеспечить максимум эффективности, например, производительности машины.

Но каждая технология включает, как минимум, три составляющих: Объект (О), Субъект (С) и Окружающая среда (ОС). При этом в широком понимании каждая составляющая включает и человеческий фактор (ЧФ) и состоит из пространства (геометрии) и его качества, определяемого многочисленными свойствами в каждой из его точек.

Поэтому оптимизации технологии можно разделить по трем основным направлениям (подэтапам), и в каждом из них – по соответствующим параметрам.

Подэтап 8-О (оптимизация объекта),

например, в технологии экскавации может включать как геометрические (ширина, высота забоя и т.д.), так и качественные (влажность, плотность...) параметры.

Подэтап 8-С (оптимизация субъекта), также может включать аналогичные параметры рабочего органа (угол резания, усилие на ноже, частота вибрации...)

Подэтап 8-ОС (оптимизация окружающей среды) может включать выбор оптимальной температуры, влажности, скорости воздуха, освещенности... Сюда же входит и оптимизация экологического взаимодействия с окружающей средой.

Все это вносит изменения в значение производительности машин, и, следовательно, в сроки работ или число машин, которые соответственно и уточняются.

Отметим, что окружающая среда (ОС) может разделяться на:

- естественную (ОС-Е),
- переходную (ОС-П),
- искусственную (ОС-И).

Для сельскохозяйственных, строительных, добывающих отраслей характерна ОС-Е, для промышленных – ОС-И.

В конечном счете следует оптимизировать условия работы всех составляющих машины (см. п. 1.1.3). Но несомненно следует особо выделить

Подэтап 8-С-УПЩ (оптимизация условий работы управляющего машиной человека), чем в сущности и определяется успех любой технологии.

1.5. Обобщенные критерии оптимального выбора технологий и машин

И вся наша жизнь по сути: непрерывный выбор технологий и их осуществление.

Единый критерий любого выбора суть: пространство возможностей (B) выбираемого объекта должно быть больше или равно пространству предъявляемых к нему требований (T), т. е.

$$\boxed{B \geq T} \quad (1)$$

Любой обобщенный критерий всегда может быть представлен в виде ряда частных составляющих критериев. Для выбора технологии их можно записать в виде четырехмерного пространства и его качественных характеристик (физических, экологических, социологических):

$$\left. \begin{array}{l} \text{I: } X_B \geq X_T, \\ \text{II: } Y_B \geq Y_T, \\ \text{III: } Z_B \geq Z_T \end{array} \right\} \text{ – геометрические критерии,} \quad (2)$$

$$\text{IV: } P_B \text{ (или } 1/T_B) \geq P_T \text{ (или } 1/T_T) \text{ – критерий производительности} \quad (2a)$$

(или времени),

$$\left. \begin{array}{l} \text{V: } KP_B \geq KP_T \text{ – критерий качества продукции (сооружения),} \\ \text{VI. } BP_B \geq BP_T \text{ – критерий безопасности работ,} \\ \text{VII. } \mathcal{E}L_B \geq \mathcal{E}L_T \text{ – критерий экологичности технологии,} \\ \text{VIII. } UT_B \geq UT_T \text{ – критерий устойчивости технологического} \\ \text{процесса,} \\ \text{IX. } \mathcal{E}C_B \geq \mathcal{E}C_T \text{ – критерий эстетичности,} \\ \text{X. } \mathcal{E}N_B \geq \mathcal{E}N_T \text{ – критерий экономичности.} \end{array} \right\} \quad (3)$$

В известной мере эти критерии выбора можно рассматривать как основные (классические), однако их состав может быть всегда расширен за счет специфических требований, выставляемых, например, со стороны Заказчика (или Потребителя) продукции, а также для уточнения выбора.

Как известно, практической целью технологии как науки является: выбор метода технологии, разработка оптимальных технологических схем, выбор типа и числа строительных машин, необходимых для выполнения работ по объекту в заданные сроки и с требуемым качеством, при минимальной стоимости работ. Все вышеперечисленные критерии выбора технологии используются и при выборе строительных машин. При этом **геометрическое пространство возможностей** следует рассматривать как рабочую зону машины, а **пространство требований** – как технологический объем, в каждой точке которого должны быть выполнены все остальные критерии, обеспечивающие качество этого объема.

Одним из основных является критерий **качества продукции (сооружения)**, которое определяется всеми потребительскими свойствами и также оценивается с помощью всех приведенных выше универсальных критериев, но примененных уже к сооружению на всех стадиях его возведения и эксплуатации. Заметим здесь, что предела качеству изделий нет, но есть оптимальный необходимый уровень качества, соответствующий технико-экономическим возможностям общества на данном этапе его развития.

Все упомянутые критерии выбора, в зависимости от конкретных машин и условий, могут быть еще более детализованы. Так **критерий производительности** может быть пред-

ставлен как эксплуатационной производительностью, так и технической или их составляющими: например, емкостью ковша (кузова), сохранностью продукции, циклом, грузоподъемностью, рабочими скоростями, мобильностью, временем перебазирования, монтажа и т. п. При этом выбор рекомендуется начинать с наиболее мощных и высокопроизводительных машин.

Критерий устойчивости (надежности, непрерывности) технологического процесса определяется и качеством машин, их новизной, надежностью, техническим состоянием, выработкой и т. п. Он может быть выражен также коэффициентом запаса в количестве машин

$$\text{VIII-1:} \quad K_{уст} = N^c / N^p \geq [K_{уст}], \quad (4)$$

где N^c – списочное (проектное) число машин,

N^p – расчетное число машин.

Устойчивость работы технологической цепи определяется оптимальным согласованием составляющих ее машин по их числу и мощности.

Безопасность можно разделить на таковую для оператора и для машины, а также на внутреннюю (собственную) и внешнюю, определяемую соответствующими коэффициентами надежности, безопасности, устойчивости, прочности, долговечности...

Экологичность оценивается степенью чистоты технологического процесса по отношению к окружающей среде и природе в настоящем и будущем.

Экономичность включает все приведенные показатели, а также характеристики машин: общая масса, масса движущихся частей, расходы топлива, других видов энергии...

Отметим, что при выполнении прочих критериев выбора условие экономичности, как правило, выполняется автоматически, поскольку это условие является синтетическим. И, конечно, требует проверки **критерий времени** выполнения работ, который обеспечивается лишь при условии максимальной загрузки машин.

Естественно, что все требования к машине можно разделить на жесткие и нежесткие. К жестким, например, геометрическим, относятся требования, которые должны быть выполнены безусловно точно (или строго). Однако, здесь следует заметить, что невыполнимых требований теоретически не существует.

К нежестким относятся требования, для которых допустимо лишь приближение к некоторой оптимальной величине.

Выбор типа машин для выполнения любого процесса определяется из принципа наибольшего соответствия данной машины условиям работы или наибольшего удовлетворения требований.

Поскольку выбор является многофакторным, то степень соответствия машины условиям ее работы можно оценить величиной

$$C_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{T_i}{B_i} q_i}{\sum_{i=1}^n q_i}, \quad (5)$$

где q_i – относительная важность (весовой коэффициент) достижения удовлетворения данного требования.

Степень соответствия определяется при условии $B_i \geq T_i$, в противном случае следует принять обратные величины, например,

$$1/T_B \geq 1/T_T. \quad (6)$$

Наилучшее соответствие предполагается при $C_0 = 1$.

Приведенные условия позволяют провести сравнение вариантов различных типов и марок машин и выбрать лучший из них.

В случае невыполнения какого-то из критериев всегда существует два выхода:

- 1) увеличить ресурс возможностей (например, мощность машины),
- 2) снизить размер требований (например, технологического объема и т. п.).

1.6. Основы расчета числа машин

Все машины в технологической цепи можно разделить на ведущие и ведомые. К звену **ведущих** отнесем машины, имеющие следующие признаки:

- а) наиболее дорогие и сложные машины,
- б) определяющие интенсивность работ,
- в) стоящие в начале технологической цепи,
- г) загруженные на полную мощность... .

Машины ведущие – это, например: в земляных работах – экскаваторы, в бетонных – смесители. Однако их выбор может быть всегда уточнен технико-экономическим сравнением вариантов. Машины в остальных звеньях цепи отнесем к **ведомым**. Поскольку число машин всегда является целым числом, то ведомые машины могут быть и недогруженными, т. е. их потенциальная производительность не может быть полностью использована.

В зависимости от конкретных условий проекта **расчетное число ведущих машин** (а равно и любых ведущих исполнителей...) можно определить различными методами:

I. – по интенсивности J' (или скорости) выполнения работ одной машиной

$$N_{вщ}^p = J^p / J', \quad (1)$$

II. – по объему работ V' , выполняемому одной машиной,

$$N_{вщ}^p = V / V', \quad (1a)$$

III. – по продолжительности работ T' , выполняемых одной машиной,

$$N_{вщ}^p = T' / T^p, \quad (1б)$$

где $J' = \Pi$ – эксплуатационная производительность одной машины,

$V' = W$ – выработка одной машины за срок строительства,

T' – время выполнения всего объема работ одной машиной.

Основные соотношения между использованными величинами приведены в п. 1.2. Практически **расчетная интенсивность работ (поток)** определяется по выражению

$$J^p = \frac{V}{T^p} K_{нер}, \quad (2)$$

где V – объем работ,

T^p – расчетная продолжительность их выполнения,

$K_{нер}$ – коэффициент неравномерности интенсивности работ, учитывающий конкретные условия строительства и временной уровень рассмотрения (с, мин, час, смена...).

Проектное число ведущих машин принимается из следующих условий:

- 1) $N_{вщ}^n = E$ – целое число,
- 2) $N_{вщ}^n \rightarrow N_{вщ}^p$ – т. е. стремится к расчетному, но может быть и больше и меньше его,
- 3) $N_{мин} \leq N_{вщ}^n \leq N_{макс}$,
- 4) $N_{вщ}^n \rightarrow N_{мин}$,

} (3)

Из условия надежности технологического процесса
VIII-2: $N_{мин} \rightarrow 2$. (3а)

Из условия возможности размещения машин
VIII-3: $N_{макс} \leq \Phi/\Phi'$, (3б)

где Φ – возможный фронт работ на объекте (в любых измерителях),
 Φ' – фронт, требуемый для эффективной работы одной машины.

При этом **проектный поток**

$$J^n = \Pi_{вщ} \cdot N_{вщ}^n \quad (4)$$

и проектный срок строительства (с учетом коэффициента запаса)

$$T^n = \frac{V}{J^n} \cdot K_{нер} \cdot K_{зан} \quad (4а)$$

Расчетное число ведомых машин

$$N_{вм}^p = J^n / \Pi_{вм} \quad (5)$$

и проектное

$$N_{вм}^n \geq N_{вм}^p \quad (5а)$$

при выполнении условий (3).

В заключение отметим, что недостаточное внимание к расчетам числа машин приводит к большим потерям времени и ресурсов.

1.7 Основные траектории движения машин и их рабочих органов

Чертеж – язык инженера.

Траектория полностью определяет основную характеристику технологического процесса, каковой является эксплуатационная производительность. Поэтому выбор траектории требует должного внимания. При этом удача выбора пропорциональна числу рассмотренных вариантов. В траекториях, как в немногом другом, наиболее наглядно просматривается всеобщий закон развития: по

Рис. 1.7.1. Некоторые
траектории движения машин:
————— – рабочий ход,
- - - - - – холостой ход.

Рис. 1.7.2. Траектории поперечных движений конца электрода при наложении сварного шва. (Применение пульсирующего постоянного тока в два раза увеличивает производительность и сокращает расход энергии.)

непрерывной спирали. Но в расчет времени цикла можно ввести типовую (осредненную) длину одной петли, однако с проверкой на ее минимакс. Часть траекторий движения на примере катков показана в [5, с. 47].

Ниже приведены некоторые дополнительные траектории (рис. 1.7.1) движения машин и их рабочих органов:

- | | |
|------------------------------------|--|
| а) внешний загон, | и) валкование с односторонними ходами, |
| б) внутренний загон, | к) сдвоенный зигзаг, |
| в) двойной загон, | л) центробежная, |
| г) полосовая челночная, | м) центростремительная, |
| д) прямо-перекрестная, | н) произвольная, |
| е) косо-перекрестная, | п) внешний разворот на 90°, |
| ж) валкование со сквозными ходами, | р) внутренний разворот на 180°. |

Одни из этих траекторий также могут быть применены при движении уплотняющих машин, другие – при экскавации грунтов, при выполнении мелиоративных, культуртехнических и других работ.

Для сравнения на рис. 1.7.2 приведены траектории наложения сварных швов. И они также, как и предыдущие, обладают достаточной общностью, т. е. применимы и в общей строительной технологии, включая грунтовую.

Рис. 1.7.3. Траектории движения:

- а* – частиц бетона в противоточном смесителе;
б – резцов дисковых фрез в туннельной машине.

На рис. 1.7.3 приведены другие типы траекторий, например, частиц в смесителях или резцов туннельных машин.

Разумеется, большинство траекторий фактически являются не плоскими, как условно показано на рисунках, а пространственными (рис. 1.7.4). Для работы той или иной машины выбирается оптимальная траектория движения и определяется максимальная возможная эксплуатационная производительность.

Рис. 1.7.4. Пример траектории движения экскаватора при разработке карьера:
I, II, III, IV – ярусы разработки.

1.8. Схемы распределения материалов по объектам

Некоторые из схем представлены графически на рис. 1.8.1.

Схема I – синхронные потоки материала, например, бетонной смеси с бетонного завода, выдача материалов или изделий с заводов, со складов и т. п.

Для нее справедливы следующие зависимости:

$$J_0 = V_0 / T_0, \quad (1)$$

$$V_0 = \sum_{i=1}^n V_i, \quad (2)$$

$$T_i = T_0 = \text{const}, \quad (3)$$

$$V_i = V_0 \cdot \xi_i, \quad (4)$$

$$J_i = J_0 \cdot \xi_i, \quad (5)$$

где J_i , V_i и T_i – интенсивность, объем и время выдачи материала на i -й объект,

ξ_i – доля объема материала для i -го объекта,

V_0 , T_0 и J_0 – объем материала для всех объектов, полное время строительства всех объектов и суммарная интенсивность выдачи материалов.

Схема II – последовательная выдача материала, которую характеризуют

$$J_i = V_i / T_i = J_0 = \text{const}, \quad (6)$$

$$T_i = \xi_i \cdot T_0, \quad (7)$$

Рис. 1.8.1. Схемы распределения материалов по объектам:
I – синхронная, *II* – последовательная, *III* – смешанная (дробная).

$$\xi_i = V_i/V_0. \quad (7a)$$

Эти зависимости аналогичны таковым для параметров электрического тока при последовательном соединении проводников, поэтому здесь можно говорить об электротехнологической аналогии (ЭТА). При этом J эквивалентно силе тока, V – напряжению, T – сопротивлению проводника.

Схема III – смешанная (дробная) выдача материалов, сочетающая в себе предыдущие схемы. Здесь в дополнение к схеме II можно записать

$$T_0 = m_T^* \cdot T^*, \quad V_0 = m_T^* \cdot V^*, \quad (8)$$

$$T_i^* = T^* \cdot \xi_i, \quad V_i^* = \xi_i \cdot V^*, \quad (9)$$

где T^* – период выдачи материалов (период пульсации потока),

m_T^* – число выдач материалов на каждый объект в течение T_0 ,

T_i^* – продолжительность выдачи материалов на i -ый объект в одном периоде.

Таким образом, в течение одного периода имеем последовательную выдачу материала, а в течение всего срока строительства – параллельную.

Разумеется, этим не исчерпываются возможные регулярные схемы выдачи. Нерегулярных же (неидеальных) на практике – несчетное множество.

Для всех схем справедливо

$$J_{cp_i} = V_i/T_0. \quad (10)$$

Однако, например, бетоноукладочное оборудование по среднему потоку для схем II, III подбирать нельзя, так как реальный поток будет J_0 , поэтому лучше не пользоваться комплексной производительностью кранов. Поскольку потоки по схемам I, II на каждом из объектов непрерывны, то здесь нужно иметь как минимум по два крана: один – для подачи бетонной смеси, другой – для монтажа, причем второй может оказаться недогруженным. При работе по схеме III можно иметь на объектах по одному крану, который в перерывах (между укладкой бетона) длительностью

$$T_{пер.i}^* = T^* \cdot (1 - \xi_i) \quad (11)$$

ведет монтаж опалубки, арматуры, закладных частей...

Аналогично положению с кранами будет для различных схем меняться и число и специализация бригад рабочих, причем, если бетоносмесители в одну из смен не работают, то в эту смену бетоноукладочный кран может вести монтажные работы...

Отметим, что приведенные схемы применимы и во многих других задачах технологии и организации строительства при распределении ресурсов, и рис. 1.8.1 по сути представляет собой варианты линейных календарных графиков.

ГЛАВА 2. ОБОБЩЕННЫЕ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МАШИН

2.1. Общие положения

Особое внимание общим принципам делает обучение более лёгким.

Д. Ланн

В общем случае при определении интенсивности любых работ, выполняемых не только машинами, но и людьми и природными силами, пользуются понятием производительности, т. е. количеством продукции, производимой за единицу времени. Поэтому в более широком плане следует говорить о производительности процесса.

Эксплуатационная производительность машины или процесса записывается в виде:

$$\boxed{P = P^T \cdot K_B}, \quad (1)$$

где P^T – техническая (мгновенная) производительность, получаемая при непрерывной работе,

K_B – коэффициент использования времени, учитывающий перерывы в работе (простои различного вида).

Здесь сразу же следует уточнить понятие производительности, заключающееся в том, что она представляет собой поток продукции через определенную, заранее **фиксированную**, контрольную (требуемую) **поверхность** (границу), которая может выражаться не только геометрией пространства, но и любыми его качественными характеристиками, применяемыми для описания материи (веществ и полей).

Техническая производительность машины:

а) для циклического процесса, по определению

$$\boxed{P^T = Q_{\text{ц}} / T_{\text{ц}}}, \quad (2)$$

б) для непрерывного процесса, аналогично расходу воды по трубе,

$$\boxed{P^T = v \cdot \Omega}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{ц}}$ – количество продукции, выдаваемое за один цикл и проходящее **через определенную границу** (поверхность), для которой определяется производительность,

$T_{\text{ц}}$ – продолжительность (время) этого цикла,

v – скорость потока материалов (продукции),

Ω – поперечное сечение этого потока, проходящего через фиксированную поверхность.

Количество продукции $Q_{\text{ц}}$ рассматривается нами как техатом.

Единицы измерения входящих величин могут быть любыми, например, величина $Q_{\text{ц}}$ может выражаться в единицах измерения пространства, например, в метрах, возведенных в степень 3; 2; 1; 0, а также в единицах, измеряющих качество этого пространства (например, в килограммах, джоулях, градусах и т. д.). Величины $T_{\text{ц}}$ и v отражают временную меру (базу) производительности. Заметим, что (2) может приводиться к (3), если допустить, что

$$Q_{\text{ц}} = a \cdot \Omega \quad \text{и} \quad T_{\text{ц}} = a/v, \quad (4)$$

где a – расстояние между порциями при циклическом транспортировании.

Если же принять

$$T_y = 1/v_y^* \quad (4a)$$

где v_y^* – частота циклов, то получим

$$\Pi^T = Q_y \cdot v_y^* \quad (4б)$$

при этом, в частном случае,

$$v_y^* = v/a \quad (4в)$$

Таким образом, **формулы производительности (2) и (3) взаимно обратимы**, что и подтверждает наличие дуализма в познании природы: даже такое явление как свет может рассматриваться как циклический процесс: в виде потока частиц – фотонов, и как непрерывный процесс: в виде волны. В механике грунтов также применяются на равных правах две модели: сплошной (непрерывной) среды и прерывной (дискретной), составленной из отдельных частиц, например, шаровидной формы.

В некоторых случаях, например, при определении количества машин, необходимо оценить их выработку, которая может быть представлена в виде

$$W = \Pi \cdot T \quad (5)$$

где T – время работы машины, или точнее в виде

$$W = \int_0^T \Pi \cdot dT + W_0 \approx \sum_{j=1}^m \Pi_j \cdot \Delta T_j + W_0 \quad (5a)$$

где j – номер промежутка времени с постоянной производительностью машины.

Из выражения (5a) следует

$$\Pi = \frac{dW}{dT} \approx \frac{\Delta W}{\Delta T} \quad (5б)$$

Эксплуатационная производительность машины может быть определена также из следующей универсальной зависимости, в которой непосредственно учтены и потери времени,

$$\Pi = \frac{1}{1/\Pi^T + \sum_{i=1}^n (T_{\text{пот.}i}/W_i)} \cdot K'_B \quad (6)$$

где $T_{\text{пот.}i}$ – продолжительность ***i*-го вида** перерыва (потери времени) в работе машины;

W_i – объем работ, выполненный до начала первого перерыва *i*-го вида потери времени;

K'_B – коэффициент использования времени, учитывающий другие потери времени.

Эта формула позволяет повысить точность расчетов, если известны абсолютные потери времени и моменты их наступления.

Комплексная производительность машины (например, крана по бетону) с учетом затрат времени на подачу других – сопутствующих – материалов: опалубки, арматуры, закладных частей, вспомогательных машин и оборудования,

$$\Pi_{\text{бк}} = \frac{Q_{\text{ЦБ}}}{T_{\text{ЦБ}}} \cdot \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot \beta_i / \gamma_i)} \cdot K_B \quad (7)$$

где относительные объем *i*-го сопутствующего материала, продукция одного цикла и его продолжительность равны

$$\alpha_i = V_i/V_B; \quad \beta_i = Q_{Ц_i}/Q_{ЦБ}; \quad \gamma_i = T_{Ц_i}/T_{ЦБ}. \quad (7a)$$

Производительность машины, средняя на данном объекте (или комплексе объектов),

$$P_{\text{ср}} = V / \sum_{i=1}^n (V_i/P_i), \quad (8)$$

где V – объем работы на данном объекте (или комплексе);

V_i и P_i – объем работы и производительность машины на i -м участке объекта (или i -м объекте).

Каждый из приведенных выше параметров, определяющих производительность машины, может быть представлен в виде

$$A_i = a_i \cdot \eta_{ai}, \quad (9)$$

где a_i – нормативная (конструктивная, паспортная) величина рассматриваемого параметра машины,

η_{ai} – степень использования (КПД) указанного параметра.

Эта степень зависит от многих факторов и в первом приближении выразится в виде

$$\eta_i = \eta_{i,1} \cdot \eta_{i,2} \cdot \eta_{i,3} \cdot \dots, \quad (10)$$

где частные коэффициенты использования некоторого параметра машины учитывают отдельно:

1 – влияние объекта обработки (конкретные характеристики перерабатываемых материалов, деталей и др.);

2 – влияние особенностей самой данной конкретной машины (особенности конструкции, технического обслуживания, степень износа и т. п.);

3 – влияние окружающей среды (климатические, гидрогеологические условия, микроклимат и др.);

4 – влияние качества управления (нравственность и профессионализм водителей, операторов и обслуживающего персонала);

5 – влияние условий применения машины (особенности планирования, технологии, организации и т. п.);

6 – влияние технологического прогресса;

7 – влияние других специфических факторов.

Здесь следует отметить, что временное отсутствие в литературе численного значения какого либо из коэффициентов ни в коей мере не может бросить тень на методику расчета. И если его нельзя оценить даже приближенно, то уже всегда его можно принять равным 1,0. С другой стороны общеизвестно, что чем большее число факторов учитывается (хотя бы и весьма приближенно, а это всегда возможно!), тем точнее будет прогноз и искомый результат. Здесь, в методе расчета, главное – не упустить ни одного фактора влияния. В одних конкретных случаях он может действительно оказаться пренебрежимо малым, но в других – может вырасти до решающей величины.

Следует отметить также зависимость и взаимное влияние друг на друга отмеченных выше факторов. Время (период) цикла – это временная мера производительности, выражаемая в любых единицах времени: от секунды до года и т. д. в обе стороны.

Переход от одной меры производительности к следующей можно произвести по формуле перехода

$$P_{i+1} = P_i \cdot T_{i/(i+1)} \cdot K_{B(i+1)}, \quad (11)$$

где $T_{i/(i+1)}$ – продолжительность меры высшего порядка в единицах меры низшего порядка,

$K_{B(i+1)}$ – коэффициент использования меры времени высшего порядка.

Переход от секундной производительности к часовой можно записать в виде

$$\Pi_{\text{ч}} = \Pi_{\text{с}} \cdot T_{\text{с/ч}} \cdot K_{B\text{ч}}, \quad \text{где } T_{\text{с/ч}} = 3600 \text{ с/ч}; \quad (11a)$$

от часовой к суточной (в календарном времени)

$$\Pi_{\text{сут}} = \Pi_{\text{ч}} \cdot T_{\text{ч/сут}} \cdot K_{B\text{сут}}, \quad \text{где } T_{\text{ч/сут}} = 24 \text{ ч/сут}; \quad (11б)$$

от секундной к суточной

$$\Pi_{\text{сут}} = \Pi_{\text{с}} \cdot T_{\text{с/сут}} \cdot K_{B\text{ч}} \cdot K_{B\text{сут}}, \quad (11в)$$

где

$$T_{\text{с/сут}} = T_{\text{с/ч}} \cdot T_{\text{ч/сут}} = 3600 \cdot 24 = 86400 \text{ с/сут}, \quad (12)$$

и так далее.

2.2. Продукция одного цикла

В соответствии с (2.1.9) технологический атом или количество продукции, выдаваемое за один цикл работы, запишем в виде

$$Q_{\text{ц}} = q \cdot \eta_q, \quad (1)$$

где q – паспортное (стандартное) количество требуемой продукции, конструктивный параметр машины,

η_q – степень (КПД) использования возможностей машины по указанному параметру в зависимости от конкретных условий работы.

Продукция одного цикла может быть любой частью (порцией, техатомом) обрабатываемого объекта, на которые возможно его разделение. Этот диапазон распространяется от элементарных частиц (и полей) до целых сооружений и определяется уровнем рассмотрения и соответствующей продолжительностью цикла.

Поясним формулу (1) на примере циклической экскавации.

Здесь:

q – геометрическая (конструктивная, паспортная) емкость ковша (или призмы волочения),

η_q – степень использования этой емкости,

$Q_{\text{ц}}$ – объем грунта в ковше, приведенный к состоянию в выемке.

В первом приближении по (2.1.10)

$$\eta_q = (K_H / K_P) \cdot K_C \cdot K_{\alpha} \cdot \eta_B \cdot \dots, \quad (2)$$

где K_H и K_P – коэффициенты соответственно наполнения ковша и разрыхления грунта в начале пути перемещения,

K_C – коэффициент сохранности грунта при его перемещении до фиксированной поверхности, для которой определяется производительность,

K_{α} – коэффициент, учитывающий угол наклона местности, а также поверхности резания,

η_B – степень полноты выгрузки ковша (за фиксированной поверхностью).

Далее можно конкретизировать, т. е. привязать к местным условиям (уточнение второго порядка...) и составляющие предыдущей формулы, например:

$$K_H = K_{H.ПАСП} \cdot \eta_H \quad (3)$$

и т. д. для всех величин, используемых в расчетах. Приближенные величины K_H и K_P приведены в [5, с. 35, 36], K_α в [5, с. 18].

Аналогично для непрерывной экскавации

$$\Omega = \omega \cdot \eta_\omega, \quad (4)$$

где ω – геометрическая (паспортная) площадь сечения потока материала,

η_ω – коэффициент полезного использования этой площади.

Продукция – это грузы, переносимые краном и ракетами..., и информация, передаваемая в эфире...

При этом в расчеты Π вводится только полезный груз Q_u и не вводится тара, упаковочные материалы и стропы, если это не оговорено специально. (Напротив, при выборе грузоподъемности машин нужно, разумеется, учитывать полную массу груза).

Любой уровень технологий, как уже отмечалось, предусматривает перемещение в четырехмерном пространстве, т. е. всегда существуют начало и конец пути. А отсюда можно записать

$$Q_{u.нач} \cdot K_C = Q_{u.кон}, \quad (5)$$

и соответственно

$$\Pi_{нач} \cdot K_C = \Pi_{кон}, \quad (6)$$

где $\Pi_{кон}$ – определяемая обычно производительность – Π (в конце пути), например, **по**

объему насыпи (!) для землеройно-транспортных машин,

$\Pi_{нач}$ – начальная – Π_0 (в начале пути), например, **по объему выемки (!)** для тех же машин, т. е. при $K_C = 1,0$.

2.3. Продолжительность (время) цикла

Продолжительность (время) цикла определяется как продолжительность любого процесса (или выполнения любых работ) по формулам (1.2.4), (1.2.6б), (1.2.7б).

Для одномерного пространства:

$$T_u = \sum_{i=1}^n l_i / v_i, \quad (1)$$

где l_i – длина i -го участка пути,

v_i – скорость на нем.

Другие выражения приведены в [5, с. 12, 19, 30]. (2)

В свою очередь

$$v_i = v_{iПАСП} \cdot \eta_{v_i} \quad (3)$$

и т. д. в соответствии с (2.1.10).

Часто применяется такая запись:

$$T_u \cong T_{cp} + T_{nop}, \quad (4)$$

где T_{cp} – груженный ход, основная (рабочая) часть цикла,

T_{nop} – порожний (холостой) ход, передвижка, перестановка (маневрирование) рабочего органа или всей машины.

Цикл – это период выдачи одной порции (техатома) продукции, период одного колебания, который связан с частотой выражением

$$T_{ц} = 1/v_{ц}^* \quad (5)$$

где $v_{ц}^*$ – частота циклов, колебаний, пульсаций, вибраций, оборотов, качаний, импульсов, ударов, выбросов, ходок, переходов, ходов, заходов, шагов, подач, выдач, загрузок, выгрузок, подъемов, спусков, заполнений, опорожнений, влияний, изменений, движений, возмущений, воздействий...

Для многомерного пространства вместо (1) будет

$$T_{ц} = \sum_{i=1}^n V_i / J_i \quad (6)$$



где V_i – объем работ на i -м участке,

J_i – интенсивность работ на нем.

Это же выражение определяет и время выполнения любой работы или процесса и вообще служит мерой времени.

2.4. Коэффициент сохранности продукции

Любое решение (зависимость, формулу, закон...) можно уточнить, введя учет еще одного дополнительного фактора.

В общем случае **объем материалов** по длине некоторого фиксированного участка пути (и вообще с течением времени) **не остается постоянным**, т. е. имеют место потери (в т. ч. и отрицательные) по причинам, спектр которых весьма разнообразен. Это явление можно оценить коэффициентом сохранности продукции, который, по аналогии с (1.2.11) и (2.1.10), в общем виде будет:

$$K_C = K_{C.T.} \cdot K_{C.B.} \cdot K_{C.X.} \cdot \dots \quad (1)$$

при

$$K_{C.T.} = K_{C.T.ПАСП} \cdot \eta_K \quad \text{и т. д.}, \quad (1a)$$

где $K_{C.T.}$, $K_{C.B.}$, $K_{C.X.}$ – коэффициенты сохранности соответственно при транспортировании, выгрузках и хранении.

При этом, в дальнейшем, коэффициент сохранности продукции должен, вероятно, учитываться отдельно при потерях через открытую поверхность и отдельно через каждую из неплотностей кузова, ковша или тары и т. д., при перемещении до фиксированной поверхности, для которой определяется производительность.

Заметим, что коэффициент сохранности является одной из важнейших технологических характеристик, которая зависит от всей суммы природных, технических и социальных факторов. Величина его в определенной мере пропорциональна пути и времени.

Коэффициент сохранности на i -м промежутке времени (или участке пути)

$$K_{C.i} = Q_{КОН} / Q_{НАЧ} \quad (2)$$

При этом интенсивность потерь будет

$$J_{ПОТ} = J_{НАЧ} \cdot (1 - K_C) \quad (3)$$

Коэффициент сохранности при транспортировании (и при перегрузках) продукции может быть определен по [5, с.18, 87].

Что касается хранения продукции на складе, то его коэффициент сохранности от исчезновения или (и) порчи может определяться тем же выражением, что и при транспортировании, но с заменой величины дальности транспортирования L на величину продолжительности (срока) хранения T в виде

$$K_{C.X.} = 1 - \left(\frac{T}{T_{ПП}} \right)^{n_{C.X.}} \quad (4)$$

при

$$T_{ПП} = T_{ПП}^0 \cdot \eta_T, \quad (5)$$

где $T_{ПП}^0$ – стандартный срок хранения (может включать и время перевозки), при котором теряется (или портится) весь объем продукции,

η_T – коэффициент повышения сохранности, например, в результате принятия дополнительных мер,

$n_{C.X.}$ – показатель сохранности продукции на складе (в первом приближении 1,0).

Далее, многие грузы включают различные фазы: твердую, жидкую, газообразную... Это прежде всего грунты, затем бетонные смеси, в которых к жидкой фазе можно отнести не только воду, но и часть цемента. Грузы могут быть разделены на фракции по крупности (например, сыпучие) и по другим признакам. И следует учитывать отдельно **сохранность каждой фазы или фракции**.

Коэффициент сохранности настолько же важен, насколько и распространен в жизни человека. Он учитывает потери, отходы, отбросы, выбросы, и в том числе вредные и опасные, т. е. различного рода загрязнения. Это и неизбежное рассеяние тепла и потери напряжения в электросети и утечка радиоактивных веществ, информации и даже самих «умов»... И не только утечка, но и порча, включая и перерождение... с полным изменением направления и даже знака с «+» на «-» или обратно для отдельных характеристик продукции.

2.5. Коэффициент использования времени

Некоторые выражения для K_B приведены в [5, с. 12, 28]. Можно использовать и другую запись в виде

$$K_B = \frac{T(П) - T_{пот}}{T(П)}, \quad (1)$$

где $T(П)$ – производительная (календарная) мера времени, т. е. временная база, принятая в расчете $П$ (час – часовая $П$, смена – сменная $П$ и т. д.),

$T_{пот}$ – потери времени, допущенные в пределах этой меры и не вошедшие во время (длительность) цикла.

Отсюда следует, что при $T(П) \leq T_{ц}$ имеем $K_B = 1$. При определении $T_{пот}$ также используется (2.1.10).

До настоящего времени K_B определялся обычно относительно нормативного урочного рабочего времени, причем только в пределах рабочей смены, а применялся он при вычислении часовой производительности. Представляется более логичным и правильным переход к определению K_B в соответствии с производительной мерой времени и в календарном исчислении.

Этот коэффициент (использования *времени*) еще более важен в деятельности человека, так как он связан с такой наиболее фундаментальной и определяющей характеристикой жизни, какой является **Время**, поистине достойное, чтобы его писать с большой буквы хотя бы потому, что оно невозобновляемо и незаменимо. И все потери производительности в первую очередь связаны именно с его потерями.

ГЛАВА 3. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ I-ГО КЛАССА (УМЕНЬШЕНИЕ МАТЕРИИ)

3.1. Структура и особенности технологий I-го класса

Состав технологий – см. п. 1.1.

Класс I – это класс технологий для снижения количества материи в заданном объеме пространства, т. е. **выемок (экскавации) разного рода** в различных материалах (и не только в них): от грунтов до металлов и биомасс... до массивов информации и электрических зарядов... Это прежде всего технологии заготовки материалов (для создания новых объектов и сооружений) путем разрушения устаревших и (или) недостаточно защищенных существующих систем.

Развитая технология класса I включает следующие процессы:

1. транспортирование объекта к месту обработки,
2. подготовка (оптимизация параметров) обрабатываемого объекта (массива),
3. оптимизация условий работы (окружающей среды),
4. подвод машины (рабочего органа) и оптимизация рабочих параметров,
5. захват части (порции или, иначе, техатома) массива,
6. **отделение (отрыв) порции (техатома) от массива,**
7. удаление порции из забоя,
8. транспортирование на склад или в сооружение,
9. защита массива от произвольного обрушения,
10. контроль качества,
11. ограничение объема выемки,

12. удаление машины (рабочего органа),
13. обработка зоны выемки (стабилизация, рекультивация...),
14. ...

К этой технологии следует отнести и строительство необозримого разнообразия подземных сооружений, начиная от скважин, туннелей и кончая электростанциями, подземными заводами и целыми городами.

Следует заметить, что не менее широко эти технологии применяются в обработке дерева и в машиностроении, так как любая деталь получается из заготовки **путем «удаления лишнего»**. При этом лишней может оказаться часть среды не только снаружи, но и распределенной (и даже произвольно) внутри объекта, которую можно вымыть, выдуть, растворить, испарить и т. д. Аналогична и технология обработки энергии (уменьшение, удаление других видов), информации (уменьшение, борьба с шумами), зарядов (уменьшение, исключение другого знака), магнитного, гравитационного и других полей (снижение напряженности...), анализ явлений природы, массивов информации, короче, **снижение потенциала любого рода** (включая сюда и само вещество), уменьшение материи в заданном объеме пространства.

Возведение зданий и сооружений можно производить и... выемкой. Одиннадцать христианских храмов царя Валибелы (в т. ч. храм Спасителя и Георгиевская церковь – в плане в виде креста) возведены в XIII в. в Эфиопии, в горах Абиссинии, по необычной технологии, аналогичной возведению индийских храмов Лора. Они высекались из скалы как скульптуры, со всеми колоннами, внутренними помещениями и потайными переходами, с окнами в виде крестов-проемов (рис. 3.1.1). Храмы не видны издали, так как не выступают над поверхностью земли. И все же это – пещерная (по древности) технология. Парадокс строительства: чтобы получить сооружение, нужно просто убрать все лишнее.

Рис. 3.1.1. Храм, высеченный в скальной породе.
Возведение сооружений методом удаления «лишнего» материала.

Основой технологий этого класса являются процессы захвата и отделения порции от массива, иными словами, разрушение монолитности, анализ, расчленение (дробление, резание, черпание, изъятие...) материала (объекта). Эти процессы нагляднее всего видны на примере экскавации грунтов. Здесь нож срезает стружку грунта, которая направляется в ковш и заполняет его, создавая порцию грунта, удаляемую за один цикл. Эту порцию и называем **техатомом** (технологическим атомом).

При этом производительность машины определяется толщиной стружки и скоростью резания. Толщина же стружки определяется **рабочими усилиями (возможностями)**, развиваемыми машиной в процессе резания, и их соотношением с **сопротивлением грунта резанию (требованиями)**. Оценка рабочих усилий и условий резания для отдельных машин (их возможности) приведены ниже, а сопротивление материалов разрушению (требования к машинам) – в следующей главе.

Расчеты производительности и оптимизации некоторых параметров работы экскаваторов типа «прямая лопата» приведены в [5, с. 28...33].

3.2. К оценке усилий резания, развиваемых экскаватором «прямая лопата»

Условия резания (копания) грунта запишутся в виде развития обобщенных критериев выбора (п. 1.5), например критерия IV:

$$\begin{aligned}
\text{IV-1:} & R_{\mathcal{E}} > R_{\Gamma P}, \\
\text{IV-2:} & T_{\mathcal{E}} > T_{\Gamma P}, \\
\text{IV-3:} & N_{\mathcal{E}} > N_{\Gamma P},
\end{aligned} \tag{1}$$

где $R_{\mathcal{E}}$, $T_{\mathcal{E}}$, $N_{\mathcal{E}}$ – соответственно касательные усилия срезания стружки и трения и нормальное усилие, развиваемое экскаватором (возможности машин),
 $R_{\Gamma P}$, $T_{\Gamma P}$, $N_{\Gamma P}$ – соответствующие указанным усилиям сопротивления грунта резанию или копанью (требования к машине).

На рис. 3.2.1 приведены схемы нагрузок на ковш экскаватора. При этом усилия, развиваемые ковшом, заменены реакциями со стороны грунта.

Для нахождения искомых величин используем уравнения равновесия:

1) Из проекции сил на ось X_0

$$N_{\mathcal{E}} = \boxed{P_H - F \cdot \cos(\alpha - \gamma)} + G \cdot \cos \alpha. \tag{2}$$

2) Из проекции на ось Z_0

$$R_{\mathcal{E}} = F \cdot \sin(\alpha - \gamma) - T_{\mathcal{E}} - G \cdot \sin \alpha - \Delta R_{HB} \tag{3}$$

при

$$T_{\mathcal{E}} = N_{\mathcal{E}} \cdot f_{CT}, \tag{4}$$

f_{CT} – коэффициент трения грунта по стали (0,1 – 0,6).

3) Из условия равенства моментов сил (относительно точки крепления ковша)

$$\Delta R_{HB} = \left(R_{\mathcal{E}} + T_{\mathcal{E}} + \frac{G \cdot \sin \alpha}{2} \right) \cdot \frac{l_K}{L_P} - \frac{G \cdot \cos \theta}{2} \cdot \frac{h_K}{L_P}. \tag{5}$$

Рис. 3.2.1. Схемы возможных усилий при резании грунта:
a – на стреле; *b* – на ковше экскаватора типа «прямая лопата»

В первом приближении этой величиной можно пренебречь.

Важным показателем является соотношение ортогональных составляющих усилий резания (**коэффициент силового качества экскаватора**):

$$\xi_{\mathcal{E}} = \frac{N_{\mathcal{E}}}{R_{\mathcal{E}} + T_{\mathcal{E}}} \cong \frac{P_H}{F \cdot \sin(\theta - \gamma)} - \text{ctg}(\theta - \gamma). \quad (6)$$

Именно силовое качество экскаватора определяет, в конечном счете, его эффективность и производительность. Этот индекс определяется не только распределением мощностей напора и подъема ковша, но и устойчивостью всей машины, обеспечиваемой ограничением моментов M_C и $M_{\mathcal{E}}$. При этом условие резания будет:

$$\boxed{\xi_{\mathcal{E}} = \text{tg } \vartheta_{\mathcal{E}} > \text{tg } \vartheta_{GP}}, \quad (7)$$

где $\vartheta_{\mathcal{E}}$ – угол силового качества экскаватора,

ϑ_{GP} – угол сопротивления грунта резанию, зависящий также и от экскаватора (например, от степени износа ножа).

Угол силового качества экскаватора с гибкой (канатной) подвеской не является полностью управляемым, так как зависит от устойчивости стрелы, и в данной конструкции напорное усилие не всегда может быть реализовано полностью. Процесс резания полностью управляем лишь при жесткой (гидравлической) подвеске ковша, когда $M_C > 0$. Однако и он ограничен моментом $M_{\mathcal{E}}$ опрокидывания экскаватора.

Здесь следует отметить и другой недостаток канатной подвески, заключающийся в том, что один механизм (подъема ковша) противодействует при резании другому механизму (напорное движение рукояти), тем самым существенно снижая нормальное усилие резания $N_{\mathcal{E}}$ (что видно из равенства (2)) и силовое качество экскаватора. Такое явление называют **техническим противоречием**. Оно тормозит развитие технической системы. Вероятно, поэтому гидравлические экскаваторы и получают большее развитие по сравнению с канатными.

3.3. К расчету усилий резания, развиваемых драглайном

Схема резания грунта ковшом драглайна представлена на рис. 3.3.1.

Из условий равновесия получим:

$$\boxed{N_{\mathcal{E}} = G \cdot \cos \alpha}, \quad T_{\mathcal{E}} = N_{\mathcal{E}} \cdot f_{CT}, \quad (1)$$

$$R_{\mathcal{E}} = S - G(f_{CT} \cdot \cos \alpha + \sin \alpha). \quad (2)$$

Высота точки крепления каната

$$Z_S = \frac{G}{S}(Z_G \cdot \sin \alpha + X_G \cdot \cos \alpha). \quad (3)$$

Из последнего равенства вытекает, что при постоянном Z_S и при переменном G в начале пути резания возможно опрокидывание ковша вперед, а в конце пути резания – опрокидывание назад и дополнительное трение ковша о грунт. Стабилизация ковша натяжением подъемного каната возможна, но при этом снижается нормальное давление $N_{\mathcal{E}}$ ковша на грунт, которое и без того мало, так как определяется лишь собственным весом ковша и грунта в нем, что следует из первых равенств. И это давление падает с увеличением угла откоса. Недостатком драглайна является **нерегулируемое силовое качество**, поэтому здесь влияние типа грунта и износа ножа особенно велико.

Рис. 3.3.1. Схема возможных усилий
на ковше драглайна при резании грунта

Можно предложить следующие меры **повышения эффективности** драглайна:

- а) утяжеление ковша,
- б) «плавающая» точка крепления к тяговому канату,
- в) применение принципа парашютного крепления ковша,
- г) посадка ковша на колесную ось,
- д) превращение ковша в прицепной скрепер,
- е) пригрузка тягой воздушного винта,
- ж) заброс ковша и сброс его с высоты,
- и) работа на откосах резания с оптимальным углом наклона к горизонту и др.

Разумеется, эти меры неполны, а отдельные из них требуют специальной проработки и исследований.

Рис. 3.4.1. Рабочие зоны (возможности) драглайна:
«Р» – зона резания (копания), «В» – зона выгрузки,
«В_с» – дополнительная зона выгрузки за счет сыпучести грунта.

3.4. К расчету размеров забоев драглайна

Расчетная схема рабочих зон (возможностей) драглайна приведена на рис. 3.4.1. Из геометрических соображений получим предельные значения:

а) глубины бокового забоя

$$H_B = \frac{B_1}{\text{ctg}\alpha_1 + \text{ctg}\beta_2}, \quad (1)$$

б) глубины лобового забоя

$$H_{Л} = \frac{B_1}{\text{ctg}\alpha_1 - \text{tg}\gamma}, \quad (2)$$

а также следующие зависимости:

$$\begin{aligned} B_1 &= R_P + H_K \cdot \text{tg}\gamma - r_{CT}, \\ R_P &= r_C + L_C \cdot \cos\alpha_C, \\ H_K &= h_C + L_C \cdot \sin\alpha_C, \\ r_{CT} &= r_C + h_C \cdot \cos\alpha_1. \end{aligned} \quad (3)$$

Дальность выгрузки

$$L_B = \sqrt{R_B^2 - l_{П}^2}, \quad (4)$$

максимальная высота выгрузки

$$H_B = H_K - h_K, \quad (5a)$$

где h_K – длина ковша со стропами.

Максимальная ширина лобового забоя при погрузке на транспорт T_1

$$B_{MAX.Л1} = \sqrt{R_P^2 - l_{П}^2} + R_B - H \cdot \text{ctg}\alpha - a_T, \quad (6)$$

то же на транспорт T_3 , подаваемый на подошву забоя,

$$B_{MAX.Л3} = 2 \cdot \sqrt{R_P^2 - l_{П}^2}. \quad (6a)$$

Определение параметров лобового симметричного забоя при работе в отвалы на две стороны приведено ниже. Схема – на рис. 3.4.2.

Из геометрических соотношений максимальные значения глубины забоя и высоты отвала будут

$$H_{МАКС} = H_{Л}, \quad (7)$$

$$H_{О.МАКС} = H_B, \quad (8)$$

ширина забоя

$$B_{МАКС} = 2 \cdot \left(\sqrt{R_B^2 - l_{П}^2} - H \cdot \text{ctg}\alpha - b_0 - H_0 \cdot \text{ctg}\alpha_0 - B_0 \right), \quad (9)$$

ширина отвала по верху

Рис. 3.4.2. Схемы работы драглайна:

- a* – план бокового забоя (по Б.Э.Казанцеву) с погрузкой через бункер 1 на конвейеры: 2 – приемный (забойный); 3 – передаточный (ярусный) и 4 – магистральный;
- б* – бункер с погрузкой на самосвалы 5;
- в* – разрез по симметричному лобовому забою при выгрузке в отвалы.
- T_1, T_2 и T_3 – возможные оси движения транспортных средств, например, автосамосвалов.

$$B_{0.МАКС} = \sqrt{R_B^2 - l_{II}^2} - H \cdot \operatorname{ctg} \alpha - b_0 - H_0 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_0 - \frac{B}{2}. \quad (10)$$

Из условия равенства масс грунта в выемке и в отвале найдем

$$B = \frac{2 \cdot H_0}{H \cdot K_P} \cdot (H_0 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_0 + B_0) - H \cdot \operatorname{ctg} \alpha, \quad (11)$$

$$B_0 = \frac{H \cdot K_P}{2 \cdot H_0} \cdot (B + H \cdot \operatorname{ctg} \alpha) - H_0 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_0, \quad (11a)$$

$$H_0 = \frac{-B_0 + \sqrt{B_0^2 + 2 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_0 \cdot H \cdot K_P \cdot (B + H \cdot \operatorname{ctg} \alpha)}}{2 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_0} \quad (12)$$

при соблюдении условий (7) – (10).

Здесь, кроме геометрических размеров:

l_{II} – шаг передвижки экскаватора,

K_P – коэффициент разрыхления грунта в отвале.

3.5. Работа многоковшовыми экскаваторами (МКЭ)

3.5.1. Классификация МКЭ.

Многоковшовые экскаваторы (МКЭ) классифицируются:

1. по назначению: а) верхнего и б) нижнего копания,
2. по технологическим признакам: а) поперечного (планирующие) – П и б) продольного черпания (траншейные) – Т,
3. по конструктивным особенностям рабочего органа: а) роторные – Р и б) цепные – Ц:
 - 1) ковшовые и 2) баровые (зубовые),
4. по схеме навески рабочего органа: а) поворотные в плане и б) бесповоротные,
5. по окружающей среде: а) наземные, б) подземные, в) плавающие, г) подводные (донные), д) лунные...

3.5.2. Некоторые соотношения технологических параметров работы МКЭ.

Экскаваторы поперечного черпания (ЭП).

Из условия устранения пропусков (огрехов) при резании грунта скорости движения ковшей v_K и экскаватора $v_{Э}$ связаны определенной зависимостью

$$v_K = \frac{v_{Э} \cdot a}{(b_K - \Delta b)}, \quad (1)$$

где a – шаг ковшей,

b_K – ширина ковша,

Δb – ширина перекрытия полос резания.

С другой стороны, из условия наполнения ковшей ЭП грунтом получим толщину стружки грунта

$$\delta = Q_u / (L \cdot (b_K - \Delta b) \cdot \eta_3) \quad \text{при } \delta \leq [\delta], \quad (2)$$

где Q_u – объем грунта в ковше, приведенный к состоянию в выемке,

L – длина полосы резания,

η_3 – степень полноты захвата грунта ковшем,

$[\delta]$ – допустимая из условий резания толщина стружки грунта.

Экскаваторы траншейные (ЭТ).

Расчетная схема представлена на рис. 3.5.1.

Рис. 3.5.1. Треугольник скоростей для траншейного многоковшового экскаватора.

Из сравнения технических производительностей для машин цикличного и непрерывного действия при $T_u = a/v_K$ получим

$$v_K = v_{\mathcal{E}} \cdot a \cdot B \cdot H / Q_u, \quad (3)$$

где B и H – ширина и глубина траншеи.

Из условия наполнения ковшей ЭТЦ

$$\delta \cong Q_u \cdot \sin \alpha / (B \cdot H \cdot \eta_3) \quad \text{при} \quad \delta \leq [\delta], \quad (4)$$

где α – угол наклона \vec{v}_K к горизонту.

Рассмотрим треугольник скоростей (рис. 3.5.1). Из теоремы синусов получим

$$\sin \mathcal{E} = \sin \alpha \cdot v_{\mathcal{E}} / v_C, \quad (5)$$

где \mathcal{E} – угол между v_K и v_C при

$$\vec{v}_C = \vec{v}_K + \vec{v}_{\mathcal{E}}. \quad (5a)$$

Из теоремы косинусов следует

$$v_C^2 = v_{\mathcal{E}}^2 + v_K^2 - 2 \cdot v_{\mathcal{E}} \cdot v_K \cdot \cos C \quad \text{при} \quad \cos C = -\cos \alpha. \quad (6)$$

Из геометрических построений

$$\delta = a \cdot \sin \mathcal{E}. \quad (6a)$$

После подстановки и преобразований получим следующее уточненное соотношение:

$$v_K = v_{\mathcal{E}} \cdot \sin \alpha \cdot \left(\left(\left(\frac{a}{\delta} \right)^2 - 1 \right)^{0,5} - 1/\operatorname{tg} \alpha \right), \quad (7)$$

которое при малых δ/a превращается в приближенное, и

$$L = H / \sin(\alpha - \mathcal{E}), \quad (7a)$$

$$\delta = Q_u \cdot \sin(\alpha - \mathcal{E}) / (B \cdot H \cdot \eta_3) \leq [\delta]. \quad (7б)$$

3.5.3. Применение метода самообрушения при разработке грунтов.

Для этого с помощью специального землеройного органа (шнек, пила, цепь, струна, струя воды и т. д.) прорезается опережающая щель, грунт забоя обрушается и затем удаляется основным рабочим органом (МКЭ, гидромониторы, землесосы и др.)

Щель подруба, вызывающая обрушение, и поверхности, по которым обрушается часть массива грунта, показаны на рис. 3.5.2а.

Рис. 3.5.2. Оценка влияния подруба на обрушение уступа грунта:
а – схема уступа, *б* – зона устойчивого равновесия (заштрихована).

Здесь:

H – высота забоя (уступа грунта), Δl – глубина подруба.

На рис. 3.5.2б штриховкой выделена зона «У» устойчивого равновесия подрубленного слоя. Здесь кривые предельного равновесия: 1 – на отрыв, 2 – на изгиб, 3 – на оползание (на сдвиг).

По принятой высоте забоя H определяют форму обрушения грунта и глубину подруба и наоборот. Здесь следует заметить, что известны и землеройные машины (это экскаваторы-блокеры), которые забирают грунт еще до момента обрушения, т. е. захватывают ими вырезанные блоки грунта и переносят на транспортные средства или в отвал.

3.6. Меры повышения производительности экскаваторов

1. Мероприятия по борьбе с налипанием грунта на стенки ковшей:

- а) применение вибрации, электроосмоса, воздушной подушки и т. п.
- б) применение гибкой внутренней выворачивающейся прокладки,
- в) уменьшение толщины стружки,
- г) уширение ковшей и совершенствование их формы,
- д) выгрузка на максимальной высоте,

- е) очиститель ковша на конце стрелы,
 - ж) покрытие поверхности антифрикционным материалом (например, нафтлен, созданный ПО «Ленполимер», $f \cong 0,015$),
 - и) принудительная выгрузка грунта и т. д.
2. Мероприятия, повышающие коэффициент наполнения ковша:
- а) оптимальная форма ковша,
 - б) оптимальная высота забоя,
 - в) короткие передвижки,
 - г) применение сменных ковшей разной емкости,
 - д) увеличение толщины стружки,
 - е) регулярная заточка режущей кромки ковша и пр.
3. Мероприятия общего характера:
- а) технологическая комплектность (достаточная емкость транспортных средств, обеспечивающая погрузку до 8 ковшей грунта),
 - б) достаточное число транспортных средств,
 - в) осушение забоя путем создания обратного уклона,
 - г) поперечный уклон площадки стоянки в сторону выгрузки,
 - д) подкладка брусков под гусеницы экскаватора для предупреждения «засасывания» в грунт,
 - е) применение бункерных и конвейерных схем,
 - ж) применение многоточечной разгрузки ковша,
 - з) оптимальная ширина забоя для экскаватора,
 - и) оптимизация влажности, плотности, температуры грунта перед разработкой,
 - к) сокращение времени цикла и т. д.

Анализируя приведенные меры повышения производительности экскаваторов, можно сделать следующие выводы:

- А) эти меры вытекают из простых логических соображений, т. е. из здравого смысла,
- Б) большинство из них наглядно видно из формул расчета производительности и составляющих ее величин,
- В) многие следуют из общих закономерностей технологии и из путей развития технических систем (см. пп. 1.2 и 1.3),
- Г) новые меры можно получить из обзоров новейших патентов и научных исследований,
- Д) разумеется, можно заказать или провести собственные исследования,
- Е) наблюдаются меры, входящие в противоречие друг с другом (например 1.в и 2.д), что указывает на необходимость их оптимизации, ...

Отметим, что несколько таких мер (или даже одна, если новая) могут послужить тем новым источником прибыли, который обеспечит победу фирме в конкурентной борьбе в условиях рынка. И эти новые меры повышения производительности и качества продукции инженер должен уметь искать, находить и применять.

3.7. Применение землеройно-транспортных машин

3.7.1. Расчет усилий резания, развиваемых скрепером.

Схема сил представлена на рис. 3.7.1.

Из проекции всех сил на оси координат X и Y получим:

$$1) \quad N_{\mathcal{E}} = G \cdot \cos \alpha - P_1 - P_2 \quad (1)$$

при

$$T_{\mathcal{E}} = N_{\mathcal{E}} \cdot f_{CT}, \quad (1a)$$

$$2) R_{\mathcal{O}} = F_K - W_1 - W_2 - G \cdot \sin \alpha - T_{\mathcal{O}} - J - B - H_K. \quad (2)$$

Из равенства моментов относительно начала координат

$$P_2 = (G \cdot \sin a + J + B) \cdot \frac{z_G}{x_2} + \frac{x_G}{x_2} \cdot G \cdot \cos \alpha + H_K \cdot \frac{z_H}{x_2} - N_{\mathcal{O}} \cdot \frac{x_N}{x_2}. \quad (3)$$

Здесь (см. (3.2.6))

$$N_{\mathcal{O}} = \xi_{\mathcal{O}} \cdot (R_{\mathcal{O}} + T_{\mathcal{O}}). \quad (4)$$

Сила инерции

$$J = \chi \cdot \frac{G}{g} \cdot \frac{dv}{dT}, \quad (4a)$$

сопротивление ветра

Рис. 3.7.1. Схема возможных усилий скрепера при резании грунта.

$$B = \Omega \cdot q_W, \quad (4б)$$

сопротивление качению (см. гл. 8)

$$W_i = P_i \cdot f_{Ki}, \quad (4в)$$

сила тяги

$$F_K = \min \{ M_{KP} / r_C; P_{CC} \cdot f_{CC} \}, \quad (4г)$$

цепной вес

$$P_{CC} = P_1 \text{ и (или) } P_2. \quad (4д)$$

Расчеты показывают, что силовое качество скрепера определяется не только его собственным весом, но и весом грунта, поступившего в его ковш-кузов.

Аналогично скреперу можно рассчитать и другие машины (автогрейдер, длиннобазовый планировщик и т. п.)

3.7.2. Схемы работы и оценка рабочих усилий бульдозера.

Бульдозер – это тягач, оснащенный толкающей (упряжной) рамой с управляемым стальным щитом – отвалом. Отличается универсальностью и надежностью в работе. Ниже приведена классификация схем работы бульдозеров:

- 1) По способам разработки: а) полосовые, б) траншейные, в) сплошные, г) шахматные.
- 2) По способам транспортирования грунта: а) с законченным циклом, б) с промежуточным валом (складом) грунта.
- 3) По траектории движения: а) кольцевые, б) челночные (без поворота, т. е. с задним порожним ходом).
- 4) По отношению к сооружению: а) продольные, б) поперечные, в) зигзагообразные.
- 5) Схемы движения бульдозеров при засыпке траншей: а) продольные (с поворотным отвалом), б) поперечные челночные, в) смешанные (косо-перекрестные).
- 6) Схемы отсыпки сооружений осуществляются: а) горизонтальными слоями, б) наклонными слоями, в) пионерная отсыпка...
- 7) При планировке применяются удлиненные сквозные проходы при резании только под уклон, т. е. с середины холмика.
- 8) По поперечному профилю стружки: а) прямоугольная, б) гребенчатая, в) сегментная...
- 9) По продольному профилю стружки:

а) прямоугольная,	г) гребенчатая,
б) треугольная (прямая и обратная),	д) сегментная,
в) ступенчатая,	е) криволинейно-треугольная.

Схема сил, развиваемых на ноже бульдозера, а также погрузчика и т. п., аналогична таковой для скрепера, если, тем более, имеем дело с колесным бульдозером. Отличие лишь в том, что нож расположен не между, а впереди колес, что учитывается соответствующими размерами плеч сил. Если бульдозер гусеничный, то его в расчете полезно привести условно к колесному, т. е. реакцию грунта на гусеницы представить двумя силами: P_1 – на передней кромке гусениц, и P_2 – на задней кромке гусениц. Если управление отвалом гидравлическое, то коэффициент силового качества, как и у экскаватора прямая лопата, может быть достаточно большим (вплоть до момента отрыва передней кромки гусениц от грунта, т. е. при $P_1 = 0$). Если же управление канатное, то условия резания приближаются к таковым для драглайна, т. е. нормальное усилие $N_{\mathcal{E}}$ составляет лишь часть собственного веса конструкции отвала. И во всех случаях бульдозер подвержен буксованию, поскольку вес груза не

включается в сцепной вес движителя, и, возможно, именно это техническое противоречие объясняет медленный рост производительности бульдозера.

3.7.3. Пути повышения производительности землеройно-транспортных машин.

Сразу же отметим, что здесь применимо большинство рекомендаций, предложенных для экскаваторов и здесь не повторяемых. Для скреперов применяются и следующие меры:

А. Меры по сокращению длительности цикла:

- 1) хорошее состояние землевозных дорог,
- 2) рыхление грунтов и применение зубьев,
- 3) оптимальные траектории движения,
- 4) сокращение числа переключений до 2-х,
- 5) применение толкачей при наборе грунта и на подъемах,
- 6) применение сдвоенных скреперов (скреперных поездов),
- 7) оптимальная длина резерва (равна удвоенной длине набора грунта),
- 8) применение шахматно-гребенчатой схемы разработки,
- 9) использование уклонов (до 1:15) при наборе грунта и др.

Б. Меры по повышению коэффициента наполнения ковша:

- 1) оптимизация плотности, температуры и влажности грунтов перед разработкой (8% – для песков, 14% – для суглинков),
- 2) применение принудительной загрузки,
- 3) установка боковых щитков для снижения потери грунта. Производительность повышается на 25%,
- 4) принудительное закрытие заслонки и устранение пересыпаний,
- 5) применение ножей косого резания,
- 6) применение бункерно-транспортных схем и т. д.

В. Меры общего характера:

- 1) повышение скоростей движения (до 40 – 60 км/ч),
- 2) применение самоходных скреперов ($q = 25 - 50 м^3$),
- 3) фирмы «Эвклид» и «Летурно-Вестингауз» выпускают скреперы с двигателем, установленным сзади, «Катерпиллер» – с двумя двигателями,
- 4) фирма «Менк» выпустила скрепер-бульдозер, работающий без поворотов, т. е. челночным способом, так как задняя скорость у него больше передней,
- 5) скреперный поезд «Летурно-Вестингауз» ($q = 70 - 80 м^3$, до $110 м^3$, мощностью 1200 л. с., с 8-ю колесами с электродвигателями в ступицах (т. н. мотор-колеса),
- 6) скреперы фирмы «Ганкок» с наклонным реверсивным конвейером загружают ковш в течение 1 мин без толкача. Выполняют бульдозерные, скреперные, планировочные и нагрузочные операции,
- 7) защитные стальные цепи на колесах скрепера повышают тяговые усилия,
- 8) на реверсивных толкачах устанавливается амортизированная толкающая плита,
- 9) разрабатываются скреперы с дополнительным инерционным двигателем-аккумулятором (ИДА), что устраняет потребность в толкачах. Проф. Н.В. Гулиа (СССР) изобрел около 100 различных конструкций маховиков инерционных двигателей. Новые маховики выполнены из ленты стали или стеклоткани, что снижает опасность «стрельбы» при разрыве.

Особенности бульдозеров:

- а) существенные изменения объема продукции (грунта) при транспортировании,
- б) не включение груза в сцепной вес,
- в) возможность исключения операции разгрузки,
- г) повышенная скорость заднего хода.

Пути повышения производительности бульдозеров (дополнительные к указанным для скреперов) **приведены ниже.**

1. Для снижения потерь грунта применяются:
 - а) боковые открьлки (щитки), диафрагмы, козырьки, уширители отвалов, сферические отвалы... Щитки повышают производительность на 50%,
 - б) траншейный метод транспортирования,
 - в) работа с промежуточным складом и др.
 Рекомендации по коэффициенту сохранности грунта при транспортировании приведены в [5, с. 18, 87].
2. Меры общего характера:
 - а) применение взрывных, гидравлических, роликовых, ленточных, скребковых, катмаранных отвалов, на пневмоподушке и т. п.,
 - б) пригрузка с помощью винтов вертолетного типа против буксования,
 - в) сокращение цикла и простоев в работе,
 - г) расширение области применения бульдозеров (планировщики, кусторезы, рыхлители, корчеватели-собиратели, толкачи, древовалы),
 - д) см. также п. 1.3.

3.8. К расчетам производительности отдельных технологий I-го класса

В науке примеры полезней правил.

И. Ньютон

Основы расчета производительности приведены в главе 2, отдельные расчеты – в [5]. Здесь приведены лишь некоторые примеры особенностей расчетов.

3.8.1. Проходка туннелей.

Техническая скорость проходки туннеля горным способом

$$\boxed{П^T = v^T = a/T_{Ц} = a \cdot v_{ц}^*}, \quad (1)$$

где a – заходка (продвигание туннеля за один цикл),

$v_{ц}^*$ – частота циклов проходки туннеля.

$$a = \frac{T_{Ц} - T_{ПОДГ}}{t_{БУ} + t_{УБ}}, \quad (2)$$

где $T_{ПОДГ}$ – время подготовительных работ в цикле,

$t_{БУ}$ и $t_{УБ}$ – времена основных работ (соответственно бурения и уборки) при единичной заходке (т. е. при $a = 1$),

$$T_{Ц} = T_{ОСН} + T_{ПОДГ} = T_{БУ} + T_{УБ} + T_{ПОДГ}. \quad (3)$$

Время цикла $T_{Ц}$ выбирается из условия простоты организации и контроля работ и назначается кратным смене.

$$a \cong (S/\pi)^{0,5}, \quad (4)$$

где S – площадь забоя (площадь сечения выработки или ее части).

В подготовительные работы входят: подкатка и откатка бурильных и других машин, зарядание, взрывание, проветривание забоя, оборка свода, устройство временной крепи и т. п. Аналогично определяются скорости и других подобных технологических процессов (другие способы проходки туннелей, шахт, стволов, бурение скважин, создание полостей в грунте и

пр.). Для бурения скважин заходка равна толщине слоя породы, снимаемой за один оборот сверла (долота), а частота циклов равна частоте оборотов бурового инструмента.

3.8.2. Уборка камней с поля.

Расчет производительности ведем для универсального камнеподборщика типа УКП-0,6 при цикличном процессе работы (см. п. 2.1), принимая

$$\boxed{Q_{Ц} = Q_{К}}, \quad (1)$$

где $Q_{К}$ – объем камня в бункере (накопителе) УКП.

$$Q_{К} = G_{К} / \gamma_{К}, \quad (2)$$

где $G_{К}$ – грузоподъемность бункера,

$\gamma_{К}$ – плотность загрузки камня.

Продолжительность цикла

$$T_{Ц} = T_{М.П} + T_{П} + T_{Г.Х} + T_{М.В} + T_{В} + T_{П.Х} + T_{ПОВ} \cdot n_{ПОВ} + \dots \quad (3)$$

Здесь времена соответствующих операций:

$T_{М.П}$ и $T_{М.В}$ – маневрирования перед погрузкой и выгрузкой,

$T_{П}$ и $T_{В}$ – погрузка и выгрузка,

$T_{Г.Х}$ и $T_{П.Х}$ – груженный и порожний ходы,

$T_{ПОВ}$ и $n_{ПОВ}$ – повороты и их число.

$$T_{П} = T_{Г} \cdot m, \quad (4)$$

$$T_{Г} = T'_{3.Г} + T_{ОПР}, \quad (5)$$

где $T_{Г}$ – время одной подачи камня гребенкой,

m – число этих подач для погрузки бункера,

$T'_{3.Г}$ – время одного забора камня гребенкой,

$T_{ОПР}$ – время опрокидывания (выгрузки) гребенки.

$$T'_{3.Г} = \frac{l'_{3.Г}}{v_3} \cdot \psi, \quad (6)$$

где $l'_{3.Г}$ – длина пути загрузки одного объема камней на гребенку,

v_3 – скорость хода при загрузке,

$\psi = 1,2$ – коэффициент, учитывающий потери времени на разгон и торможение.

$$\boxed{l'_{3.Г} = \frac{Q_{Г}}{(b_{Г} - \Delta b) \cdot h_{3АК} \cdot \eta_3}}, \quad (7)$$

где $Q_{Г}$ – объем одной загрузки на гребенке,

$b_{Г}$ – ширина гребенки,

Δb – ширина перекрытия полос подбора камней,

$h_{3АК}$ – приведенная толщина слоя закаменелости поля,

η_3 – КПД захвата камня гребенкой.

$$Q_{Г} = \frac{Q_{К}}{m}. \quad (8)$$

Пути груженого и порожнего ходов определяются из конкретной расчетной траектории движения машин. Аналогичным образом определяются производительности и большинства транспортных машин.

Рис. 3.8.1. Общий вид дренаукладчика МД-4:

1 – канат; 2 – трос; 3 – трос; 4 – гидрочилндры подьема рабочего оборудования;
5 – маятниковый датчик; 6 – рама; 7 – стоечный нож; 8 – трубоукладчик; 9 – шуповый датчик; 10 – дернорез.

3.8.3. Прокладка дрен.

Для этой цели применяются специальные машины – дреноукладчики, которые делятся на два типа: траншейные и бестраншейные.

В наиболее полном виде дреноукладчик может включать следующие системы:

- 1) трактор-тягач;
- 2) землеройный рабочий орган (ЗРО),
- 3) укладчик дренажной трубки (трубоукладчик),
- 4) укладчик защитного фильтрующего материала (ЗФМ),
- 5) укладчик элементов гидравлической связи поверхности земли (пахотного слоя) с дренажной трубкой,
- 6) засыпатель полости (траншеи).

В траншейных машинах роль ЗРО выполняют многоковшовые экскаваторы (п. 3.5). В бестраншейных дреноукладчиках (рис. 3.8.1) эту роль выполняет вертикальный (стоечный) нож, который и прорезает в грунте полость (щель) для укладки в нее дренажной трубки. Здесь в качестве гидравлической связи в щель может быть уложен непрерывный фильтрующий жгут по волновой линии, близкой к синусоиде.

По аналогии с формулой (6) п. 2.1 эксплуатационную скорость машинной укладки дренажных труб запишем в виде

$$v = \frac{1}{\frac{1}{v^T} + \sum_{i=1}^n (T_{\text{пот}i} / l_i)} K'_e, \quad (1)$$

где v^T – техническая скорость движения дреноукладочной машины,

$T_{\text{пот}i}$ – продолжительность ***i*-го вида перерыва** (потери времени) в работе машины после укладки дренажной трубки соответствующей длины l_i , считая от начала работы.

При ***i* = 1** учитываем влияние потери времени $T_{\text{пот}1}$ на переход от одной дрены к другой:

$$T_{\text{пот}1} \cong \frac{l_d + a}{v_{\text{хх}}} + T_{\text{подг}} + T_{\text{всп}} + T_{\text{закл}}, \quad (2)$$

$$l_1 = l_d, \quad (2a)$$

где l_d – длина дрены,

a – шаг дрены,

$v_{\text{хх}}$ – скорость перехода (холостого хода дреноукладчика),

$T_{\text{подг}}$, $T_{\text{всп}}$ и $T_{\text{закл}}$ – соответственно время подготовительных, вспомогательных и заключительных операций.

При ***i* = 2** учитываем влияние потери времени $T_{\text{пот}2}$ на пополнение запаса дренажных трубок для укладки дренажной линии длиной l_2 .

При ***i* = 3** учитываем влияние потери времени $T_{\text{пот}3}$ на пополнение запаса защитного фильтрующего материала (ЗФМ), необходимого для укладки дренажной линии длиной l_3 :

$$l_3 = l_{\text{ЗФМ}} / K_{\text{п}}, \quad (3)$$

где $l_{3\text{ФМ}}$ – длина запасенного ЗФМ,

K_{Π} – степень потребности дренажа в ЗФМ:

а) для ленточного ЗФМ $K_{\Pi} \leq 1,0$;

б) для объемного ЗФМ $K_{\Pi} \leq 1,0$ и

$$l_{3\text{ФМ}} = V_3 / \omega_3, \quad (4)$$

где V_3 – объем запаса ЗФМ в бункере,

ω_3 – площадь сечения ЗФМ в дренаже.

При $i = 4$ учитываем влияние потери времени $T_{\text{пот}4}$ на пополнение запаса фильтрующего жгута, необходимого для укладки дренажной линии длиной l_4 , определяемой по выражению (3), в котором для фильтрующего жгута, укладываемого по «синусоиде», следует принять

$$K_{\Pi} \cong \pi/2 \quad \text{и} \quad l_{3\text{ФМ}} = l_{\text{жгута}}. \quad (5)$$

Аналогичные технологии и методики расчета производительности могут быть применены при прокладке других подземных коммуникаций и при выполнении многих других видов работ.

ГЛАВА 4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ (ЭКСКАВАЦИИ) МАТЕРИАЛОВ

4.1. О критериях разрушения материала

Основой технологий класса 1 является процесс отделения, разрушения, анализа...

Разрушение – это отделение частей (порций – техатомов) от массива, его разъединение, раздробление, распад... Несомненно, что отделение возможно только в результате **деформации отрыва**, вызываемой усилием (напряжением) растяжения, хотя кажущимися макродеформациями могут быть и сдвиг, и кручение, и излом, и даже сжатие, как, например, при обычном испытании образца на сжатие на прессе. Усилия, прикладываемые к поверхности массива для его разрушения, могут иметь направления: 1) нормальные (от поверхности),

2) касательные, 3) нормальные (к поверхности), 4) произвольные, т. е. направленные под любым углом к поверхности.

Деформации (и воздействия) делятся на статические и динамические, постоянные и переменные по величине и направлению.

Усилия (воздействия) отрыва могут передаваться как телами в их различных состояниях (твердое, газообразное...), так и различными физическими полями (тепловым, электромагнитным...), как это показано в п. 1.1.

Технологии, отнесенные к классу 1, могут включать и несколько воздействий разной природы и направления, как, например, процессы резания, демонтажа и др., которые могут быть сложными (комбинированными). Сюда можно отнести, например, и повреждения растительного и животного мира, и взлет (отделение от земли) ракеты, и извержение вулкана, выгрызание гусеницами капустного листа, и выедание микробами (или компьютерными вирусами) блоков памяти ЭВМ...

Основные критерии отрыва (разрушения) можно записать в виде предельных состояний:

I: в напряжениях растяжения, сдвига, сжатия...

$$\sigma > \sigma_{ПР}, \quad (1)$$

II: в относительных деформациях удлинения, сдвига, сжатия...

$$\varepsilon > \varepsilon_{ПР}. \quad (2)$$

Критерии разрушения можно представить и в интегральных величинах, например:

1) в усилиях растяжения (сжатия), сдвига, ...

$$N > N_{ПР}, \quad (3)$$

2) в перепадах температур

$$\Delta t^\circ > \Delta t_{ПР}^\circ, \quad (3a)$$

3) в моментах изгиба, кручения, опрокидывания...

$$M > M_{ПР}, \quad (3б)$$

4) в напряженности полей

$$H > H_{ПР}, \quad (3в)$$

5) в силах веса

$$G > G_{ПР}, \quad (3г)$$

6) в ускорениях

$$a > a_{ПР} \text{ и т. п.} \quad (3д)$$

Разумеется, к конкретным условиям процесса эти критерии раскрываются более детально.

По сути дела эти неравенства являются критериями выбора (см. п. 1.5), в которых слева приведены параметры возможностей, а справа – требования для выполнения технологий данного класса.

Заметим, что разрушение маловероятно лишь в одном идеальном случае: равномерного и всестороннего сжатия тела в форме шара.

Все технологии 1-го класса можно еще разделить на следующие **подклассы**:

А – отрыв части (техатома) от массива,

Б – вырезание (выпиливание) части массива,

В – вытеснение (раздвижка, раскалывание...) части массива в примыкающее (окружающее) пространство,

Г – замещение массива по частям (техатомам) другим содержанием...

4.2. Общие представления о резании грунтов

Процесс резания можно уподобить процессу отделения стружки грунта при помощи прямого (плоского) или косоуго (трехгранного, сложного) клина. В начальный период происходит уплотнение грунта перед лобовой гранью клина, а затем срез. Срез грунта происходит отдельными следующими друг за другом циклами, т. е. резание осуществляется в режиме автоколебаний. Характер деформации грунта зависит от вида грунта и его состояния.

Различают следующие деформации грунта при резании:

- а) в виде стружки (влажный грунт),
- б) в виде складок (грунт средней влажности),
- в) в виде отдельных кусков (сухой, связный грунт),
- г) в виде изгиба пласта (вязкий, растительный),
- д) в виде валика (песок),
- е) комбинированная.

Выделяют следующие условия резания стружки прямоугольного сечения:

- 1) заблокированное (срезание по трем граням),
- 2) полусвободное (по двум граням),
- 3) свободное (по одной нижней грани).

Отметим, что перед ножом возникает уплотненный клин грунта, аналогичный таковому в основании фундамента или трамбовки при уплотнении грунта [5, с. 62].

Условия резания грунта приведены в п. 3.2. При горизонтальном перемещении ножа в грунте при угле резания $\delta_P = 90^\circ$ сопротивление грунта R_{2P} является по существу пассивным давлением грунта на вертикальную подпорную стенку (рис. 4.2.1а). Но если вес ножа и приложенного к нему вертикального усилия недостаточен для преодоления силы трения N_{2P} между ножом и грунтовым клином, то будет происходить выталкивание (выглубление) ножа из грунта, как это происходит при углах резания больше 45° . При этом для связных грунтов рекомендуется уменьшать угол резания по сравнению с сыпучими. Для горизонтального перемещения ножа, что необходимо для резания грунта, к рабочему органу необходимо приложить вертикальную силу $N_{\mathcal{E}}$, создающую определенное заданное углубление ножа (рис. 4.2.1б).

Рис. 4.2.1. Приближенные схемы деформации смещения грунта вертикальным ножом при отсутствии (а) и при наличии (б) вертикальной составляющей N_{Σ} усилия резания.

Гашение выталкивающей силы, действующей на рабочий орган, может быть частично обеспечено также уменьшением угла резания. Однако, при снижении угла резания до величины менее 30° может произойти обратное явление, а именно зарывание ножа в грунт. Предупредить это можно лишь поддержанием рабочего органа в висячем положении приложением усилия, направленного вверх.

Вертикальная составляющая N_{zp} сопротивления резанию определяется углом резания, типом грунта и коэффициентом его трения по стали, заточкой ножа, высотой отвала, так как перед отвалом землеройно-транспортных машин срезанный грунт накапливается и образует призму волочения.

4.3. Оценка давления и сопротивления грунта

Подобно художественному образу, формула позволяет в наглядной, компактной и обобщенной форме представить материал, для словесного описания которого порой понадобилось бы несколько страниц.

Г.А.Голицын

Интенсивность давления грунта на подпорную стенку: активного – (а) и пассивного – (р) как сопротивления запишем в одном выражении в виде

$$\left. \begin{matrix} a \\ p \end{matrix} \right\} = (q_{II} + \gamma \cdot z) \cdot \lambda_{\frac{a}{p}} \mp 2 \cdot C \cdot \lambda_{\frac{a}{p}}^{0,5}, \quad (1)$$

где γ и C – удельный вес грунта и его сцепление при срезе,
 z – ордината точки от поверхности грунта.

Заметим здесь, что при активном давлении стенка движется (уходит) от грунта, а при пассивном – надвигается на грунт.

Пригрузка поверхности грунта

$$q_{II} = \gamma_{II} \cdot h_{II}, \quad (1a)$$

где γ_{II} и h_{II} – удельный вес и высота слоя пригрузки.

Коэффициенты и углы активного и пассивного давления на вертикальную стенку без учета трения грунта по ней (т. е. при угле трения $\mu = 0$) будут

$$\lambda_{ap} = \operatorname{tg}^2 \beta_{ap} \quad \text{и} \quad \beta_{ap} = \pi/4 \mp \varphi/2, \quad (2)$$

где φ – угол внутреннего трения грунта.

На величину пассивного давления грунта значительное влияние оказывает трение грунта по стенке. Это видно, например, из таблицы коэффициентов пассивного давления в зависимости от угла μ трения по стенке талого грунта.

φ	λ_p (при $\mu = 0$)	λ_p (при $\mu = \varphi$)
10°	1,42	1,63
15°	1,70	2,13
20°	2,04	2,86
25°	2,46	3,94
30°	3,00	5,64
35°	3,69	8,44
40°	4,60	13,30

Суммарное линейное (погонное) давление на стенку

$$R_{zp} = E_{ap} = \int_0^{\delta} \frac{a}{p} \cdot dz = (q_{II} \cdot \delta + 0,5 \cdot \gamma \cdot \delta^2) \lambda_{ap} \mp 2 \cdot C \cdot \delta \cdot \lambda_{ap}^{0,5}, \quad (3)$$

где δ – высота стенки (толщина стружки, слоя грунта и т. п.).

Сопrotивление горизонтальной срезаемой стружки можно приравнять пассивному давлению грунта. При резании в вертикальном направлении пассивное давление при $q_{II} = 0$ получено в виде

$$R_{zps} = E_{ps} = (0,5 \cdot \gamma \cdot \delta + 2 \cdot C) \cdot \delta \cdot \lambda_p^{0,5}. \quad (3a)$$

Полное давление на нож

$$R_{zp}^0 = E_a^0 = E_a \cdot B \cdot K_a^V, \quad (4)$$

где B – длина стенки (ножа, ширина ковша, отвала...)

K^V – коэффициент, учитывающий объемную деформацию грунта.

Предельные сопротивления (пределы прочности) грунта растяжению и сжатию ориентировочно равны

$$R_p = 2C/\lambda_p^{0,5} \quad \text{и} \quad R_c = 2C/\lambda_a^{0,5}. \quad (5)$$

Здесь приведем также и другие соотношения

$$R_p = 2C \cdot \lambda_a^{0,5} \text{ и } R_c = 2C \cdot \lambda_p^{0,5}, \quad (5a)$$

$$C = 0,5 \cdot (R_c \cdot R_p)^{0,5} \text{ и } \varphi = \arcsin \frac{R_c - R_p}{R_c + R_p}, \quad (6)$$

$$R_c \approx R_p \approx 2C \cdot \cos \varphi \text{ при } \varphi \rightarrow 0.$$

$$\nu_R = R_p / R_c = \lambda_a, \quad R_c / R_p = 1 / \nu_R = \lambda_p. \quad (7)$$

Коэффициенты физической анизотропии:

$$\nu_E = E_p / E_c \quad (7a)$$

– для глинистых грунтов примерно 1,5;

$$\nu_\varepsilon = \varepsilon_{ПП.p} / \varepsilon_{ПП.c} = \nu_R / \nu_E \quad (7b)$$

– для глин = 0,7...0,25 при изменении $\varphi = 0^\circ \dots 30^\circ$.

Здесь E – модуль деформации грунта,

$\varepsilon_{ПП}$ – критическая (разрушающая) линейная деформация.

Для мерзлых грунтов известны соотношения:

$$R_p = (0,25 \dots 0,35) \cdot R_c; \quad C = (0,2 \dots 0,25) \cdot R_c; \quad E = (120 \dots 160) \cdot R_c. \quad (8)$$

Рис. 4.4.1. Расчетные схемы к резанию грунта:
a – при отсутствии износа; *b* – при большом износе ножа;
в – смятие грунта под ножом; *г* – влияние крупных зерен грунта.

4.4 Влияние износа ножа и крупности частиц грунта на сопротивление резанию

Причина важнее следствия.

На рис. 4.4.1а приведена схема резания при отсутствии износа ножа ($r_0 = 0$), и здесь сопротивление грунта $N_{зр}$ заглуплению ножа будет отрицательным.

На рис. 4.4.1б передняя кромка ножа закруглена вследствие износа (т. е. $r_0 \gg 0$), при этом сопротивление резанию резко возрастает. Перед закруглением ножа возникает уплотненный грунтовый клин, отделяющий стружку. Это явление «присоединенной массы» широко распространено в природе. Оно наблюдается и в металлообработке^{*)} и при резании древесины. Увлечение части среды и сзади движущегося тела наблюдается в жидкости и в газе.

Требуемое усилие вдавливания ножа в грунт запишем в виде

$$N_{\text{Э}}^0 = N_{\text{Эр}}^0 = N_{\text{Эр}} \cdot B = \sigma_{z_0} \cdot a_x \cdot B \quad (1)$$

при

$$\sigma_{z_0} = E \cdot \Delta S / h_{\text{акт}}, \quad (1a)$$

где, кроме очевидного из рисунка,

σ_{z_0} – напряжения сжатия в грунте под острием ножа,

E – модуль деформации грунта.

Введя соотношения

$$\Delta S = \psi \cdot r_0 + \psi_d \cdot d \quad \text{и} \quad h_{\text{акт}} = n \cdot a_x, \quad (2)$$

получим

$$N_{\text{Эр}}^0 = E \cdot \frac{\psi \cdot r_0 + \psi_d \cdot d}{n} \cdot B, \quad (3)$$

где d – расчетный (осредненный по длине ножа) диаметр частиц грунта ($\cong d_{50}$).

Эмпирические коэффициенты в первом приближении можно принять

$$n \approx 2, \quad \psi \approx 0,5, \quad \psi_d \approx 0,5.$$

Дополнительная сила трения

$$T^0 = N_{\text{Эр}}^0 \cdot f_{\text{ст}}, \quad (3a)$$

где $f_{\text{ст}}$ – коэффициент трения стали по грунту (0,1–0,6). Следует отметить, что это возрастание дополнительных сопротивлений износа можно и нужно исключать своевременной заточкой, и это всегда окупается (вспомним хотя бы применение перочинного ножа).

4.5. Сопротивление прорезанию щели бестраншейным дреноукладчиком

Точность прогноза пропорциональна числу учтённых факторов.

Щель в грунте прорезается вертикальным (стоечным) ножом (см. п. 3.8.3).

Сопротивление прорезанию представим в виде

$$N_0 = N_{\text{л}} + 2T_{\text{б}} \quad (1)$$

при

$$T_{\text{б}} = N_{\text{б}} \cdot f_{\text{ст}}, \quad (1a)$$

где $N_{\text{л}}$ и $T_{\text{б}}$ – соответственно лобовое и боковое сопротивления грунта движению ножа (рис. 4.5.1),

^{*)} См. акад. Кузнецов, «Теория наростов при резании металлов».

Рис. 4.5.1. Расчетная схема сопротивления прорезанию щели в грунте.

N_{δ} – нормальное давление на боковой поверхности ножа,

$f_{ст}$ – коэффициент трения стали по грунту (0,1–0,6).

В свою очередь

$$N_{л} = E_p \cdot B \cdot K_v^л \cdot K_{\phi}^л \cdot (1 - \xi_w^л) \cdot (1 - K_f^л) \cdot K_d, \quad (2)$$

$$N_{\delta} = E_p \cdot l \cdot K_v^{\delta} \cdot K_{\phi}^{\delta} \cdot (1 - \xi_w^{\delta}) \cdot \eta_p \cdot (1 - K_f^{\delta}), \quad (3)$$

где E_p – суммарное линейное (погонное) пассивное давление грунта на стенку (см. п. 4.3)

при $\delta = H$ (глубина щели),

B и l – соответственно толщина и ширина ножа,

K_v – коэффициент объемности выпора,

K_{ϕ} – коэффициент влияния формы ножа,

ξ_w – коэффициент влияния степени развития давления в поровой воде (учет натуральной «смазки» поровой водой в грунте),

K_f – коэффициент влияния применения специальных (искусственных) антифрикционных мероприятий на поверхности ножа,

K_d – коэффициент влияния крупности зерен грунта,

η_p – степень развития пассивного давления грунта.

По аналогии с учетом пространственности выпора грунта перед одиночной сваей запишем

$$K_v = 1 + \frac{H}{3d} \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\lambda_a^{0.5}}, \quad (4)$$

где для лобового давления $d = B$ и для бокового давления $d = l$.

Заметим здесь, что сравнительный анализ данной методики с другими, применяемыми, например, для оценки сопротивлений перемещению кротователей и плужных каналокопате-

лей, погружению свай, продавливанию (проколу) труб, выдуванию полостей в грунте и т. д., может привести к их взаимному обогащению и повышению точности прогнозов.

Отдельные мероприятия по снижению сопротивления прорезанию приведены в п. 1.3.4, а также в п. п. 3.6 и 3.7.3.

Перспективным представляется направление исследований по совершенствованию пилообразной формы ножа.

4.6. Приближенная оценка устойчивости выемки (полости) в грунте

А) Давление на временную крепь горизонтальной горной выработки в скальном грунте

$$q = \gamma \cdot h_0 = \gamma \cdot \frac{b}{2f_{\Pi}} \quad (1)$$

при

$$f_{\Pi} = R_{сж} / 100 \approx \operatorname{tg} \varphi_{\Pi}, \quad (1a)$$

где γ – удельный вес породы,

h_0 – высота свода обрушения,

b – ширина пролета выработки,

f_{Π} – коэффициент крепости породы по М.М. Протодьяконову,

$R_{сж}$ – предел прочности породы на сжатие ($\text{кгс}/\text{см}^2$),

φ_{Π} – угол внутреннего трения породы по М.М. Протодьяконову.

Б) Допустимая ширина незакрепленного пролета горизонтальной выработки

$$B_{нз} = 2C / (\gamma \cdot K_{зап}), \quad (2)$$

где C – сцепление породы при срезе,

$K_{зап}$ – коэффициент запаса устойчивости свода (2...3),

$$C \approx 5 \cdot f_{\Pi} \quad (\text{тс}/\text{м}^2). \quad (2a)$$

Пролет для вертикальной выработки (ствола) можно принять в 2 раза больше.

В) Предельная высота незакрепленного вертикального откоса (глубина возможной вертикальной трещины или щели) без учета фильтрационных сил

$$h_{пр} = h_T = 2C / (\gamma \cdot \lambda_a^{0.5}) = R_{сж} / \gamma, \quad (3)$$

где λ_a – коэффициент активного давления грунта (см. п. 4.3).

4.7. К расчету усилия корчевания деревьев*

Смотри в корень!

К. Прутков

Известный метод расчета (по Самсонову Л.Н.) основан на гипотезе отрыва массива грунта по концам корней. При этом грунт характеризуется предельным напряжением на разрыв.

* Примечание: первичные численные расчеты были выполнены студентами ИСФ Бородиным А.А. и Липатовой И.В.

Рис. 4.7.1. Схема к расчету усилия вертикального корчевания деревьев.

Нами предлагается находить промежуточную поверхность отрыва массива из условия минимума сопротивления корчеванию с учетом, по отдельности, веса грунта, прочности корней, прочности скелета грунта и порового пространства на разрыв. При этом учитывается концентрация напряжений на оси ствола и неодновременность наступления их максимума.

Расчетная схема приведена на рис. 4.7.1.

Усилие вертикального корчевания дерева запишем в виде

$$N^0 = P_c + P_{zp} + N_k + N_{ск} + N_{II}, \quad (1)$$

где P_c – вес надземной части дерева,

P_{zp} – вес грунта, захваченного корнями при их извлечении,

N_k – вертикальная равнодействующая сопротивления разрыву корней,

$N_{ск}$ – вертикальная равнодействующая сопротивления разрыву скелета грунта,

N_{II} – равнодействующая сопротивления разрыву пор грунта.

В свою очередь слагаемые представим в виде:

$$P_c = \pi \cdot r_c^2 \cdot H_c \cdot \xi_c \cdot \gamma_d, \quad (2)$$

$$P_{zp} = \alpha_{\phi.v} \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \psi^3 \cdot r_k^3 \cdot \gamma_{zp}, \quad (3)$$

$$N_k = \alpha_{\phi.s} \cdot \pi \cdot r_c^2 \cdot \left(1 - (\psi + \Delta\psi_k)^n\right) \cdot R_k \cdot \alpha_T / m_k, \quad (4)$$

$$N_{ск} = \alpha_{\phi.s} \cdot 2\pi \cdot \psi^2 \cdot r_k^2 \cdot R_{ск} / m_{ск}, \quad (5)$$

$$N_{\Pi} = \alpha_{\phi.s} \cdot 2\pi \cdot \psi^2 \cdot R_{\Pi} \cdot \alpha_T \cdot \eta_{\Pi} / m_{\Pi}, \quad (6)$$

где r_c – радиус ствола дерева в нижней части,

H_c – высота дерева,

ξ_c – коэффициент учета сбега и ветвистости дерева,

γ_{∂} – удельный вес древесины ствола,

γ_{zp} – удельный вес грунта,

$\alpha_{\phi.v}$, $\alpha_{\phi.s}$ – коэффициенты формы отрываемого массива, соответственно по объему и по поверхности,

R_k – предел прочности на разрыв корней,

n – степень развитости корневой системы,

$R_{ск}$ – предел прочности на разрыв скелета грунта,

α_T – коэффициент одновременности развития сопротивлений разрыву,

R_{Π} – предел прочности воды в порах на разрыв,

η_{Π} – степень глубины вакуума в порах при разрыве,

m_k – коэффициент концентрации напряжений в корнях,

$m_{ск}$ – то же, в скелете грунта,

m_{Π} – то же, в порах грунта.

В первом приближении можно принять: $\xi_c = 1...3$; $\gamma_{\partial} = (8...10) \text{ кН/м}^3$; $\gamma_{zp} = (15...20) \text{ кН/м}^3$; $\alpha_{\phi.v}, \alpha_{\phi.s} = 0,8...1,2$; $R_k = (10...30) \text{ МПа}$; $n = 0,1...0,3$; $R_{ск} = (0,0...0,1) \text{ МПа}$; $\alpha_T = 0,5...0,7$; $R_{\Pi} = 0,1 \text{ МПа}$; $\eta_{\Pi} = 0,0...0,5$ при переходе от песков к глинам; $m_k = 2...3$; $m_{ск} = 1,5...2$; $m_{\Pi} = 1,5...2$.

Численные значения в расчете могут и должны быть уточнены.

Степень заглубления поверхности разрыва грунта:

$$\psi = \frac{r}{r_k} \leq 1 - \Delta\psi_k \quad (7)$$

при

$$\Delta\psi_k = \frac{\Delta r_k}{r_k}, \quad (8)$$

где r – глубина поверхности разрыва грунта,

r_k – глубина распространения корневой системы,

Δr_k – превышение глубины разрыва корней над глубиной разрыва грунта.

Предел прочности скелета грунта на разрыв может быть определен по выражению:

$$R_{ск} = 2C \cdot \text{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (9)$$

где φ и C – угол внутреннего трения и сцепление грунта при сдвиге.

Минимум функции $N^0(r$ или $\psi)$ и будет решением поставленной задачи.

Уточнение решения может быть получено по следующим направлениям учета дополнительных факторов:

- а) изменение прочности элементов (корневой системы и грунта) с глубиной,
- б) влияние скорости выдергивания,
- в) положение уровня грунтовых вод,
- г) многообразие и случайность форм и степени развития корневой системы и усложнение поверхностей разрыва грунта и корней,
- д) вариации грунтовых условий,
- е) уточнение коэффициентов концентрации напряжений,
- ж) сопротивление выдергиванию корней на участке $\Delta r_k \dots$

Рассматриваемая задача отрыва массы грунта для глин близка к задаче прилипания (присоса) затонувших судов, лежащих на илистом грунте, при подъеме которых возникает в поровой воде отрицательное поровое давление (вакуум), резко повышающее сопротивление отрыву. И это уже задача теории консолидации грунтовых масс механики грунтов, а точнее подтеории разуплотнения водонасыщенных грунтов (см. Флорин В.А., Бородавкин П.П., Иванов П.Л. и др.)

Анализируя изложенное, можно предложить следующие меры снижения сопротивления отрыву:

- а) штыкование (прокалывание) предполагаемой зоны отрыва,
- б) нагнетание воды или воздуха в эту зону,
- в) замедленное и пульсирующее выдергивание,
- г) продольная и поперечная вибрация,
- д) круговое расшатывание ствола,
- е) круговое подрезание извлекаемого массива...

Отдельные положения данной работы могут быть применены и для условий корчевания камней, а также извлечения из грунта некоторых конструкций, например, анкерных устройств, «корневых» свайных фундаментов и т. п.

Отметим, что в Швеции уже создана специальная «лесотеребящая» машина производительностью 60 стволов в час.

ГЛАВА 5. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ II-ГО КЛАССА (НАРАЩИВАНИЕ МАТЕРИИ)

5.1. Структура и особенности технологий II-го класса

Состав технологий – см. п. 1.1.2.

Это класс технологий непосредственного строительства, созидания, роста, **соединения**, синтеза, укрупнения, наращивания, **омоноличивания**, упрочнения, питания, усвоения... , т. е. противоположный классу I.

И все же здесь следует отметить, что можно созидать и методами разрушения, по манере скульпторов «отсечь все лишнее», причем не только снаружи, но и изнутри: вырубание в скалах подземных сооружений и целых соборов. В последнем случае порода убирается и снаружи сооружений.

С помощью осуществления технологий класса II растут не только города, но и молекулы, не только космические станции, но и деревья, не только вулканы, но и люди, и их интеллектуальный потенциал. Сюда же относится и такая часть информационных технологий, как технология обучения... Из теории познания сюда относятся методы синтеза.

Развитая технология класса II включает следующие процессы:

1. транспортирование материала к массиву (сооружению),
2. подготовка (оптимизация параметров) массива,
3. оптимизация параметров окружающей среды,
4. подвод и обеспечение оптимальных условий работы машин и управления ими,
5. выверка положения и оптимизация состояния порции,
- 6. присоединение части (порции – техатома) к массиву,**
7. омоноличивание порции с массивом,
8. контроль качества омоноличивания,
9. удаление машины (рабочего органа),
10. защита массива от произвольного обрушения,
11. контроль объемов присоединенных масс и обеспечение границ объекта,
12. отделка зоны присоединения к массиву,
13. транспортирование изделия на склад или для дальнейшей (укрупненной) сборки,
14. ...

В соответствии с законом сохранения масс (вещества) насыпь не может осуществляться без выемки и без промежуточной стадии транспортирования, поэтому процессы всех классов жестко связаны между собой, например, класс I не может быть осуществлен без класса II и

часто III, и все классы по сути своей могут быть выражены единственно классом IV, так как все, что происходит в мире, есть только движение в четырехмерном пространстве.

Поэтому все технологии любого класса как начинаются, так и заканчиваются процессами транспортирования.

Процесс присоединения в основном определяет название технологии, относящейся к классу II. Омоноличивание порции с массивом осуществляется как процессами класса III, так и других классов. Аналогичные процессы протекают и при освоении учащимися новой информации при осуществлении обучающих технологий.

Сюда можно отнести и наращивание пчелами сот и заполнение их медом, нанесение красок на холст и чернил на бумагу (искусство, письменность), но и на рубашку тоже (все виды загрязнений), оседание космической пыли и засорение русел рек, все виды питания, рост кристаллов, биологических систем и их интеллекта...

5.2. Основные принципы возведения (созидания) сооружений. Классификация швов

Где тонко, там и рвется; где слабо, там и порется.

Русская пословица

1. Рост объекта (сооружения) происходит путем присоединения к целому (массиву) некоторых порций (частей), т. е. возведение производится по частям (складывается из отдельных технологических атомов).

2. Присоединенные части должны быть прочно закреплены (омоноличены) с целым (массивом) на требуемый период времени.

3. Отсюда следует, что наибольшего внимания требует качество выполнения швов между отдельными порциями и частями возводимого сооружения. Например, в каменных конструкциях промышленно-гражданских сооружений можно выделить следующие швы:

1) операционные (между камнями, кирпичами – техатомами):

- а) тычковые (поперечные),
- б) ложковые (верстовые),
- в) постельные (межслойные),

2) технологические (между делянками),

3) строительные (между захватками),

4) секционные, деформационные,

5) температурно-усадочные,

6) примыкания стен,

7) примыкания перекрытий,

8) сопряжения с фундаментом,

9) сопряжения с кровлей,

10) сопряжения с проемами и т. д.

Швы имеются и внутри кирпичей (и связующего их раствора):

- а) межагрегатные,
- б) межчастичные,
- в) межминеральные,
- г) межмолекулярные,
- д) межатомные и т. д.

Швы в бетонных и грунтовых сооружениях аналогичны и приведены в последующих параграфах.

4. Как известно, общая прочность шва

$$N_0 = R \cdot A, \quad (1)$$

где R – удельная прочность шва (предел прочности при разрушении),
 A – площадь шва.

Поэтому омоноличивающий материал (клей и пр.) должен быть не менее (а более) прочным, чем соединяемые части, и он должен быть до твердения достаточно подвижным (пластичным), чтобы обеспечить наибольшую площадь контакта соединяемых частей.

Отсюда и технология сварки, требующая размягчения (расплавления) материала, и применение суперпластификаторов и вибрационной обработки бетонной смеси и т. д. Прочность шва повышается также увеличением и его площади, например, утолщением шва, увеличением его длины и т. п.

5. Явление отторжения чужеродной субстанции наблюдается и в строительной технологии. Поэтому легче соединить близкие по составу и характеристикам (более родственные) материалы. И швы между ними к тому же менее подвержены старению, этому вездесущему спутнику и всемогущему индикатору Времени. Хотя в природе все сложнее: не менее значителен и другой спутник Времени – Созидание. Примерами последнего являются не только рост слонов и баобабов, но и кристаллов, и вулканов, и горных хребтов, и океанских впадин, и целых материков...

Наука, например, утверждает, что Индостан, как одна из крупных тектонических плит, откололась от Австралии и Антарктиды и, «приплыв» к Азии, врезалась в материк, смяла его и образовала высочайший тектонический шов – горную цепь Гималаев.

5.3. К расчету размеров блоков бетонирования из условия надежности технологических швов

Выделим следующие виды швов бетонных сооружений:

1. Граничные с основанием.
2. Граничные с другими сооружениями.
3. Деформационные (межсекционные).
4. Температурно-усадочные.
5. Строительные (межблочные).
6. Технологические (межслойные).
7. Операционные (межпорционные).
8. Композиционные (межзерновые, межфазовые),
9. Внутренние (межминеральные, межмолекулярные, межатомные...).

И качество сооружения, как и любой вещи, определяется прежде всего прочностью швов, в т. ч. и технологических, площадь которых определяется размерами блоков в плане и толщиной слоев.

На выбор размеров блоков бетонирования влияют следующие факторы:

- 1) обеспечение качества перекрытия швов между соседними слоями укладки бетона, то есть снижение ослаблений технологических швов,
- 2) устранение температурно-усадочных трещин в бетоне, предупреждение их возникновения,
- 3) сокращение стыков арматуры,
- 4) сокращение площади опалубливаемой поверхности,
- 5) сокращение площади омоноличивания кладки,
- 6) повышение производительности укладки бетона.

Таким образом, размеры блоков бетонирования определяются многими факторами, часто несущими в себе противоположные требования, и выбор, как и везде, является результатом компромисса.

Одним из основных факторов является обеспечение требуемого качества бетонной кладки, которое определяется надежным перекрытием слоев бетонирования. Качество сопряжения слоев определяется возрастом бетона предыдущего слоя к моменту перекрытия его последующим слоем, а также методами подготовки поверхности и обработки самого укладываемого слоя. Способ подготовки поверхности, естественно, определяется прочностью бетона, изменяющейся с его возрастом. В настоящее время известны следующие способы сопряжения слоев (и соответствующие им ориентировочные возрасты бетона при перекрытии слоев), гарантирующие качество швов сопряжения слоев бетона на портланд-цементе:

I-я стадия – укладка без обработки поверхности в пределах срока до начала схватывания бетона (до 2 часов),

II-я стадия – удаление цементной пленки струей воды при возрасте бетона до 12 часов (или его прочности до 3 МПа),

III-я стадия – обработка песчаной струей через 2 суток после бетонирования,

IV-я стадия – обработка поверхности стальными щетками при возрасте бетона до 12 суток,

V-я стадия – насечка поверхности молотком с зубчатым наконечником (бучардой) при возрасте бетона более 12 суток,

VI-я стадия – предварительное ослабление (размягчение) поверхности бетона обработкой 15%-ым раствором ССБ, при возрасте бетона более 28 суток.

Для примера, ориентировочные сроки набора расчетной прочности (на 100%) цементами, перечисленными ниже, составляют:

– портланд – 28 суток,

– глиноземистый – 24 часа,

– зубооградный – 5 минут.

Расчет размеров блоков из условия обеспечения надежности технологических швов производим по следующим зависимостям.

Запишем равенство масс бетонной смеси при подаче в блок (M_1) и в уложенном слое (M_2) в виде

$$\boxed{J_{\text{под}}^{\text{п}} \cdot T_{\text{сл}} \cdot \rho_{\text{под}} = \Omega \cdot h \cdot \rho_{\text{б}}}, \quad (1)$$

откуда площадь блока в плане

$$\Omega = \frac{J_{\text{под}}^{\text{п}} \cdot T_{\text{сл}}}{h} \cdot \frac{\rho_{\text{под}}}{\rho_{\text{б}}}, \quad (2)$$

где $J_{\text{под}}^{\text{п}}$ – проектный поток подачи смеси в блок,

$T_{\text{сл}}$ – время укладки одного слоя смеси,

h – толщина уплотненного слоя,

$\rho_{\text{под}}$ и $\rho_{\text{б}}$ – плотности смеси соответственно при подаче и в уложенном слое.

$$J_{\text{под}}^{\text{п}} = \begin{cases} \xi_{\text{под}} \cdot J_0, & (3) \\ J_0 / n_{\text{б}}, & (3a) \\ \Pi_{\text{под}}^{\text{т}} \cdot N_{\text{под}}, & (3б) \end{cases}$$

где $\xi_{\text{под}}$ – доля бетонной смеси от суммарной производительности бетонного завода J_0 , подаваемая в данный блок,

$n_{\text{б}}$ – число одновременно бетонизируемых блоков,

$P_{\text{под}}^T$ – техническая производительность машины, подающей бетонную смесь в блок,
 $N_{\text{под}}$ – число подающих машин.

$$T_{\text{сл}} = T - T_{\text{тр}}, \quad (4)$$

где T – возраст бетонной смеси от момента затворения до момента перекрытия следующим слоем,

$T_{\text{тр}}$ – время транспортирования (от момента затворения до момента окончания укладки одной порции смеси в блок). Под порцией понимается объем одной подачи смеси, например, краном.

Соотношения между размерами блоков в плане зависят от схемы разбивки и конкретных условий строительства. Высота блока назначается из перечисленных выше и других условий (например, защита от трещинообразования).

От выбранных размеров блока (и от его объема) зависит стоимость строительства сооружения. При этом существует оптимальный объем блока (и соответственно, его размеры), при котором стоимость будет минимальной.

При малых размерах блока стоимость бетонирования сооружения возрастает за счет увеличения площади опалубки, числа стыков арматуры, затрат на вспомогательные операции и т. п.

При больших размерах блоков потребуются повышенные затраты на обеспечение оптимального температурного режима и трещиностойкости бетона, а также надежности технологических швов и др.

В отдельных случаях расчетная площадь блока может оказаться меньше оптимальной. Снять жесткие ограничения по площади блока позволяют и следующие меры:

- 1) переход к бетонированию наклонными слоями, где длина последних принимается в качестве расчетной ширины блока,
- 2) переход к токтогульскому методу, при котором рассеивание тепла происходит в вертикальном направлении, при высоте блока, равной толщине отсыпаемого слоя бетонной смеси.

В случае бетонирования наклонными слоями расчетной поверхностью (площадью) блока следует полагать наклонную поверхность (площадь) бетонирования. При этом получаем условия, при которых один из фактических размеров блока не имеет ограничений по критерию надежности перекрытия технологических швов.

К рассмотренной задаче сводятся и многие другие технологические проблемы, например, определения размеров блоков, карт отсыпки грунтов, площадей поверхности забоев землеройных машин из условий:

- а) защиты слоев (бетона, грунта, стружки...) от промерзания или перегрева, принимая

$$T_{\text{сл}} = T_{\text{ост}},$$

где $T_{\text{ост}}$ – время остывания (нагревания) соответствующего слоя до допустимой температуры,

- б) защиты слоев от пересушивания (переувлажнения), принимая:

$$T_{\text{сл}} = T_{\text{вл}},$$

где $T_{\text{вл}}$ – время доведения слоя до оптимальной влажности,

- в) из этого условия можно определить и размеры прудков при отсыпке грунта в воду, с учетом допустимого времени $T_{\text{вл}}$ намокания комьев грунта в прудке.

Из аналогичных решений, с использованием зависимостей п. 1.2, можно определять параметры технологий многих видов.

5.4. Выбор опалубки и уточнение давления бетонной смеси

Воздерживаясь от отдания абсолютного предпочтения какому-либо из приведенных примеров опалубки, следует учесть их достоинства и недостатки и для каждого конкретного случая разрабатывать конструкцию, наиболее полно отвечающую всем требованиям данного строительства.

Ермолов А.А., Петров Г.Д.

Для создания границ отливаемого (например, бетонного) сооружения или его частей (блоков) применяется форма (опалубка). Опалубка – это «плотина» для ограждения бетонной смеси. Она похожа также на подпорную стенку для ограничения грунтовой насыпи. Ниже приведена краткая классификация опалубки.

А. По назначению:

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| а) формовочная, | ж) термоактивная, |
| б) защитная и герметизирующая, | з) уплотняющая (виброопалубка), |
| в) упрочняющая, | и) несущая, |
| г) декоративная, | к) прозрачная, |
| д) армирующая, | л) комбинированная. |
| е) теплоизоляционная, | |

Б. По водопроницаемости:

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1) непроницаемая, | 5) вакуумирующая (отсасывающая и поглощающая одновременно), |
| 2) дренирующая, | 6) электроосмотирующая, |
| 3) проницаемая (в т. ч. сетчатая), | 7) комбинированная. |
| 4) впитывающая (влагопоглощающая), | |

В. По системе крепления:

- | | |
|------------------------------|--------------------------------|
| а) гравитационная, | ж) чулковая (гибкая оболочка), |
| б) подкосная (контрфорсная), | з) пневматическая, |
| в) заанкеренная, | и) спиральная, |
| г) консольная, | к) комбинированная, |
| д) арочная, | л) ящичная (без дна), |
| е) парусная, | м) коробчатая и др. |

Г. По мобильности:

- | | |
|---------------------------|--------------------------------|
| 1) стационарная, | 6) скользящая (ползучая), |
| 2) съемная, | 7) шагающая («перекати-поле»), |
| 3) разборно-переставная, | 8) гусеничная, |
| 4) двухъярусная, | 9) комбинированная. |
| 5) передвижная (катучая), | |

Основные критерии (см. п. 1.5) применимы и для выбора опалубки. Ниже приведены дополнительные критерии выбора:

$$V-1: P_{II} \geq [P_{II}],$$

$$V-3: \Gamma \geq [\Gamma],$$

$$V-2: \mathcal{K} \geq [\mathcal{K}],$$

$$V-4: M \geq [M].$$

где P_d , \mathcal{K} , G , M – плотность (бетононепроницаемость), жесткость, гладкость внутренней поверхности, многократность применения (оборачиваемость) опалубки (ее возможности). В скобках приведены их допустимые (требуемые) значения.

Основной нагрузкой на опалубку, естественно, является давление бетонной смеси. Свойства бетонных смесей могут быть весьма различными и имеют важную особенность – изменяться во времени.

Рис. 5.4.1. Изменение прочностных характеристик бетонной смеси во времени

Бетонная смесь представляет собой дисперсное тело, которое можно рассматривать в механическом отношении в качестве разновидности грунта. При этом интенсивность давления смеси на опалубку можно записать в виде, аналогичном активному давлению грунта на подпорную стенку (см. п. 4.3), т. е.

$$a = a(T) \quad \text{при} \quad \varphi = \varphi(T), \quad c = c(T) \quad \text{и} \quad \gamma = \gamma_b, \quad (1)$$

где γ_b – удельный вес бетонной смеси,

T – возраст бетонной смеси в рассматриваемой точке блока.

Зависимости характеристик сдвига от времени строятся на основании результатов сдвиговых испытаний образцов бетонной смеси в различном возрасте со времени ее затворения (рис. 5.4.1).

Зная «историю» бетона в данной точке Z бетонируемого блока, можно установить возраст бетона. Затем по полученным кривым определяются параметры сдвига и вычисляется интенсивность давления на опалубку.

Возраст бетона в блоке определим по следующей зависимости:

$$T = T_{\text{тр}} + T_{\text{укл}} + T_{\text{выд}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{тр}}$ – время транспортировки бетонной смеси от момента затворения до момента выгрузки ее в блок,

$T_{\text{укл}}$ – время укладки смеси выше отметки, на которой определяется интенсивность давления,

$T_{\text{выд}}$ – время выдерживания блока после окончания его бетонирования.

Для получения максимума давления последнее слагаемое принимается равным нулю.

В свою очередь

$$T_{\text{укл}} = \frac{\Omega \cdot Z}{J_{\text{под}}^{\text{п}}}, \quad (3)$$

где Ω – площадь блока бетонирования,

$J_{\text{под}}^{\text{п}}$ – интенсивность подачи бетонной смеси в блок.

Характер эпюры давления представлен на рис. 5.4.2 в виде заштрихованной области.* Здесь же для сравнения приведены эпюры «гидростатического» давления и по рекомендациям НиТУ.

Наиболее важными, по нашему мнению, направлениями дальнейших уточнений являются следующие:

- а) учет порового давления воды в бетонной смеси при расчете прочности и деформаций опалубки,
- б) влияние шероховатости и водопроницаемости опалубки на усилия в элементах и на прочность самого бетона;
- в) влияние податливости опалубки на ее прочность;
- г) учет явлений зависания бетона на опалубке и на анкерных конструкциях;
- д) учет влияния армирования и наличия закладных частей;
- е) учет пространственной схемы работы опалубки и др.

* Динамическая составляющая давления на опалубку в данной работе не рассматривается.

Рис. 5.4.2. Эпюры давления бетонной смеси на опалубку:
 a – по модели грунтовой массы; ^{*)} b – по рекомендациям НИТУ.
 H_6 – высота блока; R – радиус действия виброуплотнителей.

5.5. Классификация и выбор соединений в технологиях II-го класса

По кинематике соединения делят на подвижные и неподвижные.

По геометрии на:

- 1) точечные или пунктирные.
- 2) линейные.
- 3) поверхностные (площадные).
- 4) объемные.

По жесткости:

- а) жесткие (недеформируемые),
- б) гибкие (упругие, деформируемые),
- в) шарнирные ...

Кроме того, соединения делятся на два класса:

I – Разъемные и II – Неразъемные.

^{*)} Эта модель предложена уже и для льда.

К I-му классу относятся:

- | | |
|---------------|-----------------------------------|
| 1) клиновые, | 8) пружинные (зажимные), |
| 2) винтовые, | 9) якорные, |
| 3) болтовые, | 10) замковые, |
| 4) шпоночные, | 11) вакуумные, |
| 5) зубчатые, | 12) электромагнитные, |
| 6) шлицевые, | 13) все связи полей (см. п. 1.1). |
| 7) клеммовые, | |

Ко II-му классу относятся:

- | | |
|-----------------|---|
| а) заклепочные, | м) петлевые (мягкие и жесткие, на хомутах), |
| б) паяльные, | н) гвоздевые, нагельные, |
| в) сварные, | о) свайные, |
| г) клеевые, | п) арматурные, |
| д) плетеные, | р) молекулярные, |
| е) вязаные, | с) капиллярные, |
| ж) шовные, | т) электроосмотические, |
| и) узловые, | у) биологические. |
| л) прессовые, | |

Для соединения частей используются также все известные поля (см. п. 1.1), например, электромагнитный захват на подъемных кранах, биологическое (с помощью корней) соединение деревьев с землей, срастание ран, рост кристаллов, пересадка внутренних органов и т. д., прививки растений и т. п.

Поверхности соединения (контакта) образуют швы. Прочность соединения части (порции) с массивом и определяется прочностью шва. Прочность шва в широком смысле определяется той или иной степенью омоноличивания (объединения) части с массивом, в узком же смысле (микропрочность) она определяется интенсивностью полей.

В простейшем представлении надежность и долговечность массивных земляных и бетонных сооружений определяется силами: а) тяжести, б) трения, в) внутренней прочности материала (молекулярными силами), г) вакуума ...

Таким образом, важную роль в строительстве играют фрикционные связи, обеспеченные собственным весом элементов и силами трения по поверхностям их соединений. Ведь без трения не могли бы существовать и египетские пирамиды.

Отметим, что гидравлические вяжущие (цемент, известь, гипс...) по сути своего действия тоже можно отнести к роду клеев, поскольку их растворы являются отвердевающими. Близкой по результату является связь в виде «присушивания» материалов.

Что касается сварки, то ею можно соединить и две пластины льда, если использовать ледяной «электрод». В прессовых же соединениях прижатие может быть осуществлено многими из движителей (п. 7.1).

Примером же гвоздевого присоединения к ... земле являются свайные основания. Они же могут рассматриваться как арматура грунтовых сооружений и оснований. При этом наряду с другими здесь используются и винтовые соединения (например, сваи-шурупы).

Идея торможения с помощью водного парашюта (трала) используется в воздухе и в ... грунте (анкерная свая).

Итак, основными типами соединений представляются:

- для земляных сооружений – гравитационные, прессовые, свайные, арматурные, ...
- для бетонных – цементные, арматурные, гравитационные, прессовые, клеевые, ...
- для деревянных – гвоздевые, болтовые, клеевые, на врубках, шпонках, нагельях, ...
- для металлических – сварные (в т. ч. и трением), болтовые, заклепочные, ...

Выбор соединений также производится на основе общих критериев (см. п. 1.5).
Но главным критерием выбора соединений является обобщенное условие

$$V-1: \boxed{H^B \geq H^T}, \quad (1)$$

где H^B – возможный уровень надежности,

H^T – требуемый уровень надежности соединения.

Таким образом, критерии технологии II-го класса (созидание, соединение...) выражаются неравенствами, обратными таковым для технологий I-го класса (см. п. 4.1), т. е. естественно обратными критериям разрушения.

Главным критерием прессовой технологии соединения (омоноличивания) сооружений будет условие в напряжениях сжатия

$$V-2: \sigma_{сж}^B \geq \sigma^T = [\sigma], \quad (2)$$

которое часто удобнее контролировать в соответствующих плотностях материалов (возможной и требуемой) в виде

$$V-3: \rho_{сух}^B \geq \rho_{сух}^T. \quad (3)$$

Аналогично запишем и критерий герметичности

$$V-4: \Gamma^B \geq \Gamma^T, \quad (4)$$

где Γ – степень непроницаемости (герметичности) соединения для любого наперед заданного вещества и (или) поля.

В более сложных случаях соединений применяются специальные устройства (например, кондукторы для наращивания колонн), а также целые стыковочные комплексы (для космических кораблей).

Заметим, что устройства, аналогичные кондукторам, уже давно применяются в хирургии для сращивания костей конечностей.

5.6. Влияние технологии строительства на надежность сооружений

Явление технологической неустойчивости проявляется в том, что относительно небольшие погрешности, имеющие место при изготовлении и монтаже конструкций, могут существенно снижать качество и долговечность сооружения.

Н.М. Колоколов

5.6.1. Швы и неоднородности в сооружениях как показатель неидеальности исполнения.

Аварии – главные уроки инженера.

Следует признать, что идеальных вещей в материальном мире нет. Некоторая идеальность предполагается в проекте, но идеальное исполнение проекта невозможно, хотя человечество всегда будет стремиться к этому. И основными неидеальностями являются поверхности присоединения частей к массиву, которые и образуют швы. Виды швов в каменных сооружениях приведены в п. 5.2, в бетонных сооружениях – в п. 5.4. Ниже приведены швы и неоднородности в грунтовых плотинах. Швы подразделим на следующие виды.

- | | |
|--|--|
| <p>1. Контурные или периметральные (межобъектные):</p> <p>а) с основанием,</p> <p>б) с берегами,</p> | <p>2. Граничные или контактные (межэлементные):</p> <p>а) верховые,</p> <p>б) низовые,</p> |
|--|--|

в) с другими сооружениями.

в) межучастковые.

3. Осадочные или эксплуатационные (межсекционные).
4. Строительные или границы карт (межблочные).
5. Технологические (межслойные).
6. Операционные (межпорционные).
7. Межагрегатные.
8. Межчастичные.

Швы в плотине, как и везде, являются наиболее вероятными местами отказов (повреждений и разрушений) грунтовых плотин.

Во-первых, в этих местах понижено или отсутствует сопротивление разрыву, и также, возможно, и сдвигу. Во-вторых, швы создают зоны повышенной фильтрации и служат, таким образом, квазищелями и квазитрещинами, которые при малейших неблагоприятных изменениях в напряженном состоянии могут превратиться в открытые трещины и щели.

Швы являются также местами попадания инородных включений, загрязнений другими материалами, разделения (сегрегации) сыпучих материалов на отдельные фракции по крупности и др.

Неоднородности свойств грунтов по генезису можно разделить на следующие основные классы.

1. Природная неоднородность.
2. Проектная.
3. Технологическая.
4. Эксплуатационная.

Технологическую неоднородность вызывают практически все строительные процессы:

- разработка грунта, транспортирование и перегрузка с одной машины на другую и в сооружение,
- разравнивание в слой, специальная обработка грунта, его уплотнение и т. д.

Неоднородность строительных материалов, и прежде всего грунтовых, характеризуется также трещиноватостью (макро- и микротрещины), которые поистине существуют не как исключение, а как правило. Нередко они скрыты от глаза: «их моют дожди, засыпает их пыль, и ветер волнует над ними ковыль».

Источники трещин те же, что и указанные выше для неоднородности. Взрывание скалы, к примеру, приводит к образованию макротрещин в основании и микротрещин – в камне.

5.6.2. Влияние технологии возведения грунтовых плотин на их надежность.

В проектах принято изображать сооружение в виде идеальных геометрических построений, и это в значительной мере гипнотизирует специалистов, мешая им уже в процессе исследования и проектирования учесть реальные форму и размеры будущего сооружения. Аналогичным образом идеализируются свойства материалов, нагрузки на сооружения, методы расчетов и другие факторы, определяющие их надежность.

На рис. 5.6.1–5.6.3 показаны некоторые неидеальности, приводившие к аварийным ситуациям на сооружениях.

На рис. 5.6.1 приведены, например, сечения намывной плотины с ядром: а) в проекте и б) в натуре, где видна **геометрическая неидеальность** элементов плотины, способная существенно изменить проектную надежность сооружения. Так, утоньшение ядра (при наличии т. н. «карманов») может привести к фильтрационному пробою вследствие возрастания градиентов напора по сравнению с проектными, а утолщение ядра (при наличии т. н. «языков») может привести к потере общей устойчивости откоса вследствие появления слабой прослойки в призме плотины. Здесь (при утолщении ядра) повысится также давление в поровой воде, что приведет к дополнительному снижению прочности грунта на сдвиг. Отсюда видно, что надежность плотины будет снижена в значительно

Рис. 5.6.1. Неидеальности исполнения (I):

a – сечение плотины в проекте; *b* – то же в натуре; *в* – скопление комьев (агрегатов) грунта; *г* – расслоение (сегрегация) грунта; *д* – поровый пристенный эффект на твердой поверхности; *е* – то же, арочный пристенный эффект на шероховатой поверхности; *жс* – берег с обратным уклоном; *и* – щель под трубой; *к* – недоуплотнение у крутого берега; *л* – ступенчатая обработка берега.

Рис. 5.6.2. Неидеальности исполнения (II):
a – оседание грунта под мерзлым гребнем; *б* – примерзание неуплотненного грунта; *в* – недостаточная эффективность цементации или замораживания при трещиноватом основании; *г* – недоуплотнение в узкой зоне; *д* – прорезание пленки трубой с концевой опорой; *е* – недостаточное уплотнение; *ж* – переувлажнение грунта; *и* – скопление крупных фракций; *к* – неровность напорной грани экрана.

большей степени, чем это обуславливается в связи с отклонением фактических размеров от проектных. И это один из примеров перехода количественных изменений в качественные. Вторым примером является возникновение условий гидроразрыва при наличии местного сужения (понижения поверхности) экрана (рис. 5.6.2к), с образованием в нем трещин, которые любую толщину экрана сводят на нет. Далее, поровое давление может быть настолько большим, что плотина может потерять устойчивость на сдвиг в форме расползания насыпи в горизонтальном направлении (рис. 5.6.2ж). Это и произошло на одной из плотин, отсыпанной из переувлажненного осадками суглинка на основании из жирной глины. При этом были разорваны трубопроводы водосброса и водоспуска, а вдоль гребня появились трещины с образованием воронки на верховом откосе. Рассеивание порового давления приводит к дополнительной деформации грунта, которая может вызвать трещинообразование и в других случаях, которые показаны, например, на рис. 5.6.1ж, 5.6.1л и 5.6.2е. Таким образом, влажность грунтов при укладке имеет существенное значение.

Кроме естественной агрегатности при разработке грунтов возникает **технологическая комковатость** вследствие разрушения их естественной структуры. При этом в насыпи возможно локальное скопление крупных комьев или фракций грунта, показанное на рис. 5.6.1в. Это вызывается явлениями грави-, вибро-, аэро-, флото-, магнито- (и другими видами) сепарации, т. е. разделения, расслоения грунта по крупности и плотности зерен. Скопление крупных фракций создает зоны повышенной фильтрации, которые в отличие, например, от обычных (раскрытых) трещин, можно назвать **квазитрещинами**, и т. п. Влияние на надежность плотин оказывают и технологии разработки и контроля местных материалов уже непосредственно в карьерах, в которых применение больших экскаваторов приводит к образованию комьев диаметром до 1 м.

Одним из существенных видов неидеальностей являются эффекты на сопряжении грунтов с более жесткой поверхностью. Это **пристенные эффекты** различного рода: 1) геометрические, 2) механические, 3) физические, 4) химические и др. На рис. 5.6.1д, е, показаны геометрические эффекты микро- и макро- пористости. Даже на примыкании грунта к идеально гладкой поверхности размеры пор будут больше, чем в грунтовой толще. В реальном же грунте на реальной (шероховатой) поверхности могут возникнуть полости в размере целых частиц или агрегатов, которые и составляют макропоры. Размеры последних могут возрасти за счет неблагоприятных искривлений шероховатой жесткой поверхности, т. е. шероховатостей высших порядков. К тому же жесткая стенка сама может иметь трещины. Все эти факторы обеспечивают изначально повышенную фильтрацию вдоль стенки, создавая квазищель.

Пристенные механические эффекты проявляются в виде арочных и силосных явлений, связанных с опиранием сыпучего грунта на более жесткие стенки, например берегов, бетонных частей и прорезающих грунт сооружений и т. п. При этом в подарочном пространстве сжимающие напряжения существенно снижаются и тем самым облегчается гидроразрыв квазищели и превращение ее в нормальную (открытую) щель. Арочный эффект в узком каньоне с возникновением трещин и щелей показан на рис. 5.6.1ж, л, и на рис. 5.6.2е; а на рис. 5.6.2г арка в свежесыпанном проране опирается на стенки ранее возведенной части плотины. В поперечном разрезе плотины арочный эффект ядерной части может возникать от зависания грунта на призмах (рис. 5.6.1б), на инъекционных, вентиляционных или водосбросных трубах, галереях, над траншеями, над трещинами и т. д. (рис. 5.6.2в, д). Арка может образовываться при замерзании верхней части плотины (рис. 5.6.2а).

На примыкании к крутым скальным берегам, стенкам и трубам (рис. 5.6.1ж, и, к, л и рис. 5.6.2б) осуществление механизированного технологического процесса уплотнения грунта существенно затруднено. В случае рис. 5.6.2б отсыпaeмый грунт на примыкании к переохлажденной бетонной стенке быстро замерзал (пристенный термический эффект), не под-

давался воздействиям и оставался неуплотненным. Пригребневая часть плотины должна быть защищена от морозобойных трещин и явлений пучинистости грунтов. Щели под трубопроводами и трещины в основании не могут быть заполнены даже рыхлым грунтом, не говоря уже о его уплотнении. К образованию щели приводит прокладка трубопровода в плотине методом прокола, случайная засыпка грунтом шлангов, проводов, досок, прутьев, кабелей, а также снега, льда и т. д. **Зоной повышенного риска** могут быть места пересечений трубопроводов с пленочными, листовыми и другими тонкими экранами (рис. 5.6.2д).

Известно, что и сами грунтопленочные экраны на практике тоже фильтруют, при этом фиктивный коэффициент фильтрации достигает величины $A \cdot 10^{-6}$ см/с. Их высокая проницаемость порождается не только случайными разрывами пленки, но и другими неидеальностями исполнения, часть которых представлена на рис. 5.6.3. Во-первых, пленка иногда укладывается на подстилающий слой грунта, включающий крупные частицы и комья до 0,2 м. Далее, здесь также проявляются негативные влияния пристенных эффектов. Макропоры и полости обуславливаются неровностью основания, неидеальностью пленки и способов ее укладки, сварки и последующей пригрузки. Пленка имеет или приобретает складки, сборки, волнистость, вытяжки, пузырчатость, морщины, нахлесты в швах и пр. При этом полости не могут быть сплюснены (схлопнуты) полностью при отсыпке защитного слоя грунта, так как пленка снизу оформляет и укрепляет своды грунтовых арок. Наличие этих полостей эквивалентно наличию щелей над и под пленочным полотнищем, что приведет к сосредоточенной фильтрации и к возможному аварийному состоянию плотины.

И лишь тщательнейшее **всестороннее изучение** и анализ всех без исключения **аварийных ситуаций** на плотинах (как, впрочем, и на любых других сооружениях) и установление их истинных причин только и позволит в будущем не повторять ошибочных решений.

Рис. 5.6.3. Неидеальности исполнения противofильтрационного пленочного экрана:
a – неплотности (щели) на контакте пленки с зернистым материалом;
б – то же вдоль Т-образного шва; *в* – простая складка; *г* – сплюснутая складка;
д – складчатый экран; *е* – разрез вдоль складки;
жс – сборки вдоль сварного шва в плане; *и* – складки полотнища в плане.

Для нормального функционирования грунтовой плотины необходимо обеспечить ее фильтрационную прочность **в каждой точке (!) напорного фронта**, достигающего длины нескольких километров и ширины сотен метров. При местном уменьшении толщины противofильтрационного элемента или при возникновении в нем трещин увеличивается градиент

напора и соответственно уменьшается фильтрационная прочность, что может привести к появлению путей сосредоточенной фильтрации, размыву грунта и аварии плотины.

Сооружение (в том числе и плотина) считается надежным, если оно функционирует нормально в течение определенного заданного отрезка времени, т. е. его выходные параметры (или эксплуатационные характеристики) остаются в пределах требуемых.

Критерий нормального функционирования любого объекта или сооружения можно записать в следующем обобщенном виде:

$$|T| \leq |B|, \quad (1)$$

где $|T|$ – матрица (или множество) требований к параметрам состояния объекта (или пространство его требуемых состояний); $|B|$ – матрица (или множество) возможных характеристик объекта, его выходных данных (или пространство его допустимых состояний) по параметрам предъявляемых требований.

Обобщающей эксплуатационной характеристикой плотины является величина потерь воды, профильтровавшей через ее тело и основание, а в общем случае – величина потерь сохраняемого перед плотинной материала, а равно и материала самой плотины и ее основания. Поэтому надежность плотины обеспечивается ограничением параметров массопотока через плотину.

В качестве **критериев нормального функционирования** (или критериев устойчивости) по ограничению фильтрационного потока (расхода) для сооружений класса плотин (аналогично критериям выбора, п. 1.5) принимаются следующие:

$$\boxed{\text{IV-1: } Q = q \cdot B \leq [Q]}, \quad (2a)$$

$$\text{IV-2: } A = dQ/dT \leq [A], \quad (2б)$$

$$\text{IV-3: } V = \int_0^T Q \cdot dT \leq [V], \quad (2в)$$

где Q , A и V – расход, его изменение во времени T и объем массопотока рассматриваемого вещества через трещины в теле и основании плотины; B – протяженность (ширина) трещины; q – расход на единицу ширины трещины. Здесь область допустимых значений (обозначены, как обычно, квадратными скобками) должна быть назначена совместно с Заказчиком проекта. При отсутствии специальных указаний речь идет лишь о потерях воды. Однако, зная характеристики по воде, в отдельных случаях не представляется больших затруднений для перехода к потерям растворенного или взвешенного в ней вещества.

Следует отметить, что допустимые величины расхода и объема профильтровавшей воды или рассолов могут быть оценены также исходя из экономических соображений, так как они могут существенно влиять как на стоимость возведения плотины, так и на затраты при ее эксплуатации.

Рис. 5.6.4. К разработке системы обеспечения эксплуатационной надежности грунтовых плотин: *a* – возможные кривые изменения скорости и расхода фильтрационного потока во времени T и в зависимости от раскрытия δ трещины;
б – постоянное сравнение прогнозируемых значений параметров с измеренными и вынесение заключения о надежности плотины
(на примере анализа динамики фильтрационных расходов:
————— измеренные, - - - - - прогнозируемые, на разные периоды времени).

На рис. 5.6.4а приведены примеры возможных кривых изменения во времени T расходов воды через плотины. Аналогичным образом расходы (или скорости потока) зависят от толщины трещины δ . Здесь кривые 4–6 характеризуют неустойчивое состояние плотин, при этом они не удовлетворяют критерию (2б) (критерий динамичности роста расхода).

По отношению к этому критерию все плотины можно, в соответствии с динамикой их повреждений, условно разделить (аналогично металлам) на две группы: хрупкие и пластичные. Для первой группы характерны ускоренное трещинообразование и повышенная суффозия, а для второй – повышенная пластичность и малая суффозия. **Плотины первой группы (хрупкие)** в случае повреждения разрушаются практически мгновенно, т.е. катастрофически, в то время как **плотины второй группы (пластичные)** разрушаются медленно, с появлением предвестников отказа в виде постепенного увеличения расхода, сопровождающегося достаточно медленным нарастанием суффозионных процессов, что позволяет провести необходимые защитные мероприятия и спасти плотину от разрушения. Априори к первой группе можно отнести все однородные плотины и преимущественно из однозернистых грунтов.

Динамичность разрушения плотины определяется всем комплексом как природных, так и конструктивно-технологических условий ее возведения и эксплуатации, однако она может быть изменена введением, например, соответствующих защитных мероприятий, выбор которых не ограничен, лишь бы они были достаточно эффективными. Часть из них приведена в п. 5.7.

Для обеспечения эксплуатационной надежности необходимо **непрерывное сравнение** фактического поведения сооружения с прогнозируемым и вынесение заключения о его надежности. Число параметров для сравнения не ограничивается, но одними из основных для сооружений типа плотин, естественно, являются фильтрационный расход (рис. 5.6.4б) и деформации ε^* . При условии:

$$\Delta Q_i = Q - Q_i = [\Delta Q_i], \quad (3)$$

где Q и Q_i – расходы, соответственно измеренный и прогнозируемый, и их разности ΔQ_i и $[\Delta Q_i]$ – соответственно текущая и допустимая, необходимо построить новую кривую прогноза дальнейшего поведения плотины. При этом допустимость прогнозируемых расходов обеспечивается всеми необходимыми мероприятиями, включая вывод сооружения из эксплуатации для выполнения капитальных мер защиты от разрушения. Разумеется, в прогнозах наиболее полно должны учитываться и возможные неидеальности исполнения сооружения. Величина $[\Delta Q_i]$ принимается меньше аварийно опасной с соответствующим запасом, и ей соответствует допустимое время $[\Delta T_i]$. Отсюда максимальная периодичность (шаг) наблюдений

$$\Delta T_{набл} = [\Delta T_i] - T_{подг} - \Delta T_{ин}, \quad (4)$$

где $T_{подг}$ – время подготовки к осуществлению мер защиты плотины от разрушения, $T_{ин}$ – время инерционного приращения расхода после начала осуществления мер защиты. Оно зависит от эффективности и мощности системы мер по управлению предаварийной ситуацией. И здесь оптимальным решением будет разумный компромисс между затратами на мониторинг и размерами ущерба от аварийных ситуаций. В заключение следует заметить, что для плотин первой группы (хрупких) периодичность наблюдений близка к нулю, и что хрупкими*) могут быть отдельные виды и других систем, и не только искусственных, но и создаваемых природой, не исключая и самого Человека.

*) В широком смысле хрупкостью характеризуется поведение тел и систем.

5.7. Некоторые конструктивно-технологические мероприятия по обеспечению качества грунтовых плотин

Качество плотин определяется широким кругом показателей, однако главным из них служит водоупорность сооружений, одним из основных факторов снижения которой является возникновение трещин. Здесь рекомендуется применение специальных конструктивно-технологических мероприятий по защите грунтовых плотин от трещинообразования и их вредного влияния, в основном на сложных, включая подрабатываемые территории, основаниях. Часть таких мероприятий и приводится ниже.

1. Снятие трещин вертикальной нагрузкой:
 - 1.1. статической (стационарной, передвижной и передвижной),
 - 1.2. динамической,
 - 1.3. вибрационной,
 - 1.4. гидростатической,
 - 1.5. вакуумной,
 - 1.6. анкерными затяжками с домкратами...
2. Снятие трещин горизонтальной нагрузкой:
 - 2.1. забивкой свай и рядов, включая набивные сваи,
 - 2.2. инъекцией, в т. ч. с устройством слежения (с обратной связью),
 - 2.3. плоскими домкратами,
 - 2.4. применением специальных свай для направленной раздвижки грунта.
3. Армирование плотин с устройством специальных компенсаторов деформаций:
 - 3.1. раздвижных (плоских и объемных),
 - 3.2. изгибных (плоских и объемных),
 - 3.3. веерных...
4. Создание распорных конструкций:
 - 4.1. арочных,
 - 4.2. купольных,
 - 4.3. клиновых.
5. Создание швов-надрезов в плотине и ее элементах:
 - 5.1. с пассивной герметизацией,
 - 5.2. с активной герметизацией.
6. Сглаживание пиков горизонтальной деформации:
 - 6.1. распорными армоэлементами,
 - 6.2. стягивающими армоэлементами.
7. Блокирование путей сосредоточенной фильтрации и повышение их гидравлического сопротивления:
 - 7.1. выравнивание основания экрана (ядра),
 - 7.2. уширение экрана в основании,
 - 7.3. изоляция экрана от трещиноватого и пористого основания неразмываемым материалом или разнородным грунтом,
 - 7.4. разветвление экрана у основания,
 - 7.5. применение зональных фильтров,
 - 7.7. укладка кольматирующего слоя песка на верховой грани ядра,
 - 7.8. устройство оптимальной шероховатости в основании экрана (ядра),
 - 7.9. устройство специальных гидравлических резисторов для предупреждения развития фильтрационного «туннельного» эффекта и др.
8. Уменьшение зависания ядра:
 - 8.1. дополнительное уплотнение ядра,
 - 8.2. зональное уплотнение ядра,
 - 8.3. домкратирование ядра,
 - 8.4. наклонный скользящий шов в основании ядра,

- 8.5. обеспечение дополнительной осадки призм,
 - 8.6. применение многослойных ядер (в т. ч. пленок поверх глины),
 - 8.7. применение антифрикционных прослоек и т. п.
9. Вырезание трещиноватой зоны и замена ее новым грунтом.
10. Пересечение трещины:
- 10.1. стальным шпунтовым рядом,
 - 10.2. зубом из разнозернистого грунта.
11. Заполнение трещины грунтом:
- 11.1. засыпка песком,
 - 11.2. замыв,
 - 11.3. заливка глинистым раствором,
 - 11.4. инъекция глубоких и закрытых трещин.
12. Применение пленочных экранов:
- 12.1. из растяжимого материала,
 - 12.2. с применением компенсирующих складок, накладок и вкладышей.

Разумеется, эти меры не являются исчерпывающими.

И все же высшим качеством любого изделия, в том числе и сооружения типа плотины, можно считать **равнопрочность (равнонадежность!)*** его элементов, поскольку, во-первых, это качество является интегральным, и, во-вторых, лишь оно может обеспечить наибольший ресурсосберегающий эффект.

Особенностью плотины является то, что ее прочность должна быть обеспечена на всей площади контакта с водой, несмотря на ее огромные размеры. И здесь все будет зависеть от технологических факторов, от **равновысокого качества укладки материалов** в каждой точке плотины, памятуя, что Вода – самый строгий экзаменатор строителя.

В заключение отметим, что часто возникает потребность построить сооружение быстро. Но здесь надо иметь в виду и вторую сторону медали: быстрота обычно забывается, а качество остается навечно в благодарной памяти потомков.

5.8. Технологии возведения промышленно-гражданских сооружений (ПГС)

Человек никогда не может утратить влечения улучшать свою жизнь.

Н. Чернышевский

5.8.1. Сборные ПГС.

1. Технологические элементы сооружений (**техатомы** – технологические атомы) можно также классифицировать в n -мерном пространстве.
В соответствии с техатомами выделяются и сами технологии:
 - 0) нулевое (точечное) пространство (техатом – кирпич, камень). Ему соответствуют каменная технология возведения зданий и сооружений,
 - 1) одномерное (линейное) пространство. Ему соответствует каркасная технология (с последующей навеской панелей),
 - 2) панельная технология (бескаркасная),
 - 3) объемная (кубиковая) технология, техатомы которой на строительной площадке могут быть:

*) **Равнопрочность** (иначе еще – **равноточность**) будет оптимальным решением и для многих других больших систем (например, в науке, в образовании, в защите окружающей среды, в техногенной безопасности и т. п.)

- 3.1) комната,
- 3.2) квартира,
- 3.3) этаж,
- 3.4) дом... .
- 2. Особенности монтажа:
 - 2.1. Сборка из техатомов, поступающих с завода (ЖБК, металлоконструкций),
 - 2.2. Сборка из техмолекул (после укрупненной сборки техатомов на строительной площадке),
 - 2.3. Монтаж нормальный (снизу, от Земли),
 - 2.4. Монтаж «небесный» (сверху, метод подъема этажей).
- 3. Размещение и движение кранов:
 - 3.1. сбоку (снаружи),
 - 3.2. внутри возводимого сооружения,
 - 3.3. сверху (в т. ч. вертолеты),
 - 3.4. центральное,
 - 3.5. параллельное (полосовое),
 - 3.6. круговое,
 - 3.7. ступенчатое,
 - 3.8. см. п. 1.7.
- 4. Временные крепления сборных элементов:
 - 4.1. оттяжки, стяжки,
 - 4.2. подкосы, распорки,
 - 4.3. фиксаторы (в т. ч. для арматуры), кондукторы,
 - 4.4. манипуляторы, этажерки,
 - 4.5. все соединения – см. п. 5.5.
- 5. Омоноличивание швов:
 - 5.1. заливка,
 - 5.2. затирка,
 - 5.3. вибрирование,
 - 5.4. прессование,
 - 5.5. инъекция,
 - 5.6. уплотнение – см. п. 6.4... .
- 6. Кладочные растворы:
 - а) известковые,
 - б) цементные,
 - в) гипсовые,
 - г) полимерные,
 - д) клеевые.
- 7. Подмости:
 - 7.1. лестницы: приставные, навесные, подъемные, летающие... ,
 - 7.2. подмости: сборные, передвижные (катучие), самоходные... ,
 - 7.3. люльки: подъемные, навесные (на лестнице), ползучие (на стреле крана), автомобильные, «небесные» (на вертолетах)... .

5.8.2. Монолитные ПГС.

- 1. Подача бетонной смеси:
 - 1.1. цикличная (кранами),
 - 1.2. непрерывная (бетононасосами и конвейерами)... .
- 2. Нарращивание сооружения:
 - 2.1. равномерное, неравномерное,
 - 2.2. постоянное, скачкообразное, ступенчатое,
 - 2.3. панелями, комнатами, квартирами, этажами... .
- 3. Опалубка:
 - 3.1. металлическая складчатая (и для перекрытий),
 - 3.2. щитовая, армоплиты,
 - 3.3. ползучая, гусеничная,
 - 3.4. туннельная, пневматическая, спиральная,
 - 3.5. ящичная (без дна),
 - 3.6. коробчатая,
 - 3.7. см. также п. 5.4... .

4. Уплотнение:

- 4.1. вибрирование внутреннее и внешнее (через опалубку),
- 4.2. виброопалубка, прессование,
- 4.3. другие технологии уплотнения – см. п. 6.4...

5.9. Спецтехнологии бетонирования

5.9.1. Классификация технологий.

Выделим следующие классы этого бетонирования.

- | | |
|----------------------------|-------------------------------------|
| 1. Полураздельное. | 6. Прессбетон. |
| 2. Раздельное. | 7. Полимербетон. |
| 3. Подводное. | 8. Бетон с дискретным армированием. |
| 4. Укатанные бетон. | 9. Бетон со спецзаполнителями. |
| 5. Напорное бетонирование. | |

1. Полураздельное бетонирование:

- 1.1. втапливание «изюма» из камней крупностью до 0,5 м,
- 1.2. циклопическая кладка в раствор:
 - а) камней до 2 м,
 - б) бетонных блоков,
 - в) в т. ч. пустотелых,
- 1.3. египетская кладка.

2. Раздельное бетонирование методами:

- а) восходящего раствора (в т. ч. под пульсирующим давлением),
- б) нисходящего раствора (заливка, в т. ч. под вакуумом).

3. Методы подводного бетонирования:

- а) за герметичными перемычками,
- б) под воздушным колоколом,
- в) в кессоне,
- г) в гибкую оболочку («в чулок», «в перчатку», в т. ч. в водонепроницаемую),
- д) подача смеси герметичными самораскрывающимися бадьями (бункерами),
- е) метод вертикально перемещающейся трубы,
- ж) метод восходящего раствора (в т. ч. в сочетании вибронагнетания с вибрированием и заполнителя),
- и) кладка из мешков с бетонной смесью (в т. ч. и в сухом состоянии),
- к) метод инъекции естественных грунтов и др.

4. Методы укатанного бетона (грунтовые технологии).

5.9.2. Пример технологии «горячего» раздельного бетонирования.

Существо технологии (по Карявкину А.В.) заключается в том, что, например, при устройстве подстилающего слоя 0,3 м (для несущей плиты высокоскоростной железной дороги) в зимних условиях (до -20°C), вначале в опалубку отсыпается горячий керамзит ($200\dots 300^{\circ}\text{C}$) и сверху монтируется несущая железобетонная плита. Затем, после остывания керамзита (до 95°C), производится инъектирование цементно-песчаного раствора через отверстия плиты с помощью глубинных виброинъекторов. Эта технология «сухого горячего термоса» дает:

- а) повышение прочности на 20...30% (до В15),
- б) повышение модуля упругости на 10...15%,
- в) ускорение набора прочности,

г) экономию 55...90 кВт·ч/м³ электроэнергии,

д) вторичное использование тепла остывающего керамзита...

Преимущества обусловлены явлением **самовакуумирования керамзита**, более глубокого проникновения раствора в зерна, что приводит к формированию увеличенного (до 2,5 раз) объема «налипающего» раствора. Но это снижение как живого сечения фильтрационных каналов (до 5,2%), так и подвижности раствора, вызывает повышенное сопротивление инъекции.

Условия инъектирования рекомендуются в виде

$$M_1 = \frac{D_{\text{макс}}}{d_{\text{макс}}} > 30,$$

$$M_2 = \frac{D_{\text{мин}}}{d_{\text{макс}}} > 20,$$

где D и d – диаметры частиц керамзита и песка.

5.10. О плановом расположении шламохранилищ

Известны шламохранилища, образованные из ячеек в виде четырехугольника произвольной формы в плане, что обусловлено различного рода производственными и организационно-техническими причинами. Недостатками таких хранилищ является большая длина ограждений (дамб) и нестандартность ячеек, затрудняющая их эксплуатацию. При отсыпке грунта в воду применяют прудки также в виде прямоугольников. Другим недостатком является повышенная опасность разрушения угловых участков ячеек.

Цель предложения сводится к повышению надежности дамб и снижению расхода материалов на их возведение. Эта цель достигается путем выполнения **ячеек сотовой формы**, преимущественно в виде шестигранника, и усиления дамб в узлах и на участках переломов оси в плане.

Рис. 5.10.1. Схемы шламохранилищ с оптимальными периметрами ячеек в плане.

На рис. 5.10.1 приведены различные схемы шламохранилищ в плане и варианты усиления их дамб. Здесь на рис. а) приведено хранилище сотовой конструкции с ячейками 1–7 в виде правильных шестиугольников, ограниченных прямолинейными отрезками дамб 8 и их пересечениями 9. На рис. б) хранилище состоит из ячеек в форме криволинейных шестиугольников, грани которых выполнены в виде отрезков дуги окружности. На рис. в) ячейки выполнены в виде круга или части его.

Преимуществом предложенных хранилищ является снижение строительных и эксплуатационных расходов, обусловленное типовой формой ячеек, а также снижение до минимума потребности в материалах на возведение дамб при равных общих объемах хранилищ.

При этом хранилище на рис. б) имеет дополнительное преимущество в виде повышенной надежности, поскольку **арочная форма дамбы 8** обеспечивает дополнительные сжимающие напряжения, препятствующие трещинообразованию.

Как показывает практика эксплуатации плотин и дамб, места излома их оси в плане являются наиболее опасными.

Устройства усиления указанных зон приведены на рис. г), д) и е).

В местах перелома оси дамбы может выполняться внешний контрфорс 9 (рис. г) или местное уширение гребня 9б (рис. е), которое может сопровождаться также и уположением откосов дамбы.

В случае примыкания участка дамбы 8 ячейки 3 к ранее построенной ячейке 2, на участке примыкания выполняется уширение 9а (рис. д).

На рис. ж) приведено поперечное сечение дамбы 8 между последовательно возводимыми ячейками 1 и 2. С целью сокращения расходов изоляционный слой 10 рекомендуется укладывать не на откосы 12 дамбы, а в ее основание, при этом профильтровавшие через тело дамбы рассолы перехватываются дренажной трубой II, уложенной в понижении изоляционного слоя 10.

Предложенная конструкция хранилища может быть применена при сооружении различного рода отстойников, золоотвалов, а также прудов, например, при отсыпке в воду, при намыве территорий и пр., а также в строительстве на акватории. При этом расход материалов сокращается на 5–10%.

5.11. Спецтехнологии строительства на шельфе

5.11.1. Особенности и тенденции технологий.

Общие тенденции технологий изготовления, транспортирования и установки сооружений на место следующие. 1) Увеличение рабочих глубин и удельных нагрузок на сооружения и их элементы. И тем не менее большинство сухопутных технологий применимо и в этих условиях. 2) Ухудшение географических условий (температурных, гидрогеологических и т. п.). 3) Динамические изменения как в сторону гигантизма, так и миниатюризации сооружений. 4) Требование легкости, плавучести и балластируемости сооружений и всех их элементов (блок-модулей и др.), включая тросы, цепи и даже отдельное оборудование и инструмент. 5) Расширение применения физических, химических и других технологий высокого уровня. 6) Изготовление и монтаж сборных единиц (в виде блок-модулей). 7) Увеличение сборности вплоть до монопода. 8) Применение в технологиях в любой среде (в воздухе, на суше, на воде, под водой, на дне моря...), в этих же средах осуществляется и транспортирование) любых углов наклона блок-модулей: от 0° до 360° по отношению к эксплуатационному положению. 9) Применение плавучих сооружений в виде моно-, би(ката)-, три-, квадра-, пентамаранов... 10) Применение опор (для палубы) в виде башен (колонн), по аналогии с п. 9, от 1 до 8 шт. и более. 11) Применение круглых, включая шар и тор, кольцевых и многогранных плавучих фундаментов и оснований (с аналогичными отверстиями) до 24 граней, а

также А-, U-, Н-, П-, ..., X-, Y-, Z-образных и их всевозможных сочетаний, требующих специального описания.

12) Транспортирование блок-модулей по воде осуществляется на:

- | | |
|-----------------------|---|
| а) судах, | д) в доках, |
| б) баржах, | е) с помощью дополнительной плавучести, |
| в) кранах, | ж) за счет собственной плавучести. |
| г) понтонах (плотах), | |

Кроме обычных способов разгрузки спуск блок-модулей на воду осуществляется методом соскальзывания при притоплении кормовой части баржи и (или) ее шарнирно сочлененной секции.

В настоящее время известны баржи с одним осевым шарниром: вертикальным или горизонтальным (продольным или поперечным). В будущем число шарниров и их типов будет возрастать, и не только на баржах, но и на других судах, включая подводные. И не только на судах. Уже работают автомобили со сламывающимся (шарнирным) шасси. Эта технология получит еще большее распространение во всех областях техники, включая и авиацию.

Другим методом является последовательная балластировка понтонов плота и перевод за счет этого, например, ферменной опорной части из горизонтального положения в вертикальное и посадка на грунт с последующим отсоединением плота.

Посадка блок-модуля непосредственно на другую опору может осуществляться следующими способами:

- 1) притоплением транспортного средства,
- 2) дебалластировкой приемного средства,
- 3) комбинированным способом...

Для этого транспортное средство выполняют с вырезом, т. е. в П-образной форме.

5.11.2. Технологии удержания плавсредств над точкой.

Все технологии можно разделить на два вида:

I – пассивные и II – активные.

К пассивным относится: а) применение гибких (в т. ч. плавучих) связей с якорными устройствами, б) применение жестких связей.

Плавучесть связей делят на:

- | | |
|----------------|----------------------|
| 1) внешнюю и | а) сосредоточенную и |
| 2) внутреннюю, | б) распределенную. |

И, конечно же, всегда существуют комбинированные решения.

Внешняя сосредоточенная плавучесть обеспечивается буями и понтонами.

Внутренняя плавучесть обеспечивается как легкостью материала, так и созданием определенных полостей с соответствующим их заполнением. Например, тросы могут быть сплетены из полых нитей, а цепи выполнены из полых звеньев тороидальной, эллиптической, цилиндрической, шаровой, двухконусной, гантельной и других форм. Проектируются трубчато-шарнирные связи. Начинается внедрение тросов из синтетических композиционных материалов.

К активным технологиям следует отнести:

- 1) динамическое позиционирование,
- 2) управление усилиями в связях, ...

5.11.3. Технологии соединения сооружений с грунтом дна моря.

Подготовка основания:

- а) выемка слабых грунтов,

- б) насыпка качественных грунтов,
- в) повышение качества слабых грунтов (все виды мелиораций, например, замена камнем песка в кипящем слое, замена камнем ила путем его отжатия весом камня, внешним давлением, дренирование, огрузка, инъектирование, электроосмотирование)

Закрепление на дне моря:

- 1) гравитационное,
- 2) прижимное,
- 3) зацепное,
- 4) вакуумное,
- 5) свайное (см. п. 6.6),
- 6) тепловое (примораживание),
- 7) электромагнитное,
- 8) другие виды соединений (см. п. 5.5).

Все вышеуказанное полностью относится и к якорным устройствам. Здесь также возможны многие технологии, применяемые уже на суше.

5.11.4. Технологии защиты акватории от волнения.

- 1) Пневмоволноломами:
 - а) пузырьковыми,
 - б) камерными (вертикальными, горизонтальными),
 - в) полукамерными,
 - г) парогенераторными,
- 2) Гидроволноломами:
 - а) гидромониторными,
 - б) гребно-винтовыми,
- 3) Гравитационными (инерционными) волноломами:
 - а) жесткими и гибкими торами,
 - б) жесткими элементами в форме плавучих цепей («сарделек»),
 - в) зонтичными в вертикальном (и) или горизонтальном направлении.
- 4) Упругими пластинами, включая пространственные лопастные.
- 5) Волновыми гидроэлектростанциями.

ГЛАВА 6. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ III-ГО КЛАССА (ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МАТЕРИИ)

6.1. Структура и особенности технологий III-го класса

Состав технологий – см. п. 1.1.1.

Развитая технология класса III может включать следующие процессы.

1. Транспортирование к месту обработки.
2. Подготовка к осуществлению процесса.
3. Оптимизация параметров объекта.
4. Подвод машин, обеспечение оптимальных условий работы машин и управления ими.
- 5. Выполнение процесса обработки порции – техатома массива.**
6. Ограничение объемов обработки.
7. Защита объекта от разрушения.
8. Контроль качества обработки.
9. Отделка зоны обработки.
10. Отвод машин.
11. Транспортирование изделия на склад и для дальнейшего использования.
12. ...

К этому классу можно отнести и некоторые технологии обработки конструкционных материалов (металлов).

Это в основном класс технологий перевода материала из одного состояния в другое, изменение формы и качества материала, обработка различными физическими полями.

6.2. Обеспечение прочности бетона в экстремальных температурных условиях

6.2.1. Уравнение теплового баланса.

Прочность блока, а главное – его монолитность, определяется в значительной мере динамикой температур, особенно в процессе набора бетоном прочности.

Так, зимой блок может замерзнуть, не набрав достаточной прочности, со всеми неблагоприятными последствиями. Летом же он может разогреться до чрезмерных величин.

Уравнение теплового баланса запишем в виде

$$Q_{\text{укл}} + Q_{\text{экз}} + Q_{\text{инс}} + Q_{\text{осн}} + Q_{\text{упр}} = Q_{\text{пот}} + Q_{\text{кон}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{укл}}$ – количество тепла, поступившее с бетонной смесью при ее укладке в блок;

$Q_{\text{экз}}$ – тепло, выделенное при экзотермической реакции твердения бетона;

$Q_{\text{инс}}$ – тепло, получаемое за счет солнечной радиации (инсоляции) через освещенные поверхности;

$Q_{\text{упр}}$ – внесенное искусственно (или отобранное) тепло, т. е. составляющая управления технологическим процессом;

$Q_{\text{осн}}$ – тепло, внесенное через поверхность основания блока (тепло земли или ранее уложенных блоков);

$Q_{\text{пот}}$ – тепло, рассеянное в пространство через открытые поверхности блока;

$Q_{\text{кон}}$ – тепло, оставшееся в блоке через расчетный промежуток времени после укладки бетонной смеси в блок.

Раскрывая (1), можем записать:

$$\begin{aligned} V \cdot \gamma \cdot \theta \cdot t_{\text{укл}} + V \cdot \text{Ц} \cdot \text{Э} + q_{\text{инс}} \cdot F_{\text{инс}} \cdot T_{\text{инс}} + q_{\text{осн}} \cdot F_{\text{осн}} \cdot T_{\text{осн}} + V \cdot q_{\text{упр}} \cdot T_{\text{упр}} = \\ = F_{\text{пот}} \cdot k_{\text{ТП}} (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) \cdot T_{\text{р}} \cdot \alpha_{\text{w}} + V \cdot \gamma \cdot \theta \cdot t_{\text{кон}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где V – объем блока,

γ – плотность бетона,

θ – теплоемкость бетона,

$t_{\text{укл}}$ – температура бетонной смеси при укладке,

Ц – удельное содержание цемента в бетоне,

Э – экзотермия или удельное тепловыделение цемента (за 2, 7, 28 дней – max 75, 85, 90 ккал/кг цемента),

$F_{\text{инс}}, q_{\text{инс}}, T_{\text{инс}}$ – площадь инсоляции, ее интенсивность и время,

$q_{\text{упр}}, T_{\text{упр}}$ – удельная составляющая управления тепловым балансом (например, Дж/(м³·ч) и время управления,

$F_{\text{осн}}, q_{\text{осн}}, T_{\text{осн}}$ – площадь основания, интенсивность и время изменения количества тепла,

$F_{\text{пот}}$ – площадь теплопроводящих (открытых и опалубленных) поверхностей блока,

$k_{\text{ТП}}$ – коэффициент теплопередачи опалубки,

$t_{\text{вн}}$ – средняя температура внутри блока за расчетный период времени,

$t_{\text{нар}}$ – температура наружного воздуха,

$T_{\text{р}}$ – расчетный период времени, считая от момента укладки бетона в блок,

α_{w} – коэффициент продуваемости блока,

$t_{\text{кон}}$ – осредненная по объему конечная температура блока.

Выражение позволяет решать различные практические задачи технологии и обеспечения качества бетонных сооружений, например,

$$T_{\text{р}} = \frac{\gamma \cdot \theta \cdot (t_{\text{укл}} - t_{\text{кон}}) + \text{Э} \cdot \text{Ц} + q_{\text{упр}} \cdot T_{\text{упр}} + q_{\text{инс}} \cdot M_{\text{инс}} \cdot T_{\text{инс}} + q_{\text{осн}} \cdot M_{\text{осн}} \cdot T_{\text{осн}}}{M_{\text{пот}} \cdot k_{\text{ТП}} (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) \cdot \alpha_{\text{w}}}, \quad (3)$$

где $M_i = \frac{F_i}{V}$ – модули поверхностей блока, имеющие решающее значение в рассматриваемом явлении.

6.2.2. Зимние условия.

При $t_{\text{кон}} = 0^{\circ}\text{C}$ из выражения (3) получим $T_p = T_{\text{ост}}$ – время остывания блока. Условие обеспечения необходимой степени прочности бетона, при достижении которой бетон может быть заморожен, запишется в виде

$$T_{\text{ост}} \geq [T_{\text{ТВ}}], \quad (3a)$$

где $[T_{\text{ТВ}}]$ – требуемое время твердения бетона (при температуре $t_{\text{вн}}$) до величины требуемой прочности

$$[R_{\text{ТВ}}] \geq 0,5 \cdot R_{\text{сж}}, \quad (3б)$$

где $R_{\text{сж}}$ – предел прочности бетона на сжатие.

Управлять процессом набора прочности, кроме искусственного обогрева, можно и путем изменения других параметров, входящих в T_p .

Увеличение модуля поверхности, вызываемое уменьшением блоков, ускоряет их замерзание, и именно поэтому быстрее замерзают угловые участки блоков, а у человека мерзнут конечности. В свое время природа, решая эту проблему, снабжала древних животных управляемым «парусом», быстро нагревавшимся в лучах восходящего солнца.

6.2.3. Летние условия.

В летних условиях, наоборот, необходимо защитить блок от перегрева.

Дополнительное повышение (приращение) температуры можно при этом определить в виде

$$\Delta t = t_{\text{кон}} - t_{\text{укл}} \quad (4)$$

также из выражения (3), где можно принять

$$t_{\text{вн}} = \frac{t_{\text{укл}} + t_{\text{кон}}}{2} \quad (4a)$$

и

$$k_{\text{ТП}} = \frac{1}{R_t}, \quad (5)$$

где R_t – термическое сопротивление оболочки (опалубки).

Учитывая, что температурно-усадочные напряжения, вызывающие трещинообразование, прямо пропорциональны приращению температуры, мы должны всячески стремиться уменьшить последнее.

И наиболее эффективным здесь будет искусственное охлаждение бетонной смеси и блока, дающее отрицательную величину управляющего воздействия. Приблизительно можно оценить приращение температуры в виде

$$\Delta t_{\text{э}} \approx \frac{\text{Э} \cdot \text{Ц}}{\gamma \cdot \theta}, \quad (6)$$

что соответствует условию «абсолютного термоса».

С помощью уравнения теплового баланса можно приблизительно (но сравнительно быстро) оценить параметры зимней отсыпки карт грунтовой плотины как насухо, так и в воду и намывом, разработки котлованов, наметить необходимые мероприятия по обеспечению оптимальных температурных условий, включая необходимость устройства шатров и тепляков. Можно также решать и обратные задачи, например, создание замороженных грунтовых противофильтрационных завес, фундаментов, свай, ледяных дамб, переправ, ... , охлаждение материалов и, возможно, зданий в летний зной и другие подобные задачи.

6.2.4. Холодный бетон.

Если провести засоление бетонной смеси хлористыми солями (например кальция и натрия), т. е. затворить смесь на рассоле, то ее можно укладывать до $t = -20^{\circ}\text{C}$, и она не будет замерзать и будет набирать прочность, хотя и несколько медленнее.

Отметим, что реакция твердения после оттаивания снова возобновляется. Например, можно выдержать бетон в опалубке 5 дней, в течение которых бетон приобретет 50% прочности, после чего бетон можно заморозить. Весной он оттает и схватится почти полностью (на 95%). Но при этом следует помнить, что соли выфильтровываются, получаются высолы. К тому же повышается коррозийность бетона по отношению к арматуре.

Кроме отмеченных в качестве противоморозных химических добавок в ПГС (каменные работы) использовались также нитрит натрия, нитрит кальция с мочевиной и поташ, характеризующийся меньшей агрессивностью.

Засоление с целью защиты от замерзания применяется и для грунтовых оснований и сооружений.

6.3. Об оптимальной скорости вращения горизонтального барабана смесителя

Любая задача должна решаться как задача оптимизации.

Л. Эйлер

При гравитационном перемешивании можно предположить четыре условия предельного равновесия частицы на внутренней поверхности барабана:

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1) условие сдвига (сползания); | 3) условие качения; |
| 2) условие радиального отрыва; | 4) условие вертикального падения. |

Рис. 6.3.1. К расчету скоростей вращения горизонтального барабана:
 a – гладкий барабан; b – изменение функции $f(\alpha)$
при различных коэффициентах трения f стали.

1. Рассмотрим условие сдвига частицы смеси по поверхности барабана. Расчетная схема приведена на рис. 6.3.1.а.

Здесь

q – вес некоторой части смеси;

G – центробежная сила;

T – сила трения по стенке;

N – нормальная реакция стенки барабана;

α – угол подъема частицы над горизонтом;

R – внутренний радиус барабана.

Из условий равновесия получим:

$$1) \sum v = 0; \quad N = G - q \cdot \sin \alpha; \quad (1)$$

$$2) \sum \tau = 0; \quad T = q \cdot \cos \alpha; \quad (2)$$

$$3) T = N \cdot f_{\text{ст}}, \quad (3)$$

где $f_{\text{ст}}$ – коэффициент трения частицы по внутренней поверхности барабана.

Принимая во внимание, что

$$G = \frac{q}{g} \omega^2 R, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения, получим угловую скорость барабана:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{f(\alpha)} \quad (5)$$

при

$$f(\alpha) = \sin \alpha + \frac{\cos \alpha}{f_{\text{ст}}}, \quad (5a)$$

значения которой представлены на рис. 6.3.1б.

Отсюда видно, что возможность непрерывного регулирования процесса смешивания обеспечивает лишь кривая $f_{\text{ст}} = \infty$. А как же получить это условие? Вероятно, только с помощью устройства системы ребер (лопастей), расположенных на внутренней поверхности барабана, что и осуществляется в реальных конструктивных решениях барабанов смесителей.

2. Ниже и рассматривается условие наличия лопастей (рис. 6.3.2а). Из равновесия сил имеем:

$$\sum v = 0; \quad G + T + C - q \sin \alpha = 0. \quad (6)$$

Раскрывая величины с учетом

$$T = q \cdot \cos \alpha \cdot f_{\text{ст}}, \quad (7)$$

получим

$$f(\alpha) = \sin \alpha - f_{\text{ст}} \cos \alpha - \frac{C}{\gamma \cdot h}. \quad (8)$$

Здесь, кроме прежних обозначений,

C – сцепление смеси при сдвиге;

γ – удельный вес смеси;

h – толщина слоя смеси на лопасти.

Функция $f(\alpha)$ приведена в виде пунктирной линии на рис. 6.3.1б, откуда видно, что она обладает наилучшим качеством регулирования угла подъема смеси над горизонтом.

Рис. 6.3.2. К расчету скоростей вращения барабана с лопастями:
a – расчетная схема; *б* – зависимость прочности бетона
от скорости вращения смесителя.

Частота оборотов барабана

$$n = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (9)$$

При $\alpha = 90^\circ$ и соответственно $n = n_{90}$ в результате расчетов получим:

- а) при $C \geq \gamma \cdot h$ $n_{90} = 0$.
- б) при $C = 0$ и $R = 1,5 \text{ м}$ $n_{90} = 24,5 \text{ об/мин}$;
- в) при $C = 10^{-3} \text{ МПа}$ и $h = 0,1 \text{ м}$ $n_{90} = 17 \text{ об/мин}$.

Последнее число примерно и соответствует практической скорости вращения барабанов смесителей.

Продолжительность перемешивания можно записать в следующем виде:

$$T_{\text{пер}} = \frac{l_{\text{T}}}{\omega \cdot R} \quad (\text{или } \frac{n_{\text{T}}}{n}), \quad (10)$$

где l_{T} – некоторая требуемая длина траектории движения смеси в процессе перемешивания как обобщенная характеристика, определяющая качество технологического процесса,

n_{T} – требуемое суммарное число оборотов для одной загрузки (рекомендуют не менее 40).

Для нахождения траектории движения частицы при падении внутри барабана нужно решить совместно уравнения движения

$$x = x_{\text{H}} + v_x \cdot t, \quad (11)$$

$$z = z_H + v_z \cdot t - \frac{gt^2}{2} \quad (11a)$$

и уравнение окружности

$$x^2 + z^2 = R^2, \quad (11б)$$

где x_H, z_H – координаты точки отрыва частицы от поверхности барабана (начало свободного полета);

v_x, v_z – составляющие скорости частицы в момент отрыва;

t – время свободного полета частицы.

Принимая начальную скорость частицы в виде

$$v_H = \omega \cdot R \quad (12)$$

и считая в качестве оптимальной траекторию полета частицы через центр вращения барабана, получим оптимальный угол отрыва частицы в виде

$$\alpha_{отр} = \arcsin \left(-\frac{\omega^2 R}{g} + \sqrt{\frac{\omega^4 R^2}{g^2} + 1} \right). \quad (13)$$

Решая (13) совместно с (5) и (8), определим искомые оптимальные величины $\alpha_{опт}$ и $\omega_{опт}$.

Оптимальной скорости вращения соответствует и наилучшее качество перемешивания, соответствующее максимуму прочности бетона (рис. 6.3.2б).

Эта задача для шаровой мельницы приведена в работе Баумана В.А. Выше произведены ее обобщение и некоторая методическая обработка.

Рис. 6.3.3. Схемы движения частиц материала в барабане:

a – с перекатыванием; *б* – с отрывом от стенки; *в* – с «прилипанием» к стенке.

Отметим, что в зависимости от скорости вращения горизонтального цилиндрического барабана, можно выделить следующие три режима (рис. 6.3.3) движения находящихся в нем сыпучих материалов:

а) при малых скоростях материал пересыпается в барабане в виде вальца с горизонтальной осью вращения и с увеличенной, по сравнению с барабаном, угловой скоростью вращения;

б) при средних скоростях материал отрывается от стенок и совершает свободный полет в пределах полости барабана;

в) при больших скоростях материал «прилипает» к внутренней поверхности барабана и совершает вместе с последней круговые движения.

Обработка материалов во вращающихся барабанах применяется не только в строительной промышленности, но и во многих других отраслях народного хозяйства, в металлургической, химической, биологической, в пищевой и других технологиях.

Так, в процессах перемешивания и шлифования применяются первый и второй режимы, при грохочении и измельчении – второй, а при сепарации, обезвоживании и формовании – третий режим вращения барабана. Последний режим применяется, например, при отливке железобетонных и металлических труб и других изделий в центрифугах.

6.4. Технологии формования и уплотнения и выбор машин

По приложению воздействия способы уплотнения делятся на: 1) поверхностные и 2) глубинные, а по виду воздействия – на: а) статические (прессовые), б) динамические (ударные), в) вибрационные... .

Методы формования и уплотнения материалов и изделий приведены ниже.

- | | |
|--|--|
| а) Отливка. | н) Нагнетание. |
| б) Глубинное вибрирование. | п) Центрифугирование. |
| в) Формование на вибростоле. | р) Экструзия. |
| г) Штампование (прессование, гравитационное уплотнение). | с) Уплотнение виброопалубкой. |
| д) Вибропрессование. | т) Электрогидравлическое уплотнение. |
| е) Гидропрессование. | у) Взрывное уплотнение (в т. ч. бетона). |
| ж) Вибропрокат. | ф) Лепка. |
| и) Сбрасывание с высоты. | х) Фильтрационное уплотнение. |
| к) Метание (набрызг). | ц) Намораживание. |
| л) Вакуумирование. | ч) Электромагнитное обжатие. |
| м) Электроосмотирование. | |

Уплотнители делятся на 1) одиночные и 2) системы, пакеты (на тягачах, кранах и специальных манипуляторах, например, с телескопической стрелой ...).

Вибраторы, как и многие другие вещи, прежде всего могут классифицироваться как *n*-мерное пространство:

0 – нулевое пространство (точечные, например, булава...),

1 – одномерное пространство (линейные, например, виброигла, вибросигара, виброторпеда, виброцепь и т. п.),

2 – плоские (ножевые вибраторы, виброплоскость (стол), виброковер на автоприцепе ...),

3 – пространственные (виброфермы, вибропоршни, виброштампы, виброкаркасы и т. д.).

Типы приводов (электромоторов) вибраторов:

- а) погружной (вибробулава),
- б) выносной (виброштампы),
- в) дистанционный (виброигла).

Виды вибровозбудителей:

1) механические:

- а) эксцентриковые (вращательный, колебательный в виде «виброзмейки» и др.),
- б) бегунковый,

- в) планетарный, с внешней обкаткой,
- г) то же, с внутренней обкаткой,
- 2) пневмопульсационный (с открытой или закрытой полостью),
- 3) гидропульсационный (то же),
- 4) электрогидравлический (электроискровый),
- 5) электромагнитный,
- 6) пьезоэлектрический,
- 7) магнитострикционный,

Различают вибраторы: а) ненаправленного действия, б) направленного (нормального, касательного и крутильного воздействия), в) управляемого действия.

Классификация машин для уплотнения грунтов, производительность и оптимизация отдельных параметров приведены в [5].

Основы выбора машин приведены в п. 1.5. Ниже приведены дополнительные критерии выбора уплотняющих машин на основе принципа: возможности машин должны быть выше требований:

$$\left. \begin{array}{l} II - 1: \frac{1}{R_k} \geq \frac{2}{B}, \quad V - 1: \sigma_k \geq \sigma_{\text{опт}}, \\ III - 1: h_k \geq h_{\text{опт}}, \quad V - 2: a_k \Rightarrow a_{\text{опт}}, \\ III - 2: a_{ki} \geq \alpha_i, \quad V - 3: \rho_{\text{сух}} \geq [\rho_{\text{сух}}], \\ III - 3: R_B \geq [R], \quad V - 4: Ш_k \Rightarrow Ш_{\text{опт}}, \\ VII - 1: \frac{1}{P_{\text{э.в}}} \geq \frac{1}{P_{\text{э.т}}}, \end{array} \right\} \quad (1)$$

где h_k и $h_{\text{опт}}$ – толщина слоя, уплотняемая катком, и ее оптимальное значение,

R_k и R_B – радиусы разворота и уплотнения (последний для глубинных уплотнителей),

B – ширина карты, на которой разворачивается каток,

a_{ki} – углы продольного и поперечного откосов, преодолеваемые машинами,

$\sigma_k, a_k, \rho_{\text{сух}}, Ш_k$ – напряжения, ускорения, плотность грунта, шероховатость поверхности, обеспечиваемые машинами,

$P_{\text{э.в}}$ – критерий нарушения экологии в виде интенсивности вредных загрязнений, шума, вибрации и других вредных влияний и полей и т. д.,

$P_{\text{э.т}}$ – предельно допустимые концентрации (интенсивности) этих воздействий.

6.5. Армирование материалов

Для успешной работы нужен инструментарий.

Классификация арматуры затруднительна, так как в ее качестве может выступать неограниченное множество веществ, их форм и состояний, в т. ч. изделия из самого армированного материала.

Арматура может быть: гибкой и жесткой, монолитной и сыпучей, литой и витой, тканой и клееной, несущей и не несущей, сплошной и полой, гладкой и шероховатой (периодического профиля), обычной и преднапряженной, линейной и спиральной, мертвой и живой, механизмом и... машиной.

Она также классифицируется n -мерным пространством:

$n = 0$: нулевое (относительное точечное пространство): арматура дисперсная (гвозди, иглы, «щебень» из металлического лома, стружка, опилки, порошки и т. п.),

$n = 1$: одномерная: струны, волокна, стержни, канаты, сваи, ленты, цепи, нити и т. д.,

$n = 2$: плоская: сетки, плиты, фермы, литые чугунные решетки, ткани... ,

$n = 3$: каркасы, блоки, фермы, корневая система растений... .

По форме расположения в бетоне арматура имеет сходство с формами траекторий движения машин – см. п. 1.7.

Можно выделить следующие технологии укладки арматуры в бетон или в грунт:

- а) засыпка в смеситель,
- б) укладка с последующей засыпкой, в т. ч. и в опалубку,
- в) втапливание в смесь (например, гусеницами трактора при раскатывании сеток из рулона или прокат вместе со смесью),
- г) забивка и другие способы погружения (см. п. 6.6),
- д) протаскивание в отверстия,
- е) забуривание и др.

Для арматуры применимы большинство известных соединений – см. п. 5.5. (например, в т. ч. с помощью муфт с цементным, с синтетическим наполнителем, сваркой – трением и т. д.).

Для натяжения арматуры применяются:

- 1) домкраты механические,
- 2) домкраты гидравлические, пневматические,
- 3) электронагрев,
- 4) расширяющийся цемент (на основе алюминиевого порошка и др.),
- 5) сжатие самого напрягаемого элемента,
- 6) бездомкратные методы:
 - а) рычажного типа,
 - б) с использованием собственного веса сооружения и его частей,
 - в) путем деформации основания,
 - г) с использованием эксплуатационных нагрузок, окружающей среды,
 - д) превращение (временное или постоянное) сооружения или его части в подобие конструкции домкрата.

Упорами для натяжения арматуры служат:

- а) форма (опалубка),
- б) сам бетонный элемент,
- в) специальные стендовые опоры.

Для устройства в бетоне каналов закладывают в смесь как несъемные, так и извлекаемые опалубочные элементы:

- | | |
|---|----------------------------|
| 1) металлические трубки, | б) специальные стержни: |
| 2) резиновые трубки под внутренним давлением, | а) выплавляемые, |
| 3) резиновые шнуры, | б) выжигаемые, |
| 4) проволочные спирали, | в) вымываемые, |
| 5) шланги с песчаным наполнением, | г) растворяемые, |
| | д) выщелачиваемые, |
| | е) вымагничиваемые и т. п. |

Для армирования применяются и деревянные элементы, включая стволы бамбука, и цепи типа якорных, сетки типа кроватных, а для грунтов – также части растений: верхние (солома и пр.) и нижние (корневая система). Последняя уже представляет собой живое биологическое (выращиваемое) армирование. Существуют представители и химического армирования (например, инъектированные сваи) и физического (например, электроплавленные сваи).

В результате армирования получают композиционные материалы:

- | | | |
|----------------|------------------|------------------------|
| а) армобетон, | д) армостекло, | к) базальтофибробетон, |
| б) армогрунт, | е) армометалл, | л) армолед, |
| в) армодерево, | ж) армокамень, | м) ледополимер, |
| г) армопласт, | и) армокерамика, | н) |

Сюда же относятся и все слоистые материалы.

6.6. Свайные технологии

И свая тоже превращается в ... машину.

Сваи выполняют роль арматуры в грунте.

6.6.1. Классификация свайных технологий.

Основные классы технологий:

- I. Погружение готовых свай (механические технологии).
 - II. Набивка свай (механические технологии).
 - III. Инъектирование (в т. ч. химические технологии).
 - IV. Термообработка (физические технологии).
 - V. Выращивание (биотехнологии).
 - VI. Комбинированные технологии.
- I. Технологии погружения (воздействия на сваю).
- | | |
|---------------------|--|
| 1. Забивка. | 6. Подмыв. |
| 2. Вибропогружение. | 7. Электроосмотирование. |
| 3. Задавливание. | 8. Выстреливание. |
| 4. Завинчивание. | 9. Сброс с высоты (например, с вертолета). |
| 5. Забуривание. | |
- II. Набивка свай.
- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| 1. С извлечением грунта. | III. Инъектирование. |
| 2. С вытеснением грунта. | 1. Цементация. |
| 3. С защитными оболочками. | 2. Химическое закрепление. |
| 4. Без защитных оболочек. | 3. Смолизация. |
- IV. Термообработка грунта:
- | | |
|-------------------|--|
| 1. Замораживание. | V. Выращивание свай: |
| 2. Обжиг. | 1. Использование природных деревьев с их развитой корневой системой. |
| 3. Плавление. | 2. Специальные посадки и выращивание (с пропиткой антисептиками на корню). |

6.6.2. Классификация сваепогружателей.

I. Сваепогружатели – молоты.

1. Механический.
2. Воздушный.
3. Паровой.
4. Гидравлический.
5. Дизельный.
6. Взрывной.
7. Электрогидравлический.
8. Электромагнитный.

II. Вибропогружатели:

1. Простой
2. С подрессоренной пригрузкой.
3. Вибромолот.
4. Виброкабестан.
5. С комбинированной вибрацией.
6. С распределенным внутри сваи-оболочки вибровозбудителем (виброцепь).

Для ускорения вибропогружения поверхностям свай придается оптимальная направленная шероховатость.

III. Задавливатели свай.

1. Наложением груза (в т. ч. наливного).
2. С опорой на соседние сваи.
3. С опорой на конструкции.
4. С использованием активного «присоса» к земле, к воде.
5. С опиранием на воздух (установки вертолетные, реактивные, ...).

Воздействия на сваю при ее погружении могут быть:

1. Сосредоточенные (на голове или на башмаке).
2. Распределенные (по всей длине или ее части).

6.6.3. Особенности погружения полых свай.

Полые сваи (трубы, оболочки) могут погружаться:

- а) с закрытым концом или
- б) с открытым концом:
 - 1) без извлечения грунта и
 - 2) с полным или частичным извлечением грунта из полости сваи,
 - 3) с опережающим извлечением (забуривание),
- в) с частично открытым концом,
- г) с регулируемым открытием конца сваи,
- д) с разрыхлением грунтовой «пробки» с помощью вибростержня с направленной шероховатостью,
- е) с внешним и внутренним электроосмотированием,
- ж) с вакуумированием,
- з) в тиксотропной рубашке и т. п.

При вибропогружении оболочек из железобетона через слой воды не только в плотные, но и в слабые грунты, а также и при погружении с поверхности земли с применением подмыва, они получают повреждения в виде продольных трещин и выколов бетона. Повреждения возникают выше дна акватории, в зоне грунтового сердечника («пробки»), особенно при возникновении виброударного неустановившегося режима колебаний оболочек. По-видимому, в воде в полости оболочек возникают при вибропогружении явления, близкие к гидравлическому удару и кавитации.

Для снижения местных динамических давлений в воде применяются те же меры, что и при защите от взрывов в воде или при гашении волн:

- а) воздушно-пузырьковые завесы,
- б) заполненные воздухом камеры и
- в) воздушные колокола...

помещаемые в заполненную водой полость оболочки на поверхность грунтового сердечника. Для повышения долговечности оболочек железобетон в зоне переменного горизонта воды заменяется стальным стаканом с бетонным заполнением.

6.6.4. Расчет производительности и оптимизация выбора сваепогружателей.

Всё можно считать и всё нужно считать:
количественная оценка важнее качественной.

1. Чистое время погружения сваи запишем в виде

$$T_{\Pi} = \int_{l_0}^{l_{\Pi}} \frac{dz}{v(z)} \quad (1)$$

при

$$v(z) = v \cdot s_a \geq v_{\min}, \quad (1a)$$

где l_{Π} – глубина забивки сваи;

$v(z)$ – скорость погружения сваи;

v – частота воздействий (ударов, колебаний) погружателя;

s_a –отказ (подача, т. е. погружение сваи от одного воздействия);

z – ордината (текущая глубина погружения);

l_0 – глубина погружения без забивки, т. е. под собственным весом сваи и молота с наголовником;

v_{\min} – минимальная скорость погружения из условия обеспечения приемлемой производительности.

Интеграл легко вычислить графически, если построить эпюру скоростей по глубине забивки (рис. 6.6.1). При вибрационном методе отказ (подача) пока оценивается непосредственно скоростью погружения.

Рис. 6.6.1. Зависимость скорости забивки свай от глубины ее погружения.

2. Эксплуатационная производительность погружения свай запишется в виде

$$\Pi = \frac{K_B}{T_{\text{ц}}} \quad (2)$$

при

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{п}} + T_{\text{подг}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{ц}}$ – полный цикл погружения одной сваи;

K_B – коэффициент использования времени;

$T_{\text{подг}}$ – время подготовительного периода для погружения одной сваи.

3. Значение контрольного остаточного отказа s_a , м, при забивке и добивке железобетонных и деревянных свай длиной до 25 м в зависимости от энергии удара E_d выбранного молота и **несущей способности свай** F_d , указанной в проекте, должно удовлетворять условию (СНиП 3.02.01-87)

$$s_a \leq \frac{\eta A E_d}{F_d (F_d + \eta A)} \cdot \frac{m_1 + \varepsilon^2 (m_2 + m_3)}{m_1 + m_2 + m_3}. \quad (4)$$

Если фактический (измеренный) остаточный отказ $s_a < 0,002$ м, то следует предусмотреть применение для погружения свай молота с большей энергией удара, при которой остаточный отказ будет $s_a \geq 0,002$ м, а в случае невозможности замены сваебойного оборудования – общий контрольный отказ сваи $s_a + s_{el}$, м (равный сумме остаточного и упругого отказов), должен удовлетворять условию

$$s_a + s_{el} \leq \frac{2E_d \frac{m_1}{m_1 + m_2} + F_d s_{el}}{F_d \left[\left(2 + \frac{F_d}{4} \right) \left(\frac{\eta_p}{A} + \frac{\eta_f}{A_f} \right) \frac{m_4}{m_4 + m_2} \sqrt{2g(H-h)} \right]}. \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) приняты обозначения:

η – коэффициент зависимости от материала сваи, приведенный ниже.

Виды свай	Коэффициент η , $\kappa\text{H}/\text{м}^2$
Железобетонные с наголовником	1500
Деревянные без подбабка	1000
Деревянные с подбабком	800

A – площадь, ограниченная наружным контуром сплошного или полого поперечного сечения ствола сваи (независимо от наличия или отсутствия у сваи острия), м^2 ;

E_d – расчетная энергия удара молота, $\kappa\text{Дж}$, приведенная ниже.

Тип молота	Расчетная энергия удара молота E_d , $\kappa\text{Дж}$
Подвесной или одиночного действия	GH
Трубчатый дизель-молот	$0,9GH$
Штанговый дизель-молот	$0,4GH$

G – вес ударной части молота, κH ;

H – фактическая высота падения ударной части дизель-молота, м ;

m_1 – масса молота, т ;

m_2 – масса сваи и наголовника, т ;

m_3 – масса подбабка, т ;

ε – коэффициент восстановления удара, принимаемый, при забивке железобетонных свай и свай-оболочек молотами ударного действия с применением наголовника с деревянным вкладышем, в виде $\varepsilon^2 = 0,2$;

s_a – фактический остаточный отказ, равный значению погружения сваи от одного удара молота;

s_{el} – упругий отказ сваи (упругие перемещения грунта и сваи), определяемый с помощью отказомера, м ;

η_p и η_f – коэффициенты перехода от динамического (включающего вязкое сопротивление грунта) к статическому сопротивлению грунта, принимаемые соответственно равными: для грунта под нижним концом сваи $\eta_p = 0,00025 \text{ с}\cdot\text{м}/\kappa\text{H}$ и для грунта на боковой поверхности сваи $\eta_f = 0,025 \text{ с}\cdot\text{м}/\kappa\text{H}$;

A_f – площадь боковой поверхности сваи, соприкасающейся с грунтом, м^2 ;

m_4 – масса ударной части молота, т ;

g – ускорение свободного падения, принимаемое равным $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$;

H – фактическая высота падения ударной части молота, м ;

h – высота первого отскока ударной части дизель-молота, а для других видов молотов $h = 0$ м.

Примечание. При забивке свай через грунт, подлежащий удалению в результате последующей разработки котлована, или через грунт для водотока значение расчетного отказа следует определять исходя из несущей способности свай, вычисленной с учетом не удаленного или подверженного возможному размыву грунта, а в местах вероятного проявления отрицательных сил трения – с учетом последнего.

Расчетный отказ для железобетонных свай длиной свыше 25 м, а также для стальных трубчатых свай следует определять расчетом, основанным на волновой теории удара.

4. Общие положения (см. п. 1.5) справедливы при выборе и этих машин. Ниже приведены лишь два важных (и противоречащих друг другу) критерия, удовлетворение которым и обеспечивает при прочих равных условиях оптимальность выбора:

$$\text{IV: } \Pi = \Pi_{\max}, \quad (6)$$

$$\text{V-I: } \sigma \leq [\sigma], \quad (6a)$$

где σ и $[\sigma]$ – обобщенное напряжение при изготовлении, транспортировке и забивке свай и соответствующее допускаемое напряжение в материале.

5. Так, динамическое напряжение при забивке по формуле Бахолдина

$$\sigma = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{6 \cdot E_d}{\left(\frac{\delta_{\Pi}}{E_{\Pi}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_c}{E_c}\right) \left(1 + \frac{G}{q}\right) A}}, \quad (7)$$

где, кроме прежних обозначений,

δ_{Π} , E_{Π} – соответственно толщина и модуль упругости прокладки наголовника;

L_c , E_c – соответственно длина сваи и модуль упругости ее материала;

q – вес свай, наголовника и подбабка;

или по приближенной формуле сопротивления материалов

$$\sigma_{\text{дин}} = \sigma_{\text{ст}} \cdot K_{\text{дин}} \quad (8)$$

при

$$K_{\text{дин}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\Delta_{\text{ст}}}}, \quad (8a)$$

где $\sigma_{\text{ст}}$ – статическое напряжение от веса молота;

$\Delta_{\text{ст}}$ – соответствующая ему осадка головы свай;

$K_{\text{дин}}$ – коэффициент динамичности при ударе.

Для оценки напряжений можно использовать также формулу Герсеванова

$$\sigma_{\text{дин}} = E_c \frac{V_M}{V_Y} \quad (9)$$

при

$$V_M = \sqrt{2g \cdot \frac{E_d}{G}}, \quad (10)$$

где V_M и V_Y – скорости соответственно движения ударной части молота и распространения

продольной ударной волны в свае;

g – ускорение свободного падения.

6. Напряжения, действующие при вибропогружении:

$$\text{а) } \sigma_{\text{раст}} = \frac{K_g G_B - Q_B}{A}, \quad (11)$$

$$\text{б) } \sigma_{\text{сж}} = \frac{K_g G_B + Q_B + q}{A}, \quad (12)$$

где K_g – коэффициент перегрузки ($\approx 1,2$);

G_B – максимальная величина возмущающей силы вибропогружателя;

Q_B – вес вибропогружателя.

В случае удовлетворения второго критерия автоматически выполняется для данного рода погружателя и первый критерий максимума производительности.

Эти проверки на прочность и устойчивость (в общем случае – надежность) элементов сооружений в процессе самого строительства становятся все более важными, поскольку возрастает со временем динамичность технологий, например, анкерные сваи прижима газовых трубопроводов против всплытия на болотах вбивает... пушка ($d = 100 \text{ мм}$).

ГЛАВА 7. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ IV-ГО КЛАССА (ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ МАТЕРИИ)

7.1. Структура и особенности технологий класса IV. Классификация движителей

Это в основном технологии собственно переноса (перемещения, передвижки, перевозки, транспортирования) массы материалов (и изделий) в четырехмерном пространстве.

Развитая технология класса IV включает следующие операции:

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1) подача (маневрирование, постановка, ...) транспортного средства под загрузку, | 8) задержки в пути, |
| 2) контроль чистоты средства, | 9) подача под выгрузку, |
| 3) приемка груза, | 10) контроль и передача груза, |
| 4) защита средства от повреждения, | 11) подготовка к выгрузке, |
| 5) загрузка средства порциями – техатомами, | 12) выгрузка, |
| 6) контроль и защита от потерь, | 13) очистка средства, |
| 7) транспортирование (груженный ход), | 14) ремонт средства, |
| | 15) обратный (порожний) ход средства, |
| | 16) |

Транспортное средство (машина) перемещается с помощью движителей.

Движитель – устройство для преобразования работы двигателя или другого источника энергии в работу, расходуемую на преодоление сопротивления движению транспортных средств по суше, в воде, под землей, в воздухе и в космосе.

Движители взаимодействуют либо с путем, либо со средой. Виды движителей:

- | | |
|--|---|
| 1) колесо (простое и на рельсах), | |
| 2) гусеничный ход, | |
| 3) шагающие устройства, | |
| 4) аэросани (лыжи), | |
| 5) винт воздушный, | |
| 6) планер (парящая плоскость), | |
| 7) крыло (воздушное и подводное), | |
| 8) винт гребной, | |
| 9) колесо гребное, | |
| 10) маховое крыло, | |
| 11) парусный (в воздухе, в воде, в космосе – при солнечном ветре), | |
| 12) весло и шест, | |
| 13) водометный движитель, | |
| 14) инерционный движитель (вибрационный), | 21) дирижабль, |
| 15) винтовая пара (болотоход-амфибия, винты-поплавки), | 22) парашют, |
| 16) воздушная подушка, | 23) канатный, |
| 17) магнитная подушка, | 24) червячный, |
| 18) электрокинетический, | 25) змеиный, |
| 19) магнитогидравлический, | 26) гусеница-«капустница», |
| 20) электрогидравлический, | 27) кротовый, |
| | 28) ракетный (реактивный, плазменный) и т. д. |

Движители иногда называют ходовым оборудованием машин.

В настоящее время наиболее распространен колесный движитель на пневмошинах. Пневматическая шина запатентована в 1845 г. Томпсоном, применена для велосипедов в 1888 г. и для автомобилей – в 1895 г. Сейчас **колесо само превратилось** в сложнейшую **машину** под названием «мотор-колесо».

Получает дальнейшее развитие и гусеничный ход. Например, на автомобиле «Эйрол» гусеницы выполнены из пневмоклатков, свободно вращающихся на осях (звеньях) цепи, при этом корпус машины непосредственно опирается на нижние катки и таким образом катится по каткам со скоростью в 2 раза большей скорости цепи. Скорость на шоссе достигает 54 км/ч. На грязи и болоте катки превращаются в грунтозацепы, так как перестают вращаться вследствие проскальзывания по корпусу.

Существенно возрастает применение авиации в строительстве. Например, в 2001 г. вертолеты доставляли мешки с песком для заделки промоин в дамбах на юге России во время наводнений.

Из транспортных машин можно выделить **подкласс транспортирующих**, которые сами не перемещаются, а грузы переносятся их рабочими орудиями или средами. Рабочими средами, а равно и технологическими орудиями могут быть любые вещества в любых их состояниях. Так, машины могут применять как твердую несущую ленту (конвейеры), так и жидкую: открытую (канал, струя) или закрытую (трубопровод), или газообразную: открытую (форсунка) или закрытую (пылесос) и т. п., или сыпучую (струя песка), и т. д. Разумеется, известны и сложные транспортно-технологические комплексы, например, автоматические роторно-конвейерные линии.

7.2. Классификация и выбор кранов

- | | |
|--|---|
| <p>1. По принципиальной схеме конструкции выделяют краны:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) стреловые, 2) козловые, 3) мостовые, 4) мостокабельные, 5) кабельные, 6) башенные (с верхним и нижним противовесами), 7) порталные... | <p>2. По мобильности:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) стационарные, 2) передвижные, 3) переносные, 4) самоходные, 5) плавучие, 6) подводные, 7) летающие, 8) космические... |
| <p>3. По ходовому устройству:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) пневмокошесные, 2) гусеничные, 3) автомобильные, 4) тракторные, 5) на рельсовом ходу, 6) на плавучих платформах (понтонках), 7) см. Двигатели в п. 7.1. | <p>4. Типы стреловых кранов:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) с горизонтальной стрелой, 2) с наклоняемой стрелой, 3) с телескопической стрелой, 4) с конвейерной стрелой, 5) с трубопроводной стрелой, 6) с концевой опорой стрелы (подставкой), 7) с концевым вертолетным винтом (поддержкой стрелы), 8) со стабилизацией башни винтами, 9) с противовесом на прицепе-трайлере, 10) со стабилизацией вакуумированием, 11) с внешним автономным противовесом, 12) с «анкерным» противовесом... |

Как и конвейеры, трубопроводы и подъёмники, краны относятся к транспортирующим машинам, которые, в отличие от транспортных, сами при подъёме груза практически не перемещаются.

Основные **критерии выбора** остаются общими и приведены в п. 1.5. Ниже раскрыты некоторые из них:

$$\text{I:} \quad R_B \geq R_T = l_{Tp} = b_k/2 + \Delta b_k + a + B_{соор}/N_T + \Delta l, \quad (1)$$

$$\text{II:} \quad \beta_B \geq \beta_T = 2\pi, \quad (2)$$

$$\text{III:} \quad H_B \geq H_T = h_{Tp} = H_{соор} - H_{упр} + h_{стр} + \Delta h + h_{Tp}, \quad (3)$$

при $H_B = H_B(R_B)$, см. рис. 7.2.1.

Здесь приняты обозначения:

R_B, H_B, β_B – соответственно возможные радиус вылета, высота подъема крюка крана и угол поворота стрелы, т. е. некоторые граничные характеристики пространства возможностей машины,

R_T, H_T, β_T – требуемые дальности подачи груза по горизонтали, высоте (измеряемые до крюка) и углу поворота стрелы, т. е. пространство требований,

b_K и Δb_K – колея крана и выступание его габарита за колею с одного борта,

a и $B_{\text{соор}}$ – расстояние от габарита крана до сооружения и его ширина,

N_T – требуемое число кранов (в первом приближении 1 – на блок, 2 – на сооружение),

Δl – запас вылета крюка, зависящий от конфигурации сооружения в плане, в частности, от его длины, определяемый графически,

$H_{\text{соор}}, h_{\text{тр}}$ и $h_{\text{стр}}$ – высоты сооружения, груза (с тарой) и стропов,

$H_{\text{упр}}$ – превышение уровня стоянки крана над основанием сооружения, включая высоту эстакады,

Δh – запас высоты подъема груза с учетом возможных выступов опалубки, шатров и других устройств.

Рис. 7.2.1. Пространство возможностей крана в зависимости от вылета крюка R_B :

a – грузоподъемности G_B , b – высоты подъема крюка H_B :

1 – для наклоняемой стрелы, 2 – для горизонтальной стрелы. Здесь густота штриховки характеризует качество пространства (в частности, грузоподъемность).

$$\text{IV-1:} \quad \frac{1}{T_{B_i}} \geq \frac{1}{T_{T_i}}, \quad (4)$$

где T_i – затраты времени на подготовительные и непредвиденные операции (доставка крана, монтаж, перестановка, перебазирование, технический уход, ремонт, замена и т. п.).

$$\text{IV-2:} \quad G_B \geq G_T = G + G_{\text{тары}} + G_{\text{стр}}, \quad (5)$$

$$v_{iB} \geq v_{iT}, \quad \dot{v}_{iB} \geq \dot{v}_{iT}, \quad (5a)$$

$$\frac{1}{\Delta X_B} \geq \frac{1}{\Delta X_T} \quad (5b)$$

при $G_B = G_B(R_B)$, см.рис.7.2.1,

где $G_B, v_{iB}, \dot{v}_{iB}$ – грузоподъёмность, скорость и ускорение движения крюка и крана на i -ом участке (с индексом «Т» – их требуемые величины),

G – требуемая масса полезного груза,

$G_{\text{тары}}$ – масса тары,

$G_{\text{стр}}$ – масса стропов,

ΔX – величина отклонения подачи груза от проектной точки.

Здесь рекомендуется иметь в виду соотношение:

$$G = mG_{\text{гр}}, \quad (6)$$

где $G_{\text{гр}}$ – масса груза на транспортном средстве доставки к крану,

m – кратность приема груза краном (0,5; 1,0; 2,0; ...).

$$\text{V:} \quad K_{C_{B_i}} \geq K_{C_{T_i}} \quad (7)$$

где K_{C_i} – степени сохранения груза как по количеству, так и по качеству, на всех операциях (загрузка, перенос, выгрузка).

$$\text{VI:} \quad K_{3B.} \geq K_{3T.}, \quad (8)$$

где K_3 – коэффициент запаса крана на опрокидывание с учётом уклона и деформируемости основания при неблагоприятном сочетании возможных нагрузок.

$$\text{X:} \quad \frac{1}{M_B} \geq \frac{1}{M_T}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{q_B} \geq \frac{1}{q_T}, \quad (9a)$$

$$\frac{1}{m_B} \geq \frac{1}{m_T}, \quad (9b)$$

где M и m – соответственно масса крана и его вращающихся частей,
 q – удельный расход топлива (энергии).

7.3. Выбор автомобилей

Автомобили относятся к транспортным машинам, которые перемещаются вместе с грузом. Основные критерии выбора остаются общими. Наиболее близкими здесь являются приведённые выше критерии выбора кранов. Ниже приведены лишь специфические дополнения к ним.

$$\text{III:} \quad i_{\text{В}} \geq i_{\text{Т}}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{r_{\text{В}}} \geq \frac{1}{r_{\text{Т}}}, \quad (1a)$$

$$\frac{1}{h_{\text{В}}} \leq \frac{1}{h_{\text{Т}}}, \quad (1б)$$

где i и r – уклоны и радиусы поворота пути,

h – мостовые, туннельные и другие путевые ограничения по габаритам, грузоподъемности и т. д.

$$\text{IV:} \quad Q_{\text{В}} \geq Q_{\text{Т}}, \quad (2)$$

$$G_{\text{В}} \geq G_{\text{Т}}, \quad (2a)$$

при

$$G = Q \cdot \rho, \quad (2б)$$

где Q , G и ρ – объем, масса и плотность груза.

При этом:

$$Q_{\text{Т}} \text{ (или } G_{\text{Т}}) = m Q'_{\text{Т}} \text{ (или } G'_{\text{Т}}). \quad (3)$$

Здесь m – число принимаемых единичных грузов (ящиков, контейнеров, бадей, ковшей грунта, замесов бетонной смеси и т. п., подаваемых на один автомобиль).

$Q'_{\text{Т}}$ (или $G'_{\text{Т}}$) – объём (или масса) единичного груза.

7.4. Выбор технологий строительства каналов в выемке и насыпи

Схемы к выбору технологий приведены на рис. 7.4.1, где технологии обозначены арабскими цифрами. **Технология 1** (поперечное перемещение грунта бульдозерами) применяется на участке канала в выемке-насыпи, ограниченном по длине канала точками пересечения поверхности земли с основанием канала на отметке 0 и с гребнем дамбы на отметке Б.

Граница разработки выемки по глубине определяется поперечным уклоном $i_{\text{В}} = 1/3 \dots 1/4$, преодолеваемым бульдозером при транспортировании грунта со средней дальностью L_1 между центрами тяжести масс выемки и насыпи.

Доработку выемки канала здесь производят по **технологии 2** (поперечное перемещение грунта скреперами). При этом при наборе грунта скреперы перемещаются вдоль оси канала.

Рис. 7.4.1. К выбору технологии строительства канала: *a* – продольный разрез; *b* – эпюры площадей поперечных сечений выемки Ω_B и насыпи Ω_H ; поперечные разрезы: *в* – в выемке; *г* – в выемке-насыпи; *д* – в насыпи; *е* – в выемке-насыпи (крупно).

На примыкающих к рассмотренному участкам канала используется **технология 3** (продольное перемещение грунта скреперами из выемки канала в насыпь дамбы). При этом длины участков выбираются из условий равенства масс грунта в выемке и насыпи и расстояния между их центрами тяжести, равного оптимальной дальности транспортирования грунтов скреперами.

Технология 4 (экскавация и перемещение грунта вдоль каналов автосамосвалами) применяется на участках, расположенных за участками работы скреперов. Разумеется, здесь может использоваться и конвейерный транспорт.

Технология 5 предусматривает выемку грунта и направление его в отвал непосредственно экскаваторами или с применением транспортных средств.

Технология 6 требует доставки грунта в дамбы канала из резерва или из ближайшего карьера.

Расстояния L_i перемещения грунта в различных технологиях зависят от условий строительства и выбираются оптимальными для соответствующих транспортных средств и траекторий их движения. Выбор машин производится на основании обобщенных критериев.

7.5. Оптимизация некоторых параметров транспортирования грунтов

Гораздо труднее увидеть проблему, чем найти ее решение.

Дж. Д. Бернал

7.5.1. Расчет шага выездов скреперов.

Ниже приведена классификация выездов из выемок и въездов на насыпи.

1. По направлению:

- а) прямые,
- б) наклонные (косые),
- в) спиральные,
- г) зигзагообразные.

2. По устройству (по технологии):

- а) насыпные (намывные),
- б) вырезные.

3. По отношению к сооружению:

- а) внешние (для дамб),
- б) внутренние (для каналов).

4. По функции:

- а) с односторонним движением,
- б) с двусторонним движением.

Задача рассматривается на примере разработки канала скрепером по траектории движения в форме продольной петли.

Время разработки единицы длины канала (т. е. **одномерное удельное время** или инверсия скорости или антискорость) в учетом объема выездов представим в виде

$$T_x = \frac{\Omega}{P} + \frac{V_B}{X \cdot P_B}, \quad (1)$$

где Ω – площадь сечения канала,

P – эксплуатационная производительность машины на выемке канала,

P_B – то же, на выемке выездов,

V_B – объем выемки одного выезда,

X – шаг выездов.

Соответствующие производительности определяются по выражениям:

$$П = \frac{Q_{ц}}{T_{ц}} \cdot K_{в} \quad (2)$$

при

$$T_{ц} = T_0 + K_{ц} \cdot X, \quad (2a)$$

$$П_{в} = \frac{Q_{ц}}{T_{ц,в}} \cdot K_{в}. \quad (3)$$

Здесь $Q_{ц}$ – объем выемки в плотном состоянии, выполняемый за один цикл,

$T_{ц}$ и $T_{ц,в}$ – продолжительности циклов при разработке соответственно канала и выезда,

$K_{в}$ – коэффициент использования рабочего времени машины,

T_0 – часть цикла, не зависящая от шага выездов, т. е. от дальности транспортировки.

Из (1) после подстановки получим

$$T_x = \Omega \cdot (T_0 + K_{ц} \cdot X) / (Q_{ц} \cdot K_{в}) + V_{в} \cdot T_{ц,в} / (X \cdot Q_{ц} \cdot K_{в}). \quad (4)$$

Приравнявая к нулю первую производную от (4) по X , получим уравнение

$$\frac{dT_x}{dX} = \frac{\Omega \cdot K_{ц}}{Q_{ц} \cdot K_{в}} - \frac{V_{в} \cdot T_{ц,в}}{Q_{ц} \cdot K_{в}} \cdot \frac{1}{X^2} = 0, \quad (5)$$

из которого оптимальное значение шага выездов из канала будет

$$X_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{V_{в} \cdot T_{ц,в}}{\Omega \cdot K_{ц}}} = \sqrt{\frac{Q_{ц} \cdot V_{в}}{\Omega \cdot K_{ц} \cdot П_{в}}}. \quad (6)$$

При этом скорость разработки (проходки, продвижения) канала

$$v_x = \frac{1}{T_x} \quad (7)$$

с учетом (6) будет максимальной.

Отметим, что в первом приближении можно принять

$$T_{ц,в} \approx T_0 \approx T_{0,в}. \quad (7a)$$

Аналогичное решение можно использовать при оценке шага разворотных площадок при отсыпке дамб, молов, дорожных насыпей, при проходке туннелей и т. п. Например, при применении передвижных разворотных устройств (кругов, платформ, плавучих средств и т. п.) шаг их перестановки будет

$$X_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{Q_{ц} \cdot T_{0,п}}{\Omega \cdot K_{ц}}}, \quad (8)$$

где $T_{0,п}$ – часть цикла перестановки, не зависящая от шага.

7.5.2. Расчет оптимальных размеров скреперного отвала.

Часть продолжительности цикла скрепера, зависящая от размеров отвала

$$\Delta T_{ц,отв} = \frac{B_0}{v_0} + \frac{H_0}{i \cdot v_{в}} \quad (1)$$

при

$$B_0 = \frac{\Omega \cdot K_{р.о}}{H_0}, \quad (2)$$

где B_0 и H_0 – средняя ширина и высота грунтового отвала (склада),

$K_{p.o}$ – коэффициент разрыхления грунта в отвале,

i – уклон въезда на отвал,

v_o, v_B – средние скорости скрепера соответственно по отвалу и по въезду,

Ω – площадь сечения выемки (канала).

С учетом (2) возьмем первую производную от (1) по H_o и приравняем ее к нулю, т. е.

$$\frac{d\Delta T_{ц.отв}}{dH_o} = -\frac{\Omega \cdot K_{p.o}}{v_o \cdot H_o^2} + \frac{1}{i \cdot v_B} = 0, \quad (3)$$

откуда оптимальная высота отвала

$$H_{o \text{ опт}} = \sqrt{\frac{\Omega \cdot K_{p.o} \cdot i \cdot v_B}{v_o}}, \quad (4)$$

которая и обеспечивает максимальную производительность скрепера (Фиделев А.С., 1970). Здесь осредненные для груженого и порожнего ходов скорости на i -м участке пути рекомендуется определять по выражению

$$v_i = \frac{2v_{i.гр} \cdot v_{i.пор}}{v_{i.гр} + v_{i.пор}}. \quad (5)$$

Оптимальная ширина отвала при этом определится, естественно, из (2).

Аналогичные решения можно получить и для других технологий создания грунтовых отвалов и складирования, в том числе и негрунтовых материалов.

7.6. Колесо и почва

Уплотнение пахотного слоя земли проходкой колесного трактора К-700 в два следа снижает урожайность поля с 37 до 14 ц/га. Поэтому рекомендуют использовать К-700 только на транспортных работах.

Для уменьшения уплотняющего действия сельскохозяйственных машин предлагаются следующие меры.

1. Гусеницы уширенные или из надувных резиновых траков.
2. Гусеница уширенная центральная.
3. Совмещение всех операций по обработке почвы и посеву за один проход тягача.
4. Цепной двухсекторный плуг как тяговый самоходный агрегат.
5. Мостовой полеобработывающий комплекс на рельсах.
6. Лебедочный плуг по типу канатного скрепера, примененный в 20-х годах в «Электроплуге».
7. Использование технологий авиационной промышленности.

Итак, спираль технического прогресса замкнулась: через столетие снова возвращаемся к «Электроплугу». Но разумеется, этот возврат будет уже на другом (более совершенном) научно-технологическом уровне.

ГЛАВА 8. К ТЕОРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЯ СО СРЕДОЙ

Одной из важнейших задач многих технологий, и в особенности строительных, является оценка условий проходимости транспортных средств и технологических машин, в частности, по грунтовым дорогам, чему и посвящена данная глава.

8.1. Общие положения

Сила тяги на крюке транспортного средства (машины, тягача) является основным показателем движителя, так как от нее зависит и величина совершаемой полезной работы, например, по резанию грунта. Эта сила выражается в виде:

$$H_0 = F_k - W_0, \quad (1)$$

где F_k – сила тяги на движителе,

W_0 – сумма сопротивлений движителя и машины в целом.

Практически устанавливаются характерные значения силы тяги на крюке:

- 1) максимальная по сцеплению – H_{\max} ,
- 2) максимальная по мощности – $H_1 \cong 0,7H_{\max}$,
- 3) при максимальном К.П.Д. – $H_2 \cong 0,5H_{\max}$,
- 4) максимально допустимая из условия небуксования (при $K_\delta \leq 0,1 \dots 0,3$).

Землеройно-транспортные машины имеют два характерных режима работ:

- а) землеройный (или тяговый) и
- б) транспортный.

Наиболее интересны тяговые расчеты колесного движителя. Колесо относится к самым крупным открытиям человека, так как в природе его не существует, как и корабельного винта (винт Архимеда). Колеса машин работают в двух режимах:

- 5) свободное колесо;
- 6) ведущее колесо.

8.2. Взаимодействие в режиме ведомого (свободного) колеса

Схема сил взаимодействия жесткого колеса с грунтом приведена на рис. 8.2.1а. Из трех условий равновесия имеем:

$$1) \quad H_0 = W_0, \quad (1)$$

$$2) \quad V = G, \quad (1a)$$

$$3) \quad W_0 = M_T / r_c - G \cdot e / r_c = W_T + W. \quad (2)$$

Введем коэффициент сопротивления качению

$$f_k = \operatorname{tg} \alpha_k = e / r_c, \quad (3)$$

Рис. 8.2.1. Схемы взаимодействия с грунтом ведомого колеса:
а) жесткого; б) деформируемого.

при этом можем записать

$$\boxed{W = G \cdot f_k} \quad (4)$$

и

$$W_T = M_T \cdot \sqrt{1 + f_k^2} / r. \quad (4a)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

H_0 – ведущая сила на оси колеса,

W_0 – полная сила сопротивления движению колеса,

V – вертикальная составляющая силы реакции грунта,

G – нагрузка на ось колеса и его вес с присоединенной к нему массой грунта,

M_T – тормозной момент с учетом трения в подшипниках оси колеса,

r_c – силовой радиус колесного движителя,
 e – радиус трения качения,
 W_T – часть сопротивления движению, вызываемая тормозным моментом M_T ,
 W – сопротивление колеса качению,
 α_k – угол сопротивления качению,
 r – радиус колеса.

Условие выполнения **режима качения** запишем в виде

$$W_T < G \cdot f_{ск}, \quad (5)$$

где $f_{ск}$ – коэффициент сопротивления колеса при скольжении по грунту (т. е. при отсутствии его вращения).

Нарушение этого условия ведет к заклиниванию колеса на оси и его «проскальзыванию» по грунту. Это явление наблюдается при резком торможении, а также при боковом скольжении на повороте, когда возможен «занос» машины, что может привести к аварии.

При деформации покрышки пневматика за один оборот колеса дважды повторяется сгиб-разгиб. При этом горизонтальная скорость движения колеса

$$v_x = \omega_k \cdot r \cdot (1 - \Delta_{ш}) \quad (6)$$

при

$$\Delta_{ш} = \frac{\Delta S_{ш}}{r}, \quad (6a)$$

где $\Delta_{ш}$ и $\Delta S_{ш}$ – относительное и абсолютное смятие шины,

ω_k – угловая скорость колеса.

Оценим угол сопротивления качению. Его величину для жесткого колеса представим в виде

$$\alpha_k \cong \frac{\alpha}{2} = 0.5 \cdot \arcsin\left(\frac{b}{r}\right), \quad (7)$$

при этом, используя формулу Беляева – Герца, запишем

$$b \cong K_V \cdot 2 \sqrt{\psi \cdot q_L \cdot \frac{r}{E_{гр}}}. \quad (8)$$

Здесь α – центральный угол контакта колеса с грунтом,

b – ширина зоны этого контакта,

K_V – коэффициент, учитывающий объемную деформацию грунта,

ψ – коэффициент асимметрии давления колеса на грунт ($\psi \cong 2$),

q_L – линейная нагрузка на колесо,

$E_{гр}$ – модуль деформации грунта.

В свою очередь

$$q_L = \frac{G}{B}, \quad (9)$$

где B – ширина обода колеса,

и осадка («зарывание») колеса в грунт по передней его части

$$\Delta S \cong r(1 - \cos 2\alpha_k). \quad (10)$$

8.3. Взаимодействие в режиме ведущего колеса

Расчетная схема для жесткого колеса приведена на рис. 8.3.1.

Из уравнений равновесия получим

$$1) \quad H = T \cdot \cos \alpha_{\text{к}} - N \cdot \sin \alpha_{\text{к}}, \quad (1)$$

$$2) \quad N = \frac{-T \sin \alpha_{\text{к}} + G}{\cos \alpha_{\text{к}}}, \quad (2)$$

$$3) \quad T = \frac{M_{\text{к}}}{r}. \quad (3)$$

Здесь, кроме отмеченных ранее,

H – тяговое усилие на оси колеса,

N и T – нормальная и касательная составляющие силы реакции грунта,

$M_{\text{к}}$ – крутящий момент на ведущей оси.

Рис. 8.3.1. Схемы взаимодействия с грунтом ведущего колеса в режимах:
а) качения; б) буксования.

После подстановки и тригонометрических преобразований с учетом выражения (8.2.3) получим

$$H = T \sqrt{1 + f_{\text{к}}^2} - G \cdot f_{\text{к}} = F_{\text{кI}} - W, \quad (4)$$

где $F_{\text{кI}}$ – горизонтальная сила тяги на ободе колеса. С одной стороны, эта сила тяги определяется **мощностью двигателя** и соответствующим ей крутящим моментом и с учетом (3) запишется в виде

$$\boxed{F_{\text{кI}} = \frac{M_{\text{к}}}{r} \sqrt{1 + f_{\text{к}}^2}}. \quad (5)$$

С другой стороны, она ограничивается **силой сцепления колеса с грунтом** в виде

$$T_{\text{II}} = N \cdot f_{\text{сц}} = G \cdot \frac{f_{\text{сц}}}{\cos \alpha_{\text{к}} (1 + f_{\text{к}} \cdot f_{\text{сц}})}, \quad (6)$$

где $f_{сц}$ – коэффициент сцепления, при этом сила тяги по грунту будет

$$F_{к II} = G \cdot \frac{(1 + f_k^2) \cdot f_{сц}}{1 + f_k \cdot f_{сц}}. \quad (7)$$

В расчетах из значений (5) и (7) выбираем наименьшее.

8.4. Учет явления буксования

При условии

$$N \cdot f_{ц} < M_k / r \quad (1)$$

будем наблюдать явление буксования колес (рис. 8.3.1б). При этом ведущие колеса временно превращаются по сути своей в роторные землеройные органы, и вся мощность идет на «разработку» грунта дороги протекторами шин. При этом на глинистых и снежных дорогах коэффициент сопротивления растет, а коэффициент сцепления падает, и явление буксования нарастает нелинейно. И в этом сложность его преодоления. Сопутствующую опасность для машины представляет **неравномерность разработки колес** с правого и левого бортов, в результате которой машина кренится, как правило, на правый борт, где грунт слабее, и может опрокинуться, если водитель недостаточно опытный. К сожалению, этому явлению до сих пор уделяется недостаточно внимания.

Практически для избежания опасного буксования следует принимать

$$F_k \leq 0,5 \cdot F_{к II}. \quad (1a)$$

Мощность на колесе (тяговая мощность) раскладывается на полезную и мощность буксования в виде

$$N_k = N_v + N_{б} = N_k (\eta_k + K_{б}), \quad (2)$$

где η_k – колесный КПД, состоящий из скоростного и силового КПД и равный 0,7...0,9,

$K_{б}$ – коэффициент буксования (0,3...0,1 – его допустимая величина).

Полезная мощность на колесе

$$N_v = v_{ф} \cdot (H + W) = N_k \cdot (1 - K_{б}), \quad (3)$$

при этом

$$N_k = N_{дв} \cdot \eta_{п}, \quad (3a)$$

где $v_{ф}$ – фактическая горизонтальная скорость,

$N_{дв}$ – мощность двигателя,

$\eta_{п}$ – КПД передач (трансмиссии).

Сравнивая последние величины, получим

$$v_{ф} = \frac{N_k \cdot (1 - K_{б})}{H + W}. \quad (4)$$

С другой стороны,

$$v_{ф} = v_{теор} \cdot (1 - K_{б}), \quad (5)$$

при

$$v_{теор} = \omega_k \cdot r, \quad (5a)$$

где ω_k – угловая скорость вращения колеса.

Коэффициент $K_{б}$ определяется из натуральных измерений фактической скорости $v_{ф}$.

В общем случае можно записать

$$K_{\sigma} = \Delta_{ш} + K_{\sigma,гр} + K_{\sigma,сц} + K_{\sigma,в} \quad (6)$$

где $\Delta_{ш}$ – составляющая коэффициента буксования от влияния всех видов деформации колеса (шины),

$K_{\sigma,гр}$ – то же от характеристик и деформации грунта,

$K_{\sigma,сц}$ – то же от степени использования силы сцепления,

$K_{\sigma,в}$ – то же от скорости движения.

Теоретически коэффициент буксования может быть определен из решений задач общей механики, включая механику грунтов.

8.5. К теоретической оценке коэффициента сцепления

Сила трения есть сумма предельных касательных напряжений τ в зоне (на площадке A) контакта колеса с грунтом

$$T = \sum_A \tau \cong \tau \cdot A, \quad (1)$$

при этом

$$\tau = \sigma^* \cdot f_{сц}. \quad (1a)$$

С другой стороны, из механики грунтов известно, что сопротивление грунта сдвигу в **нестабилизованном состоянии**

$$\tau = (\sigma^* - p) \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (2)$$

где σ^* – нормальные напряжения в скелете грунта в стабилизированном состоянии, т. е. после окончания процесса его консолидации,

p – избыточное (дополнительное) давление в поровой воде, возникающее в процессе консолидации грунта,

φ – угол внутреннего трения скелета грунта;

c – сцепление грунта при сдвиге.

Из сравнения предыдущих выражений получим

$$\operatorname{tg} \varphi_{сц} = f_{сц} = K_w \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{c}{\sigma^*}, \quad (3)$$

где **степень консолидации** грунта

$$K_w = \frac{\sigma^* - p}{\sigma^*}. \quad (3a)$$

Для случая транспортирования по мокрым глинистым грунтам K_w стремится к нулю. Таким образом, при переходе от сухих сыпучих (песчаных и др.) к отмеченным выше грунтам получим пределы изменения коэффициента сцепления:

$$f_{сц} \cong \operatorname{tg} \varphi \text{ (или } \varphi_M) \dots \frac{c}{\sigma^*}, \quad (4)$$

где φ_M – угол трения материала колеса по грунту.

В этих пределах, прежде всего, и следует проверить проходимость машины.

В свою очередь среднее значение напряжения

$$\sigma_{\text{ср}}^* = \frac{N}{\alpha \cdot r \cdot B} \quad (4)$$

и максимальное его значение

$$\sigma_{\text{max}}^* = \sigma_{\text{ср}}^* \cdot m_{\sigma}, \quad (4a)$$

где, кроме прежних обозначений в тексте и на рис. 8.2.1 и 8.3.1,

m_{σ} – коэффициент концентрации напряжений ($\cong 2 \dots 3$, в зависимости от соотношения жесткостей колеса и грунта).

Уточнение может быть получено в результате решения соответствующих задач консолидации грунта и расчета осадки («зарывания») колеса в грунт для конкретных условий работы транспорта.

Особую проблему представляет учет неравномерности уменьшения сопротивления качению и силы сцепления с возрастанием скорости движения.

В заключение отметим, что отдельные положения изложенного выше могут быть использованы при оценке тяговых усилий, например, и гусеничного движителя.

8.6. Мероприятия по повышению проходимости машин.

В условиях строительства, в сельскохозяйственном производстве и др., где транспортным средствам необходимо продвигаться не только по бездорожью, но и по заранее взрыхленному (например, вспаханному) полю, буксование машин наносит ощутимый ущерб, так как транспортные машины просто застревают в пути, останавливаются, а иногда даже и опрокидываются. Поэтому ниже приводятся некоторые меры по повышению проходимости машин на трудных участках пути.

А. Меры по снижению вероятности буксования следующие:

- 1) применение колес с протектором, снабженным оптимальной шероховатостью, выражаемой параметрами рисунка,
- 2) навеска на колеса съемных протекторов цепного, сеточного или пластинчатого типов,
- 3) навеска гусениц на колеса,
- 4) применение гусеничного транспорта,
- 5) применение дополнительной тяги,
- 6) отдельные мероприятия п. 3.7.3,
- 7) преодоление трудного участка на повышенной скорости и т. п.

Б. Меры по выходу из состояния буксования:

- 1) предыдущие меры,
- 2) применение внешней тяги (буксирование тракторами, самовытягивание лебедкой, толкачи любого рода, езда машинами в паре и др.),
- 3) временное укрепление колеи наброской местных материалов (доски, жерди, ветки, камни, гравий, песок...),
- 4) укладка инвентарных сеток и щитов, перевозимых на транспортном средстве,
- 5) удаление валика грунта перед колесом,
- 6) разгрузка прицепа или освобождение от него,
- 7) снижение давления воздуха в шинах.

Разумеется, состав этих мер не может претендовать на абсолютную полноту и эффективность.

8.7. Практические тяговые расчеты машин

В основе тяговых расчетов лежит уравнение динамического равновесия сил, приложенных к движущейся транспортной единице,

$$F_K = \sum_{i=1}^n W_i, \quad (1)$$

где F_K – касательная (приложенная к ободам ведущих колес тягового движителя) сила тяги,

$\sum_{i=1}^n W_i$ – суммарная сила сопротивлений движению.

Если равенство этих сил нарушается, то при $F_K > \sum_{i=1}^n W_i$ избыток силы тяги пойдет **на**

создание ускорения (поезд будет набирать скорость); при $F_K < \sum_{i=1}^n W_i$ избыток силы сопро-

тивления вызовет отрицательное ускорение (движение будет замедляться). С ростом скорости движения возрастают силы сопротивления и уменьшается сила тяги и наоборот. Таким образом, оба случая нарушения равновесия завершаются восстановлением такового при другой скорости движения.

Возможная к получению от двигателя касательная сила тяги не всегда может быть практически реализована, так как она не может превышать величины силы сцепления колес движителя с путем, т. е.

$$F_{K\Pi} \leq G \cdot f_{\text{сц}}. \quad (2)$$

Значения коэффициентов сцепления приведены в таблице.

Движитель и путь	$f_{\text{сц}}$
Паровоз (тепловоз) широкой колеи.....	0,20
узкой 1000 мм.....	0,21
750 мм.....	0,22
Автомобиль по сухой грунтовой дороге.....	0,60
по мокрой.....	0,30
по сухому шоссе, асфальту.....	0,60
по мокрому.....	0,40
Автомобиль по снежной замерзшей дороге.....	0,21
обледеневшей дороге.....	0,18
растаявшей дороге.....	0,15
Гусеничный трактор (без шпор) по грунтовой сухой дороге.....	0,9
мокрой.....	0,8
булыжной мостовой.....	0,25
снежной растаявшей дороге.....	0,2
(со шпорами).....	0,4

Сопротивление движению складывается из трех величин:

- 1) Сопротивление на прямом горизонтальном участке пути при движении с установившейся скоростью – основное сопротивление;
- 2) Сопротивление на подъеме;

3) Сопротивление на кривой.

Основное сопротивление создается всеми видами механических потерь, но не учитывает сопротивление воздуха, которое может стать существенным лишь при сильном встречном ветре или большой скорости движения.

ГЛАВА 9. ТЕХНОЛОГИЯ ОТСЫПКИ ГРУНТА В ВОДУ

Рожденный в воде воды не боится;
также и технология возведения должна
соответствовать условиям эксплуатации сооружения.

9.1. Основы технологии

Сущность способа заключается в том, что глинистый **грунт отсыпается в** огороженную валиками (дамбочками) карту, **залитую водой** на 25–40% толщины укладываемого слоя. При этом нижняя часть слоя сильно увлажняется, происходит размокание грунта и постепенное его уплотнение под действием собственного веса и транспорта. Верхняя часть грунта остается сухой, образует корку, по которой двигаются транспортные средства и частично уплотняют ее.

Из условий проходимости транспортных средств отсыпка более глинистых грунтов должна производиться с более высокой интенсивностью по сравнению с отсыпкой менее глинистых грунтов.

При заливке водой карты следующего по высоте слоя она быстро заполняет пустоты между не размокшими комьями верхней части предыдущего слоя.

Основными достоинствами этого способа являются:

- а) возможность возведения насыпи вне зависимости от погодных условий,
- б) надежность сопряжения тела плотины с береговыми бортами и бетонными сооружениями вследствие их промачивания и предварительной суффозионной приработки,
- в) отсутствие затрат на уплотнение грунта,
- г) обусловленная вышеуказанными положениями повышенная производительность работ.

Этот способ разработан в СССР, в основном Ленинградской школой гидротехников (Васильев А.Ф., Лобасов П.Д., Трунков Г.Т., Павчич М.П., Букин П.А., Радченко В.Г., Телешев В.И., Маркевич В.Ф., Северова Г.В. и др.) и применен на строительстве грунтовых плотин ГЭС: Саларская, Н.-Бозсуйская, Ириклинская, Княжегубская, Иркутская, Волжская им. XXII съезда, Серебрянская и др.

На Волжской ГЭС высота дамбочек – 2–4 м; глубина прудка – 1,15 м.

На строительстве Серебрянской плотины были применены прудки **глубиной до 15 м**, с подогревом воды в зимнее время, **при отсыпке в прудки мерзлого грунта**. В качестве теплоизоляции на поверхность прудков укладывался пенопласт. При применении глубоких прудков строители наблюдали образование на дне илистых прослоев в результате отмыва и осаждения мелких частиц. На большей глубине агрегаты разрушаются быстрее вследствие размокания. Хрупкие агрегаты взрываются и разваливаются под давлением воздуха, сжатого капиллярными силами и гидростатическим давлением. Для повышения однородности грунта в теле сооружения прудки смежных слоев по высоте должны смещаться друг относительно друга.

9.2. Оптимизация технологии отсыпки грунтов в воду

9.2.1. Расчет основных параметров технологии.

Геометрические параметры отсыпки представлены на рис. 9.2.1. Скорость отсыпки (или скорость продвижения фронта насыпи) по любому (i -му) направлению (см. п. 1.2)

$$v_i = \frac{J}{\Omega_i}, \quad (1)$$

где J – поток грунта (или интенсивность отсыпки),

Ω_i – площадь сечения насыпи в нормальном к скорости направлении.

Отметим, что при постоянном потоке справедливо соотношение

$$v_1 \Omega_1 = v_2 \Omega_2 = \dots = v_n \Omega_n. \quad (2)$$

Продолжительность перекрытия слоя (яруса) или время отсыпки отдельного i -го элемента сооружения

$$T_i = \frac{L_i}{v_i} + T_{\Pi i} \quad (3)$$

или

$$T_i = \frac{V_i}{J} + T_{\Pi i}, \quad (4)$$

где L_i – длина i -го элемента насыпи в направлении скорости v_i ,

V_i – объем i -го элемента насыпи,

$T_{\Pi i}$ – продолжительность перерыва в процессе или после отсыпки.

Эти зависимости определяют и время замачивания, а также и возраст насыпи в любой ее точке, от которого зависят все характеристики насыпи.

Например, время отсыпки одной ленты грунта (или время замачивания грунта открытой водой прудка) будет

$$T_{\text{л}} = \frac{l}{v_y} = \frac{l \cdot b \cdot h}{J}, \quad (5)$$

где l – длина ленты отсыпки (длина захватки),

v_y – скорость продвижения фронта отсыпки ленты,

b – толщина ленты по горизонтали,

h – высота ленты (слоя отсыпки грунта).

Скорость продвижения фронта отсыпки слоя в пределах захватки

$$v_x = b/T_{\text{л}} = J/(l \cdot h) \quad (5a)$$

и время отсыпки слоя грунта на карте отсыпки

$$T_{\text{к}} = \frac{B \cdot n_3}{v_x}, \quad (5б)$$

Рис. 9.2.1. Параметры отсыпки грунта в воду:
 a – план карты, b – план слоя, v – разрез слоя, z – фото.
1 – элементарный объем (техатом) отсыпки (объем грунта в кузове самосвала),
2 – лента отсыпки, 3 – захватка, 4 – карта.

где B – ширина карты отсыпки,
 n_3 – число захваток в карте.
 В свою очередь

$$b = b_x = \frac{V_0}{l_0 \cdot h}, \quad (6)$$

где V_0 – объем грунта в транспортном средстве (объем техатома отсыпки), приведенный к плотности грунта в насыпи по аналогии с формулой (1.2.2),
 l_0 – длина элементарного объема (отсыпанного техатома).

Толщина ленты (или скорость отсыпки) нормально откосу

$$b_n \text{ (или } v_n) = b \text{ (или } v_x) \sin \alpha, \quad (6a)$$

то же в направлении вертикали

$$b_z \text{ (или } v_z) = b \text{ (или } v_x) \operatorname{tg} \alpha, \quad (6б)$$

где α – угол откоса с горизонтом.

Длина откоса отсыпки по наибольшему скату и его заложение

$$l_{\text{отк}} = \frac{h}{\sin \alpha}, \quad b_{\text{отк}} = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (6в)$$

Уточнение в виде изменения угла откоса по высоте можно представить в виде

$$\alpha = \alpha_0 + K_\alpha \cdot \frac{z}{h}, \quad (7)$$

где α_0 и K_α – параметры линейной зависимости.

Элементы высоты **слоя отсыпки** ограничиваются следующими условиями

$$h_{\text{надв}} = h - h_w \geq h_{\text{пр}}, \quad (8)$$

$$h_{w.\text{min}} < h_w < h_{w.\text{max}}, \quad (8a)$$

где h_w – глубина воды в прудке,

$h_{\text{пр}}$ – минимальная толщина надводной части слоя из условия проходимости транспортных средств,

$h_{w.\text{min}}$ – минимальная глубина воды в прудке,

$h_{w.\text{max}}$ – то же, максимальная, например, из условия ограничения отмыва пылеватых частиц.

9.2.2. Назначение требуемой плотности укладки грунта.

Плотность грунта в плотине при укладке может быть назначена из следующих условий:

- 1) из соответствия напряжениям сжатия от веса вышерасположенной части сооружения (по компрессионной кривой),
- 2) из условия ограничения водопроницаемости,
- 3) из условия соответствия стандартной степени плотности,
- 4) из соответствия естественной плотности,
- 5) исходя из мощности катков,
- 6) из условия фильтрационной устойчивости,
- 7) из условия общей устойчивости плотины, включая и сейсмоустойчивость,
- 8)

Ниже рассмотрена методика нахождения параметров технологии, обеспечивающих максимум плотности и минимум водопроницаемости отсыпаемых в воду грунтов.

9.2.3. Основы и критерии оптимизации технологии.

Для интегральной оценки основных особенностей технологии отсыпки грунта в воду введем понятие **индекса намокания** i_H , который приближенно характеризует начальную степень захвата воды грунтом в процессе его отсыпки в прудок.

Рис. 9.2.2. Зависимости плотности ρ и водопроницаемости K_ϕ грунта от индекса i_H намокания при отсыпке в воду:
I и II – зоны недостаточного и избыточного намокания грунта.

Ожидаемые кривые изменения плотности грунта ρ и его коэффициент фильтрации k_ϕ в зависимости от индекса намокания приведены на рис. 9.2.2. Здесь значения оптимальных индексов намокания обозначены в виде $i_{\rho.\text{опт}}$ – по плотности скелета грунта и $i_{\phi.\text{опт}}$ – по водонепроницаемости грунта. При этом, в зависимости от реальных условий отсыпки, можно получить два следующих соотношения индексов намокания

$$\text{I:} \quad i_H < i_{\rho.\text{опт}}, \quad (9)$$

$$\text{II:} \quad i_H > i_{\rho.\text{опт}}. \quad (9a)$$

В зоне I отсыпанный грунт **не будет успевать размокать** до перекрытия его следующим слоем и поэтому останется менее влажным, менее плотным, возможно, с отрицательным (вакуумирующим) поровым давлением в результате действия капиллярных сил от продолжающегося процесса выравнивания влажности грунта в его толще, с повышенным содержанием защемленного газа. Здесь грунт характеризуется неравномерностью распределения влажности и возможным наличием макропор.

В зоне II произойдет **значительное размокание грунта** при его отсыпке прежде, чем он будет перекрыт следующим слоем. Здесь насыпь будет отличаться пониженной плотностью, повышенной влажностью и большим поровым давлением. Грунт характеризуется однородностью и монолитностью сложения.

Целью опытной отсыпки в лабораторных и полевых условиях можно считать отыскание значений **оптимальных индексов намокания**. При этом на плотность грунта можно наложить следующие ограничения (рис. 9.2.2):

$$\rho_I \geq [\rho_I], \quad (10)$$

$$\rho_{II} \geq [\rho_{II}], \quad (10a)$$

$$\rho \geq [\rho_0], \quad (10б)$$

$$\rho \geq [\rho_{ф.п}], \quad (10в)$$

$$\rho \geq \rho^{кр} K_H, \quad (10г)$$

где ρ_I и ρ_{II} – возможные и $[\rho_I]$ и $[\rho_{II}]$ – требуемые плотности соответственно в зоне малых I и больших II индексов намокания из условия ограничения водопроницаемости допустимой величиной $[K_{ф}]$,

$[\rho_0]$ и $[\rho_{ф.п}]$ – требуемые плотности соответственно из условий ограничения осадок и обеспечения контактной фильтрационной прочности,

$\rho^{кр}$ – критическая плотность в зоне II, соответствующая началу трещинообразования,

K_H – коэффициент надежности по плотности грунта, предупреждающий трещинообразование.

Разумеется, требуемые значения плотностей определяются в зависимости от степени водонасыщения грунта и от времени приложения нагрузок на экран, главной из которых является напор на сооружение.

Отсыпанный в воду грунт является наиболее ярко выраженной **динамической системой**, поэтому следует учитывать его возраст и все процессы рассматривать с учетом фактора времени. Графики на рис. 9.2.2 приведены на момент перекрытия отсыпанного грунта следующим слоем, но они будут трансформироваться с течением времени, включая и весь срок эксплуатации сооружения. Индекс намокания представим в виде

$$i_H = \frac{v_H}{v_{II}} \cdot \eta_w \cdot \eta_c, \quad (11)$$

где v_H – скорость намокания комьев грунта, т. е. скорость проникания влаги внутрь комьев,

v_{II} – скорость отсыпки грунта нормально к откосу,

η_w – степень замачивания ленты грунта по высоте,

η_c – степень операционной слоистости отсыпки.

$$\eta_w = \frac{h_w}{h}, \quad \eta_c = \frac{h}{b}, \quad (12)$$

Средняя скорость намокания комьев приблизительно определится выражением

$$v_H^{ср} = \frac{4 \cdot K_{ф.к} \cdot H_k}{D}, \quad (13)$$

где $K_{ф.к}$ – коэффициент фильтрации материала комьев (в монолите),

H_k – капиллярный напор в комьях,

D – диаметр комьев.

Заметим, что произведение

$$П = K_{ф.к} \cdot H_k \approx \text{const}. \quad (13a)$$

После подстановки определенных величин в (11) получим

$$i_H = \frac{4 \cdot K_{ф.к} \cdot H_k \cdot l \cdot h \cdot \eta_w}{D \cdot J \cdot \sin \alpha} \cdot \eta_c, \quad (14)$$

откуда видно, что индекс намочания интегрирует все основные физико-технологические параметры отсыпки.

Принимая в качестве критериев оптимизации равенства

$$i_H = i_{р.опт}, \quad i_H = i_{ф.опт}, \quad (15)$$

из выражения (14) находим параметры двух вариантов технологии, и на основе технико-экономического сравнения выбираем наилучший.

В первом приближении можно принять:

- 1) скорость отсыпки $v_x = 5 \dots 10$ м/ч,
- 2) время отсыпки одной карты $T_k = 1 \dots 2$ сут.

Скорость намочания v_H по данным Роде А.А. (1952) как скорость капиллярного подъема воды в грунте с крупностью частиц 0,05 ... 0,01 мм при высоте подъема 10 см, которая примерно соответствует отсыпке из комьев грунта со средней крупностью 10 см, можно принять равной 0,5 м/ч.

9.2.4. Рекомендации по определению оптимальных параметров технологии из опытной отсыпки грунта.

Для выбора технологических параметров используем вариации индекса намочания. В результате опытных работ необходимо найти оптимальный индекс намочания, соответствующий максимуму на графике функции плотности грунта (рис 9.2.2). С целью экономии времени и средств на опытные работы, предлагается применить стратегию поиска с обратной связью. При этом вначале проводят опыт 01 при индексе $i_{H.1}$ и опыт 02 при индексе $i_{H.2}$ и наносят на график значения плотности ρ_1 и ρ_2 уложенного грунта. Условия каждого из последующих опытов определяют после анализа результатов опытов, проведенных ранее, на основе метода поиска «горки» (т. е. максимума функции плотности).

Опытные работы начинают с наибольшей толщины слоя. Далее варьируют длиной фронта отсыпки (длиной ленты), если опытная насыпь является частью сооружения; или – потоком грунта, если опытная насыпь рассматривается как отвал породы. В последнем случае поток может быть форсирован за счет временного накопления груженых самосвалов перед фронтом отсыпки, а снижение потока можно обеспечить временными остановками процесса подачи грунта после отсыпки очередной ленты.

Наряду с плотностью замеряют и водопроницаемость и строят график $K_{ф} = f(i_H)$, аналогично рис. 9.2.2, по которому находят оптимум $i_{ф.опт}$ по водопроницаемости. На опытных участках устанавливают пьезометры для непрерывного измерения хода уровня грунтовых вод. Периодически берут пробы на влажность и зерновой состав комьев грунта перед отсыпкой в воду, замеряют уклон откоса фронта отсыпки под водой. Фиксируют тщательно во времени и в пространстве все показатели и параметры технологии отсыпки, включая способ, место и время укладки грунта и взятия проб, и, в особенности, изменения в поведении отсыпанного материала и в технологии отсыпки (замена машин, перерывы в работе и т. п.).

Одновременно устанавливают динамику изменения плотности отсыпанного грунта во времени, отбирая образцы через 1 час, 1 сутки, 10 суток, 1 месяц, 6 месяцев после отсыпки. Для оценки влияния степени замачивания η_w можно использовать одну карту с минимальным начальным заполнением водой, например, при $\eta_w = 0.25$. По мере отсыпки грунта уровень воды будет повышаться, плавно увеличивая степень замачивания. И лишь в конце

засыпки карты потребуется сброс излишней воды в прудке. При этом измеряемый уровень воды в прудке привязывается к положению фронта отсыпки.

Для упрощения технологии рекомендуется одну из опытных карт толщиной 0,5 м отсыпать насухо, а затем залить ее водой с замером ее расхода. С этой карты и можно начать опытные работы. При удовлетворительных результатах испытаний и эта технология может быть рассмотрена при окончательном выборе технического решения.

Разумеется, для получения надежных результатов может потребоваться опытная отсыпка нескольких карт.

9.3. К динамике уровня воды в прудке

Уравнение баланса воды в прудке в суммарном виде

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 + \Delta V_3, \quad (1)$$

или в дифференциальной форме

$$\eta_w \cdot l \cdot m \cdot h \cdot dx = \omega_{\Pi} \cdot dh_w + q \cdot \omega_{\Pi} \cdot dT, \quad (1a)$$

где ΔV_1 – объем воды, вытесненный отсыпаемым грунтом,

ΔV_2 – то же, компенсированный подъемом уровня воды в прудке,

ΔV_3 – то же, потерянный за счет фильтрации в основании и через дамбочки обвалования,

l – ширина прудка,

m – монолитность грунта насыпи (равная единице минус пористость),

x – координата фронта отсыпки,

ω_{Π} – площадь зеркала прудка,

h_w – глубина воды в прудке,

T – время от начала заполнения карты грунтом,

q – удельные фильтрационные потери воды на единицу площади зеркала прудка (скорость опускания уровня воды).

$$\omega_{\Pi} = \Omega_0 - l \cdot v_x \cdot T, \quad (2)$$

где Ω_0 – начальная площадь зеркала прудка.

С учетом (2) преобразуем (1a) к виду

$$dh_w = \left(\frac{\eta_w \cdot l \cdot m \cdot h \cdot v_x}{\Omega_0} \cdot \frac{1}{1 - \frac{l \cdot v_x \cdot T}{\Omega_0}} - q \right) \cdot dT, \quad (3)$$

и после интегрирования с учетом (9.2.1) и (9.2.6a) получим

$$h_w = h_{w.0} - \eta_w \cdot m \cdot h \cdot l \cdot \left(1 - \frac{J}{h \cdot \Omega_0} \cdot T \right) - q \cdot T, \quad (4)$$

где $h_{w.0}$ – начальная глубина воды в прудке.

Удельные потери на фильтрацию

$$q = K_{oc} \cdot \frac{h_w + H_{oc}}{l_{oc}}, \quad (5)$$

где K_{oc} – коэффициент фильтрации грунта основания,

H_{oc} – начальный напор в основании,

l_{oc} – средняя длина пути фильтрации в основании прудка.

9.4. К оценке размокания грунтовых комьев

9.4.1. Условия и формы размокания комьев.

Все факторы, влияющие на процессы намокания и разрушения комьев, перечислить невозможно.

Основными из них являются следующие факторы неоднородности, неравномерности и разнообразия:

- а) истории (остаточные напряжения, начальная влажность и др.),
- б) формы (некруглость комьев, разнозернистость и пр.),
- в) содержания (различия в химическом составе, в пористости и др.),
- г) монолитности (трещиноватость),
- д) замачивания (несимметричность, растворение и пр.),
- е) напряжений (удары при падении, скатывании, внешняя нагрузка и др.),
- ж) опирания (локальные, нерегулярные и др.),
- и) разрушения (местный откол и пр.),
- к) набухания (расклинивающий эффект и др.),
- л) внешнего давления воды (вакуумирующий эффект при дефиците влаги и др.).

И чтобы правильно прогнозировать процессы размокания, необходимо в расчетах учитывать (и с наибольшей точностью) все вышеперечисленные факторы. Отметим, что близкими к рассматриваемому являются процессы набухания и потери фильтрационной прочности грунтов, а равно и их консолидации и др., а также пропитки, вакуумирования и сушки материалов (противоположен намоканию). В общем, задача, как и везде, превращается в комплексную.

При замачивании отдельных комьев грунта без внешней нагрузки в лабораторных условиях можно выделить следующие формы размокания:

- I – последовательное отделение от поверхности комка и падение отдельных частиц вплоть до полного его рассыпания;
- II – раскалывание кома на несколько агрегатов, с возможностью вторичного (и высших степеней) дробления, до достижения ими устойчивой крупности;
- III – набухание комьев до текучего состояния, размягчение и расплывание (без дробления) – характерно для жирных глин дочетвертичных отложений, например, кембрийских (по Трункову Г.Т.);
- IV – практическое сохранение формы комьев с возможным слабым размягчением приповерхностного слоя.

В главном эти формы определяются родом грунта и его начальной влажностью и наблюдаются при переходе от супесей к глинам и с возрастанием влажности. В конечном счете форма размокания определяется условиями взаимодействия грунта с водой и физико-механическими явлениями, протекающими на микроуровне на контактах между частицами.

Преобладание сил отталкивания частиц друг от друга приводит к форме I, а сил притяжения между ними – к форме II. На эти силы накладывается влияние расклинивающего эф-

факта тонких водных слоев, т. е. явления набухания грунта. Все эти явления зависят от расстояний между частицами и, в свою очередь, сами влияют на эти расстояния, что приводит к весьма сложным законам изменения прочности и водопроницаемости в различных зонах комьев грунта и, соответственно, всего грунтового массива.

Рис. 9.4.1. Стадии трансформации структуры грунта после отсыпки комьев в воду:

П – макропоры между «сливающимися» грунтовыми комьями;

С – сухая часть комьев грунта с замкнутым газовым пузырьком;

М – монолитная (мокрая, намоченная, пропитанная водой) часть комьев грунта.

На практике после отсыпки в воду грунт в общем случае проходит несколько стадий (рис. 9.4.1) трансформации структуры:

- а) начальная комковатая макропористая структура,
- б) намочение с поверхности с образованием пластичной оболочки,
- в) дробление комьев и заполнение макропор размокшим грунтом под действием нагрузки (при наличии сухих остаточных ядер внутри комьев с зацементированными газовыми пузырьками),
- г) рассасывание и всплывание газовых пузырьков, схлопывание макропор,
- д) выравнивание влажности и омоноличивание грунта.

В результате получаем структуру грунта, отличающуюся повышенной плотностью и малой водопроницаемостью, с высоким уровнем фильтрационной прочности сооружения, проверенной уже непосредственно в период его создания (иначе – рождения) на действие напора воды в прудке.*)

Таким образом данная технология отсыпки грунта в воду обладает редким свойством автоконтроля (непрерывной проверки в процессе строительства) фильтрационной прочности (и, соответственно, надежности) строящихся плотин с одновременным **автозалечиванием** (кольматацией) слабых мест. И в этом главное преимущество данной технологии, подтвержденное многочисленными примерами практики гидротехнического строительства.

9.4.2. К оценке разрушения комьев в идеализированных условиях.

Предположим, что комья разрушаются только под действием нарастания давления газа во внутреннем замкнутом пространстве при замачивании грунта. При этом избыточное давление газа в сухой части комьев (перед фронтом намочения) по сравнению с внешним давлением воды будет

$$p_{г и} = \xi_w (p_{w.0} + p_k) - p_{w.0} = p_{г} - p_{w.0}, \quad (1)$$

*) И наоборот: плотины, возведенные сухим способом (с динамическим уплотнением грунта), более устойчивы к сейсмическим нагрузкам.

где ξ_w – степень возрастания во времени давления воды за фронтом намочания ($\xi_w = 0 \rightarrow 1,0$),

$p_{w.0}$ – давление воды на поверхности комьев,

p_k – капиллярное давление,

p_g – давление в газе перед фронтом намочания сверх атмосферного.

При $\xi_w = 0$ имеем

$$p_{g \text{ и. мин}} = -p_{w.0}, \quad (2a)$$

при $\xi_w = 1$

$$p_{g \text{ и. макс}} = +p_k, \quad (2б)$$

При $p_{g \text{ и}} = 0$

$$\xi_{w.g \text{ атм}} = \frac{p_{w.0}}{p_{w.0} + p_k}. \quad (2в)$$

Поскольку газопроницаемость выше водопроницаемости, то для давления газа в центре комьев можно записать

$$p_{g \text{ ц. и}} \simeq p_{g \text{ и}}. \quad (3)$$

Разрушение комьев грунта произойдет при наступлении условия

$$p_{g \text{ и}} > p_{кр}, \quad (3)$$

где $p_{кр}$ – критическое (разрушающее) избыточное давление газа внутри комьев.

Вероятно, возможны следующие **формы разрушения** отдельных грунтовых комьев (рис. 9.4.2) при замачивании в идеализированных условиях без внешней нагрузки:*)

- а) локальное выталкивание (отслаивание) части мокрой оболочки (меньше половины), возможно, с отрывом примыкающей части сухого ядра;
- б) полное разрушение или разрыв комьев примерно пополам (по диаметральной плоскости) при равномерном внешнем замачивании;
- в) раскалывание комьев на части при внутреннем замачивании, т. е. при поступлении воды через трещины внутри комьев...

*) На практике нагрузка от вышележащих слоев грунта вызывает дробление и смятие комьев и резко усложняет картину размочания.

Рис. 9.4.2. Формы возможного разрушения комьев грунта при замачивании:
a – отслаивание; *б* –разрыв; *в* –раскалывание.

Уравнение предельного равновесия для второй формы разрушения запишем в виде

$$p_{кр} \cdot A_c = R_{p.c} \cdot A_c + R_{p.m} \cdot A_m \cdot \frac{E_m}{E_c}, \quad (5)$$

где A_c и A_m – площади сечения сухой и мокрой частей комьев,

$R_{p.c}$ и $R_{p.m}$ – пределы прочности сухой и мокрой части грунта на разрыв,

E_c и E_m – см. п. 4.3, модули деформации этих частей при растяжении.

Из (5) получим

$$p_{кр} = R_{p.c} + R_{p.m} \frac{E_m}{E_c} \left(\frac{D^2}{d^2} - 1 \right), \quad (5a)$$

где D – внешний диаметр комьев,

d – диаметр сухой части (ядра) комьев, оцениваемый специальными расчетами.

При наличии в комьях идущих с поверхности трещин (рис. 9.4.2в) вода через них быстро всасывается внутрь комьев, и поток воды, устремляющийся в трещину подобно клину, раскалывает комья на части, что и может рассматриваться как четвертая форма разрушения, далее переходящая в третью для отдельных частей. В заключение отметим, что реальная картина поведения грунта бесконечно сложнее идеализированных представлений.

9.5. Метод заливки экрана плотины в прудок^{*)}

Существо данной технологии заключается в том, что в предварительно возведенный в насыпи канал (траншею) **заливают противодиффузионный раствор**, а затем отсыпают грунт с двух сторон с отжатием части раствора вверх до формирования противодиффузионного элемента требуемых размеров.

На рис. 9.5.1 изображены схемы отливки экрана и ядра. В переходные зоны плотины производят отсыпку дамбочек 1 обвалования, образуя траншею 2. Затем последнюю заливают противодиффузионным раствором, например глинистым, образуя прудок 3, **после чего**

^{*)} Предложен совместно с М.В. Комаринским и В.П. Клинецовым.

производят отсыпку грунтов слоями (призмами) 4, отжимая раствор к откосам прудка. Лишний раствор вытесняют вверх на вышележащий горизонт отсыпки и добавляют раствор в прудок. Раствор применяют плотностью 1,15...1,70 г/см³. Состав 1 м³ раствора примерно следующий: 1) при плотности 1,15 г/см³: глины в сухом состоянии необходимо 270 кг, воды 880 л; 2) при плотности 1,4 г/см³ соответственно 720 кг и 680 л; 3) при плотности 1,70 г/см³ – 1110 кг и 590 л.

Раствор не смешивается с отсыпаемым грунтом, а отдает ему воду и опрессовывается, в результате чего образуется противofильтрационный слой на основе глинистых частиц раствора. Материал, приготовленный в виде раствора, подается к месту укладки в прудок насосами по трубопроводу от растворного узла.

Растворы с плотностью ниже 1,15 г/см³ требуют специальной проверки фofильтрационной устойчивости. Растворы с плотностью выше 1,70 г/см³ требуют другой технологии укладки (способом сухой отсыпки).

Способ заливки противofильтрационных растворов при отсыпке грунтов обеспечивает следующие преимущества: повышение водонепроницаемости экрана и его пластичности; сокращение объема добычи и укладки более дорогостоящего материала; упрощение технологии ведения работ, сокращение сроков их выполнения; а в результате – и ускорение роста плотины по высоте. Меняя по высоте плотность раствора, **можно добиться оптимальной толщины экрана: от нескольких сантиметров и выше**, что технологически невозможно выполнить известными механизированными способами – послойной отсыпкой насухо или отсыпкой в воду. Отсюда вывод: использование старых способов может обеспечить получение лишь обычного эффекта, новый же технико-экономический эффект может быть достигнут применением только новых (нестандартных) методов, материалов, орудий, технологий...

Рис. 9.5.1. Заливные противофильтрационные элементы плотины
в процессе возведения: *а* – экран; *б* – ядро.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альхименко А.И. Охрана природы при освоении ресурсов Мирового океана. – Л.: Судостроение, 1982. – 206 с.

2. Атаев С.С. и др. Технология, механизация и автоматизация строительства. – М.: Высшая школа, 1990. – 592 с.
3. Белоликов В.Т., Телешев В.И., Леонов В.А., Воробьев В.Б. Организация и планирование строительства гидроузлов. – Л.: ЛПИ, 1990. – 36с; То же: Приложения. – 40с.
4. Богородский В.А. и др. Разрушение льда. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 234 с.
5. Булатов Г.Я. Технология возведения грунтовых плотин: Учебное пособие. –СПб.: СПбГТУ, 1994. – 92 с.
6. Булатов Г.Я. Методические указания по туннельным работам. – Л.: ЛПИ, 1970. – 58 с.
7. Булатов Г.Я. К определению времени погружения свай // ЛПИ. Материалы к науч.-техн. конф. Гидротехн. фак-та. 1970.
8. Булатов Г.Я. Об оптимальных параметрах гидромониторной разработки грунтов // Труды ЛПИ, 1978, №361. С. 88–90.
9. Бугров А.К., Синяков Л.Н., Гитин Д.И., Пирогов И.А. Исследование взаимодействия ледостойкой платформы с грунтами морского дна в районе Штокмановского ГКМ // Освоение шельфа арктических морей России. Тезисы докладов. II-я международная конференция – 1995. с. 222-223.
10. Васильев Ю.С., Козлов В.Н. Интеллектуальные технологии и нормативная база высшего профессионального образования России / VII Международная научно-методическая конференция «Высокие интеллектуальные технологии образования и науки», 27 – 28 января 2000. – СПб.: СПбГТУ, 2000.
11. Ватин Н.И., Колосова Н.Б. Дополнительное инвестирование высших образовательных учреждений в современных условиях // Технология, строительство и эксплуатация инженерных систем. Матер-лы междунар. науч.-практ. конф. СПб.: Изд-во СПбОДЗПП, 2002. С. 39–40.
12. Галузин В.М., Комаринский М.В., Телешев В.И. Выбор машин и оборудования для производства бетонных работ. – СПбГТУ, 1995. – 78 с.
13. Галузин В.М., Пехтин В.А., Телешев В.И. Возведение сооружений способом «стена в грунте»: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. – 36 с.
14. Годес Э.Г., Нарбут Р.М. Строительство в водной среде: Справ-к. – Л.: Стройиздат, 1989. – 527 с.
15. Голицын Г.А. Информация и творчество: на пути к интегральной культуре. –М.: Русский мир, 1997. – 304 с.
16. Дикарев В.И. Справочник изобретателя. – СПб.: Лань, 1999.
17. Казанцев Б.Э. Задачи оптимизации в планировании и управлении гидротехническим строительством. Учебное пособие. – Л.: ЛПИ, 1986. – 60 с.
18. Комаринский М.В., Булатов Г.Я. Совершенствование возведения грунтовых гидротехнических сооружений. // Гидротехническое строительство, 1983. № 11.
19. Мищенко С.М., Шхинек К.Н., Михаленко Е.Б., Большев А.С., Фролов С.А. Сравнительная оценка устойчивости и надежности сооружений для установки на глубоководных участках Баренцева моря // Освоение шельфа арктических морей России. Тезисы докладов. II-я Междунар. конф. – 1995. с. 216 – 219.
20. Морские гидротехнические сооружения на континентальном шельфе: Учебник / Г.В. Симаков, К.Н. Шхинек, В.А. Смелов и др. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
21. Мостков В.М. Подземные гидротехнические сооружения. – М.: Высшая школа, 1986. – 464 с.
22. Основы современной технологии / Под ред. В.В. Глухова: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. – 89 с.
23. Потеев М.И. Концепции современного естествознания. – СПб.: Питер, 1999. – 350 с.

24. Романенко В.Н. Принципы общей теории технологий. – СПб.: Гос. архит. –строит. ун-т, 1994. – 53 с.
25. Технология строительных процессов: Учебник под ред. Данилова Н.Н. – М.: Высшая школа, 2000. – 464 с.
26. Руководство по возведению грунтовых сооружений способом отсыпки грунтов в воду. П 68-97 / ВНИИГ. Сост.: Павчич М.П., Ермолаева А.Н., Радченко В.Г. – СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1997. – 109 с.
27. Телешев В.И., Астахова К.И., Галузин В.М., Леонов В.А., Севенард Ю.К. Бетонные работы в гидротехническом строительстве. Учебное пособие в трех томах. – 1992–93.
28. Телешев В.И., Маркевич В.Ф., Северова Г.В., Кочетков С.В. Строительство противофильтрационных экранов способом отсыпки грунта в воду. // Мелиорация и водное хозяйство, 1988, №6, с. 15–19.
29. Трунков Г.Т. Некоторые вопросы строительства и расчета земляных сооружений, возводимых отсыпкой в воду глинистых грунтов. Автореф. дисс. к.т.н. – Л.: ЛПИ, 1962.
30. Федоров М.П., Романов М.Ф. Математические основы экологии / Под ред. чл.-корр. РАН В.И. Зубова. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. – 156 с.
31. Федоров М.П., Шилин М.Б., Ролле Н.Н. Экология для гидротехников. – СПб.: СПбГТУ, 1992. – 80 с.
32. Ясинецкий В.Г., Ачкасов Г.П., Иванов Е.С. Производство гидромелиоративных работ. – М.: Агропромиздат, 1987. – 143 с.
33. Boulatov G. et autr. Contribution à l'exploitation des camions basculants (stabilité d'un camion) // Annales de l'Institut polytechnique Gamal Abdel Nasser. – République de Guinée, Conakry, 1972.
34. Boulatov G. et autr. Coupe des minéraux à l'aide d'une pelle mécanique dans les conditions optimales // Там же, 1973.

Булатов Георгий Яковлевич
Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

ВВЕДЕНИЕ В ОБЩУЮ ТЕОРИЮ ТЕХНОЛОГИЙ
Подписано в печать . . . 2002. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. Уч.-изд. л. Тираж 100. Заказ
(на примере строительства)

Отпечатано с оригинал-макета, подготовленного автором,
в типографии Издательства СПбГТУ.

Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29.

ТЕХНОЛОГИЯ – МАТЬ ЭКОНОМИКИ

(и действительно, все сколько-нибудь значительное на Земле
было создано технологами, инженерами-новаторами-изобретателями)

Мы должны научиться воспринимать новое как закономерное явление, сколь необычным оно ни казалось бы на первый взгляд.

К. Фролов

Деятельность современного крупного предприятия – это сеть реализуемых проектов, в большинстве инновационных (новых или создающих новую продукцию).

Н.Б. Культин

Среди факторов, определяющих уровень конкурентоспособности, следует особо выделить технологию.

В.И. Синько

На современно этапе решающим звеном научно-технического прогресса становится технология строительства.

Н.В. Бойко

Одно из главных составляющих успеха предприятия – использование самых прогрессивных технологий – то есть того, что будет актуально не только сегодня, но и завтра, и послезавтра.

Р.Д. Гркич

Будущее уже сегодня должно лежать на столе у архитектора, иначе оно опоздает.

В.Л. Кравцов

Информационная технология есть инструмент, и процессор никогда не заменит творческой работы.

Флемминг

Идет ли инженерная мысль в обгон лучших мировых достижений или будем глотать пыль, догоняя по аналогам?

Из газет.