

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ШЕПЕЛЬ Тарас Вильевич

УДК 622.271.53 (043.3)

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОВШЕЙ ЗЕМЛЕЧЕРПАТЕЛЬНЫХ
СНАРЯДОВ ДЛЯ ГЛУБОКОВОДНОЙ ДОБЫЧИ
ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОСАДКОВ
Специальность 05.05.06 “Горные машины”**

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научные руководители:
Франчук Всеволод Петрович
доктор технических наук, профессор
Дребенштедт Карстен
доктор, профессор

Днепропетровск – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	9
РАЗДЕЛ 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОВШЕЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОСАДКОВ	16
1.1 Глубоководные органо-минеральные осадки Черного моря как объект разработки.....	16
1.2 Землечерпательные снаряды для глубоководной добычи полезных ископаемых.....	23
1.2.1 Землечерпательные снаряды циклического действия.....	24
1.2.2 Землечерпательные снаряды непрерывного действия.....	30
1.3 Определение параметров ковшей и нагрузок на ковш при разработке водонасыщенных грунтов.....	33
1.4. Цель и задачи исследований.....	45
РАЗДЕЛ 2 АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОВШЕЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОСАДКОВ....	46
2.1 Реологическая модель грунтовой среды.....	46
2.2 Исследование напряженного состояния стружки.....	47
2.3 Формирование тела грунта в ковше.....	56
2.4 Определение предельных параметров заполнения ковша.....	65
2.5 Определение объема тела грунта в ковше и призмы волочения.....	67
2.6 Определение усилия сопротивления пластичных водонасыщенных грунтов копанию.....	71
Выводы.....	79
РАЗДЕЛ 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ КОВША ПРИ КОПАНИИ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОСАДКОВ.....	81
3.1. Критериальное моделирование процесса копания ГВОМО.....	81

3.2. Обоснование параметров лабораторной установки.....	82
3.3. Конструкция лабораторной установки.....	84
3.4 Условия проведения лабораторных исследований процесса копания.....	88
3.5 Анализ результатов лабораторных исследований.....	92
3.5.1 Исследование свойств используемых образцов	92
3.5.2 Уточнение уровней варьирования глубины и скорости резания.....	93
3.5.3 Уточнение количества параллельных опытов.....	95
3.5.4 Исследование процесса копания ГВОМО в атмосферных условиях.....	98
3.5.4.1 Влияние скорости резания на параметры заполнения ковша и усилие сопротивления грунта копанию.....	98
3.5.4.2 Влияние глубины резания и ширины ковша на параметры его заполнения и усилие сопротивления грунта копанию.....	102
3.5.4.3 Исследование влияния угла наклона ковша на параметры его заполнения и усилие сопротивления грунта копанию.....	104
3.5.5 Исследование процесса копания ГВОМО в водной среде.....	107
3.6 Исследования процесса глубоководного драгирования в Черном море...	110
3.6.1 Условия проведения исследований и используемая аппаратура....	110
3.6.2 Результаты исследований процесса глубоководного драгирования и их анализ.....	115
3.7 Проверка адекватности разработанных математических моделей.....	122
Выводы.....	129
РАЗДЕЛ 4 РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА.....	131
4.1 Постановка задачи.....	131
4.2 Разработка инженерной методики расчета.....	131
4.2.1 Исходные данные для расчета.....	133
4.2.2 Расчет предельных параметров заполнения.....	134
4.2.3 Расчет параметров заполнения ковша при $t < t_{пр}$	137
4.2.4 Определение усилия сопротивления грунта копанию.....	138

4.3 Исследование зависимостей параметров ковша, удельных усилий и работы заполнения при копании ГВОМО от параметров резания на основе численного эксперимента.....	139
4.4 Перспективы использования результатов исследований.....	144
Выводы.....	146
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	147
Список литературы.....	150
Приложение А. Геологический разрез через полигон «Сапропели».....	161
Приложение Б. Критериальное моделирование процесса копания ГВОМО	162
Приложение В. Результаты тарирования электронного силоизмерительного оборудования.....	166
Приложение Г. Результаты исследований гранулометрического состава ГВОМО.....	167
Приложение Д. Результаты испытаний ГВОМО на сдвиг методом вращательного среза.....	168
Приложение Е. Результаты вискозиметрических испытаний ГВОМО.....	169
Приложение Ж. Проверка гипотезы о нормальном законе распределения параметра $l_{пр}$	171
Приложение И. Анализ влияния скорости резания v_0 на параметры $l_{пр}$, $h_{пр}$ и P_k	174
Приложение К. Результаты испытаний образцов ГВОМО на трехосное сжатие.....	177
Приложение Л. Расчет параметра K_r для сапропелевого и кокколитового илов.....	180
Приложение М. Результаты расчетов предельных параметров заполнения ковша.....	182
Приложение Н. Расчет параметров заполнения при копании кокколитового ила моделью ковша в водной среде.....	190

Приложение П. Расчет параметров заполнения ковша при копании кокколитовых илов ковшом землечерпательного снаряда емкостью 0,33 м ³ в реальных условиях эксплуатации.....	194
Приложение Р. Алгоритм проверки гипотезы об однородности двух выборок по критерию Вилкоксона.....	198
Приложение С. Результаты проверки гипотезы об однородности распределения выборок.....	201
Приложение Т. Проверка гипотезы о виде закона распределения и расчет основных параметров выборок.....	209
Приложение Ф. Пример расчета геометрических параметров ковша землечерпательного снаряда и нагрузок на ковш при копании ГВОМО.....	222
Приложение Х. Акт внедрения научно-исследовательских работ.....	236
Приложение Ц. Акт внедрения результатов исследований в учебный процесс Государственного ВУЗ «НГУ».....	238

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- b – ширина ковша;
- b_n – ширина отвала;
- b_I – толщина зоны вязкопластического течения грунта у боковой стенки ковша при длине срезаемой стружки меньше $x_{кр}$;
- b_{II} – ширина твердой области стружки в плоскости, параллельной днищу ковша, при длине срезаемой стружки меньше $x_{кр}$;
- $d\lambda/dt$ – скорость угловых деформаций грунта;
- g – ускорение свободного падения;
- h_0 – глубина резания;
- h_k – высота ковша;
- h – толщина слоя грунта, поступающего в ковш при длине стружки меньше $x_{кр}$;
- $h_{пр}$ – предельная высота заполнения ковша;
- $h_{прт}$ – предельная высота призмы волочения по прочностным свойствам разрабатываемого грунта;
- $h_{пру}$ – предельная высота призмы волочения по углу естественного откоса грунта в разрыхленном состоянии;
- h_I, h_{II} – толщины соответственно области вязкопластического течения грунта и твердой области стружки при длине стружки меньше $x_{кр}$;
- h'_{II} – толщина твердой области стружки при значении длины стружки больше $x_{кр}$;
- K – критерий подобия;
- K_Γ – параметр, прямо пропорциональный динамическому коэффициенту структурной вязкости грунта и скорости его угловой деформации;
- k_n – коэффициент наполнения ковша;
- k_π – коэффициент пропорциональности, учитывающий возрастание сопротивления перемещению грунта в ковш за счет увеличения площади трения грунта о боковые стенки ковша при деформировании стружки при значении ее длины больше $x_{кр}$;

$k_{гр}$ – коэффициент распределения грунта; численно равен отношению объема грунта в ковше к объему срезанного грунта в момент времени $t \leq t_{пр}$;

$k_{фк}$ – коэффициент формы тела грунта в ковше; показывает какая часть от предельного линейного параметра заполнения ($h_{пр}$ и $l_{пр}$) достигнута в момент времени $t \leq t_{пр}$;

l_k – длина ковша;

$l_{пв}$ – длина призмы волочения;

$l_{пр}$ – предельная длина заполнения ковша;

$P_{гд}$ – усилие гидродинамического сопротивления перемещению ковша в водной среде;

P_3 – усилие сопротивления продвижению стружки в ковше (усилие сопротивления ковша заполнению);

P_k – усилие сопротивления грунта копанию;

$P_{к.пр.}$ – предельное усилие сопротивления грунта копанию;

$P_{п}$ – усилие сопротивления перемещению призмы волочения и движению грунта в ковше;

P_p – усилие сопротивления грунта резанию;

P_T – усилие сопротивления трению ковша о грунт;

$P_{тяг}$ – тяговое усилие;

p_0 – давление на поверхность донного грунта от призмы волочения;

Q – критерий подобия, который численно равен отношению h_I/h_{II} ;

q – расход грунта через сечение площадью h_0b «на бесконечности» от ковша;

$R_{пл}$ – размер пластической зоны перед ножом;

$S_{стр}$ – площадь поперечного сечения срезаемой стружки;

s – путь копания;

$T_{II}^{кр}$ – усилие сопротивления перемещению твердой области стружки при значении ее длины равному $x_{кр}$;

$t_{пр}$ – предельное время заполнения ковша, при котором процесс резания грунта переходит в процесс его раздвигания без отделения стружки;

$V_{гр}$ – объем грунта в ковше;

$V_{гр.пр.}$ – предельный объем заполнения ковша грунтом;

V_k – емкость ковша;

$V_{пв}$ – объем призмы волочения;

$V_{пв.пр.}$ – предельный объем призмы волочения;

v_0 – скорость резания;

$x_{кр}$ – длина стружки в ковше, при которой происходит срез твердой области стружки;

α_p – угол резания;

β_n – угол наклона днища ковша относительно горизонтальной плоскости;

γ – угол естественного откоса грунта в разрыхленном состоянии;

λ – угловая деформация грунта;

$\Delta\rho$ – усредненная плотность грунта в воде;

η – динамический коэффициент структурной вязкости грунта;

$\eta_{пл}$ – пластическая вязкость грунта;

ν – коэффициент вариации;

ρ и ρ_v – усредненная плотность соответственно грунта и воды;

σ – среднеквадратическое отклонение;

σ_x и σ_y – нормальные напряжения;

σ_B – предел прочности твердой области стружки на сжатие;

$\sigma_{сж}$ – напряжение сжатия, численно равное отношению сопротивления перемещению твердой области стружки в ковше к площади ее поперечного сечения;

τ_0 – предельное напряжение сдвига (сцепление) грунта;

τ_{max} – максимальные касательные напряжения;

φ – угол наклона отрезка, соединяющего полуоси эллипса, который описывает контур призмы волочения в плоскости симметрии ковша;

ГВОМО – глубоководные органо-минеральные осадки;

НИС – научно-исследовательское судно.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Дефицит органо-минеральных ресурсов и выгодное географическое положение Украины в непосредственной близости к морю обусловило повышенный интерес к глубоководным органо-минеральным осадкам (ГВОМО), прогнозные запасы которых в акватории Черного моря составляют около 320 млрд. м³ при глубине залегания 500 – 2200 м от зеркала воды, что вызвало необходимость поиска технических решений для промышленного освоения данного вида природного сырья.

Среди оборудования механического способа добычи к агрессивной морской среде наиболее приспособлены одно- и многоковшовые землечерпательные снаряды, эффективность применения которых подтверждена в ходе опытно-промышленной добычи полиметаллических конкреций в океане на глубинах более 4500 м. По разработке землечерпательных снарядов для глубоководной добычи донных отложений известны работы А. П. Зиборова, В. Г. Кравченка, В. В. Мишина, В. П. Кузьминского, А. М. Райцина, Дж. Мери, Й. Масуды, Х. Факуды, М. Моргенштейна и др. Поскольку скорость движения рабочего органа в водной среде ограничена, основным направлением повышения производительности землечерпательных снарядов для обеспечения рентабельности горнодобычных работ является увеличение емкости ковшей, что приводит к повышению энергоемкости процесса добычи, однако не всегда позволяет достичь ожидаемой производительности из-за снижения коэффициента наполнения ковшей. Поэтому геометрические параметры (длина, ширина и высота) ковшей землечерпательных снарядов и их нагрузки при глубоководной добыче донных осадков требуют научного обоснования.

Значительный вклад в развитие теории подводной разработки грунтов сделали такие ученые, как В. И. Баловнев, Д. Д. Тургумбаев, М. А. Гоц, В. Г. Моисеенко, М. К. Сукач, О. В. Замыцкий, А. О. Карошкин, В. А. Лобанов, С. П. Огородников, А. И. Коптелов и др. Однако закономерности процесса заполнения ковша при копании пластичных водонасыщенных грунтов, а также

влияние параметров резания и свойств разрабатываемого грунта на параметры заполнения ковша изучены недостаточно. Поэтому для обоснования геометрических параметров ковшей для разработки подводных месторождений полезных ископаемых, а также усилия сопротивления ковша заполнению, используются эмпирические зависимости, большинство из которых опирается на опыт эксплуатации землеройных машин на суше. Неучитывание особенностей процесса заполнения ковша при копании грунтов в подводных условиях приводит к снижению производительности землечерпательного снаряда и неоправданному повышению энергоемкости процесса добычи, что негативно отражается на показателях эффективности работы добычного оборудования.

Таким образом, установление аналитических зависимостей рациональных геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и усилия сопротивления ковша заполнению при глубоководной добыче органических осадков от параметров резания и свойств разрабатываемого грунта является **актуальной научной задачей**.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Тема диссертационной работы связана с научным направлением кафедры горных машин и инжиниринга Государственного ВУЗ «НГУ» и выполнена в рамках темы ГП-452 «Развитие теоретических основ создания и оптимизации параметров современного горного оборудования для подводной добычи полезных ископаемых» (2012 – 2014) с номером государственной регистрации 0112U000871, темы ГП-470 «Разработка метода проектирования перспективных конструкций горных машин на основе рекуррентного метамоделирования» (2014) с номером государственной регистрации 0114U006102, соответствует направлениям и задачам «Общегосударственной программы развития минерально-сырьевой базы Украины на период до 2030 года», утвержденной Законом Украины № 3268-VI от 21 апреля 2011 г. Автор работы – исполнитель тематик.

Цель работы. Обоснование параметров ковшей землечерпательных снарядов для повышения их производительности при глубоководной добыче органических осадков на основе установленных аналитических зависимо-

стей рациональных геометрических параметров ковша и усилия сопротивления его заполнению от параметров резания и свойств разрабатываемого грунта, и разработка инженерной методики расчета геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и их нагрузок при глубоководной добыче органических осадков.

Для осуществления поставленной цели решаются следующие задачи:

– обзор и анализ конструкций ковшовых землечерпательных снарядов для глубоководной добычи полезных ископаемых, а также исследований по обоснованию параметров ковшей и нагрузок на ковш при подводной разработке грунтов;

– установление закономерностей процесса заполнения ковша при копании пластичных водонасыщенных грунтов;

– установление аналитических зависимостей рациональных геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и усилия сопротивления ковша заполнению от параметров резания и свойств разрабатываемого грунта;

– проведение экспериментальных исследований процесса заполнения ковша при копании ГВОМО в лабораторных условиях с использованием уменьшенных физических моделей ковшей и в реальных условиях эксплуатации одноковшового землечерпательного снаряда в Черном море. Оценка адекватности разработанных математических моделей путем сопоставления результатов расчетов и экспериментальных исследований;

– разработка и внедрение инженерной методики расчета геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и нагрузок на ковш при копании глубоководных органических осадков.

Объект исследования: процесс копания глубоководных органических осадков ковшом землечерпательного снаряда.

Предмет исследований: зависимости рациональных геометрических параметров ковша землечерпательного снаряда и усилия сопротивления его заполнению от параметров резания и свойств разрабатываемого грунта.

Идея диссертационной работы: повышение производительности землечерпательных снарядов осуществляется путем повышения коэффициента наполнения ковшей за счет выбора их рациональных геометрических параметров с учетом физико-механических и реологических свойств разрабатываемого грунта и параметров резания.

Методы исследований. Для решения поставленных задач были использованы методы: обобщения – при изучении результатов исследований, проведенных предшественниками; анализ – при установлении закономерностей процесса заполнения ковша; моделирование – при проведении лабораторных исследований с использованием уменьшенных физических моделей ковша землечерпательного снаряда и натуральных образцов грунта; эксперимент – при установлении влияния параметров резания и свойств разрабатываемого грунта на параметры заполнения ковша при исследовании процесса копания ГВОМО в лабораторных условиях; измерения – при исследовании кинематики и динамики ковша землечерпательного снаряда в реальных условиях эксплуатации; метод математического моделирования – при разработке и исследовании математических моделей определения параметров заполнения и усилия сопротивления ковша заполнению; метод статистической обработки данных – при определении отклонений расчетных данных от экспериментальных.

Научные положения, которые защищаются в диссертации:

1. При глубоководной добыче органо-минеральных осадков ковшом землечерпательного снаряда шириной от 0,5 до 2,5 м при глубине резания от 0,1 до 0,25 м наибольшая его емкость при максимальном значении коэффициента наполнения достигается при значении отношения высоты ковша к его длине в среднем равным 0,75.

2. При копании органо-минеральных осадков усилие сопротивления ковша заполнению находится как сумма линейной, логарифмической и степенной с показателем степени 0,5 зависимостей от пути копания, на котором происходит заполнение ковша.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые установлено, что при копании пластичных водонасыщенных грунтов ковшом определенной ширины при сколь угодно больших его прочих габаритных размерах и пути копания объем грунта в ковше ограничен и прямо пропорционален квадратному корню из произведения длины и высоты тела грунта в ковше в состоянии его заполнения, при котором процесс резания грунта переходит в процесс его раздвигания по обе стороны от ковша без отделения стружки (состояние предельного заполнения ковша).

2. Впервые установлено, что при копании пластичных водонасыщенных грунтов ковшом определенной ширины при сколь угодно больших его прочих габаритных размерах при изменении угла наклона ковша в диапазоне от 0 до $\pi/2$ относительно горизонтальной плоскости в состоянии предельного заполнения внешний контур тела грунта в ковше в плоскости его симметрии остается неизменным относительно соответствующего контура в ненаклоненном ковше.

3. Впервые установлено, что максимальное значение усилия сопротивления ковша заполнению не зависит от длины ковша и угла его наклона в диапазоне углов наклона днища ковша относительно горизонтальной плоскости от 0 до $\pi/2$.

4. Усилие сопротивления пластичных водонасыщенных грунтов копанию определяется как сумма усилий сопротивления ковша заполнению, его трению о грунт и гидродинамического сопротивления перемещению ковша в водной среде, что отличается от известных способов расчета исключением таких составляющих как усилие сопротивления грунта резанию (ввиду его малости по сравнению с усилием сопротивления ковша заполнению) и усилие сопротивления перемещению призмы волочения (данный параметр равный по величине и противоположный по знаку усилию сопротивления ковша заполнению).

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечены использованием фундаментальных методов механики грунтов, механики сплошной среды; методами математической статистики при анализе результатов экспериментальных исследований; удовлетворительным

доверительным диапазоном экспериментально определенных параметров. При определении геометрических параметров тела грунта в ковше в состоянии предельного заполнения отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 27%, при определении усилия сопротивления ковша заполнению указанное отклонение не превышает 33% при доверительной вероятности 0,95.

Научное значение работы заключается в установлении закономерностей процесса заполнения ковшей землечерпательных снарядов при глубоководной добыче пластичных водонасыщенных грунтов и разработке аналитических зависимостей рациональных геометрических параметров ковша и усилия сопротивления его заполнению от ширины ковша, глубины и скорости резания, плотности, вязкости, сцепления и угла естественного откоса (в разрыхленном состоянии) разрабатываемого грунта.

Практическое значение работы состоит в разработке инженерной методики расчета параметров ковшей землечерпательных снарядов и нагрузок на ковш при копании глубоководных органо-минеральных осадков, использование которой позволяет определить рациональные геометрические параметры ковша для обеспечения высокого коэффициента его наполнения, и нагрузки на ковш для обоснования параметров привода рабочего органа, исключая необходимость проведения дорогостоящих экспериментальных исследований; на уровне изобретения предложен способ добычи донных отложений с больших глубин и устройство для его реализации.

Реализация результатов

Инженерная методика расчета геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и нагрузок на ковш при копании глубоководных органо-минеральных осадков принята к использованию при разработке ковшей одноковшовых землечерпательных снарядов в Государственном научном учреждении «Отделение морской геологии и осадочного рудообразования» НАН Украины, результаты проведенных исследований используются в учебном процессе Государственного ВУЗ «НГУ» при изложении дисциплины «Основы конструирования горных машин для подводной добычи полезных ископаемых».

Личный вклад автора

Сформулированы цель, научные положения и задачи исследований. Исследованы закономерности процесса заполнения ковша землечерпательного снаряда при копании пластичных водонасыщенных грунтов. Разработан математический аппарат для описания процесса. Разработано измерительное оборудование для проведения лабораторных исследований и натурных экспериментов в Черном море. Разработана инженерная методика расчета параметров ковшей землечерпательных снарядов и нагрузок на ковш при копании глубоководных органо-минеральных осадков.

Апробация результатов диссертации

Материалы диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку:

– на XII Международной конференции по открытой и подводной разработке полезных ископаемых (г. Варна, Болгария, 2013 г.); на Международной конференции «Форум горняков – 2014» (г. Днепропетровск, 2014г.); на Международной конференции «Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта 2014» (г. Днепропетровск, 2014 г.); на XII Всеукраинской научно-технической конференции «Потураевские чтения» (г. Днепропетровск, 2014 г.); на V научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная весна – 2014» (г. Днепропетровск, 2014 г.);

– на заседаниях: Научно-технического совета Государственного научного учреждения «Отделение морской геологии и осадочного рудообразования» НАН Украины (г. Киев, 2013 г.); Научно-технического совета 73-го рейса научно-исследовательского судна (НИС) «Профессор Водяницкий» (НИС «Профессор Водяницкий», 2013 г.).

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 8 статей, 5 тезисов докладов на конференциях, получен 1 патент на изобретение.

РАЗДЕЛ 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОВШЕЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОСАДКОВ

1.1 Глубоководные органо-минеральные осадки Черного моря как объект разработки

Исследования Черного моря начались еще в XVII-XVIII веке в связи с нуждами навигационного обеспечения мореплавания [1]. Дальнейшие работы были направлены на изучение гидрологического режима, животного, растительного мира и геологии Черного моря. Современные исследования геологических особенностей черноморских осадков проводятся сотрудниками Отделения морской геологии и осадочного рудообразования НАН Украины под руководством академика Е. Ф. Шнюкова, Институтом океанологии Болгарской академии наук (П. С. Димитров, Д. П. Димитров и др.), а также другими подразделениями по национальным и международным программам. Фактологический материал с каждым годом пополняется все новыми результатами исследований. Начиная с последней четверти XX века только в украинской и болгарской экономзонах акватории Черного моря были проведены комплексные океанографические экспедиции НИС «Гломар Челленджер», «Кнор», «Акад. Б. Петров», «Витязь», «Профессор Водяницкий», «Владимир Паршин», «Д. Менделеев», «Ломоносов», «Киев», «Академик» и др. [2].

При исследовании донных отложений Черного моря на глубинах свыше 500 м были выявлены осадки с повышенным содержанием органического вещества – сапропелевые илы, которые могут представлять интерес для различных отраслей экономики стран Причерноморского региона. Сапропели (от греч. «сапрос» – гнилой, «пелос» – ил) – темные, жирные на ощупь каучукоподобные осадки, имеющие запах сероводорода. С. А. Клещенко выделяет несколько разновидностей сапропелевых осадков: собственно сапропелевый ил, сапропелево-глинистый, или глинисто-сапропелевый ил, сапропелевая брекчия, сапропелево-кокколитовые, сапропелево-диатомовые, сапропелево-кокколитово-диатомовые илы и т.д. Полезным компонентом илов является аморфное

бесструктурное органическое вещество, называемое сапропелем. По предварительной оценке запасы сапропелевых осадков в Черном море составляют более 320 млрд. м³, в том числе более 4 млрд. м³ в экономической зоне Украины. Морские сапропели описываются в трудах Е. Ф. Шнюкова [3, 4, 5], А. П. Зиборова [3, 6, 7], Т. С. Блохиной [8, 9], Т. С. Куковской [10], П. Н. Куприна, К. М. Шимкуса [11], Ф. А. Щербакова [12], П. С. Димитрова [13, 14, 15], Д. П. Димитрова [16, 17], С. А. Клещенко [18, 19], Е. Г. Дегодюка [20], В. Х. Велева [21], Н. Николова [22] и др.

Характеристика донного забоя. Многие исследователи образование сапропелевых осадков связывают с геологическими катаклизмами в начале неолита (около 7000–5000 лет до н.э.) в результате прорыва средиземноморских вод в акваторию с пресными водами Черного моря-озера [3]. Его органические остатки и планктон стали основой сапропелевидных отложений и кокколитовых илов. Этим объясняется повсеместное распространение сапропелевых осадков в Черном море на глубинах свыше 500 м, а также выдержанность сапропелевого слоя по толщине и глубине залегания от донной поверхности.

Толщина собственно сапропелевого слоя в ненарушенном залегании изменяется в пределах от 0,1 до 0,5 м [19]. Вся толща обогащенных сапропелевым органическим веществом осадков изменяется в разных районах Черного моря от 0,35 до 2 м. Такое распределение обусловлено в основном рельефом дна – у подножья материкового склона, у грязевых вулканов толщина слоя возрастает. Максимальные значения толщины обычно обусловлены процессами оползания осадков на крутых склонах.

Сапропельсодержащая толща на материковом склоне может переслаиваться тонкими прослойками (в несколько миллиметров) диатомового ила. Сверху сапропелевый слой покрывают кокколитовые илы. Поверхностные донные осадки сложены жидко- и вязкотекучими терригенными илами, толщина которых находится в пределах 0,1 – 0,2 м. Верхние жидкотекучие терригенные и мягкопластичные кокколитовые илы относят к вскрышному слою, толщина которого составляет 0,3 – 1,0 м.

Нижняя граница сапропелевых осадков хорошо выдержана. Подстилающие осадки – зеленовато-серые и голубовато-серые мягко- и тугопластичные глинистые илы.

Верхняя часть сапропеленосной толщи относится к более бедным по содержанию сапропелевого вещества разубоженным глинистым материалом осадкам, а нижняя часть представлена более качественными сапропелевыми илами. Осадки вскрышного слоя – кокколитовые микрослоистые илы, в определенной степени обогащенные микроэлементами и органическим веществом, поэтому вместе с сапропелевыми илами представляют интерес для их комплексного использования во многих отраслях экономики, что позволяет ввести понятие технологического слоя [23]. Технологический слой может разрабатываться как единый горизонт, что значительно упрощает технологию отработки подводного месторождения.

Сапропелевмещающие, кокколитовые и диатомовые отложения в литературе [2, 24, 25] обозначаются как глубоководные органо-минеральные осадки (ГВОМО). В общем случае к органо-минеральным относят все илы, содержащие свыше 3% $C_{\text{орг}}$.

Горная масса в целом соленая, повышенной липкости и влажности. В донных осадках содержание сероводорода изменяется в пределах от 12 – 16 до 160 мг/л. Соленость вод в придонном слое достигает 22,5‰.

Химический и гранулометрический состав. Состав ГВОМО своеобразен и изменяется в довольно широких пределах [3]: $C_{\text{орг}}$ по площади бассейна Черного моря в среднем содержится 10,23%, в вертикальном разрезе изменяется от 1,70% в кокколитово-сапропелевых илах до 22,9% в сапропелевых илах; среднее содержание CaCO_3 составляет 17,0%; $\text{SiO}_{2\text{вал}}$ от 20 до 50%; $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$ до 10%; Al_2O_3 от 5 до 16%; Na_2O от 0,917 до 4,37%, в среднем 2,05%; K_2O – от 1,01 до 2,84%, в среднем 1,98%; P_2O_5 – от 0,02 до 0,3%, в среднем 0,12%; Fe – 2,5–5%; Mn – до 5%; Ti – 0,15-0,2%; Mo – 0,02% и более. Также в ГВОМО содержится U, Cu, Zn, Ni, As, Se, Ag, Au и др. микрокомпоненты.

В сапропелевых осадках Западно-Черноморской впадины содержание глинистых частиц ($< 0,01$ мм) изменяется от 77,2 до 97,3%, в Восточно-Черноморской впадине глинистая фракция в среднем составляет 77,8%. В обоих районах крупноколлоидная фракция преобладает над субколлоидной [3].

Гранулометрический состав сапропеленосных илов в северо-западной глубоководной части Черного моря, перспективной к проведению детальных поисково-оценочных работ, представлен в табл. 1.1 [26].

Таблица 1.1

Гранулометрический состав сапропеленосных осадков на перспективной для разведки площади, %

Тип осадка	Фракция, мм						
	$> 0,1$	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,002	0,002-0,001	$< 0,001$
Ил тонкослоистый	$\frac{0,2 - 2,0}{0,86}$	$\frac{1,1 - 2,4}{1,7}$	$\frac{10,2 - 13,3}{11,4}$	$\frac{6,2 - 9,3}{8,0}$	$\frac{8,6 - 12,1}{10,4}$	$\frac{9,7 - 20,6}{14,8}$	$\frac{44,7 - 51,2}{48,2}$
Ил сапропелевидный	$\frac{0,1 - 3,7}{1,3}$	$\frac{1,4 - 28,8}{10,7}$	$\frac{7,6 - 31,5}{22,6}$	$\frac{5,0 - 8,8}{7,4}$	$\frac{6,8 - 15,4}{10,7}$	$\frac{5,3 - 12,1}{7,7}$	$\frac{21,7 - 55,0}{39,6}$
Сапропель	$\frac{0,5 - 9,3}{4,8}$	$\frac{0,7 - 31,7}{12,1}$	$\frac{22,3 - 37,1}{27,4}$	$\frac{4,3 - 12,8}{9,0}$	$\frac{5,4 - 9,1}{7,4}$	$\frac{3,6 - 9,1}{5,4}$	$\frac{25,4 - 44,7}{33,7}$
Ил глинистый	0,1	2,3	16,7	13,2	16,5	5,0	46,2

Примечание. В числителе указаны крайние значения, в знаменателе – средненные.

По классификации ЛенморНИИпроекта по гранулометрическому составу ГВОМО можно отнести к VI классу (тяжелая глина) [27].

Физико-механические и водные свойства ГВОМО. Изучение физико-механических свойств ГВОМО в лабораторных условиях представляет определенные трудности. Во многих работах [28, 29, 30, 31] указано на неизбежность различных изменений в глубоководных осадках при их подъеме в приповерхностные термодинамические условия в процессе отбора проб. При изъятии образца из естественной обстановки обжимающее давление снижается, состояние сжатия меняется от анизотропной системы в условиях естественного залегания до изотропной системы лабораторного образца. При этом может отмечаться

растрескивание некоторых типов глубоководных осадков в результате газовыделения, а также при некотором расширении воды в порах, что сказывается на точности изучения ряда свойств исследуемых донных отложений. В других работах [29, 32] отмечается достаточно хорошая сходимость результатов лабораторных исследований свойств осадков, поднятых с различных батиметрических уровней. Наблюдения во время экспедиционных исследований показывают, что при извлечении осадков из геологической трубки в них сохраняется ненарушенной тонкая горизонтальная слоистость (менее 1 мм) даже в верхних горизонтах (кроме самого верхнего 0...5 см). Водонасыщенность донного грунта практически полностью исключает влияние объемной деформации образца (если она не приводит к физическому смешиванию осадка с морской водой) на такие характеристики, как усредненная плотность, плотность скелета грунта, влажность, показатели консистенции и некоторые другие. Поэтому структуру изучаемых донных отложений можно считать условно ненарушенной, однако установление степени лабораторной ошибки при определении свойств образцов грунта требует проведения отдельных исследований.

Одни из последних данных о физико-механических свойствах глубоководных осадков Черного моря были получены в ходе работы экспедиций 30-го рейса НИС «Владимир Паршин» (2009 г.), 65-го (2010 г.) и 73-го (2013 г.) рейсов НИС «Профессор Водяницкий» [26, 33, 34]. По результатам проведенных исследований в 2009 г. был оконтурен перспективный к проведению детальных поисково-оценочных работ участок ГВОМО «Сапропели» в северо-западной части Черного моря. Однако уже в 2013 г. границы выделенного полигона были несколько смещены к юго-востоку ввиду интенсивного экономического использования обозначенного ранее района (рис. 1.1). Результаты исследований физико-механических свойств донных осадков, проведенных в ходе экспедиций 2009–2010 гг., сведены в табл. 1.2.

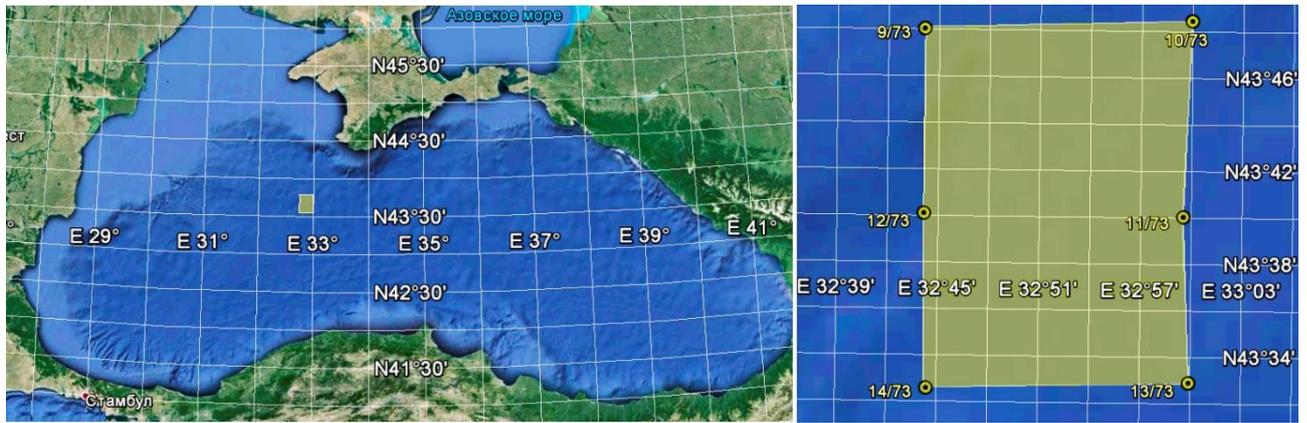


Рисунок 1.1 – Географическое положение полигона «Сапропели» в Черном море (73-й рейс НИС «Профессор Водяницкий», 2013 г.)

Таблица 1.2

Физико-механические свойства ГВОМО

Усредненная плотность, г/см ³	Влажность, %	Плотность частиц, г/см ³	СаСО ₃ , %	С _{орг} , %	Пористость, %	Пластическая прочность, кПа	Прочность на срез, кПа	Липкость в атмосфере, кПа	Липкость в воде, кПа
Вещественно-генетический тип									
Ил биогенный сильноизвестковый, пелитовый, зеленовато-серый, тонкослоистый (кокколитовый), вязкотекучий									
1,15-1,20 (1,18)	289,9-352,0 (325,9)	2,30-2,33 (2,32)	50,3-56,0 (53,4)	3,2-3,7 (3,45)	91,2-98,0 (95,25)	0,8-1,3 (1,0)	0,6-1,0 (0,8)	0,6-1,6 (1,05)	0,4-1,1 (0,73)
Ил биогенный, сильноизвестковый, пелитовый, зеленовато-серый, тонкослоистый (кокколитовый), текучепластичный									
1,22-1,26 (1,24)	254,2-276,4 (267,36)	2,31-2,43 (2,34)	47,4-55,7 (50,8)	3,2-4,1 (3,56)	93,8-97,2 (95,56)	0,9-1,4 (1,14)	0,6-1,1 (0,88)	0,7-1,8 (1,28)	0,5-1,1 (0,8)
Ил теригенный, глинистый, серый, мягкопластичный									
1,22-1,55 (1,46)	93,3-276,4 (148,28)	2,14-2,99 (2,80)	16,7-36,3 (21,88)	0,3-3,6 (1,33)	69,8-96,2 (77,58)	3,7-14,2 (8,42)	4,3-12,3 (7,98)	0,9-2,4 (2,14)	0,5-2,3 (1,77)
Ил биогенный, пелитовый, сапропелевый, упруго-пластичный									
1,16-1,39 (1,25)	182,1-309,7 (256,77)	2,12-2,32 (2,19)	25,8-58,2 (44,87)	1,9-4,2 (3,23)	83,1-95,2 (89,3)	2,7-5,7 (4,37)	2,2-4,4 (3,47)	1,1-2,3 (1,53)	0,6-2,5 (1,2)

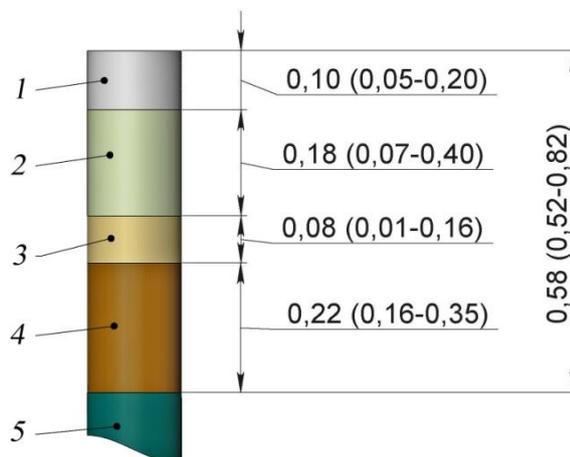
Примечания:

1. В скобках указаны усредненные значения параметров.
2. В настоящей работе под влажностью грунта понимается отношение массы воды в объеме грунта к массе этого грунта, высушенного до постоянной массы (согласно ДСТУ Б А.1.1-25-94 «Грунты. Термины и определения» [35]).

На основе анализа приведенных данных по физико-механическим свойствам, по трудности разработки ГВОМО можно отнести к I категории грунтов [27].

Характеристика залежи. Полигон «Сапропели» расположен в абиссальной зоне Черного моря. Площадь полигона составляет около 550 км² по водной поверхности. Максимальная протяженность с севера на юг – чуть меньше 29 км, с запада на восток – около 21 км. Удаленность от порта Севастополь составляет близко 110 км. Глубина моря на данном участке изменяется от 1929 м на северо-западе до 2146 м на юго-востоке. Рельеф дна преимущественно равнинный, слабонаклонный на юг (угол наклона до 2°). Геологический разрез через полигон «Сапропели» приведен в приложении А.

Технологический слой ГВОМО на данном участке морского дна представлен сапропелевыми, сапропелевмещающими и кокколитовыми илами с тонкими прослойками (1–2 мм) диатомового ила (рис. 1.2). Придонные осадки – терригенные жидко- и вязкотекучие илы. Подстилающий слой – серые с зеленоватым оттенком мягкопластичные глинистые илы.



1 – ил терригенный жидкотекучий; 2 – ил кокколитовый, мягкопластичный;
3 – ил сапропельсодержащий; 4 – сапропель; 5 – ил глинистый, серый с зеленоватым оттенком (подстилающий горизонт); в скобках указаны крайние значения толщины слоя

Рисунок 1.2 – Параметры усредненного технологического слоя ГВОМО на полигоне «Сапропели»

Таким образом, ГВОМО относятся к слабым глинистым водонасыщенным грунтам с повышенным содержанием органического вещества. Для ГВОМО характерна высокая пористость и липкость. Технологический слой имеет относительно малую толщину, достаточно хорошо выдержан по всей площади бассейна Черного моря и может отрабатываться как единый горизонт.

1.2 Землечерпательные снаряды для глубоководной добычи полезных ископаемых

В мире пока нет практики промышленного освоения месторождений твердых полезных ископаемых на больших глубинах. Основные проекты добычных комплексов, рассматриваемых на сегодня, как правило, наследуются от научных и инженерных изысканий, проводившихся во второй половине XX века для освоения месторождений полиметаллических конкреций в Тихом и Индийском океанах, а также залежей ГВОМО в Черном море [3, 36].

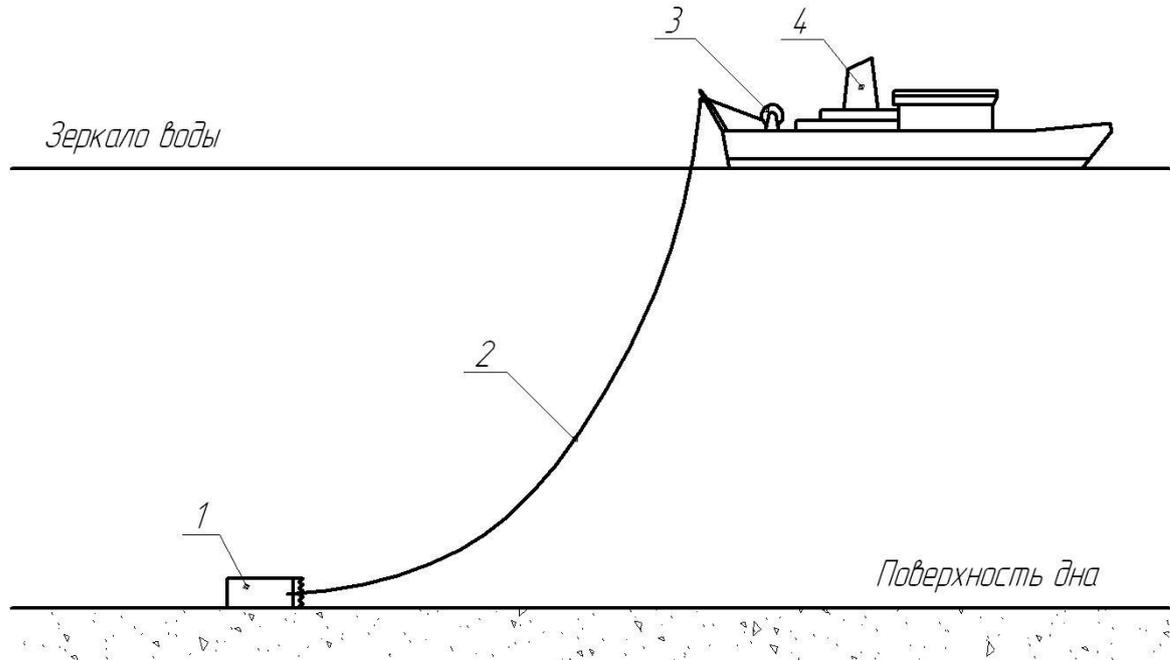
Среди испытанных добычных систем с рабочим органом ковшового типа, предназначенных для разработки полезных ископаемых на глубинах более 500 м, известны канатно-ковшовые системы циклического действия – одноковшовые землечерпательные снаряды, к которым относятся скреперные (драглайновые) снаряды (могут применяться на глубинах до 9000 м), а также системы непрерывного действия – многоковшовые землечерпательные снаряды с рабочим органом в виде бесконечной ковшовой линии (одна из таких систем была испытана для добычи конкреций с глубины 4700 м) [27, 36 – 40]. Здесь следует отметить, что если землечерпательный снаряд оснащен оборудованием для обогащения добываемого сырья, такой землечерпательный снаряд будет иметь название «драга» [39].

Одно- и многоковшовые землечерпательные снаряды (драги) имеют свои достоинства и недостатки, что применительно к разработке ГВОМО требует проведения детального анализа.

На материке для разработки прибрежно-морских и континентальных обводненных месторождений полезных ископаемых механическим способом широкое применение нашли канатно-скреперные установки, драглайны, экскаваторы с прямой и обратной лопатами, грейферные снаряды, а также многочерпаковые драги [41 – 46].

1.2.1 Землечерпательные снаряды циклического действия

Для разработки залежей полиметаллических конкреций на дне океана американским исследователем Дж. Меро была предложена добычная система, включающая два судна – добычное и транспортирующее [38]. Оборудование для разработки конкреций (рис. 1.3) представляет собой одноковшовый землечерпательный снаряд, включающий ковш 1, подвешиваемый на канате 2, поднимаемый и опускаемый лебедкой 3, установленной на палубе в кормовой части судна 4.



1 – ковш; 2 – гибкий тяговый орган; 3 – лебедка; 4 – судно

Рисунок 1.3 – Одноковшовый землечерпательный снаряд

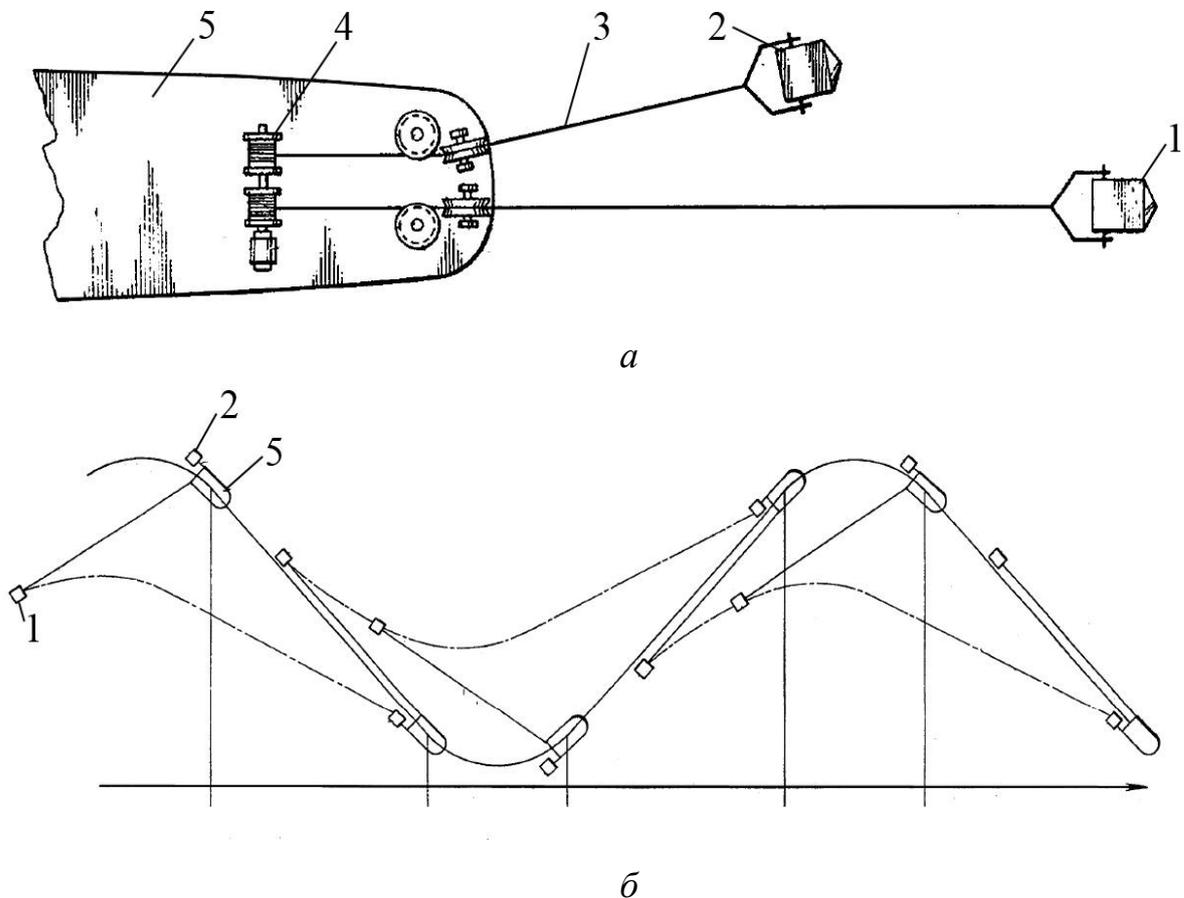
Второе судно представляет собой самоходную баржу, предназначенную для транспортирования конкреций. Цикл отбора конкреций включает опускание ковша на дно, черпание и подъем заполненного ковша на палубу с последующей разгрузкой отобранного материала в баржу. Для осуществления черпания судно должно находиться на некотором расстоянии от точки опускания ковша, поэтому длина вытравленного каната должна превышать глубину океана. Для судна водоизмещением 2000 т Дж. Меро предложен землечерпательный снаряд с габаритными размерами ковша $6 \times 3,5 \times 0,9$ м весом около 3 т, обеспечивающий производительность до 13 т извлекаемого материала за цикл (при коэффициенте наполнения ковша 0,65). Данное оборудование может быть использовано для добычи конкреций на глубинах до 1500 м.

Максимальная скорость опускания ковша не превышает скорости его свободного падения в воде. Согласно расчетам, скорость свободного падения ковша, предложенного Дж. Меро, не превышает 3 м/с. Поскольку сопротивление, возникающее при подъеме ковша землечерпательного снаряда в воде, меняется в квадратичной зависимости от скорости, а мощность, расходуемая на подъем – в кубической, существует рациональная скорость, превышение которой приводит к значительному удорожанию добываемого сырья. Поэтому основным направлением повышения производительности землечерпательного снаряда циклического действия является увеличение емкости ковша, либо применение нескольких ковшей.

Один из возможных вариантов конструктивного исполнения землечерпательного снаряда с двумя ковшами приведен в патенте [47]. Добычное судно (рис. 1.4, *а*) имеет двухбарабанную лебедку с многослойной навивкой каната. При опускании одного ковша происходит подъем другого. При этом судно движется зигзагообразно (рис. 1.4, *б*), что исключает возможность запутывания подъемных канатов. Применение такого оборудования позволяет почти в два раза повысить производительность добычного комплекса.

В НИПИОкеанмаш совместно с НГУ и ИГТМ НАН Украины (г. Днепропетровск) при участии ОМГОР НАН Украины (г. Киев) проводились инженерные

проработки по созданию одноковшовых землечерпательных снарядов для добычи ГВОМО. При этом рассматривались три типоразмера ковшей, характеристики которых приведены в табл. 1.3. Общий вид одной из разработок показан на рис. 1.5 [3]. Особенностью приведенного ковша землечерпательного снаряда является наличие обтекателя, который отклоняется при черпании донных осадков и закрывается при подъеме ковша в толще воды, исключая вымывание отобранной горной массы. Такая конструкция может использоваться при отборе крупномасштабных проб ГВОМО. При этом ковш может оснащаться сменным контейнером, который извлекается после каждого цикла пробоотбора и заменяется пустым. Это обеспечивает возможность складирования отобранных осадков при перегрузке без обогащения на судне.



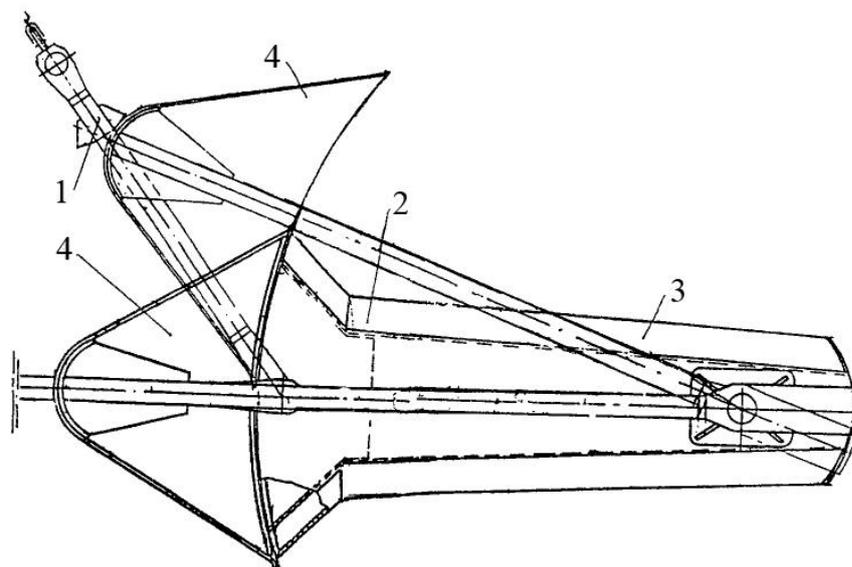
1,2 – ковши; 3 – тяговый канат; 4 – двухбарабанная лебедка; 5 – судно

Рисунок 1.4 – Устройство (а) и схема отработки залежи (б) землечерпательным снарядом с двумя ковшами

Таблица 1.3

Массогабаритные характеристики ковшей землечерпательных снарядов циклического действия для добычи ГВОМО (проект НИПИОкеанмаш)

Параметр	Объем ковша, м ³		
	7,5	10,0	15,0
	Значение параметра		
Длина, м	3,2	3,5	4,0
Ширина, м	2,05	2,26	2,6
Высота, м	1,47	1,62	1,85
Масса, т	5,68	7,2	10,27
Масса ковша с ГВОМО, т	14,68	19,2	28,27
Весовая отрицательная плавучесть пустого ковша, т	4,94	6,26	8,92
Весовая отрицательная плавучесть заполненного ковша, т	6,335	8,12	11,71
Усилие в подвеске при черпании, тс	7...10	8...12	11...16



1 – тяговая подвеска; 2 – ковш; 3 – контейнер; 4 – крышка

Рисунок 1.5 – Ковш землечерпательного снаряда конструкции НИПИОкеанмаш

Для ограничения величины заглубления ковша в донный грунт разработаны конструкции ковшей с ограничителями заглубления [48, 49]. Пример одного из таких ковшей для добычи конкреций приведен на рис. 1.6.

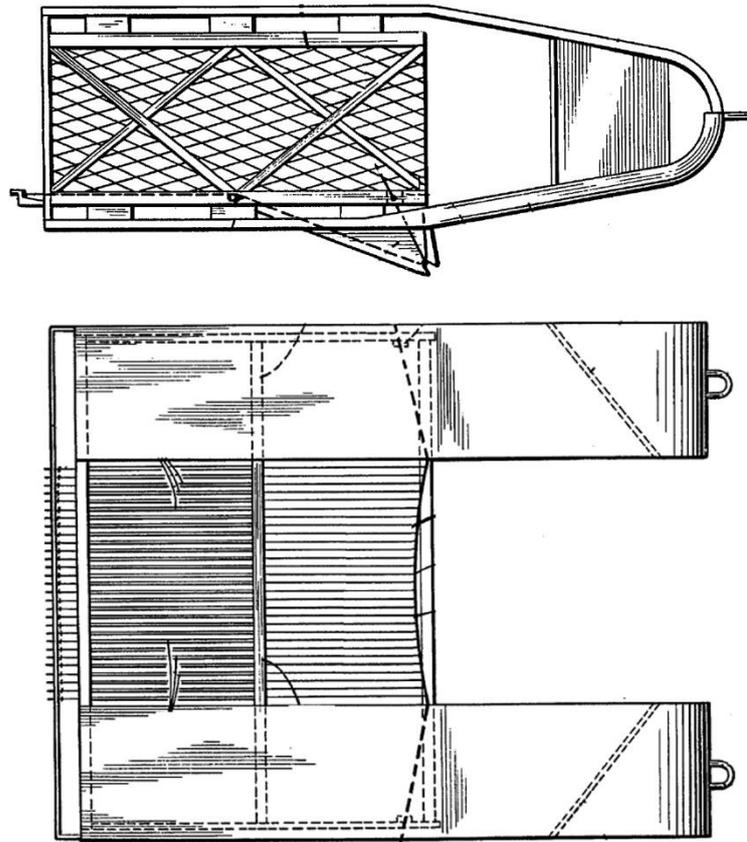


Рисунок 1.6 – Ковш землечерпательного снаряда циклического действия для добычи конкреций с ограничителями заглубления в грунт

С целью повышения качества обработки месторождения на ковшах землечерпательных снарядов циклического действия могут дополнительно устанавливаться средства видеонаблюдения, навигационные устройства и средства контроля касания дна [38]. Однако при этом качество обработки подводного месторождения все же остается крайне низким.

В США проводились работы по созданию скреперных (драглайновых) снарядов для добычи глубоководных конкреций, технические характеристики которых приведены в табл. 1.4. Наряду с традиционными, ковши землечерпательных снарядов могут иметь и крылообразную форму для сокращения цикла черпания.

Таким образом, одноковшовые землечерпательные снаряды являются наиболее простым типом глубоководного добычного оборудования с точки зрения конструктивного исполнения, которое требует минимума капитальных затрат

на создание и может быть привязано к существующим плавсредствам. Основными недостатками такого способа добычи являются низкая производительность и низкое качество отработки подводного месторождения вследствие отсутствия возможности управления рабочим органом в забое.

Таблица 1.4

Скреперные (драглайновые) снаряды, США (проект)

Показатели	Глубина черпания, м	
	305	915
Емкость ковша, м ³	13,2	13,2
Мощность снаряда, кВт	1100	1180
Производительность, м ³ /сут	670	437

Для отбора проб донных осадков широкое применение нашли ковши прямоугольного, квадратного, круглого и овального поперечного сечения. Симметричная форма ковшей обеспечивает одинаковые условия их работы при укладке на дно любой из боковых поверхностей (при соответствующей конструкции тяговой подвески ковша). Однако при добыче полезных ископаемых, как правило, применяются ковши коробчатой формы для обеспечения равномерной отработки подводного месторождения.

Основным отличием ковшей для добычи ГВОМО и конкреций является способ изолирования отобранного сырья от воздействий окружающей водной среды. При разработке конкреций встречные потоки очищают конкреции от илов, осуществляя таким образом обогащение, поэтому стенки ковша выполнены из сетчатого материала, либо предусмотрено большое количество отверстий. При добыче ГВОМО следует исключать вымывание горной массы при подъеме заполненного ковша в толще воды. Поэтому отверстия для отвода воды из ковша при черпании, как правило, предусматриваются на задней стенке, а для исключения воздействия встречных потоков на горную массу могут применяться обтекатели различных конструкций.

1.2.2 Землечерпательные снаряды непрерывного действия

Для добычи конкреций со дна океана на основе изобретения японского инженера Масуды была предложена конструкция многоковшового землечерпательного снаряда с бесконечной ковшовой линией без жесткой рамы. Рабочий орган представляет собой бесконечный синтетический нескручивающийся канат с закрепленными на нем ковшами. Ковши, как правило, имеют круглую форму поперечного сечения. Ковшовая линия проходит вдоль борта судна от носа до кормы и свешивается с него на дно. Полупромышленная установка была создана на базе грузового судна «Чиода Мару» [39]. Применялись черпаковые цепи двух типов: одна с диаметрами каната 40 мм, длиной 8200 м и разрывным усилием 20 тс, с 240 черпаками емкостью 45 кг конкреций; другая – с диаметром каната 20 мм, длиной 10 000 м и разрывным усилием 7 тс. Расстояние между черпаками составляло 25 м. Применялись также черпаки емкостью 100 кг конкреций. Минимальное расстояния между нисходящей и восходящей ветвями 1 м на каждые 25 м глубины обеспечивают отсутствие зацепления между ковшами. Испытания такого землечерпательного снаряда производилось при добыче мелкозернистого песка с глубины 1500 м, а также при добыче конкреций с глубины 3700 м. Скорость движения ковшовой цепи составляла 0,6...0,9 м/с, скорость бокового смещения судна – 0,2...0,5 м/с. На основании проведенных работ подсчитано, что производительность установки может составлять до 1,5 млн. т конкреций в год. При ковшах емкостью 5 т конкреций и канате с разрывным усилием 2500 тс с глубины 6000 м можно добывать 5000 т конкреций в сутки. В 1972 г. система прошла успешные испытания на глубине 4700 м.

Модификации землечерпательного снаряда для добычи конкреций с бесконечной ковшовой линией приведены в патентах [50 – 54], в которых предлагаются способы усовершенствования технологии ведения добычных работ, приведены способы подвески ковшей, оборудование для привода ковшовой линии и разгрузки ковшей. В патенте [55] для увеличения дистанции между вет-

вьями ковшовой линии предложено использовать пластины, закрепляемые на тяговом канате. Увеличение дистанции достигается за счет действия на пластины гидродинамического сопротивления, вследствие чего возникает усилие, отклоняющее нисходящую ветвь от восходящей. Такой же эффект может быть достигнут при подвешивании ковшей к канату под некоторым углом атаки на двух дужках разной длины (дражная система HDS–SLB).

Стремление исключить возможность зацепа ветвей бесконечной ковшовой линии между собой привело к разработке дражной системы CLB (рис. 1.7), представляющую собой бесконечную ковшовую линию, которая опирается на два судна [38, 39, 56]. Было подсчитано, что при удалении судов друг от друга на 1 км вероятность зацепа вервей между собой при глубине разработки до 6 км практически полностью исключается. Другим направлением модификации бесконечной ковшовой линии является использование придонных блоков (патенты [57 – 61]), позволяющих сделать процесс добычи более управляемым и повысить качество отработки месторождения.

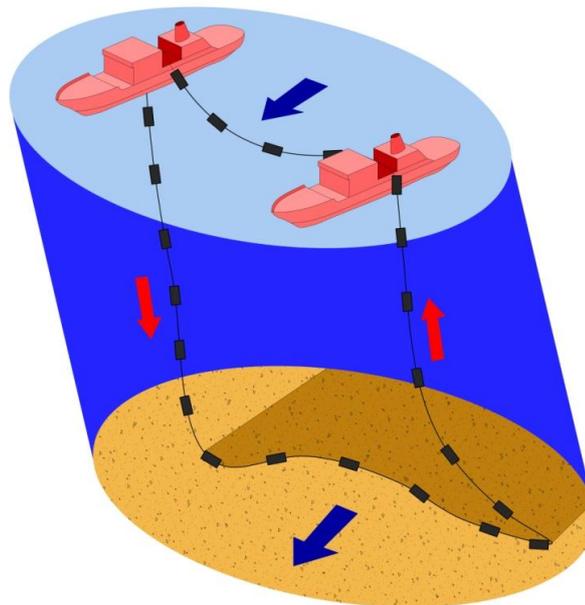
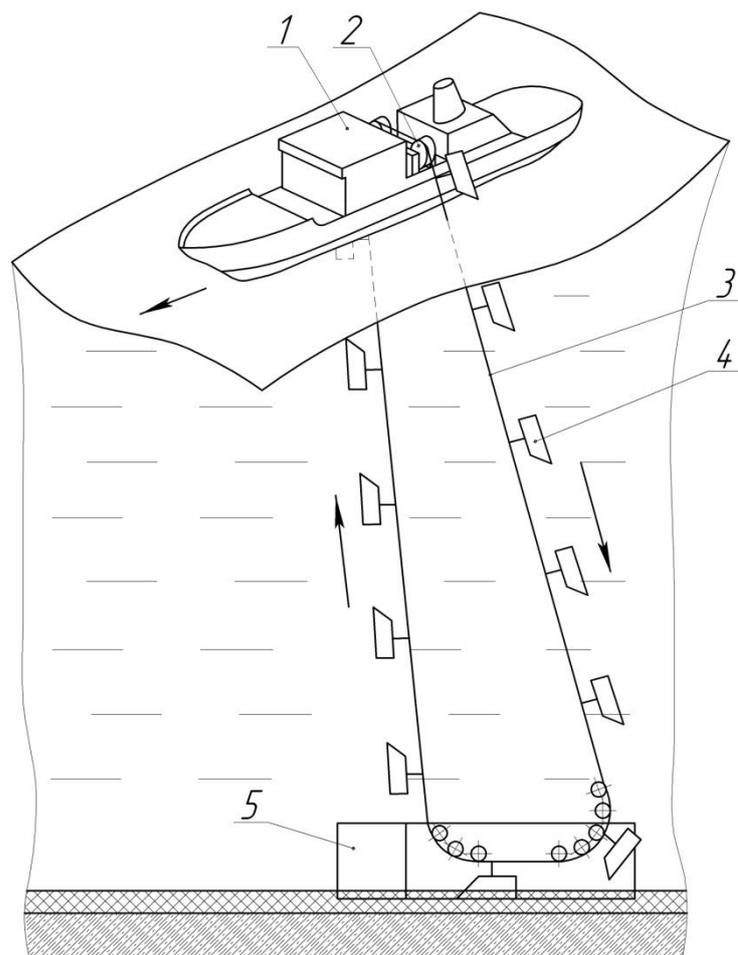


Рисунок 1.7 – Дражная система CLB

НИПИокеанмаш был предложен землечерпательный снаряд для непрерывной добычи ГВОМО с бесконечной ковшовой линией и придонным блоком (рис. 1.8) [62]. Ковши землечерпательного снаряда имеют коробчатую форму и

снабжены обтекателями для исключения вымывания горной массы при подъеме в толще воды. Придонный блок содержит направляющие, которые обеспечивают постоянство величины заглубления ковшей в грунт, а также открывают и закрывают обтекатели при черпании. Применение такой установки может обеспечить требуемое качество отработки месторождений ГВОМО в Черном море, отвечает требованию исключения вымывания горной массы при подъеме, однако вопросы, связанные с обеспечением необходимой надежности добычного комплекса все же остаются открытыми.



1 – судно; 2 – лебедка; 3 – гибкий тяговый орган; 4 – ковш; 5 – придонный блок

Рисунок 1.8 – Землечерпательный снаряд непрерывного действия конструкции
НИПИОкеанмаш

Землечерпательные снаряды непрерывного действия способны обеспечить высокую производительность добычного комплекса, однако обладают низкой надежностью. По мнению многих исследователей, низкая надежность такого

оборудования сводит на нет преимущества землечерпательных снарядов непрерывного действия по сравнению с оборудованием циклического действия.

Таким образом, требованиям, предъявляемым к добычному комплексу для промышленного освоения месторождений ГВОМО, наиболее полно отвечает землечерпательный снаряд с бесконечной ковшовой линией, придонным блоком и ковшами коробчатой формы, оснащенными обтекателями. Такая добычная установка способна обеспечить высокую производительность и необходимое качество отработки подводных месторождений. Исключение вымывания горной массы из ковшей при подъеме в толще воды обеспечивает минимальный (по сравнению с другими системами с бесконечной ковшовой линией) урон окружающей среде при проведении добычных работ. Для повышения надежности такого оборудования могут быть использованы технические решения, разработанные применительно к добыче конкреций со дна океана (например, гидродинамическое разведение ветвей, использование нескольких судов и т.д.).

За базовый вариант принят ковш коробчатой формы, использование которого позволяет обеспечить равномерную отработку подводного месторождения при послойной выемке полезного ископаемого. Основными параметрами такого ковша являются его длина, ширина и высота, величина которых определяет эффективность наполнения ковша грунтом для заданных параметров резания, свойств разрабатываемого грунта и горно-геологических условий добычи.

1.3 Определение параметров ковшей и нагрузок на ковш при разработке водонасыщенных грунтов

Для определения усилия сопротивления грунта копанию P_k ковшовым исполнительным органом Н. Г. Домбровским предложена зависимость [63, 64]:

$$P_k = P_p + P_t + P_n, \quad (1.1)$$

где P_p – усилие сопротивления грунта резанию;

P_t – усилие сопротивления трению рабочего органа о грунт;

$P_{\text{п}}$ – усилие сопротивления перемещению призмы волочения и движению грунта в ковше.

Схема действия усилий на исполнительный орган при копании грунта приведена на рис. 1.9.

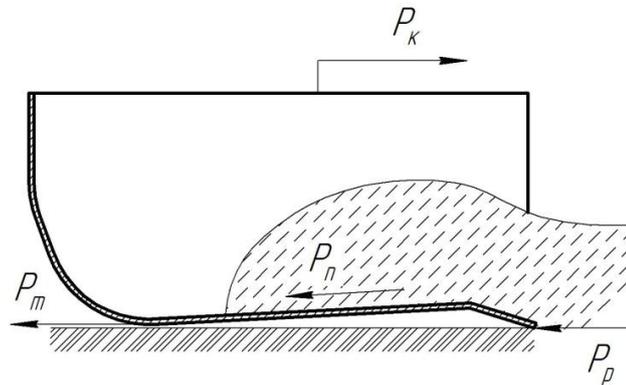


Рисунок 1.9 – Схема действия усилий на ковш при копании грунта

Составляющая $P_{\text{п}}$ в выражении (1.1) рассматривается как сумма усилия сопротивления продвижению стружки внутри ковша P_3 (усилие сопротивления ковша заполнению [65]), и силы, действующей на ковш со стороны призмы волочения $P_{\text{пв}}$.

Применительно к разработке подводных месторождений В. И. Баловнев предложил учитывать влияние гидростатического давления следующим образом [66]:

$$P_{\text{к}} = \frac{P_{\text{R}}}{P_{01}} (P_{\text{p}} + P_{\text{T}} + P_{\text{п}}),$$

где P_{R}/P_{01} – соотношение силы копания под гидростатическим давлением P_{R} к силе копания в атмосферных условиях P_{01} , определяемых по результатам физического моделирования в барокамере.

Д. Д. Тургумбаев исследовал процесс разработки глубоких траншей под слоем глинистого раствора при строительстве подземных сооружений способом «стена в грунте». Согласно результатам проведенных исследований, усилие

сопротивления грунта копанию плоским отвалом предложено определять с использованием следующего выражения [66]:

$$P_k = P_p + P_T + P_R.$$

При изучении процесса взаимодействия рабочих органов грунтообрабатывающих машин с грунтом в условиях действия гидростатического давления внимание многих исследователей было направлено на определение усилия резания. Так для определения касательной составляющей усилия резания грунта плоским отвалом (рис. 1.10) с учетом усилия гидродинамического сопротивления Д. Д. Тургумбаевым была предложена зависимость [67]:

$$P_p = \frac{1}{\sin \alpha} H_n b_n p K_s \operatorname{tg} \delta_T (\cos \alpha_p + \operatorname{tg} \varphi \cos \xi \cos \psi) + \\ + b_n h_0 \operatorname{ctg} \psi (p + C_0 - p \operatorname{tg} \psi) + \frac{1}{2} C_x \rho_c S_x v_0^2,$$

где H_n – высота подъема грунта отвалом;

p – гидростатическое давление;

δ_T – угол трения грунта по отвалу;

K_s – коэффициент смачивания поверхности передней грани отвала;

h_0 – глубина резания;

b_n – ширина отвала;

C_x – коэффициент гидродинамического сопротивления;

ρ_c – плотность жидкой среды;

S_x – проекция площади сечения отвала на плоскость, перпендикулярную направлению движения;

ξ – угол между передней гранью отвала и нормалью к плоскости сдвига;

α_p – угол резания;

v_0 – скорость резания.

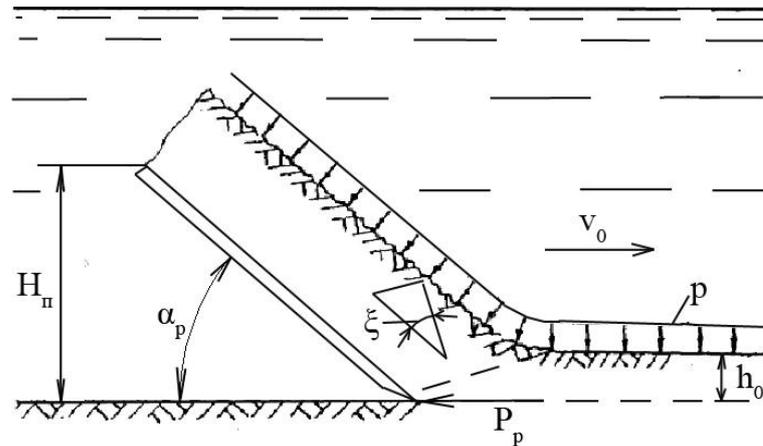


Рисунок 1.10 – Схема резания грунта плоским отвалом под гидростатическим давлением

Приведенная зависимость применима для расчета нагрузок на рабочие органы землеройных машин при разработке неводонасыщенного грунта под слоем поступающей в траншею жидкой среды (воды, глинистого раствора и т.п.).

По результатам совместных исследований с М. А. Гоцем, В. Г. Моисеенко предложил определять удельное касательное усилие резания водонасыщенных грунтов по следующему выражению [68]:

$$P_p = \frac{1,698\tau_0 h_0 [(2\alpha_p + 1) \sin \alpha_p - \cos \alpha_p]}{1 + 1,698 \sin \alpha_p},$$

где τ_0 – предельное напряжение сдвига (сцепление) грунта.

Приведенная зависимость предлагается для расчета нагрузок на рабочий орган при резании водонасыщенных грунтов, к которым также относятся донные отложения морей и океанов.

На основе обширных исследований, проведенных на базе крупных научно-исследовательских организаций СССР в лабораторных, а также полевых условиях в Балтийском, Черном морях и в Тихом океане, М. К. Сукачем предложено определять усилие резания водонасыщенных грунтов плоским ножом по следующей зависимости [69]:

$$P_p = b_H h \tau_0 \frac{\cos \alpha_p + 1}{\sin \alpha_p} + \frac{2}{9} b_H \eta v_0 \left(\sqrt{\frac{9h_0 \tau_0}{\eta v_0} + 1} + 1 \right) \frac{3 \cos \alpha_p + 1}{\sin \alpha_p} + b_H (\rho - \rho_B) g \frac{h_0^2}{2}, \quad (1.2)$$

где ρ и ρ_B – соответственно плотность грунта и воды;

η – динамический коэффициент структурной вязкости грунта;

g – ускорение свободного падения.

Приведенная формула наиболее полно учитывает реологические особенности пластичных водонасыщенных грунтов, к которым относятся в том числе и ГВОМО.

В. И. Баловневым, А. А. Карошкиным, В. А. Лобановым, С. П. Огородниковым, А. И. Коптеловым и др. исследователями предложены свои математические модели для определения сил резания грунта под водой для различных типов и режимов работы землеройных машин [66, 70]. Однако многие исследователи, изучавшие процесс разработки грунта ковшовыми исполнительными органами в условиях суши, в своих работах отмечали значительное возрастание усилия сопротивления грунта копанию по мере заполнения ковша при неизменных параметрах процесса резания [63, 71 – 74].

В работе [63] приведены обобщенные схемы случайных процессов изменения усилий при взаимодействии рабочих органов с грунтом, полученные при испытании рабочих органов различных типов землеройных машин в широком диапазоне грунтовых условий. При разработке грунтов ковшом драглайна функция математического ожидания тягового усилия $P_{\text{тяг}}$ от пути копания s монотонно возрастает (рис. 1.11, а). Для скреперов и бульдозеров данная функция практически постоянна (рис. 1.11, б), за исключением начального участка, соответствующего врезанию рабочего органа в грунтовый массив (15 – 30 % пути копания в зависимости от конструкции рабочего органа и системы его привода). При этом удельное усилие копания, определяемое как отношение усилия копания к площади поперечного сечения срезаемой стружки, в конце пути ко-

пания может в несколько раз превышать соответствующее значение на начальном участке после врезания рабочего органа в грунт. Это обусловлено увеличением составляющих P_T и P_{II} в общем балансе сопротивлений грунта копанию (см. (1.1)).

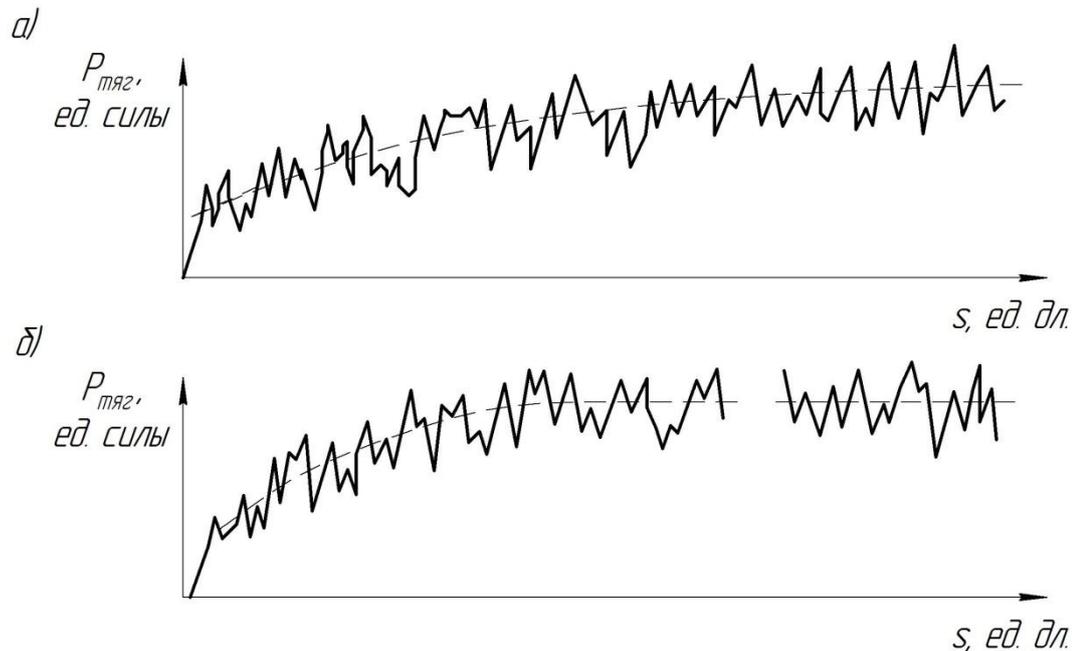


Рисунок 1.11 – Обобщенные схемы случайных процессов изменения усилий при взаимодействии рабочих органов с грунтом для драглайна (а), скрепера и бульдозера (б)

Для отвально-ковшовых рабочих органов (бульдозеров, скреперов, экскаваторов) доля составляющих P_T и P_{II} в общем балансе сопротивлений может составлять от 30 до 70% в зависимости от прочности грунта [75]. С увеличением прочности грунта доля составляющих P_T и P_{II} уменьшается.

Прочность грунтов определяется структурными связями частиц [76]. Поэтому очевидно, что при копании скальных и мерзлых пород с жесткими кристаллизационными связями основную часть общего усилия копания будет составлять усилие резания. Структурные связи пылевато-глинистых грунтов имеют более сложную природу и в большей степени определяются водно-коллоидными и цементационными связями, прочность которых сравнительно невелика. Поэтому при разработке малопрочных грунтов, как супеси, суглинки,

мягкие глины, может преобладать как усилие резания, так и усилие сопротивления заполнению и перемещению рабочего органа (в зависимости от конструктивных особенностей рабочего органа и параметров процесса резания).

А. Н. Зеленин описал процесс заполнения ковша при копании связных и супесчаных грунтов [77]. Согласно его наблюдениям, заполнение ковшей происходит под действием двух внешних сил: силы, создаваемой самой стружкой, и силы, создаваемой призмой волочения грунта перед ковшом (рис. 1.12). В глинистых грунтах преобладает первая сила, в песчаных – вторая. Усилие сопротивление перемещению призмы волочения и движению грунта в ковше А. Н. Зеленин предлагает определять по выражению:

$$P_{\Pi} = K_{\text{сж}} S_{\text{стр}} + V_{\text{пв}} \rho \operatorname{tg} \psi,$$

где $K_{\text{сж}}$ – удельная сопротивляемость разрабатываемого пласта продольному сжатию – переменная величина, возрастающая с уменьшением длины срезаемого пласта и увеличением пригруза, определяется экспериментально;
 $S_{\text{стр}}$ – площадь поперечного сечения срезаемой стружки;
 $\operatorname{tg} \psi$ – коэффициент внешнего трения грунта по грунту;
 $V_{\text{пв}}$ – объем призмы волочения.

В этой же работе обобщаются результаты наблюдений процесса заполнения ковша: при разработке тяжелых глинистых грунтов достигается высокий коэффициент наполнения ковшей, заполнение идет спокойно и равномерно, призма волочения незначительна или отсутствует совсем; при работе на песчаных грунтах коэффициент наполнения ковшей значительно ниже, а сам процесс их заполнения – пульсирующий.

Водонасыщенные грунты на дне водоемов обладают сравнительно слабыми структурными связями, поэтому основная часть сопротивления при их резании обусловлена трением срезаемого пласта о поверхность исполнительного органа грунторазрабатывающей машины, как это показано в работе [66] при выводе выражения (1.2). Поскольку площадь режущей части ковша, как правило,

намного меньше площади поверхностей внутреннего объема ковша, с которыми взаимодействует срезаемый пласт, то, очевидно, в балансе сопротивлений при копании пластичных водонасыщенных грунтов должны преобладать составляющие P_{Π} и P_{τ} .

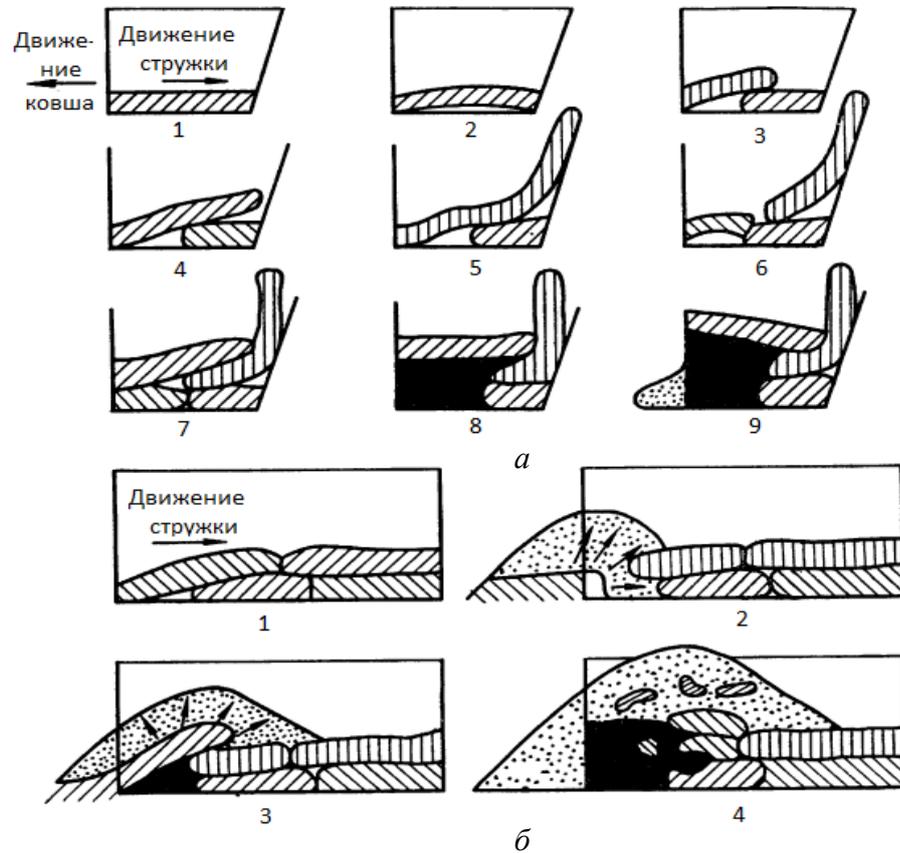


Рисунок 1.12 – Схемы заполнения ковшей связными (а) и супесчаными (б) грунтами

При разработке обводненных месторождений канатно-скреперными установками в работе [78] рекомендовано определять геометрические параметры ковша по формулам Д. И. Федорова для ковшей драглайна [63], мм:

$$l_k = 1650 \sqrt[3]{V_k};$$

$$b = 1050 \sqrt[3]{V_k};$$

$$h_k = 750 \sqrt[3]{V_k},$$

где l_k , b , h_k – соответственно длина, ширина и высота ковша;

V_k – емкость ковша в м^3 .

Однако приведенные зависимости были получены применительно к разработке грунта на суше и не учитывают особенностей процесса копания грунта в подводных условиях, которые в значительной степени отличаются [79 – 81].

Применительно к разработке обводненных россыпных месторождений, В. Б. Добрецовым и Д. С. Опышко на основании анализа параметров стандартных скреперных ковшей открытого типа (с тремя открытыми поверхностями) были получены формулы для определения геометрических параметров ковша скрепера в зависимости от его массы [82]:

$$V = 0,0021m_k, \text{ м}^3;$$

$$l_k = 306,36m_k, \text{ мм};$$

$$b = 220m_k, \text{ мм},$$

где m_k – масса ковша в кг.

Для определения мощности тяговой лебедки канатно-скреперной установки на практике используют примерный расчет [83]: при разработке песков и илов мощность двигателя лебедки на 1 кг массы ковша должна составлять около 105 Вт; для предварительно разрушенных плотных и скальных пород – 184 Вт.

В работе [84] приведено обоснование параметров торообразного ковша канатно-скреперной установки для разработки озерных сапропелей (рис. 1.7). Заполнение такого ковша происходит при его повороте относительно осей крепления (т. О). В данной работе показана необходимость учета таких свойств разрабатываемого грунта как липкость и влажность, оказывающих значительное влияние на коэффициент наполнения ковша.

При проведении экспериментальных исследований по резанию пластичных водонасыщенных грунтов плоским ножом было установлено, что при достижении некоторого состояния процесс резания грунта переходит в процесс его раздвигания без отделения стружки [81]. При этом грунт перемещается в стороны от режущего инструмента, образуя так называемые «валики» по бокам.

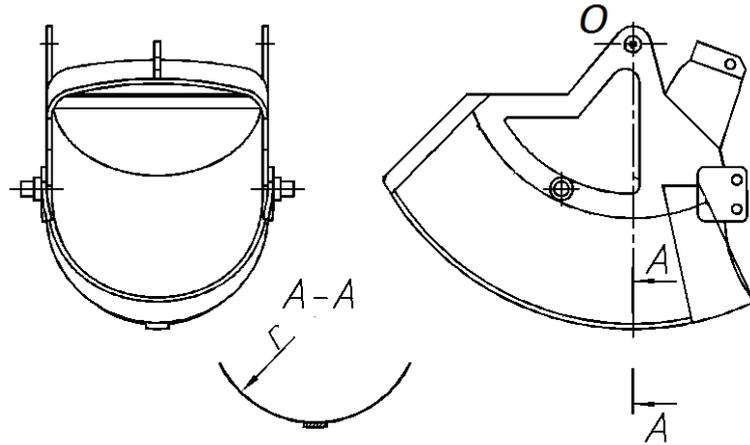


Рисунок 1.13 – Торообразный ковш для добычи сапропелей канатно-скреперной установкой

Условие перехода процесса резания в его раздвигание имеет вид [81]:

$$p_0 \geq 2\tau_0, \quad (1.3)$$

где p_0 – давление призмы волочения на поверхность донного грунта ABC (рис. 1.14).

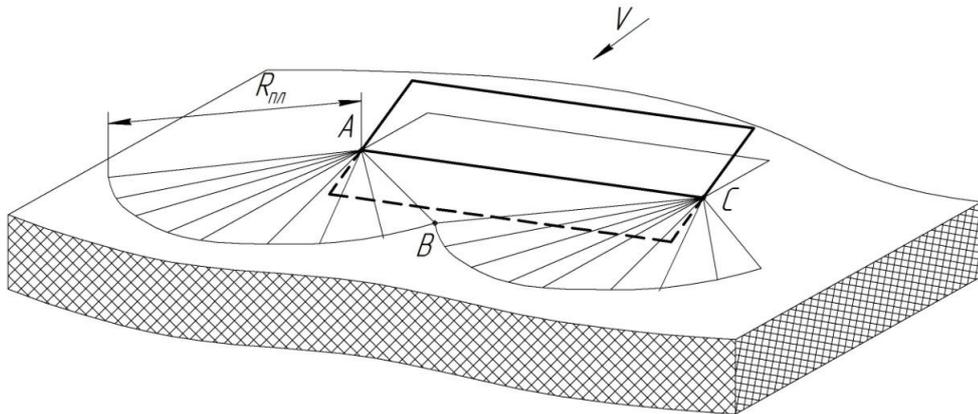


Рисунок 1.14 – Напряженное состояние грунта перед плоским ножом

Размер пластической зоны $R_{пл}$ составляет:

$$R_{пл} = \frac{b_H}{\sqrt{2}} \quad (1.4)$$

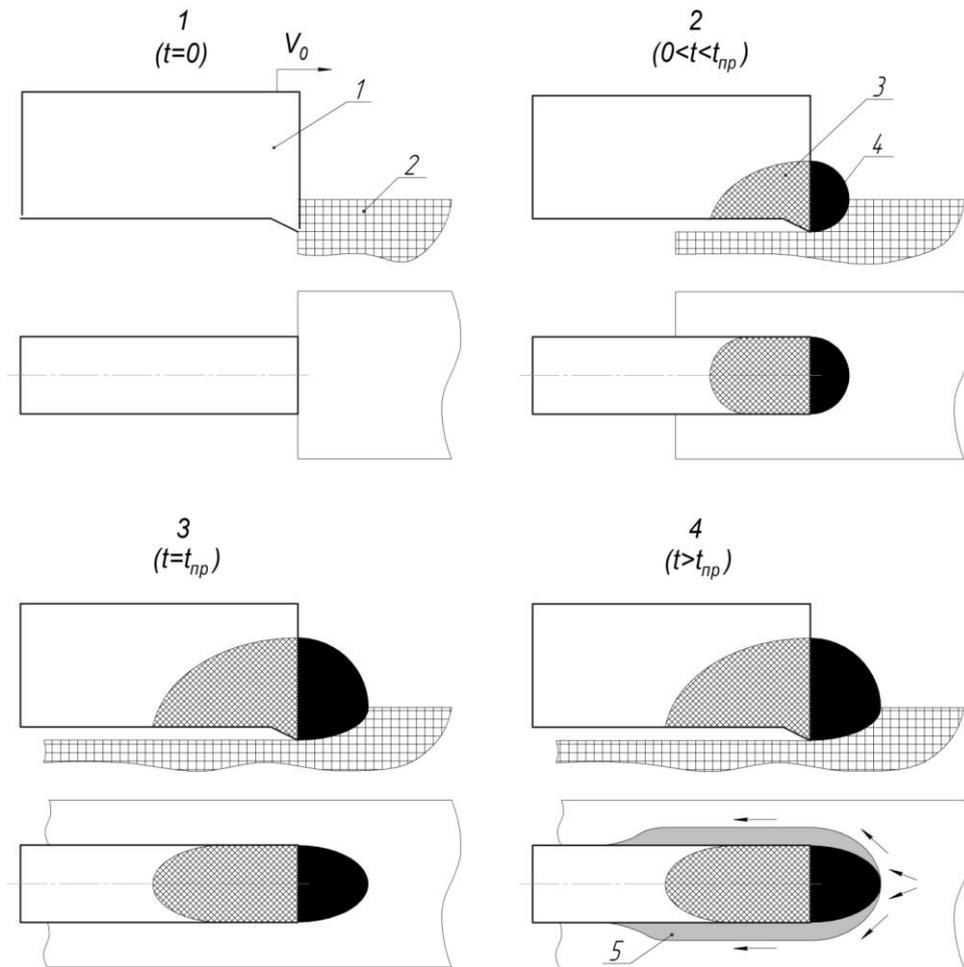
Давление p_0 в выражении (1.3) определяется высотой призмы волочения перед ножом и плотностью разрабатываемого грунта. Если рассматривать ковш

как сочетание ножа (режущей части) и емкости, ограниченной внутренними поверхностями днища, задней и боковых стенок ковша, то условие (1.3) должно достигаться при определенных геометрических параметрах тела грунта в ковше, которые возрастают с увеличением высоты призмы волочения.

Таким образом, при копании пластичных водонасыщенных грунтов при достижении некоторых геометрических параметров тела грунта в ковше его заполнение должно прекращаться, а процесс резания грунта должен переходить в процесс его раздвигания без отделения стружки. Такое состояние в дальнейшем будем называть состоянием предельного заполнения ковша, а параметры заполнения, соответствующие данному состоянию при копании пластичного водонасыщенного грунта ненаклоненным к горизонту ковшом определенной ширины при сколь угодно больших его прочих геометрических размерах – предельными параметрами заполнения. К предельным параметрам заполнения можно отнести геометрические параметры (высоту, длину) и объем тела грунта в ковше и призмы волочения, время заполнения, путь копания и др. Схема достижения состояния предельного заполнения ковша при копании пластичных водонасыщенных грунтов приведена на рис. 1.15.

Очевидно, что для обеспечения высокого коэффициента наполнения, определяемого как отношение объема грунта в ковше к емкости ковша, геометрические параметры ковша не должны превышать соответствующие предельные параметры тела грунта, что необходимо учитывать при проектировании (особенно при разработке ковшей большой емкости). Определение влияния ширины ковша, свойств грунта, а также параметров резания на рациональные длину и высоту ковша требует проведения теоретических и экспериментальных исследований.

Проведенный анализ литературных источников показывает, что процесс заполнения ковша при разработке пластичных водонасыщенных грунтов и связанные с ним нагрузки на ковш исследованы недостаточно, что не позволяет обосновать параметры ковшей землечерпательных снарядов для разработки ГВОМО. Зависимости Д. И. Федорова для определения габаритных размеров



1 – ковш; 2 – грунт; 3 – тело грунта в ковше; 4 – призма волочения; 5 – грунтовые валки;
 t – продолжительность процесса копания; t_{np} – предельное время заполнения ковша

Рисунок 1.15 – Схема достижения состояния предельного заполнения ковша при копании пластичных водонасыщенных грунтов

ковша драглайна, которые получили наибольшее распространение, в том числе, при обосновании параметров ковшей канатно-скреперных установок для разработки обводненных континентальных и прибрежных россыпных месторождений, были получены применительно к разработке влажных грунтов на суше и не учитывают особенностей процесса копания грунта в подводных условиях. Более того, данные зависимости были разработаны для конкретного типа землеройных машин – драглайнов, поэтому учитывают особенности их работы в условиях, которые могут отличаться от схем разработки залежей полезных ископаемых землечерпательными снарядами на больших глубинах.

1.4 Цель и задачи исследований

Исходя из изложенного, целью настоящей работы является обоснование параметров ковшей землечерпательных снарядов для повышения их производительности при глубоководной добыче органо-минеральных осадков на основе установленных аналитических зависимостей рациональных геометрических параметров ковша и усилия сопротивления его заполнению от параметров резания и свойств разрабатываемого грунта, и разработка инженерной методики расчета геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и их нагрузок при глубоководной добыче органо-минеральных осадков.

Для осуществления поставленной цели решаются следующие задачи:

- установление закономерностей процесса заполнения ковша при копании пластичных водонасыщенных грунтов;
- установление аналитических зависимостей рациональных геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и усилия сопротивления ковша заполнению от параметров резания и свойств разрабатываемого грунта;
- проведение экспериментальных исследований процесса заполнения ковша при копании ГВОМО в лабораторных условиях с использованием уменьшенных физических моделей ковшей и в реальных условиях эксплуатации одноковшового землечерпательного снаряда в Черном море. Оценка адекватности разработанных математических моделей путем сопоставления результатов расчетов и экспериментальных исследований;
- разработка и внедрение инженерной методики расчета геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и нагрузок на ковш при копании глубоководных органо-минеральных осадков.

РАЗДЕЛ 2

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОВШЕЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОСАДКОВ

2.1 Реологическая модель грунтовой среды

Поскольку формирование ГВОМО в Черном море происходило в процессе естественного осадконакопления (седиментогенеза), их поры практически полностью насыщены водой. Высокая пористость и водонасыщенность грунтов обеспечивают независимость их свойств от гидростатического давления [66, 68]. При быстром нагружении образцов ГВОМО в начальный момент времени приложенная нагрузка воспринимается поровой водой и постепенно, по мере ее оттока, передается на скелет грунта. Для водонасыщенного грунта при скорости деформирования более 0,025 мм/с угол внутреннего трения можно принять равным нулю. Реальные скорости резания грунта на несколько порядков превышают величину указанной скорости деформирования (к примеру, средняя скорость движения черпаков многочерпаковой драги находится в пределах 0,15 – 0,5 м/с [85], подводных скреперов – не более 1,2 – 1,5 м/с [83]). Поэтому для характеристики предельного напряженного состояния ГВОМО может быть использован критерий Треска, согласно которому пластическое течение грунта наступает при достижении максимальными касательными напряжениями величины предельного напряжения сдвига (сцепления) грунта. Данное условие имеет вид [80, 82]:

$$\tau_{max} \geq \tau_0, \quad (2.1)$$

где τ_{max} – максимальные касательные напряжения.

Наиболее полно реологические свойства водонасыщенных осадочных грунтов могут быть охарактеризованы свойствами вязкопластичной среды (тело Бингама), подчиняющейся одновременно двум законам – течения нелинейной вязкой жидкости и структурированного твердого тела, обладающего сцеп-

лением [66, 87]. Вязкопластичная модель подчиняется закону Бингама-Шведова:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{пл}} \dot{\lambda}, \quad (2.2)$$

где τ – касательные напряжения в грунте;

$\eta_{\text{пл}}$ – пластическая вязкость грунта;

$\dot{\lambda}$ – скорость угловой деформации грунта;

При величине касательных напряжений $\tau < \tau_0$ грунт можно рассматривать как твердое тело, проявляющее упругие свойства (в пределах прочности структурных связей).

Таким образом, при изучении процесса заполнения ковша при $\tau < \tau_0$ ГВОМО будем рассматривать как твердое тело, при величине $\tau \geq \tau_0$ – как нелинейную вязкую жидкость.

2.2 Исследование напряженного состояния стружки

Постановка задачи. При копании водонасыщенного грунта стружка поступает в ненаклоненный к горизонту ковш с плоским днищем, который перемещается горизонтально с постоянной скоростью v_0 . Глубина резания – h_0 . Предельное напряжение сдвига грунта равно τ_0 , его пластическая вязкость – $\eta_{\text{пл}}$, усредненная плотность грунта в воде $\Delta\rho$. Необходимо исследовать напряженное состояние стружки и установить закономерности формирования тела грунта в ковше.

Рассматриваем процесс заполнения ковша в промежутке времени $0 < t < t_1$ – от момента его врезания в грунт и до наступления предельного напряженного состояния в твердой области срезаемой стружки.

Для решения задачи примем следующие допущения:

- 1) грунт рассматриваем как однородную вязкопластичную среду;
- 2) в промежутке времени $0 < t < t_1$ твердая область стружки движется равномерно, поступательно;

- 3) касательные напряжения в твердой области стружки находятся в линейной зависимости от ординаты;
- 4) твердая область стружки испытывает деформацию чистого сдвига.

Последнее допущение предполагает, что деформирование твердого тела, характеризующего область стружки, напряжения в которой $\tau < \tau_0$, происходит по схеме, приведенной на рис. 2.1.

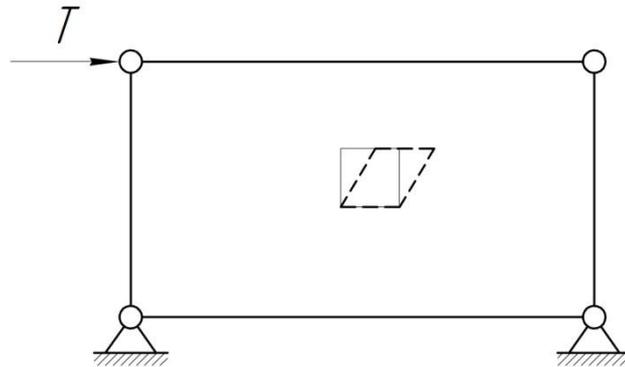


Рисунок 2.1 – Деформирование твердого тела при чистом сдвиге

Схема для расчета приведена на рис. 2.2. Срезаемую стружку рассматриваем как полупространство. Систему координат совместим с грунтом таким образом, чтобы ось абсцисс совпала с поверхностью ковша и была направлена в сторону его движения, ось ординат направлена вверх.

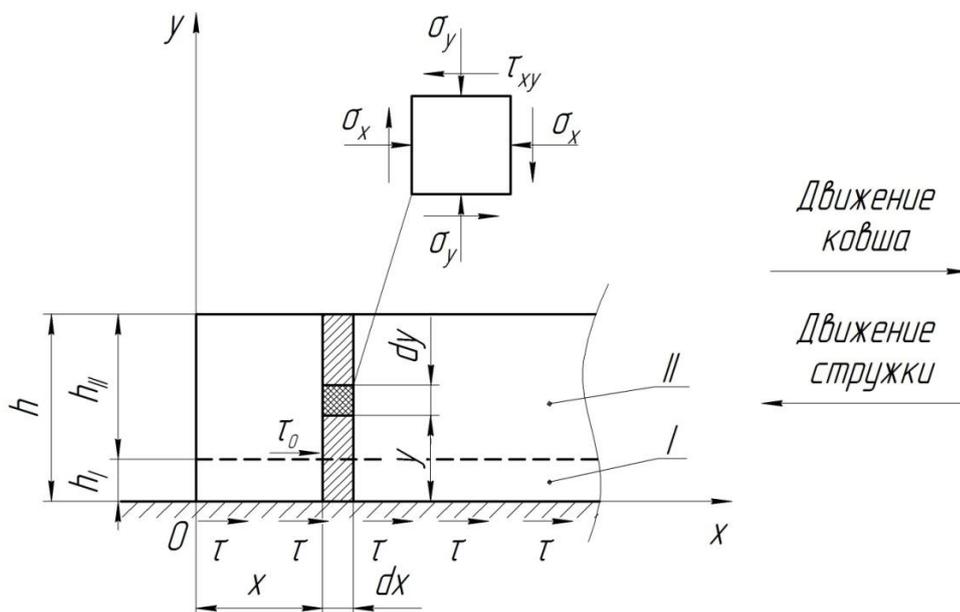


Рисунок 2.2 – Расчетная схема к определению напряжений в срезаемой стружке

Разделим стружку в ковше на две области – область вязкопластического течения грунта I , толщиной h_I , распределение скоростей в которой изменяется по оси ординат ($v_I(y) \neq \text{const}$), и твердую область (твердое тело) II , толщиной h_{II} , скорость движения частиц грунта в которой относительно системы координат равна нулю. Общая толщина стружки в ковше равна h . Граничное условие на границе разделения областей I и II имеет вид:

$$\tau_{xy}(h_I) = \tau_0. \quad (2.3)$$

Исследуем напряженное состояние твердого тела. Для этого выделим элемент грунта, длиной dx и высотой dy . При чистом сдвиге связь между нормальными напряжениями σ_x и σ_y имеет вид [88]:

$$\sigma_x = -\sigma_y. \quad (2.4)$$

Нормальное напряжение $\sigma_z = 0$, поэтому запишем условие равновесия для плоского напряженного состояния:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X = 0; \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0, \quad (2.6)$$

где X и Y – проекции сил, действующих на единицу объема, соответственно на оси x и y .

Поскольку движение равномерное, из объемных сил будем учитывать только силы тяжести. Для принятой расчетной схемы проекции объемных сил будут иметь следующие значения:

$$X = 0; \quad (2.7)$$

$$Y = -\frac{dG}{dx \cdot dy} = -\Delta \rho g, \quad (2.8)$$

где dG – вес грунта, оказывающего давление на поверхность длиной dx выделенного элемента.

Поскольку $\tau_{xy}(h_l) = \tau_0$, очевидно, что для принятой расчетной схемы справедливой является запись:

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0. \quad (2.9)$$

Из уравнения (2.6) с учетом (2.8) и (2.9) находим $\partial \sigma_y / \partial y$:

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \Delta \rho g. \quad (2.10)$$

Условие равновесия на поверхности твердого тела имеет вид [89]:

$$l\sigma_x + m\tau_{xy} = p_x; \quad (2.11)$$

$$l\tau_{xy} + m\sigma_y = p_y, \quad (2.12)$$

где $l = \cos(\widehat{x, \widehat{n}'})$ и $m = \cos(\widehat{y, \widehat{n}'})$ – направляющие косинусы (\widehat{n}' – нормаль к свободной поверхности);

p_x и p_y – проекции поверхностных сил, отнесенных к единице площади.

В рассматриваемой задаче для точки с координатами $(0; h)$ для верхней границы $l = p_x = p_y = 0$, $m = 1$, поэтому условия равновесия (2.11) и (2.12) можно записать как:

$$\tau_{xy}|_{x=0, y=h} = 0; \quad (2.13)$$

$$\sigma_y|_{x=0, y=h} = 0. \quad (2.14)$$

Для точки с координатами $(0; h)$ для вертикальной свободной поверхности из равенств (2.11) и (2.12) получим граничные условия:

$$\sigma_x|_{x=0, y=h} = 0; \quad (2.15)$$

$$\tau_{xy}|_{x=0, y=h} = 0.$$

Запишем полный дифференциал касательных напряжений:

$$d\tau_{xy} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dx + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy.$$

или с учетом (2.9):

$$d\tau_{xy} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy. \quad (2.16)$$

Если справедливо допущение о линейной зависимости функции касательных напряжений от ординаты, то, проинтегрировав выражение (2.16), получим зависимость:

$$\tau_{xy} = Ay + B, \quad (2.17)$$

где A – коэффициент;

B – постоянная.

Подставив граничные условия (2.3) и (2.13) в зависимость (2.17) находим коэффициенты A и B , с учетом которых зависимость (2.17) окончательно примет вид:

$$\tau_{xy} = \tau_0 \left(1 - \frac{y - h_I}{h_{II}} \right). \quad (2.18)$$

Возьмем производную от τ_{xy} по y и подставим полученную зависимость в уравнение (2.5), после чего с учетом (2.7) получим зависимость:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = -\frac{\tau_0}{h_{II}}. \quad (2.19)$$

Запишем полный дифференциал функции σ_x :

$$d\sigma_x = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx + \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} dy. \quad (2.20)$$

На основании (2.4) и (2.10) справедливой является запись:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial y} = -\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = -\Delta \rho g. \quad (2.21)$$

С учетом (2.19) и (2.21) выражение (2.20) примет вид:

$$d\sigma_x = -\frac{\tau_0}{h_{II}} dx - \Delta\rho g dy. \quad (2.22)$$

Проинтегрировав выражение (2.22) получим зависимость:

$$\sigma_x = -\frac{\tau_0}{h_{II}} x - \Delta\rho g y + C_1, \quad (2.23)$$

где C_1 – постоянная.

Подставив граничное условие (2.15) в выражение (2.23), находим постоянную C_1 , с учетом которой после преобразований можно записать выражение для определения σ_x :

$$\sigma_x = \Delta\rho g(h - y) - \frac{\tau_0}{h_{II}} x. \quad (2.24)$$

Выражение для определения σ_y на основании (2.3) примет вид:

$$\sigma_y = -\Delta\rho g(h - y) + \frac{\tau_0}{h_{II}} x. \quad (2.25)$$

Проанализируем полученные зависимости. Первый член в выражениях (2.24) и (2.25) характеризует составляющую нормальных напряжений от веса вышележащего грунта, второй – от трения стружки о поверхность ковша. Обозначим указанные составляющие соответственно $\sigma_{xG} = -\sigma_{yG}$ и $-\sigma_{xT} = \sigma_{yT}$. Первая составляющая уменьшается по модулю с увеличением ординаты, поскольку уменьшается толщина покрывающего слоя, и при $y = h$ принимает значение 0. Вторая составляющая прямо пропорционально зависит от x , поскольку площадь трения, а соответственно и сопротивление перемещению, с увеличением длины стружки также возрастают.

Касательные напряжения с увеличением ординаты уменьшаются, принимая нулевое значение при $y = h$. Максимальное значение касательных напряжений в области II не превышают величины сцепления грунта, так что при $\tau_{xy}(h_I) = \tau_0$.

Решение задачи по исследованию напряженного состояния и скорости движения частиц грунта в области I для случая установившегося движения получено М. К. Сукачем [66]. Для системы координат, связанной с поверхностью ковша, ось абсцисс которой направлена коллинеарно вектору скорости движения грунта, а ось ординат – перпендикулярно поверхности ковша, функция скорости имеет вид:

$$v(y) = 2y \frac{Q\tau_0}{\eta_{пл}} - y^2 \frac{Q^2\tau_0}{\eta_{пл}Kh_0}, \quad (2.26)$$

где критерии подобия K и Q рассчитываются по формулам:

$$K = \frac{\eta_{пл}v_0}{h_0\tau_0}; \quad (2.27)$$

$$Q = \sqrt{K + \frac{K^2}{9} + \frac{K}{3}}. \quad (2.28)$$

Толщины областей I и II определяются выражениями:

$$h_I = \frac{K}{Q} h_0; \quad (2.29)$$

$$h_{II} = \frac{K}{Q^2} h_0. \quad (2.30)$$

Как показывает выражение (2.26), распределение скорости движения частиц грунта в области вязкопластического течения грунта описывается параболой, причем $v(0) = 0$, $v(h_I) = v_0$. Такой вид функции распределения скорости вдоль нормали к поверхности ковша будет использован в дальнейшем без дополнительных доказательств.

Для характеристики предельного напряженного состояния области II стружки используем условие текучести (2.1):

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x^{II} - \sigma_y^{II})^2 + 4(\tau_{xy}^{II})^2} \leq \tau_0. \quad (2.31)$$

где индекс II указывает на соответствующие напряжения в твердой области стружки (индекс I будет обозначать напряжения в области вязкопластического течения грунта).

Подставив выражения (2.18), (2.24) и (2.25) в условие (2.31), после преобразований получим:

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\Delta\rho g(h-y) - \frac{\tau_0}{h_{II}}x\right)^2 + \tau_0^2\left(1 - \frac{y-h_I}{h_{II}}\right)^2} \leq \tau_0. \quad (2.32)$$

Определим вид функции $x = f(y)$, характеризующую линию скольжения, вдоль которой касательные напряжения $\tau_{max} = \tau_0$. На основании (2.32) для $\tau_{max} = \tau_0$ составим уравнение, которое решим относительно неизвестной x :

$$\left(\Delta\rho g(h-y) - \frac{\tau_0}{h_{II}}x\right)^2 + \tau_0^2\left(1 - \frac{y-h_I}{h_{II}}\right)^2 - \tau_0^2 = 0 \quad (2.33)$$

Корни квадратного уравнения (2.33) следующие:

$$x_{1,2} = \frac{h_{II}}{\tau_0} \left(\Delta\rho g(h-y) \pm \tau_0 \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y-h_I}{h_{II}}\right)^2} \right). \quad (2.34)$$

Физический смысл имеет только первый корень, поэтому уравнение линии скольжения окончательно примет вид:

$$x(y) = \frac{h_{II}}{\tau_0} \left(\Delta\rho g(h-y) + \tau_0 \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y-h_I}{h_{II}}\right)^2} \right). \quad (2.35)$$

Функция (2.35) представляет собой уравнение параболы, ветви которой направлены к оси ординат. Длину стружки в ковше, при которой происходит срез твердой области стружки, обозначим через $x_{кр}$ (рис. 2.3).

Значение $x_{кр}$ определим из уравнения линии скольжения (2.35), полагая $y = h$:

$$x_{кр} = x(h) = h_{II}. \quad (2.36)$$

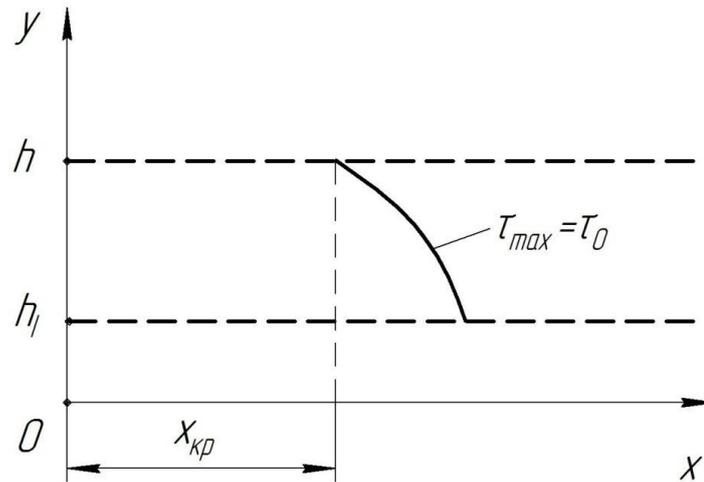


Рисунок 2.3 – Схема среза твердой области стружки

Проанализируем полученный результат. При поступлении стружки в ковш с возрастанием ее длины увеличивается сопротивление перемещению грунта T , следствием чего является рост нормальных напряжений. При $x < x_{кр}$ вес вышележащего грунта вместе с силой сцепления частиц уравнивают составляющую нормальных напряжений σ_{yT}^{II} . При достижении длиной стружки значения $x \geq x_{кр}$, вес грунта и силы сцепления не способны компенсировать указанную составляющую, что приводит к образованию и стремительному развитию зоны скольжения. Вследствие этого происходит срез твердой области стружки и перемещение грунта на некоторую высоту Δh . Перемещение грунта в вертикальном направлении происходит до тех пор, пока вес грунта не уравнивает составляющую нормальных напряжений σ_{yT}^{II} , после чего грунт продолжит поступать в ковш в горизонтальном направлении. Как показывают наблюдения, при копании пластичного водонасыщенного грунта перемещение частиц грунта в горизонтальном и вертикальном направлениях происходит одновременно.

Таким образом, можно сформулировать закономерность процесса заполнения ковша при копании пластичных водонасыщенных грунтов: продвижение стружки вдоль ковша происходит лишь при достаточной величине ее толщины, требуемой для уравнивания за счет собственного веса грунта вертикальной составляющей нормальных напряжений от трения стружки о поверхности внутреннего объема ковша. В противном случае толщина стружки увеличивается до выпол-

нения условия продвижения грунта вдоль ковша. Этим обусловлено увеличение толщины стружки в ковше с ростом ее длины.

2.3 Формирование тела грунта в ковше

Поставим задачу: установить зависимость толщины стружки в ковше шириной b от ее длины (ковш не наклонен к горизонту).

Принятые допущения:

- 1) значение $x_{кр}$ для трехмерной задачи равно h_{II} ;
- 2) движение стружки вдоль ковша происходит при выполнении условия $\sigma_{сж} < \sigma_B$ (где $\sigma_{сж}$ – напряжение сжатия, численно равное отношению сопротивления перемещению твердой области стружки в ковш к площади ее поперечного сечения, σ_B – предел прочности твердой области стружки на сжатие);
- 3) рассматриваются два расчетных случая: $b_I = h_I$ (где b_I – толщина зоны вязкопластического течения грунта у боковой стенки ковша при длине срезаемой стружки меньше $x_{кр}$) и $2b_I/b_{II} = h_I/h_{II} = Q$ (где b_{II} – ширина твердой области стружки в плоскости, параллельной днищу ковша, при длине срезаемой стружки меньше $x_{кр}$).

В отличие от плоской задачи, при рассмотрении трехмерного случая заполнения необходимо учитывать трение срезаемой стружки о боковые стенки ковша (рис. 2.4). Трение обуславливает наличие зоны вязкопластического течения грунта у боковых стенок толщиной b_I . При этом распределение касательных напряжений в стружке будет иметь сложный характер. Недостаточное количество граничных условий для точного решения обусловило необходимость поиска приближенного решения, при котором рассматриваются два расчетных случая: $b_I = h_I$ и $2b_I/b_{II} = h_I/h_{II} = Q$. Окончательный выбор расчетной модели должен быть основан на результатах анализа данных, полученных в ходе экспериментальных исследований.

Первый расчетный случай. Толщина области вязкопластического течения грунта у боковых стенок определяется зависимостью:

$$b_I = h_I = \frac{K}{Q} h_0. \quad (3.37)$$

Ширину твердой области стружки находим по выражению:

$$b_{II} = b - 2b_I = b - \frac{2K}{Q} h_0. \quad (2.38)$$

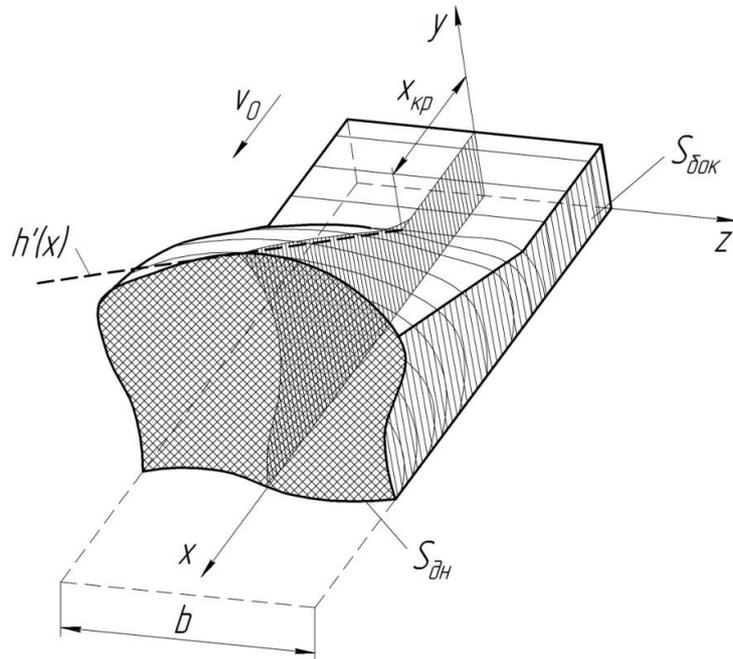


Рисунок 2.4 – Расчетная схема к трехмерной задаче о заполнении ковша

Для обеспечения выполнения условия сохранения расхода потока несжимаемой среды рассмотрим расход грунта $Q_{гр}$ через перпендикулярное днищу ковша сечение при $x < x_{кр}$. Формула для определения расхода имеет вид:

$$Q_{гр} = v_{ср} S_{стр}, \quad (2.39)$$

где $v_{ср}$ – средняя скорость потока грунта в рассматриваемом сечении;

$S_{стр}$ – площадь поперечного сечения срезаемой стружки.

Средняя скорость представляет собой воображаемую скорость, которая определяется как высота выровненной эпюры скоростей. Распределение скоростей частиц грунта v_x по сечению потока грунта изображено на рис. 2.5.

Среднюю скорость определяем по выражению:

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_x^{II} S_{II} + \int_{S_I} v_x^I(S_I) dS_I}{S_{\text{сгр}}}, \quad (2.40)$$

где S_I и S_{II} – общая площадь поперечного сечения соответственно области вязкопластического течения грунта и твердой области стружки;

v_x^I и v_x^{II} – скорость движения частиц грунта вдоль оси абсцисс соответственно в области I и II .

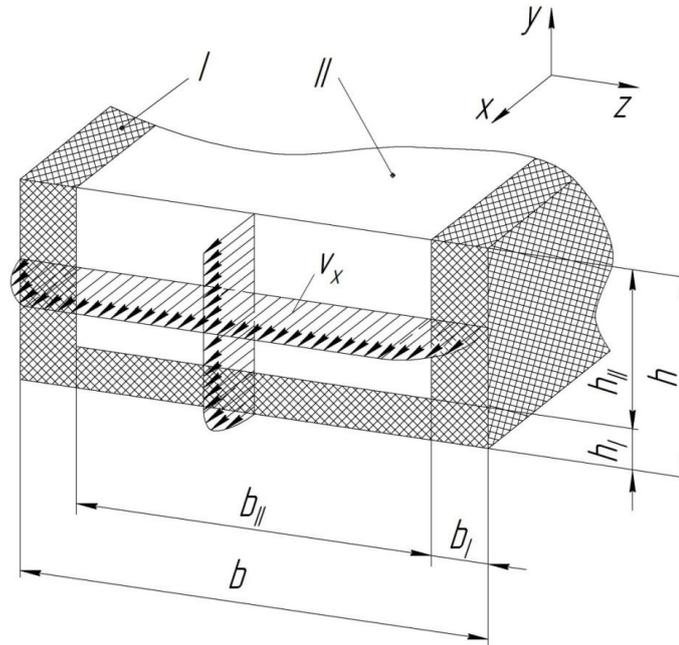


Рисунок 2.5 – Распределение скоростей v_x по сечению срезаемой стружки

Функцию $v_x(y)$ можно переписать в более удобном для дальнейших расчетов виде, преобразовав (2.26) с учетом (2.29) и (2.30):

$$v_x(y) = v_0 \left[2 \frac{y}{h_I} - \left(\frac{y}{h_I} \right)^2 \right]. \quad (2.41)$$

Скорость движения грунта в твердой области $v_x^{II} = v_0$. Раскроем интеграл в выражении (2.40), используя выражение (2.41):

$$\int_{S_I} v_x^I(S_I) dS_I = (2h_{II} + b) \int_0^{h_I} v_0 \left[2 \frac{y}{h_I} - \left(\frac{y}{h_I} \right)^2 \right] dy = \frac{2}{3} v_0 h_I (2h_{II} + b),$$

или, с учетом (2.29) и (2.30):

$$\int_{S_I} v_x^I(S_I) dS_I = \frac{2v_0 h_0 K}{3Q} \left(\frac{2h_0 K}{Q^2} + b \right). \quad (2.42)$$

Подставив (2.42) в (2.40) получим зависимость:

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_0 S_{II} + \frac{2v_0 h_0 K}{3Q} \left(\frac{2h_0 K}{Q^2} + b \right)}{S_{\text{ср}}} = \frac{v_0 \left[\frac{1}{Q} \left(b - \frac{2K}{Q} h_0 \right) + \frac{2}{3} \left(\frac{2h_0 K}{Q^2} + b \right) \right]}{b \left(1 + \frac{1}{Q} \right)}. \quad (2.43)$$

Расход грунта q через сечение площадью $h_0 b$ «на бесконечности» от ковша, определяется формулой:

$$q = h_0 b v_0. \quad (2.44)$$

Расход грунта через сечение, перпендикулярное днищу ковша, при $x < x_{\text{кр}}$ будет равен:

$$q = h b v_{\text{ср}}. \quad (2.45)$$

Приравнивая правые части формул (2.44) и (2.45), выразим толщину стружки при $x < x_{\text{кр}}$:

$$h = h_0 \frac{v_0}{v_{\text{ср}}}, \quad (2.46)$$

или с учетом (2.43) после преобразований:

$$h = \frac{3h_0(Q+1)}{2 \left(Q - \frac{Kh_0}{bQ} \right) + 3}; \quad (2.47)$$

$$h_{II} = h - h_I = \left[\frac{3(Q+1)}{2 \left(Q - \frac{Kh_0}{bQ} \right) + 3} - \frac{K}{Q} \right] h_0. \quad (2.48)$$

Таким образом, определены параметры h и h_{II} для первого расчетного случая.

Второй расчетный случай. Запишем соотношение, принятое для рассматриваемого расчетного случая:

$$\frac{2b_I}{b_{II}} = \frac{h_I}{h_{II}} = Q. \quad (2.49)$$

Толщина области вязкопластического течения грунта у боковых стенок ковша будет определяться из (2.49) как:

$$b_I = \frac{1}{2} b_{II} Q,$$

или приняв во внимание, что $2b_I + b_{II} = b$:

$$b_I = \frac{b}{2} \left(1 - \frac{1}{Q+1} \right); \quad (2.50)$$

$$b_{II} = \frac{b}{Q+1}. \quad (2.51)$$

Зависимость скорости движения частиц грунта в области вязкопластического течения грунта у боковой стенки ковша от z описывается параболой вида:

$$v_x(z) = m_1 z^2 + n_1 z + c_1, \quad (2.52)$$

где m_1, n_1 – коэффициенты;

c_1 – свободный член.

Ось z считаем направленной по нормали к боковой стенке в направлении противоположной стенки ковша; нулевая точка отсчета лежит на рассматриваемой стенке.

Запишем следующие граничные условия:

1) $v_x = 0$ при $z = 0$ (условие «прилипаемости» частиц грунта). Подставляя данное граничное условие в (2.52) определяем значение c_1 :

$$0 = m_1 0^2 + n_1 0 + c_1;$$

$$c_1 = 0;$$

2) $v_x = v_0$ при $z = b_I$. Используя данное граничное условие, из (2.52) получим равенство:

$$v_0 = m_1 b_I^2 + n_1 b_I; \quad (2.53)$$

3) $\tau = \tau_0$ при $z = b_I$. Подставляя данное граничное условие в (2.2) получим уравнение:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= \tau_0 + \eta_{\text{пл}} \left. \frac{dv_x(z)}{dz} \right|_{z=b_I}, \\ 2m_1 b_I + n_1 &= 0. \end{aligned} \quad (2.54)$$

Решая систему, составленную из уравнений (2.53) и (2.54), находим вид функции $v_x(z)$:

$$v_x(z) = v_0 \left[2 \frac{z}{b_I} - \left(\frac{z}{b_I} \right)^2 \right]. \quad (2.55)$$

Определим суммарный расход потока грунта для области вязкопластического течения, в первом приближении полагая $h = h_I + h_{II}$, где h_I и h_{II} определяются выражениями (2.29) и (2.30):

$$\begin{aligned} \int_{S_{II}} v_x^I(S_{II}) dS_{II} &= b \int_0^{h_I} v_0 \left[2 \frac{y}{h_I} - \left(\frac{y}{h_I} \right)^2 \right] dy + 2h_{II} \int_0^{b_I} v_0 \left[2 \frac{z}{b_I} - \left(\frac{z}{b_I} \right)^2 \right] dz = \\ &= \frac{2}{3} v_0 (b h_I + 2 b_I h_{II}), \end{aligned}$$

или с учетом (2.29), (2.30), после преобразований:

$$\int_{S_{II}} v_x^I(S_{II}) dS_{II} = \frac{2Kv_0 h_0 b}{3Q} \left[1 + \frac{1}{Q} \left(1 - \frac{1}{Q+1} \right) \right]. \quad (2.56)$$

Подставив (2.56) в (2.40) определяем $v_{\text{ср}}$:

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_0 S_I + \frac{2Kv_0 h_0 b}{3Q} \left[1 + \frac{1}{Q} \left(1 - \frac{1}{Q+1} \right) \right]}{S_{\text{сеч}}} = v_0 \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3(Q+1)^2} \right). \quad (2.57)$$

Используя зависимость (2.46), определяем толщину стружки в ковше при $x \leq x_{\text{кр}}$:

$$h = \frac{h_0}{\frac{2}{3} + \frac{1}{3(Q+1)^2}}; \quad (2.58)$$

$$h_{II} = h - h_I = \left[\frac{1}{\frac{2}{3} + \frac{1}{3(Q+1)^2}} - \frac{K}{Q} \right] h_0. \quad (2.59)$$

Таким образом, определены параметры h и h_{II} , соответствующие второму расчетному случаю.

Окончательный выбор формул для определения параметров b_I и h_{II} будет сделан на основе анализа результатов расчета и экспериментальных данных, приведенных в следующем разделе настоящей работы.

Определим предел прочности твердой области срезаемой стружки на сжатие:

$$\sigma_B = \frac{T_{II}^{\text{кр}}}{b_{II}h_{II}}, \quad (2.60)$$

где $T_{II}^{\text{кр}}$ – усилие сопротивления перемещению твердой области стружки при значении ее длины равному $x_{\text{кр}}$, определяемое выражением:

$$T_{II}^{\text{кр}} = \tau_0(S_n + 2S_6) = \tau_0 x_{\text{кр}}(b_{II} + 2h_{II}), \quad (2.61)$$

где S_n и S_6 – соответственно площадь нижней и боковой поверхностей твердой области стружки.

Согласно принятому допущению, для трехмерной задачи значение $x_{\text{кр}}$ в первом приближении определяется выражением (2.36), с учетом которого зависимость (2.61) примет вид:

$$T_{II}^{\text{кр}} = \tau_0 h_{II}(b_{II} + 2h_{II}). \quad (2.62)$$

Подставляя выражения (2.62) в (2.60), определим предел прочности твердой области стружки на сжатие:

$$\sigma_B = \tau_0 \left(1 + 2 \frac{h_{II}}{b_{II}} \right). \quad (2.63)$$

Напряжение $\sigma_{сж}$ определяется зависимостью:

$$\sigma_{сж} = \frac{T}{h'_{II}(x)b_{II}} = \frac{k_{II}\tau_0 b_{II}}{h'_{II}(x)b_{II}} x = \frac{k_{II}\tau_0}{h'_{II}(x)} x, \quad (2.64)$$

где k_{II} – коэффициент пропорциональности, учитывающий возрастание сопротивления перемещению грунта в ковш за счет увеличения площади трения грунта о боковые стенки ковша при деформировании стружки при значении ее длины больше $x_{кр}$;

h'_{II} – толщина твердой области стружки при значении длины стружки больше $x_{кр}$;

Для определения минимальной толщины стружки, необходимой для продвижения грунта вдоль ковша при $x \geq x_{кр}$, приравняем правые части выражений (2.63) и (2.64). Из полученного равенства выразим функцию $h'_{II}(x)$. Учитывая наличие области вязкопластического течения грунта толщиной h_I , окончательно запишем зависимость, определяющую минимальную толщину стружки, требуемую для продвижения грунта вдоль ковша при $x \geq x_{кр}$:

$$h'(x) = \frac{k_{II}b_{II}}{b_{II} + 2h_{II}} x + h_I. \quad (2.65)$$

Согласно полученной зависимости, значение минимальной толщины стружки, требуемой для ее продвижения вдоль ковша, прямо пропорционально зависит от ее длины.

2.4. Определение предельных параметров заполнения ковша

В подразделе 1.3 настоящей работы было показано, что геометрические параметры тела грунта в ковше имеют предельные значения. Поставим задачу: определить высоту и длину тела грунта, формируемого в ненаклонном к горизонту ковше определенной ширины при сколь угодно больших его прочих габаритных размерах в состоянии предельного заполнения.

Для решения поставленной задачи примем допущения:

- 1) контур призмы волочения в плоскости симметрии ковша в первом приближении можно описать уравнением эллипса;
- 2) форма поперечного сечения грунтовых валиков, образуемых по бокам ковша в состоянии предельного заполнения, близка к треугольной.

Давление p_0 в т. B (см. рис. 1.14) создается слоем грунта, высота которого определяется формулой:

$$h_{\text{ВПВ}} = \frac{p_0}{\Delta\rho g},$$

или с учетом условия (1.3):

$$h_{\text{ВПВ}} = \frac{2\tau_0}{\Delta\rho g}, \quad (2.66)$$

где $h_{\text{ВПВ}}$ – высота призмы волочения в т. B .

Предельную высоту призмы волочения по прочностным характеристикам разрабатываемого грунта, которую обозначим через $h_{\text{прт}}$, определим с использованием схемы, приведенной на рис. 2.6, где точка $O(0; 0)$ совпадает с режущей кромкой ковша, т. $M(b/2; h_{\text{ВПВ}})$, т. $N(0; l_{\text{пв}})$.

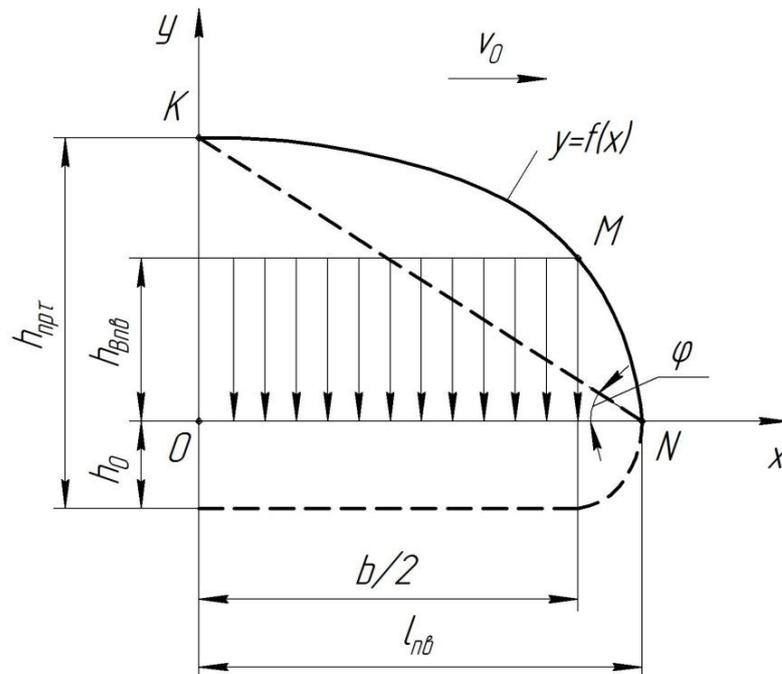


Рисунок 2.6 – Схема для расчета предельной высоты призмы волочения по прочностным свойствам разрабатываемого грунта

Согласно принятым допущениям, кривую $y = f(x)$ можно описать уравнением вида:

$$\frac{x^2}{l_{\text{пв}}^2} + \frac{y^2}{(h_{\text{прт}} - h_0)^2} - 1 = 0. \quad (2.67)$$

где $l_{\text{пв}}$ – длина призмы волочения, определяемая выражением (см. рис. 2.6):

$$l_{\text{пв}} = \frac{h_{\text{прт}} - h_0}{\text{tg}\varphi},$$

где φ – угол наклона отрезка, соединяющего полуоси эллипса, который описывает контур призмы волочения в плоскости симметрии ковша.

Подставив в (2.67) координаты точек M и N и решая полученное уравнение относительно $h_{\text{прт}}$ окончательно получим:

$$h_{\text{прт}} = \frac{\sqrt{(\Delta\rho b g \text{tg}\varphi)^2 + 16\tau_0^2}}{2\Delta\rho g} + h_0. \quad (2.68)$$

Поскольку для грунта в разрыхленном состоянии характерен угол естественного откоса γ менее 90° , найдем предельную высоту призмы волочения по углу естественного откоса $h_{\text{прт}}$, используя расчетную схему, приведенную на рис. 2.7.

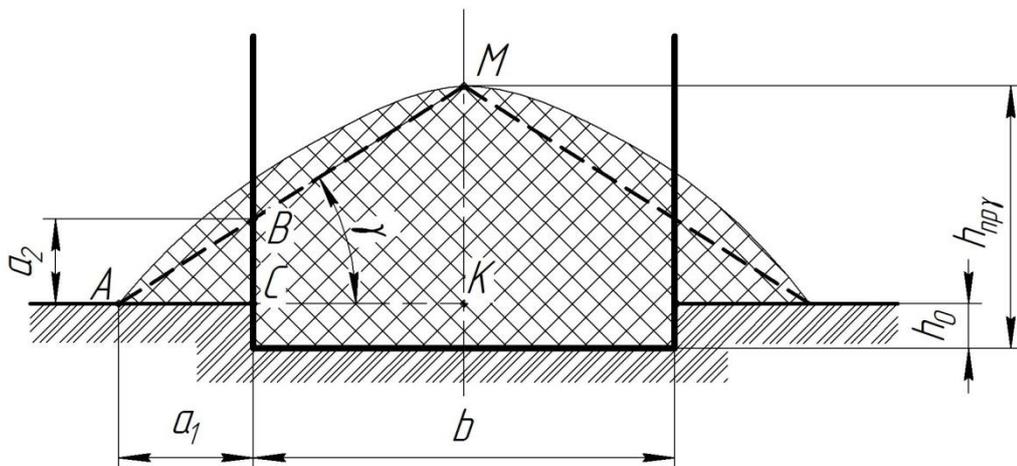


Рисунок 2.7 – Схема для расчета предельной высоты призмы волочения по углу естественного откоса грунта в разрыхленном состоянии

Расход грунта, раздвигаемого в стороны от ковша в состоянии предельного заполнения, будет определяться выражением (2.44). Расход грунта в грунтовых валиках треугольного поперечного сечения (согласно принятому допущению) будет составлять:

$$q_B = a_1 \cdot a_2 \cdot v_0, \quad (2.69)$$

где q_B – расход грунта в валиках, образуемых по бокам от ковша в состоянии его предельного заполнения;

a_1 и a_2 – соответственно ширина и высота треугольников, характеризующих сечение грунтовых валиков.

Приравнивая правые части выражений (2.44) и (2.69), используя свойства подобных треугольников ΔAMK и ΔABC (см.рис. 2.7), окончательно получим выражение для определения предельной высоты призмы волочения с учетом угла естественного откоса грунта в разрыхленном состоянии:

$$h_{\text{пр}\gamma} = \sqrt{h_0 b \operatorname{tg} \gamma} + \frac{1}{2} b \operatorname{tg} \gamma + h_0. \quad (2.70)$$

Предельная высота заполнения ковша будет определяться из условия:

$$h_{\text{пр}} = \min \begin{cases} h_{\text{пр}\tau}, \\ h_{\text{пр}\gamma}. \end{cases} \quad (2.71)$$

Предельную длину заполнения ковша $l_{\text{пр}}$ выразим из (2.65), подставив вместо h' значение $h_{\text{пр}}$:

$$l_{\text{пр}} = \frac{1}{k_{\text{II}} b_{\text{II}}} (h_{\text{пр}} - h_{\text{I}}) (b_{\text{II}} + 2h_{\text{II}}). \quad (2.72)$$

Предельные параметры заполнения $h_{\text{пр}}$ и $l_{\text{пр}}$ должны рассматриваться как максимально достижимые геометрические параметры тела грунта в ковше для определенных параметров процесса резания, ширины ковша и свойств разрабатываемого грунта.

Рациональные геометрические параметры проектируемого ковша определяются зависимостями:

$$h_k = k_1 h_{пр}; \quad l_k = k_2 l_{пр},$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты пропорциональности, не превышающие 1.

С уменьшением величины k_1 и k_2 коэффициент наполнения ковша коробчатой формы должен возрастать, поскольку требуемый для заполнения объем ковша будет уменьшаться по сравнению с потенциально достижимым объемом тела грунта в ковше (в состоянии предельного заполнения).

2.5 Определение объема тела грунта в ковше и призмы волочения

Выражение (2.65) предполагает линейную зависимость минимальной толщины стружки, требуемую для продвижения грунта вдоль ковша, от ее длины. Однако результаты наблюдений показывают, что при копании пластичных водонасыщенных грунтов тело грунта в ковше имеет округлую форму. Поставим задачу: определить объем тела грунта в ковше при копании пластичных водонасыщенных грунтов.

Примем допущения:

- 1) контуры тела грунта и призмы волочения в плоскости симметрии ковша описываются уравнениями эллипса (на основании результатов наблюдений);
- 2) отношение полуосей эллипсов, описывающих контуры тела грунта в ковше и призмы волочения, является постоянной величиной;
- 3) сечение тела грунта в ковше и призмы волочения одинаково в любой плоскости, параллельной боковым стенкам ковша.

На основании принятых допущений, форму контура тела грунта в ковше можно описать уравнением:

$$\frac{y^2}{h(t)^2} + \frac{x^2}{l(t)^2} = 1. \quad (2.73)$$

где $h(t)$ и $l(t)$ – соответственно высота и длина тела грунта в ковше в момент времени $t \leq t_{\text{пр}}$.

Введем понятие коэффициента формы тела грунта в ковше $k_{\text{фк}}(t) = h(t)/h_{\text{пр}} = l(t)/l_{\text{пр}}$, который является функцией времени и показывает какая часть от предельного параметра заполнения ($h_{\text{пр}}$ и $l_{\text{пр}}$) достигнута в момент времени $t \leq t_{\text{пр}}$. Тогда уравнение (2.73) можно переписать в виде:

$$\frac{y^2}{[k_{\text{фк}}(t)h_{\text{пр}}]^2} + \frac{x^2}{[k_{\text{фк}}(t)l_{\text{пр}}]^2} = 1. \quad (2.74)$$

Объем грунта в ковше $V_{\text{гр}}$ в момент времени t будет определяться зависимостью:

$$V_{\text{гр}}(t) = \frac{1}{4} \pi k_{\text{фк}}^2(t) h_{\text{пр}} l_{\text{пр}} b. \quad (2.75)$$

Объем призмы волочения $V_{\text{пв}}$ рассчитывается с использованием выражения:

$$V_{\text{пв}}(t) = \frac{1}{4} \pi b k_{\text{фк}}^2(t) (h_{\text{пр}} - h_0)^2 \text{ctg } \varphi. \quad (2.76)$$

Для определения объема грунта, поступающего в ковш при копании, справедлива зависимость:

$$V_{\text{гр}}(t) = k_{\text{рг}} h_0 v_0 b t, \quad (2.77)$$

где $k_{\text{рг}}$ – коэффициент пропорциональности, показывающий какая часть от общего объема срезанного грунта поступает в ковш при $t \leq t_{\text{пр}}$ (данный коэффициент условимся называть коэффициентом распределения грунта).

Коэффициент $k_{\text{рг}}$ определяется выражением:

$$k_{\text{рг}} = \frac{V_{\text{гр}}}{V_{\text{гр}} + V_{\text{пв}}} = \frac{h_{\text{пр}} l_{\text{пр}}}{h_{\text{пр}} l_{\text{пр}} + (h_{\text{пр}} - h_0)^2 \text{ctg } \varphi}. \quad (2.78)$$

Приравнивая правые части выражений (2.75) и (2.77) определим значение коэффициента $k_{\text{фк}}$ в момент времени t :

$$k_{\text{фк}}(t) = 2 \sqrt{\frac{k_{\text{гр}} h_0 v_0 t}{\pi h_{\text{пр}} l_{\text{пр}}}}. \quad (2.79)$$

Уравнение линии, описывающей контур тела грунта в ковше в плоскости его симметрии (перпендикулярной днищу), в момент времени $t \leq t_{\text{пр}}$ с учетом (2.79) можно представить в следующем виде:

$$\frac{\pi}{4k_{\text{гр}} h_0 v_0 t} \left(\frac{l_{\text{пр}}}{h_{\text{пр}}} y^2 + \frac{h_{\text{пр}}}{l_{\text{пр}}} x^2 \right) = 1. \quad (2.80)$$

Таким образом, получены зависимости, которые позволяют определить объем тела грунта в ковше и призмы волочения в промежуток времени $0 < t \leq t_{\text{пр}}$.

Практический интерес представляет определение размеров ковша, обеспечивающих его наибольшую емкость при максимальном значении коэффициента наполнения. Рассмотрим схему, приведенную на рис. 2.8, где утолщенной линией показан контур ковша коробчатой формы с одной открытой поверхностью.

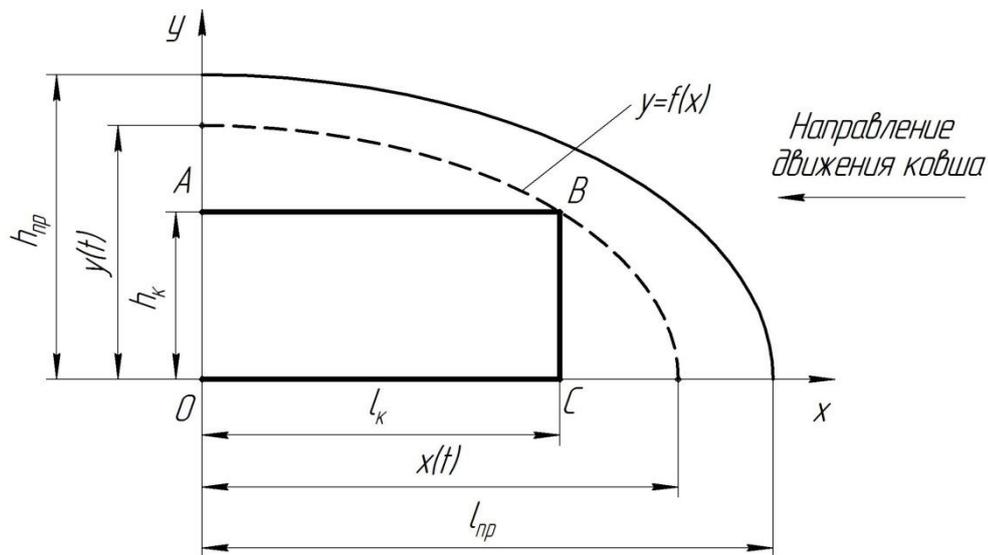


Рисунок 2.8 – Схема к определению максимальной емкости коробчатого ковша при наибольшем коэффициенте его наполнения

Если полагать верхнюю стенку ковша абсолютно гладкой, а количество отверстий в ковше достаточным для беспрепятственного оттока воды при его

заполнении, то очевидно, что для достижения максимального коэффициента наполнения ковша его контур должен полностью вписываться в эллипс, который описывает контур тела грунта в ковше равной ширины при сколь угодно больших его прочих габаритных размерах при идентичных параметрах процесса резания. Наибольшую емкость ковш будет иметь в случае, когда т. $B(l_k; h_k)$ будет принадлежать кривой $f(x)$. Для заданной ширины ковша определим размеры l_k и h_k , при которых площадь вписанного в эллипс прямоугольника $OABC$ будет наибольшей. Для этого запишем уравнение (2.73) и подставим в него координаты т. B :

$$\frac{h_k^2}{h(t)^2} + \frac{l_k^2}{l(t)^2} = 1,$$

откуда

$$h_k = h(t) \sqrt{1 - \frac{l_k^2}{l(t)^2}}. \quad (2.81)$$

Записав площадь прямоугольника $OABC$, заменив при этом h_k выражением (2.81), находим экстремум функции $S_{OABC}(l_k)$. После несложных расчетов определяем параметры h_k и l_k , при которых площадь вписанного в эллипс прямоугольника имеет наибольшее значение:

$$h_k = \frac{\sqrt{2}}{2} h(t),$$

$$l_k = \frac{\sqrt{2}}{2} l(t).$$

При этом отношение h_k к l_k будет составлять:

$$\frac{h_k}{l_k} = \frac{h(t)}{l(t)} = \frac{k_{\phi k}(t) h_{\text{пр}}}{k_{\phi k}(t) l_{\text{пр}}} = \frac{h_{\text{пр}}}{l_{\text{пр}}}. \quad (2.82)$$

Таким образом, наибольшая емкость ковша при максимальном значении коэффициента его наполнения достигается при значении отношения высоты ковша к его длине равным $h_{\text{пр}}/l_{\text{пр}}$.

2.6 Определение усилия сопротивления пластичных водонасыщенных грунтов копанию

В общем случае усилие сопротивления грунта копанию P_k определяется выражением (1.1), которое с учетом усилия гидродинамического сопротивления перемещению ковша в водной среде можно переписать в виде:

$$P_k = P_p + P_{\Pi} + P_T + P_{гд}, \quad (2.83)$$

где $P_{гд}$ – усилие гидродинамического сопротивления перемещению ковша в водной среде.

Как было показано подразделе 1.3 настоящей работы, при разработке пластичных водонасыщенных грунтов, которые имеют относительно слабые структурные связи, усилие сопротивления грунта копанию обусловлено в основном силами вязкого трения грунта о поверхности ковша, поэтому величина усилия резания P_p должна быть незначительной по сравнению с усилием сопротивления ковша заполнению P_3 . Усилие сопротивления перемещению призмы волочения равно по величине реакции тела грунта в ковше. Из этого следует, что выражение для определения усилия копания (2.83) можно записать в следующем виде:

$$P_k = P_3 + P_T + P_{гд}. \quad (2.84)$$

Поставим задачу: определить усилие заполнения ковша при копании пластичных водонасыщенных грунтов.

Принятые допущения:

- 1) грунт представляет собой вязкопластичную среду;
- 2) контур тела грунта в плоскости симметрии ковша описывается уравнением окружности в полярных координатах; площадь фигуры, ограничиваемой окружностью, днищем ковша и вертикалью, пересекающую режущую кромку ковша, равна площади четверти эллипса с полуосями $h(t)$ и $l(t)$;

3) толщина зоны вязкопластического течения грунта у боковой стенки ковша, в которой выполняется условие $v(n) \neq const$ (где n – координата вдоль нормали к рассматриваемой поверхности), а также толщина зоны вязкопластического течения грунта у дна ковша, в которой функция $v(\beta)|_{r=const} \neq const$, являются постоянными по величине и численно равны соответственно b_l и h_l .

Рассмотрим промежуток времени при копании от 0 до $t = t_{пр} - dt$ (где dt – бесконечно малый промежуток времени). В момент времени $t = t_{пр} - dt$ все еще происходит заполнение ковша, а усилие заполнения бесконечно близко приближается к своему предельному значению $P_{з.пр.}$:

$$P_3(t_{пр} - dt) \rightarrow P_3(t_{пр}) = P_{з.пр.}$$

Усилие сопротивления ковша заполнению можно определить с использованием выражения:

$$P_3 = 2P_б + P_{дн}, \quad (2.85)$$

где $P_б$ и $P_{дн}$ – поверхностные усилия, возникающие при трении стружки соответственно о боковую и нижнюю стенки внутреннего объема ковша.

Поверхностные усилия $P_{пов}$ в общем случае определяются зависимостью [91]:

$$P_{пов} = \int_S \tau dS, \quad (2.86)$$

где τ – касательные напряжения на поверхности S .

Согласно выражению (2.2) величина касательных напряжений является функцией скорости. При заполнении ковша в момент времени $0 < t < t_{пр}$ частицы поступающего в ковш грунта имеют различную скорость, что необходимо учитывать при проведении дальнейших расчетов.

Схема для расчета скорости движения частиц грунта приведена на рис. 2.9. Для упрощения задачи было принято допущение, что контур тела грунта в ковше описывается уравнением окружности вида:

$$r(\beta) = R, \quad (2.87)$$

где R – радиус окружности.

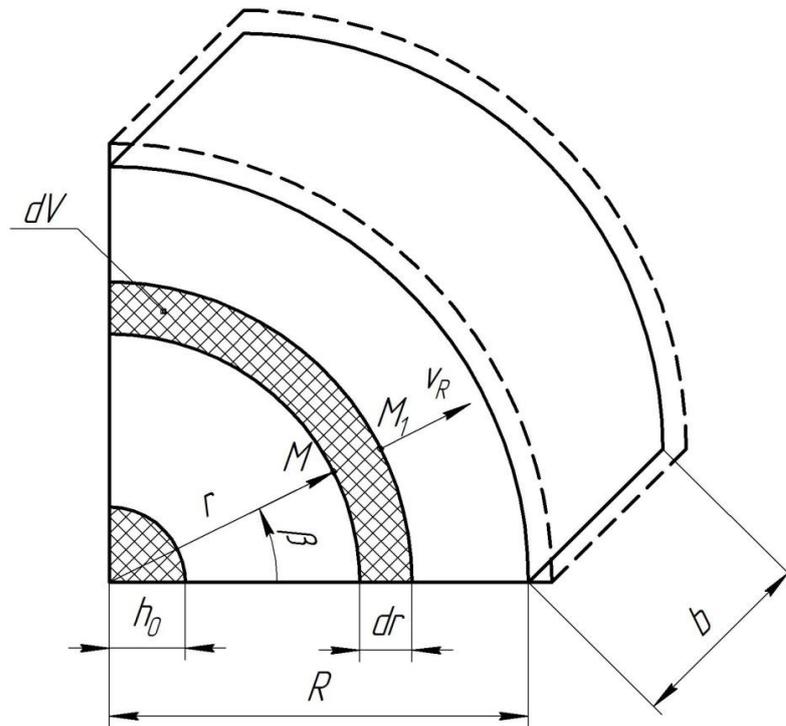


Рисунок 2.9 – Схема для расчета скорости движения частиц грунта в ковше

При копании за промежуток времени dt объем грунта, поступившего в ковш, будет составлять:

$$dV = k_{\text{пр}} h_0 v_0 b dt. \quad (2.88)$$

При этом частицы грунта из т. M переместятся в т. M_1 , преодолев расстояние dr . Определим величину dr из следующего уравнения:

$$V(t + dt) - V(t) = dV,$$

или подставляя формулу для определения объема сектора цилиндра с центральным углом $\pi/2$, с учетом (2.88):

$$\frac{1}{4} \pi b (r + dr)^2 - \frac{1}{4} \pi b r^2 = k_{\text{пр}} h_0 v_0 b dt. \quad (2.89)$$

Единственным корнем уравнения (2.89), имеющим физический смысл, является:

$$dr = \sqrt{r^2 + \frac{4}{\pi} k_{\text{пр}} h_0 v_0 dt} - r. \quad (2.90)$$

Разложим правую часть равенства (2.90) в ряд Тейлора, ограничиваясь тремя первыми членами (до бесконечно малых первого порядка). После преобразований окончательно получим зависимость:

$$dr = \frac{2k_{\text{пр}} h_0 v_0}{\pi r} dt,$$

из которой определим мгновенную скорость перемещения частиц:

$$v_R(r) = \frac{dr}{dt} = \frac{2k_{\text{пр}} h_0 v_0}{\pi r}, \quad (2.91)$$

где $r \geq 2h_0 k_{\text{пр}}/\pi$, поскольку значение скорости v_R в рассматриваемой задаче не должно превышать скорости резания v_0 . Поскольку предельная длина тела грунта многократно превышает h_0 и $k_{\text{пр}} < 1$, для упрощения формы записи примем диапазон $h_0 \geq r \geq R$.

Скорость v_R не учитывает влияние сил вязкого трения, возникающих при контакте грунта с поверхностью ковша, что необходимо для определения усилия сопротивления ковша заполнению. Исследуем изменение скорости движения частиц грунта вдоль нормали к поверхности ковша. В общем случае данная зависимость описывается параболой вида [92]:

$$v(n) = A_2 n^2 + B_2 n + C_2, \quad (2.92)$$

где A_2 и B_2 – коэффициенты;

C_2 – свободный член.

Из условия «прилипаемости» частиц к стенке ($v(0) = 0$) находим $C_2 = 0$.

На основе принятых допущений запишем граничное условие:

$$v(n_I) = v_R, \quad (2.93)$$

где n_I – толщина зоны вязкопластического течения грунта, в которой выполняется условие $v(n) \neq const$ для боковой стенки ковша и $v(\beta)|_{r=const} \neq const$ для его днища.

Подставив значение производной $dv(n)/dn$ в выражение (2.2) можно записать зависимость $\tau = f(n)$:

$$\tau(n) = \tau_0 + \eta_{пл}(2A_2n + B_2). \quad (2.94)$$

Для касательных напряжений граничное условие имеет вид:

$$\tau(n_I) = \tau_0. \quad (2.95)$$

Решая систему уравнений (2.92) и (2.94) с использованием граничных условий (2.93) и (2.95) определяем значения коэффициентов A_2 и B_2 . С учетом указанных коэффициентов выражение (2.92) примет вид:

$$v(n) = -\frac{v_R}{n_I^2}n^2 + \frac{2v_R}{n_I}n. \quad (2.96)$$

Подставив значения коэффициентов A_2 и B_2 в (2.94) приходим к выражению:

$$\tau(n) = \tau_0 + \eta_{пл} \left(-\frac{2v_R}{n_I^2}n + \frac{2v_R}{n_I} \right). \quad (2.97)$$

Величина касательных напряжений у стенки ковша будет равна:

$$\tau|_{n=0} = \tau_0 + \frac{2\eta_{пл}v_R}{n_I},$$

или принимая во внимание (2.91):

$$\tau|_{n=0} = \tau_0 + \frac{4k_{гр}\eta_{пл}h_0v_0}{\pi n_I r}. \quad (2.98)$$

Для боковой стенки $n_I = b_I$. Подставляя выражение (2.98) в зависимость (2.86) находим поверхностное усилие P_6 :

$$\begin{aligned} P_6 &= \int_{h_0}^R \left(\tau_0 + \frac{4k_{\text{пр}}\eta_{\text{пл}}h_0v_0}{\pi b_I r} \right) dS = \int_{h_0}^R \left(\tau_0 + \frac{4k_{\text{пр}}\eta_{\text{пл}}h_0v_0}{\pi b_I r} \right) \frac{\pi}{2} r dr = \\ &= \frac{1}{4} (R - h_0) \left[\pi \tau_0 (R + h_0) + \frac{8k_{\text{пр}}\eta_{\text{пл}}h_0v_0}{b_I} \right]. \end{aligned} \quad (2.99)$$

Аналогичным образом определяем поверхностное усилие, действующее на днище ковша, для которого согласно принятым допущениям $n_I = h_I$:

$$\begin{aligned} P_{\text{дн}} &= \int_{h_0}^R \left(\tau_0 + \frac{4k_{\text{пр}}\eta_{\text{пл}}h_0v_0}{\pi h_I r} \right) dS = \int_{h_0}^R \left(\tau_0 + \frac{4k_{\text{пр}}\eta_{\text{пл}}h_0v_0}{\pi h_I r} \right) b dr = \\ &= \frac{1}{\pi} b \left[\pi \tau_0 (R - h_0) + \frac{4k_{\text{пр}}\eta_{\text{пл}}h_0v_0}{h_I} \ln \left(\frac{R}{h_0} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.100)$$

Усилие сопротивления ковша заполнению находим путем подстановки выражений (2.99) и (2.100) в (2.85). После преобразований полученная зависимость примет вид:

$$\begin{aligned} P_3 &= \frac{1}{2} (R - h_0) \left[\pi \tau_0 (R + h_0) + 8k_{\text{пр}}h_0\eta_{\text{пл}} \frac{v_0}{b_I} \right] + \\ &+ \frac{1}{\pi} b \left[\pi \tau_0 (R - h_0) + 4k_{\text{пр}}h_0\eta_{\text{пл}} \frac{v_0}{h_I} \ln \left(\frac{R}{h_0} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.101)$$

В полученном выражении отношения v_0/b_I и v_0/h_I характеризуют скорости угловых деформаций грунта $d\lambda/dt$. Для водонасыщенных глинистых грунтов коэффициент вязкости зависит от величины нагрузки и времени ее действия [66], поэтому при поступлении грунта в ковш по мере разрушения структурных связей его вязкость будет изменяться, причем данное изменение будет происходить тем интенсивнее, чем больше скорость угловых деформаций грунта. В совокупности влияние вязкости и скорости деформирования на усилие сопротивления заполнению носит сложный характер, поэтому вместо произведения $v_0\eta_{\text{пл}}$ введем параметр K_r .

На основе анализа влияния параметров резания на усилие копания пластичных водонасыщенных грунтов было установлено, что параметр K_r может быть определен по формуле:

$$K_r = ka\eta \frac{d\lambda}{dt}, \quad (2.102)$$

где $k = 0,5 \dots 0,7$ – коэффициент, учитывающий снижение касательных напряжений вследствие уменьшения средней скорости движения частиц грунта вдоль стенки ковша по сравнению со скоростью резания;

$a = 1$ м – единичная длина;

η – динамический коэффициент структурной вязкости, соответствующий скорости угловой деформации грунта $d\lambda/dt$.

Параметры η и $d\lambda/dt$ определяются по реологической кривой $\eta = f(d\lambda/dt)$, получаемой по результатам испытаний грунта методами вискозиметрии.

Как было показано в первом разделе, при подводной разработке скорость резания, как правило, изменяется в относительно малом диапазоне (0,15...1,0 м/с), что связано с ростом гидродинамического сопротивления перемещению рабочего органа при увеличении скорости резания, а также ограничением по скорости размыва разрабатываемых грунтов. Глубина резания при подводной разработке, как правило, не превышает 0,2...0,25 м [78, 85]. Поэтому в первом приближении можно определить диапазон величины $d\lambda/dt$, нижний предел которой составляет $0,67 \text{ с}^{-1}$ (при $v_0 = 0,15 \text{ м/с}$, $h_0 = 0,25 \text{ м}$, $h_I = 0,9h_0$), а верхний – 50 с^{-1} (при $v_0 = 1,0 \text{ м/с}$, $h_0 = 0,1 \text{ м}$, $h_I = 0,2h_0$).

Вискозиметрические испытания глубоководных сапропелевых и кокколи-товых осадков Черного моря показали, что в пределах диапазона $d\lambda/dt$ от 0,5 до 55 с^{-1} функция $\eta = f(d\lambda/dt)$ близка к гиперболе, поэтому произведение $\eta \cdot d\lambda/dt$ изменяется незначительно. Так для морского сапропелевого ила значение $\eta \cdot d\lambda/dt$ при $d\lambda/dt = 1,5 \text{ с}^{-1}$ и при $d\lambda/dt = 65 \text{ с}^{-1}$ отличается всего на 30%.

С учетом параметра K_r выражение (2.101) можно переписать в виде:

$$P_3 = \frac{1}{2}(R - h_0) \left[\pi\tau_0(R + h_0) + 8k_{\text{пр}}h_0 \frac{K_\Gamma}{b_I} \right] + \frac{1}{\pi}b \left[\pi\tau_0(R - h_0) + 4k_{\text{пр}}h_0 \frac{K_\Gamma}{h_I} \ln \left(\frac{R}{h_0} \right) \right]. \quad (2.103)$$

Параметр R определим из условия равенства объемов тел грунта в ковше, контур которых описывается соответственно уравнением окружности и эллипса:

$$\frac{1}{4}\pi bR^2 = \frac{1}{4}\pi blh,$$

откуда

$$R = \sqrt{lh}, \quad (2.104)$$

где l и h – соответственно длина и высота тела грунта в ковше.

При времени заполнения $t \geq t_{\text{пр}}$ значение R будет определяться зависимостью:

$$R_{\text{пр}} = \sqrt{l_{\text{пр}}h_{\text{пр}}}. \quad (2.105)$$

При $t < t_{\text{пр}}$ значение R следует рассчитывать с использованием выражения:

$$R(t) = k_{\text{фк}}(t) \sqrt{l_{\text{пр}}h_{\text{пр}}}. \quad (2.106)$$

Подставив выражения (2.79) и (2.106) в (2.103), учитывая, что произведение $v_0t = s$, после преобразований получим зависимость $P_3(s)$:

$$P_3(s) = 2\tau_0k_{\text{пр}}h_0s + 2\sqrt{\frac{k_{\text{пр}}h_0}{\pi}} \left(4k_{\text{пр}}h_0 \frac{K_\Gamma}{b_I} + \tau_0b \right) \sqrt{s} + \frac{2k_{\text{пр}}h_0bK_\Gamma}{h_I\pi} \ln(s) + h_0 \left[4k_{\text{пр}}K_\Gamma \left(\frac{b}{2\pi h_I} \ln \left(\frac{4k_{\text{пр}}}{\pi h_0} \right) - \frac{h_0}{b_I} \right) - \tau_0 \left(\frac{1}{2}\pi h_0 + b \right) \right]. \quad (2.107)$$

Следует отметить, что полученная зависимость (2.107) не учитывает интенсивность возрастания усилия сопротивления ковша заполнению от пути

копания для ковшей разной емкости. Так, к примеру, при одних и тех же параметрах резания при копании пластичного водонасыщенного грунта ковшами одинаковой ширины, но разной емкости, величина максимального усилия сопротивления ковша заполнению для обеих ковшей будет одинаковой. Однако для достижения состояния предельного заполнения путь копания ковшем меньшей емкости будет меньшим (при условии, что $l_k < l_{пр}$, $h_k < h_{пр}$), поскольку для его заполнения требуется меньший объем грунта (призмы волочения в состоянии предельного заполнения будут иметь одинаковый объем). Поэтому при построении графика функции $P_3(s)$ для учета разной интенсивности возрастания сопротивления ковша заполнению при копании ковшами разной емкости должно быть принято во внимание отношение предельного пути копания к фактическому, требуемому для заполнения ковша.

Выводы

1. При копании пластичных водонасыщенных грунтов продвижение стружки вдоль ковша происходит лишь при достаточной величине ее толщины, требуемой для уравнивания за счет собственного веса грунта вертикальной составляющей нормальных напряжений от трения стружки о поверхности внутреннего объема ковша. В противном случае толщина стружки увеличивается до выполнения условия продвижения грунта вдоль ковша. Этим обусловлено увеличение толщины стружки в ковше с ростом ее длины

2. Для достижения высокого значения коэффициента наполнения ковша его высота и длина не должны превышать соответствующих предельных параметров заполнения $h_{пр}$ и $l_{пр}$. Увеличение пути копания сверх значения $s_{пр}$ нецелесообразно, поскольку в этом случае заполнение ковша не происходит.

3. Усилие сопротивления пластичных водонасыщенных грунтов копанию определяется как сумма усилий сопротивления ковша заполнению, его трению о грунт и гидродинамического сопротивления перемещению ковша в водной среде, без учета усилия резания (ввиду его малости по сравнению с усилием

сопротивления ковша заполнению) и сопротивления перемещению призмы волочения.

4. Усилие сопротивления ковша заполнению равно реакции на тело грунта в ковше от призмы волочения, величина которой определяется параметрами призмы волочения и не зависит от длины ковша и угла его наклона, поэтому максимальное значение усилия сопротивления ковша заполнению не зависит от длины ковша и угла его наклона.

5. При копании пластичных водонасыщенных грунтов усилие сопротивления ковша заполнению находится как сумма линейной, логарифмической и степенной с показателем степени 0,5 зависимостей от пути копания.

РАЗДЕЛ 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ КОВША ПРИ КОПАНИИ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОСАДКОВ

Целью настоящих экспериментальных исследований является определение влияния физико-механических свойств органо-минеральных осадков, ширины ковша и параметров процесса резания на параметры заполнения ковша.

Проверка теоретических выводов настоящей работы осуществлялась на основе анализа результатов исследований, проведенных в лабораторных условиях при моделировании процесса копания ГВОМО ковшом землечерпательного снаряда, а также в реальных условиях эксплуатации одноковшового землечерпательного снаряда в Черном море.

3.1 Критериальное моделирование процесса копания ГВОМО

Для обеспечения подобия процессов копания водонасыщенного грунта при проведении лабораторных исследований необходимо соблюдать равенство соответствующих критериев подобия [93, 94]. Процесс заполнения ковша определяется параметрами, которые можно представить в виде функциональной зависимости:

$$F(\tau_0, \eta_{пл}, \rho, \rho_v, v_0, P_k, h_0, b, l_{пр}, g, \beta_n) = 0, \quad (3.1)$$

где β_n – угол наклона днища ковша относительно горизонтальной плоскости.

Упростим приведенную функциональную зависимость. Поскольку процесс копания происходит в воде, вместо параметров ρ и ρ_v можно учитывать плотность грунта в воде $\Delta\rho = \rho - \rho_v$. Произведение глубины резания на ширину ковша является площадью поперечного сечения срезаемой стружки $S_{стр}$. Таким образом, вместо четырех параметров ρ , ρ_v , h_0 и b можно использовать всего лишь два – $\Delta\rho$ и $S_{стр}$. С учетом изложенного функция (3.1) примет вид:

$$F(\tau_0, \eta_{пл}, \Delta\rho, v_0, P_k, S_{стр}, l_{пр}, g, \beta_n) = 0. \quad (3.2)$$

Методика и результаты расчета критериев подобия приведены в приложении Б. Согласно полученным результатам, при использовании образцов натурального грунта все индикаторы подобия равны 1. Это означает, что результаты экспериментальных исследований в лабораторных условиях на уменьшенных физических моделях могут быть напрямую использованы для проверки теоретических выкладок без пересчета полученных данных через масштабные коэффициенты.

Количество опытов определим по методике, предложенной в работе [68]:

$$n = \frac{\nu^2}{\Delta_a^2} t_{\alpha,k}^2, \quad (3.3)$$

где ν – выборочный коэффициент вариации;

Δ_a – максимальная относительная ошибка (допуск);

$t_{\alpha,k}$ – значение квантили статистики t уровня $P = 1 - \alpha/2$ для числа степеней свободы $k = n - 1$ (определяется по таблице).

Априорно зададимся коэффициентом вариации $\nu = 0,1$. Для $\Delta_a = 0,1$ находим значение квантили. При доверительной вероятности $P = 1 - \alpha/2 = 0,95$ квантиль равна $t_{\alpha,k} = 1,64$. Подставляя данные в формулу (3.3) определяем требуемое количество измерений:

$$n = \frac{0,1^2}{0,1^2} 1,64^2 = 2,69 \approx 3.$$

При выбранном подходе количество опытов может быть увеличено в процессе эксперимента в случае превышения коэффициентом вариации измеряемой величины значения 0,1.

3.2 Обоснование параметров лабораторной установки

Проведение исследований процесса копания ГВОМО предполагалось на лабораторном стенде для резания горных пород, рабочий ход режущего

инструмента которого составляет 1 м. Ввиду ограниченного объема имеющихся натуральных образцов ГВОМО, емкость для размещения грунта должна иметь как можно меньший объем для обеспечения возможности проведения достаточного количества опытов. В то же время, размеры емкости для образцов должны обеспечивать минимальное влияние «стеночного эффекта» на исследуемый процесс.

В работе [66] показано, что при исследовании процесса резания пластичных водонасыщенных грунтов узким ножом может проявляться краевой эффект, в результате чего возрастает вклад вязкого и пластического сопротивлений по бокам ножа. При отношении ширины режущего инструмента к глубине прорези $b/h_0 > 4...6$ краевой эффект можно не учитывать.

Допуская максимальный перепад высоты грунта в емкости при его профилировании равным 1 мм, примем минимальную глубину резания равной 0,01 м. Тогда минимальная ширина ковша должна составлять 0,04 м.

На основании большого объема экспериментальных данных в работе [68] для исключения влияния масштабного фактора, учитывающего соотношение линейных размеров частиц грунта к линейным размерам режущего инструмента, минимально допустимую глубину резания рекомендуется определять по зависимости, мм:

$$h_{min} \approx \sqrt{\frac{5 \cdot 10^6 \cdot \delta^3}{b_{min}}} = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^6 \cdot 0,012^3}{40}} = 0,46,$$

где h_{min} – минимальная глубина резания, мм;

δ – средний линейный размер частиц, мм (для глин принимается равным 0,012 мм);

$b_{min} = 40$ мм – минимальная ширина модели ковша.

Выбранная наименьшая глубина резания превышает минимальное рекомендуемое значение в $10/0,46 = 21,74$ раза, поэтому ошибку моделирования,

обусловленную уменьшением размеров режущего инструмента относительно размера частиц грунта, считаем незначительной.

Таким образом, ширину физических моделей ковшей выберем равной 0,04, 0,06, 0,08 и 0,10 м.

Согласно выражению (1.4), размер пластической зоны перед ковшом максимальной ширины будет составлять, м:

$$R_{пл} = \frac{b}{\sqrt{2}} = \frac{0,1}{\sqrt{2}} \approx 0,07. \quad (3.4)$$

С учетом двойного запаса примем минимально допускаемое расстояние от режущей кромки ковша в конечном положении резания до стенки емкости равным 0,14 м.

Проекция $R_{пл}$ на плоскость, перпендикулярную движению режущего инструмента (см. рис. 1.14), будет составлять $R_{пл} \cdot \cos 45^\circ$. Поэтому ширина емкости может быть определена по формуле, м:

$$B = b_{max} + 2R_{пл} \cos 45^\circ = 0,1 + 2 \cdot 0,07 \cos 45^\circ = 0,2,$$

где b_{max} – максимальная ширина модели ковша.

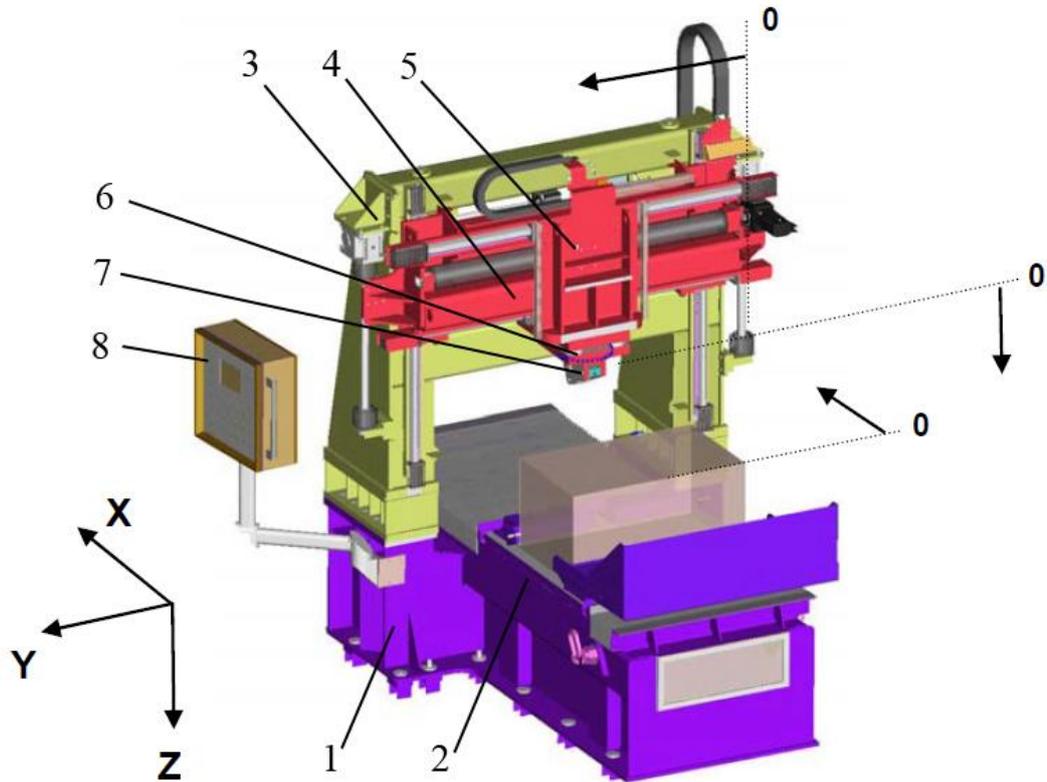
Высоту емкости примем равной ее ширине. Минимальную толщину загружаемого осадка примем равной $R_{пл} \cdot \cos 45^\circ + h_0 = 0,05 + h_0$, м.

Максимальная глубина резания должна определяться по результатам пробных резов таким образом, чтобы длины копания было достаточно для достижения состояния предельного заполнения модели ковша. Ожидаемая максимальная глубина резания – 0,03...0,04 м.

3.3. Конструкция лабораторной установки

Экспериментальная часть выполнена на базе автоматизированной трехкоординатной установки для резания горных пород в Техническом университете «Фрайбергская горная академия» (г. Фрайберг, ФРГ).

Общий вид установки представлен на рис. 3.1. Ее технические характеристики приведены в табл. 3.1.



1 – станина; 2 – подвижный рабочий стол; 3 – мост; 4 – траверса; 5 – инструментальная каретка; 6 – система измерения усилия; 7 – резцедержатель; 8 – пульт управления

Рисунок 3.1 – Общий вид установки для резания горных пород

Таблица 3.1

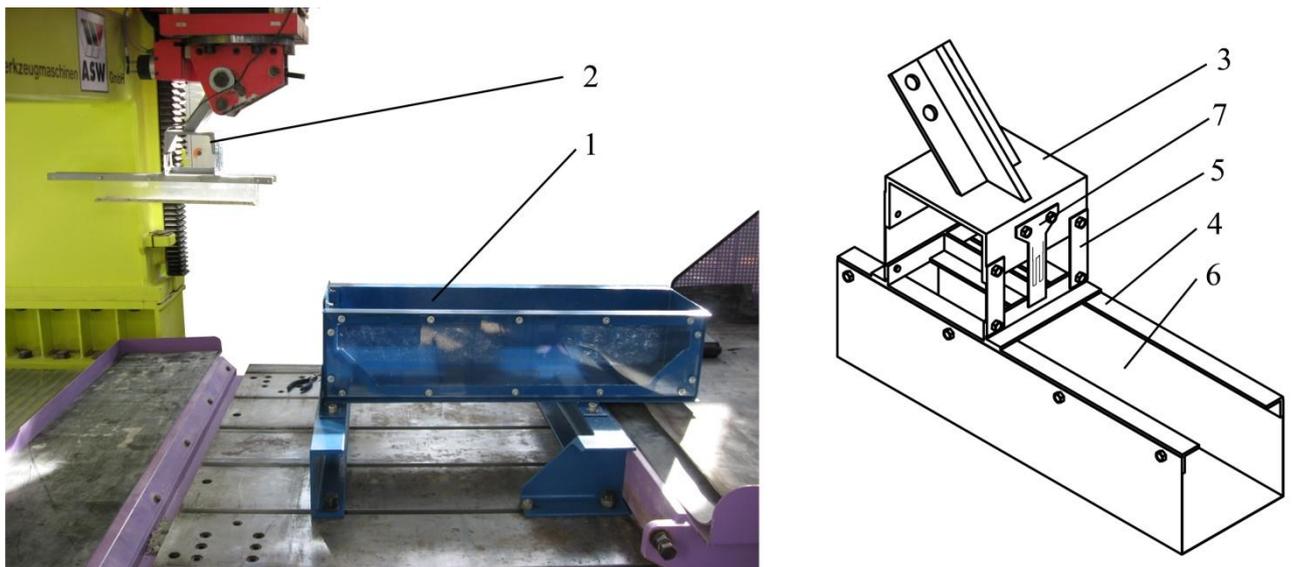
Технические характеристики установки для резания горных пород

Максимальная предельная прочность исследуемого материала на сжатие	100 МПа
Максимальная скорость резания	1,75 м/с
Максимальная глубина резания	50 мм
Максимальное ускорение рабочего стола	10 м/с ²
Допускаемые нагрузки:	
– продольная горизонтальная	50 кН
– поперечная горизонтальная	30 кН
– вертикальная	50 кН
Максимальная скорость заглабления резца	11,9 мм/с
Максимальная поперечная скорость перемещения резца	24,7 мм/с

В состав установки входят: станина 1, подвижный рабочий стол 2 (ось X), мост 3, траверса 4 (ось Z), инструментальная каретка 5 (ось Y), система измерения усилия 6, резцедержатель 7 и пульт управления 8.

Система измерения усилий резания, используемая на данной установке, способна воспринимать нагрузку в диапазоне от -50 до $+50$ кН с погрешностью измерений $0,5\%$, что достаточно для исследования процессов резания крепких горных пород. Однако для резания слабых грунтов применяемые датчики являются малочувствительными, а погрешность измерений в 250 Н – слишком большой.

Для исследования процесса копания пластичных водонасыщенных грунтов применительно к машине для резания горных пород была разработана дополнительная оснастка (рис. 3.2), включающая емкость для размещения образцов 1 с прозрачной боковой стенкой, закрепляемая на подвижном столе машины, узел крепления режущего инструмента 2 и электронную аппаратуру. Размеры внутреннего объема емкости для размещения образцов составляют $200 \times 200 \times 800$ мм.



1 – емкость для образцов; 2 – узел крепления режущего инструмента; 3 – держатель;
4 – подвижная обойма; 5 – упругая пластина; 6 – модель ковша; 7 – датчик усилий

Рисунок 3.2 – Оснастка для проведения экспериментов по резанию ГВОМО

Узел крепления режущего инструмента состоит из держателя 3, подвижной обоймы 4, соединенной с держателем посредством упругих пластин 5.

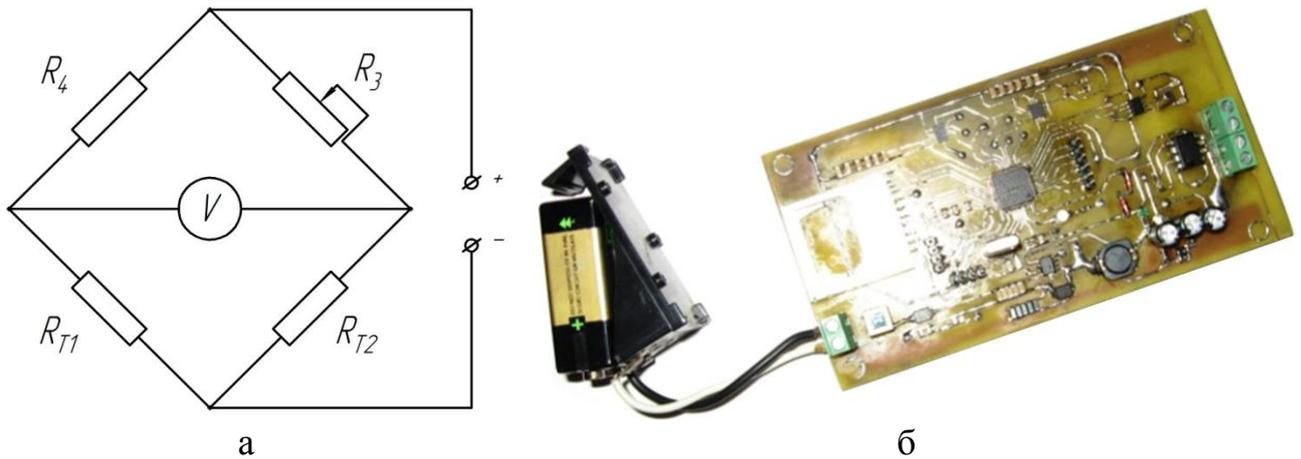
Модели ковшей 6 крепились к подвижной обойме при помощи болтовых соединений.

Электронная аппаратура включала датчик усилий 7, закрепляемый на держателе, и специально разработанную электронику. Датчик усилий выполнен в виде упругой пластины, с противоположных сторон которой наклеены два тензорезистора. Тензорезисторы вместе с резисторами постоянного и переменного сопротивлений были соединены в мостовую схему (рис. 3.3, а), причем тензорезисторы подключались в смежные плечи мостовой цепи для повышения чувствительности силоизмерительного оборудования и компенсации изменения их сопротивления вследствие колебаний температуры [95, 96].

Электронная плата (рис. 3.3, б) была разработана в Национальном горном университете. В ее состав входят милливольтметр, микроконтроллер и операционный усилитель. Цифровой сигнал от датчиков фиксируется с частотой 10 Гц. Данные измерений записываются на карту памяти, размещенную на плате. Питание электроники осуществляется от гальванического элемента, либо от блока питания напряжением 9 В. Тензорезисторный датчик усилия с электронной платой, помещаемой в специально разработанный корпус, соединены посредством экранированного проводника.

Принцип работы силоизмерительного оборудования заключается в следующем. При копании грунта на модель ковша 6 (см. рис. 3.2) действуют усилия, уравнивание которых происходит за счет сил упругости, возникающих при деформировании упругих пластин 5. Отклонение подвижной обоймы 4 от положения равновесия приводит к деформированию упругой пластины 7, на которой наклеены тензорезисторы. Способ закрепления упругой пластины 7 обеспечивает измерение касательной составляющей усилия копания. Изменение сопротивления тензорезисторов R_{T1} и R_{T2} (см. рис. 3.3, а) при деформировании пластины обуславливает разбаланс мостовой схемы и перетекание тока через диагональ, в которую включен милливольтметр, размещенный на электронной плате. Величина напряжения разбаланса записывается на карту памяти. По-

следующая обработка полученных данных производится на персональном компьютере.



а – датчик усилия (схема); б – электронная плата

Рисунок 3.3 – Электроизмерительное оборудование

П-образные модели ковшей шириной 0,04, 0,06, 0,08 и 0,10 м изготовлены из матовой листовой нержавеющей стали толщиной 0,5 мм. Модель ковша шириной 0,07 м была изготовлена с прозрачными боковыми стенками из органического стекла и стальным днищем для возможности исследования процесса заполнения ковша с использованием средств видеосъемки.

Для подготовки поверхности грунта при проведении экспериментов был разработан профилирующий нож, а также другая вспомогательная оснастка.

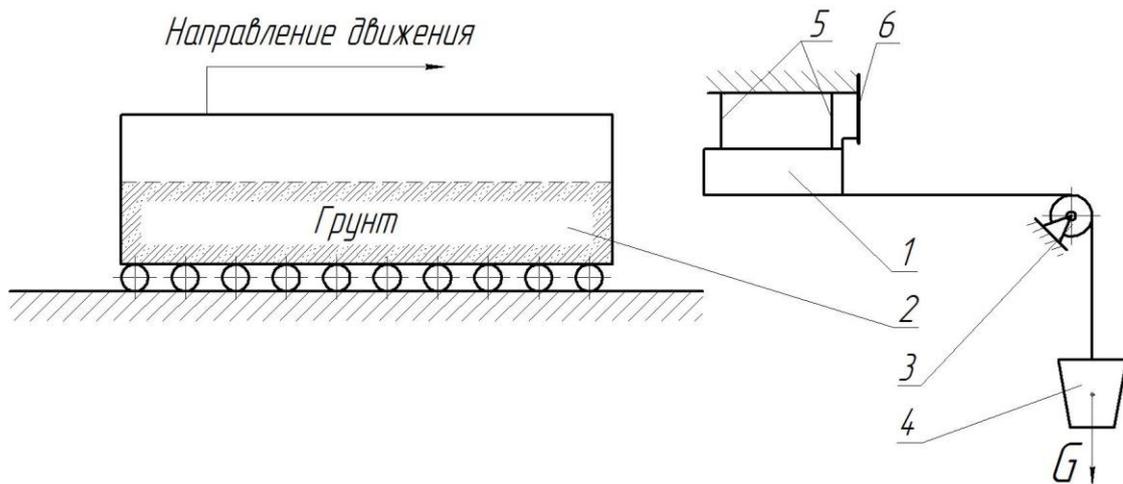
3.4 Условия проведения лабораторных исследований процесса копания

Эксперименты проводились с использованием образцов натурального грунта, отобранных ковшом в 73-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» на станции 20/73 (место отбора – полигон «Сапропели», глубина моря – 1935 м). Поднятые ковшом донные отложения представлены кокколитовыми и сапропелевыми илами, которые были упакованы отдельно по вещественно-генетическим типам в герметично закрывающиеся емкости с целью сохранения естественной влажности. Упаковка, транспортирование и хранение образцов осуществлялась

в соответствии с требованиями ДСТУ Б В.2.1- 8-2001 “Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов” [97].

Подготовка экспериментальных исследований осуществлялась следующим образом. Оснастка для исследования процесса копания ГВОМО была установлена и надежно закреплена на машине для резания горных пород. Тарирование силоизмерительного оборудования производилось по схеме, приведенной на рис. 3.4 с учетом изложенных в источниках [95, 98] рекомендаций. Шнур из синтетического материала, диаметром 0,35 мм закреплялся на днище модели ковша. К свободному концу шнура, переброшенному через прецизионный обводной блок диаметром 150 мм, прикреплялась емкость. Натяжение шнура создавалось за счет веса емкости, изменяемого путем добавления в емкость воды. Масса емкости контролировалась путем ее взвешивания на электронных весах с точностью до 0,1 г. После балансирования тензомоста электроизмерительной аппаратуры путем изменения сопротивления регулируемого резистора производили нагружение шнура от 0 до 50 Н ступенями по 10 Н. В результате была получена зависимость усилия натяжения шнура, равного касательной составляющей усилия копания, от величины напряжения в мостовой цепи (см. приложение В). Обработка результатов измерений производилась в программном пакете Excel 2007 по методике [99, 100]. В результате обработки было получено уравнение регрессии с коэффициентом детерминации близким к 1. Максимальная погрешность измерения в пределах диапазона измерений 0...50 Н составляет не более 1 Н.

Подготовка образца ГВОМО осуществлялась в следующем порядке. После вскрытия упаковки грунт нарушенного сложения укладывался в емкость для размещения образцов на стенде. При этом контролировалось наличие возможных посторонних твердых включений (костей рыб, остатков растительности и т.п.). Поверхность уложенного в емкость грунта выравнивалась при помощи профилирующего ножа. Часть грунта отбиралась для определения его физико-механических характеристик – влажности, усредненной плотности, вязкости и сцепления.



- 1 – модель ковша; 2 – емкость с грунтом; 3 – обводной блок; 4 – емкость с водой;
5 – упругие пластины; 6 – датчик усилия

Рисунок 3.4 – Схема тарирования силоизмерительного оборудования

Исследование процесса копания осуществлялось в атмосферных условиях и в водной среде. В последнем случае грунт укладывался в емкость, в которую после выравнивания поверхности образца грунта заливали пресную воду. Подготовленный таким образом образец выдерживался не менее 24 часов для выравнивания давления воды в порах грунта.

Копание образцов производилось в последовательности, приведенной ниже. На пульте управления машины для резания горных пород задавалась траектория движения режущего инструмента и параметры процесса резания. Резание осуществлялось в автоматическом режиме. Остановка режущего инструмента производилась при достижении режущей кромкой расстояния 0,15 м от перпендикулярной направлению хода ковша стенки емкости. После срезания моделью ковша слоя грунта при помощи профилирующего резца производилось удаление несрезанного по бокам слоя грунта до требуемого уровня. При достижении толщины слоя грунта 0,05 м образец извлекался из емкости, после чего подготавливался новый образец из оставшихся в герметичной упаковке илов.

При копании исследовали зависимость параметров заполнения от скорости, глубины резания и ширины ковша. Исследования проводили для кокколи-

тового и сапропелевого илов в атмосферных условиях и в водной среде. Уровни варьирования параметров приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Параметры процесса резания образцов ГВОМО

Параметры	Обозначение	Значения параметров при копании:	
		в атмосфере	в воде
Ширина ковша, м	b	0,04; 0,06; 0,07*; 0,08; 0,10	0,07
Глубина резания, м	h_0	0,01; 0,02; 0,03	0,01
Скорость резания, м/с	v_0	0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,5; 0,75; 1,00	0,01
Угол наклона ковша, град.	β_n	1,5; 15; 30; 45; 90	1,5

Примечание. Ковш шириной 0,07 м был изготовлен с прозрачными боковыми стенками для возможности исследования качественной картины протекания процесса копания ГВОМО с использованием средств фото- и видеосъемки.

При резании в атмосферных условиях контролировались параметры: длина и высота тела грунта в ковше (в плоскости его симметрии), длина призмы волочения, масса грунта в ковше, масса призмы волочения, усилие сопротивления копанию. Измерение линейных параметров производилось при помощи металлической линейки с точностью до 1 мм. Дополнительно контроль линейных параметров осуществлялся по нанесенной на поверхность ковша шкале. Измерение массовых характеристик осуществлялось при помощи аналитических весов с точностью измерений до 0,01 г.

При резании в воде контролировались параметры: длина и высота тела грунта в ковше, длина призмы волочения и усилие копания. Форма тела грунта в ковше контролировалась с использованием нанесенной на ковш с прозрачными стенками шкалы и средств фото- и видеосъемки с дальнейшей обработкой полученных изображений в программе КОМПАС 3D V9.

Для исключения трения нижней стенки модели ковша о поверхность грунта ковш устанавливался наклонно под углом $1,5^\circ$ к горизонту. Для уменьшения трения наружных боковых стенок ковша о грунт были использованы алюминиевые накладки сечением 1x3 мм, которые симметрично устанавливались на

боковых стенках снаружи модели ковша в плоскости режущей кромки (большей стороной прилегающей к стенке). После каждого цикла копания данные с карты памяти переносились на персональный компьютер для дальнейшей обработки и анализа.

Поскольку объем образцов грунта для исследований ограничен, варьирование отдельного параметра осуществлялось при фиксировании остальных на уровне $b = 0,06$ м, $h_0 = 0,01$ м, $v_0 = 0,1$ м/с, $\beta_H = 1,5^\circ$.

Экспериментальные исследования были проведены в такой последовательности:

1. Исследование свойств используемых образцов кокколитовых и сапропелевых илов (гранулометрического состава, влажности w , усредненной плотности ρ , сцепления τ_0 , пластической вязкости $\eta_{пл}$).

2. Проведение серии пробных опытов для определения уровней варьирования параметров h_0 и v_0 , а также уточнения количества параллельных измерений, требуемых для получения результатов с максимальной относительной ошибкой 10% при доверительной вероятности 0,95.

3. Исследование влияния факторов рабочего процесса на предельные параметры заполнения ковша и сопротивление грунта копанию при резании образцов в атмосферных условиях и в водной среде.

3.5 Анализ результатов лабораторных исследований

3.5.1 Исследование свойств используемых образцов

Результаты исследований гранулометрического состава сапропелевого и кокколитового илов, проведенные с использованием лазерного дифракционного анализатора HELOS (H0735) & QUIXEL, R3: 0.5/0.9...175 μ m, приведены в приложении Г. Анализ показал, что в пробах сапропелевого ила доля частиц крупностью 0,5...1,0 мкм составляет 13%, 1,0...10 мкм – 71%, 10...100 мкм – 16 %. Частиц крупностью более 125 мкм не выявлено. При исследовании проб кокколитового ила распределение частиц следующее: доля частиц крупностью

0,5...1,0 мкм составляет 12%, 1,0...10 мкм – 68%, 10...100 мкм – 20 %. Частиц крупностью более 125 мкм не выявлено.

Физические свойства определялись в соответствии с требованиями [101]. Среднее значение влажности сапропелевого ила составила 222,68%, кокколито-вого – 188,43%. Усредненная плотность составила соответственно 1219 и 1269 кг/м³.

Определение сцепления грунта производилось на автоматизированном приборе вращательного среза Fluegelsonde в соответствии с прилагаемой инструкцией. Результаты измерений приведены в приложении Д. Среднее значение величины сцепления для сапропелевого ила составило 156 Па, для кокколито-вого – 187 Па.

Вязкость образцов грунта исследовалась на автоматизированном ротационном вискозиметре Thermo Scientific HAAKE MARS III. Результаты измерений приведены в приложении Е. Пластическая вязкость сапропелевого ила составила 807,4 Па·с, кокколитового – 226,8 Па·с.

3.5.2 Уточнение уровней варьирования глубины и скорости резания

Предварительные опыты показали, что при увеличении глубины резания объем грунта в ковше увеличивается. Поскольку путь копания моделью ковша ограничивается геометрическими параметрами емкости для размещения образцов ГВОМО, параметры резания должны быть выбраны такими, чтобы реализуемого пути копания было достаточно для достижения состояния предельного заполнения ковша. Максимальный путь копания s_{max} , как было показано ранее, не должен превышать значения $L - \Delta = 0,8 - 0,15 = 0,65$ м (L – длина емкости для образцов; Δ – минимальное допускаемое расстояние от модели ковша до перпендикулярной направлению резания стенки емкости).

Опыты были проведены для кокколитового и сапропелевого илов. За средний уровень варьирования был принят параметр $b = 0,06$ м. Глубину резания изменяли от 0,01 до 0,04 м с шагом 0,01 м. При оценке получаемых резов изме-

ряли путь копания от начальной точки и до фрагмента прорези, на котором начиналось образование грунтовых валиков одинакового поперечного сечения. При глубине резания 0,01 м такие же опыты были проведены для скоростей резания 0,05, 0,5 и 1,0 м/с, а также для модели ковша шириной 0,1 м при скорости резания 0,1 м/с. Результаты измерений приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Зависимость предельного пути копания от глубины и скорости резания

Глубина резания h_0 , м	Ширина ковша b , м	Скорость резания v_0 , м/с	Предельный путь копания $s_{пр}$, м	Отношение $s_{пр}/s_{max}$, дол. ед.
Сапропелевый ил				
0,01	0,06	0,1	0,33	0,51
0,02	0,06	0,1	0,32	0,50
0,03	0,06	0,1	0,32	0,49
0,04	0,06	0,1	0,34	0,52
0,01	0,06	0,05	0,32	0,50
0,01	0,06	0,50	0,35	0,54
0,01	0,06	1,00	0,33	0,51
0,01	0,10	0,1	0,49	0,76
Кокколитовый ил				
0,01	0,06	0,1	0,37	0,57
0,02	0,06	0,1	0,43	0,66
0,03	0,06	0,1	0,41	0,64
0,04	0,06	0,1	0,40	0,61
0,01	0,06	0,05	0,46	0,70
0,01	0,06	0,50	0,45	0,69
0,01	0,06	1,00	0,48	0,74
0,01	0,10	0,1	0,62	0,95

Как видно из таблицы, глубина резания, которая для среднего уровня варьирования параметров была предварительно принята 0,01 м, является наиболее рациональной, поскольку наибольшее значение отношения предельного пути заполнения $s_{пр}$ к максимальному $s_{max} = 0,65$ м при $b = 0,1$ м достигает значения 0,95. Дальнейшее увеличение глубины резания не позволит обеспечить путь копания, требуемый для достижения состояния предельного заполнения модели ковша шириной 0,1 м.

При скорости резания 1 м/с отношение $s_{пр}/s_{max}$ не превышает значения 0,74, поэтому это значение скорости может быть принято как максимальное для среднего уровня варьирования параметров.

При глубине резания 0,04 м максимальное значение отношения $s_{пр}/s_{max}$ составляет 0,61. Полученная величина меньше 1, однако, при этом высота тела грунта в модели ковша превышает максимальное предусмотренное конструкцией значение. Поэтому максимальную глубину резания принимаем равной 0,03 м.

3.5.3 Уточнение количества параллельных опытов

Ранее было показано, что при значении коэффициента вариации измеряемой величины $v = 10\%$ для достижения максимальной относительной ошибки измерений не более 10% при доверительной вероятности 0,95 количество параллельных опытов должно составлять не менее 3. Значение v было принято априорно и требует экспериментального подтверждения. При $v > 10\%$, количество параллельных опытов следует увеличить.

Опыты были проведены с использованием сапропелевого ила, который по сравнению с кокколитовым характеризуется большим разбросом физико-механических свойств. Параметры резания: $h_0 = 0,01$ м, $b = 0,06$ м, $v_0 = 0,1$ м/с. Количество параллельных опытов $n = 16$. Контролируемые величины: $l_{пр}$, $h_{пр}$ и предельное усилие сопротивления грунта копанию $P_{к.пр}$.

Результаты 16 наблюдений в виде вариационных рядов в возрастающем порядке представлены в табл. 3.4.

Используя критерий согласия Пирсона, проверим гипотезу, что распределение случайных величин $l_{пр}$, $h_{пр}$ и $P_{к.пр}$ не противоречит нормальному закону на уровне значимости $\alpha = 0,1$. Методика проверки гипотезы о нормальном законе распределения случайной величины на примере $l_{пр}$ приведена в приложении Ж. Аналогично были обработаны значения $h_{пр}$ ($\chi^2 = 3,49$) и $P_{к.пр}$ ($\chi^2 = 4,3$). Результаты проведенных расчетов показывают что, распределение параметров $l_{пр}$, $h_{пр}$ и $P_{к.пр}$ не противоречит нормальному закону.

Сравнение статистических и теоретических плотностей распределения параметров $l_{пр}$, $h_{пр}$ и $P_{к.пр}$ приведены на рис. 3.5. По оси ординат отложено коли-

чество измерений, приходящееся на каждый интервал. Распределение случайных величин показано в виде гистограммы, а теоретическое распределение – как полигон частот.

Таблица 3.4

Результаты измерений параметров заполнения при копании сапропелевого ила

№ п/п	$l_{\text{пр}}$, мм	$h_{\text{пр}}$, мм	$P_{\text{к.пр.}}$, Н
1	55	47	14,2
2	56	49	14,2
3	56	49	14,3
4	57	52	14,4
5	57	52	14,5
6	58	52	14,6
7	58	52	14,6
8	58	52	14,8
9	58	52	14,8
10	59	52	15,0
11	60	52	15,0
12	60	52	15,0
13	61	52	15,2
14	61	53	15,3
15	62	53	15,6
16	64	55	15,8

Параметры распределения $l_{\text{пр}}$, $h_{\text{пр}}$ и $P_{\text{к.пр.}}$ приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Параметры распределения $l_{\text{пр}}$, $h_{\text{пр}}$ и $P_{\text{к.пр.}}$

Параметр распределения	Обозначение	Параметры процесса копания		
		$l_{\text{пр}}$	$h_{\text{пр}}$	$P_{\text{к.пр.}}$
Среднее значение	\bar{x}	58,75 (мм)	51,63 (мм)	14,83 (Н)
Дисперсия	σ^2	5,93 (мм ²)	3,45 (мм ²)	0,23 (Н ²)
Среднеквадратическое отклонение	σ	2,44 (мм)	1,86 (мм)	0,48 (Н)
Коэффициент вариации	ν	0,04 (дол. ед.)	0,04 (дол. ед.)	0,03 (дол. ед.)

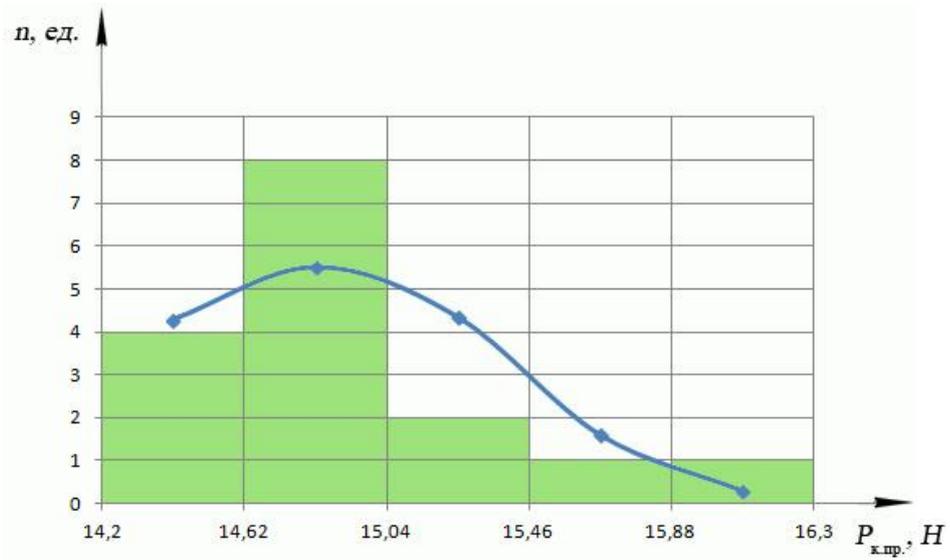
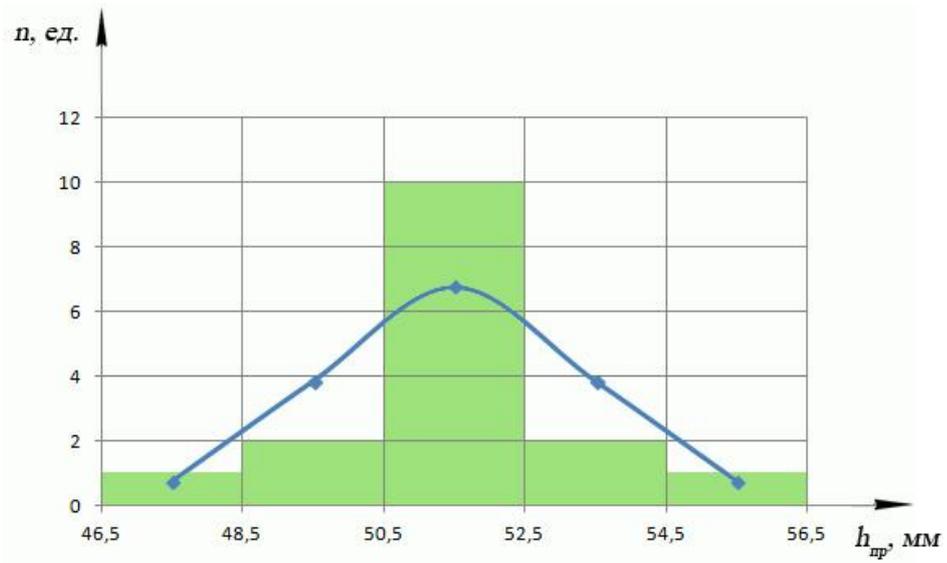
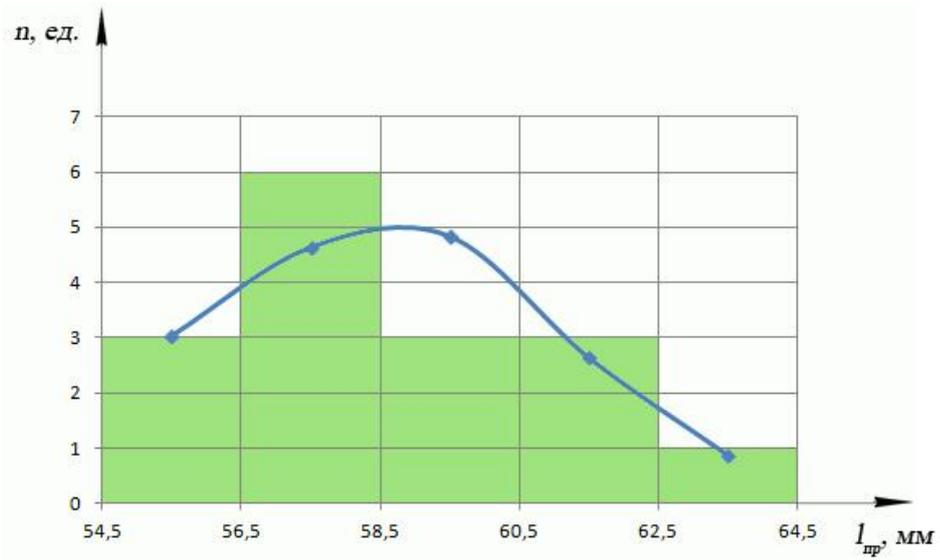


Рисунок 3.5 – Гистограммы распределения параметров $l_{пр}$, $h_{пр}$ и $P_{к.пр.}$

Согласно результатам проведенных расчетов коэффициент вариации параметров $l_{пр}$, $h_{пр}$ и $P_{к.пр.}$ меньше 10%, поэтому окончательно принимаем количество параллельных опытов равным 3.

3.5.4 Исследование процесса копания ГВОМО в атмосферных условиях

При копании сапропелевых и кокколитовых илов моделью ковша в атмосферных условиях наблюдалось характерное для резания водонасыщенных грунтов отделение сливной стружки, которая при перемещении в ковш деформировалась, формируя тело грунта (рис. 3.6, а). При деформировании стружки можно было визуальным выделить следы зон сдвига, которые проявлялись в виде волнистостей на поверхности тела грунта в ковше и призмы волочения (рис. 3.6, б). Характер заполнения равномерный (не пульсирующий), перемещение грунта в ковше в горизонтальном и вертикальном направлениях происходило одновременно. Контур тела грунта в параллельном боковым стенкам ковша сечении был близок к форме двух сочлененных четвертей эллипса с общей вертикальной полуосью в плоскости режущей кромки. Вслед за ковшом образовывалась прорезь прямоугольной формы (рис. 3.6, в). Оплывание краев прорези после проведения опыта не наблюдалось. При достижении состояния предельного заполнения ковша по бокам прорези формировались грунтовые валики.

3.5.4.1 Влияние скорости резания на параметры заполнения ковша и усилие сопротивления грунта копанию

Зависимости параметров заполнения ковша от скорости резания приведены на рис. 3.7. Как видно из графиков, влияние скорости резания в пределах от 0,05 до 1,0 м/с на параметры заполнения ковша при резании кокколитового и сапропелевого илов носит сложный характер. При резании сапропелевого ила функция $l_{пр}(v_0)$ возрастает на участке $v_0 = 0,05 \dots 0,5$ м/с, после чего убывает. Максимальное значение предельной длины заполнения соответствует скорости

резания $v_0 = 0,5$ м/с, минимальное наблюдается при $v_0 = 0,05$ м/с. В диапазоне скоростей резания $0,05 \dots 1,0$ м/с максимальное значение параметра $l_{пр}$ превышает минимальное почти на 12%.

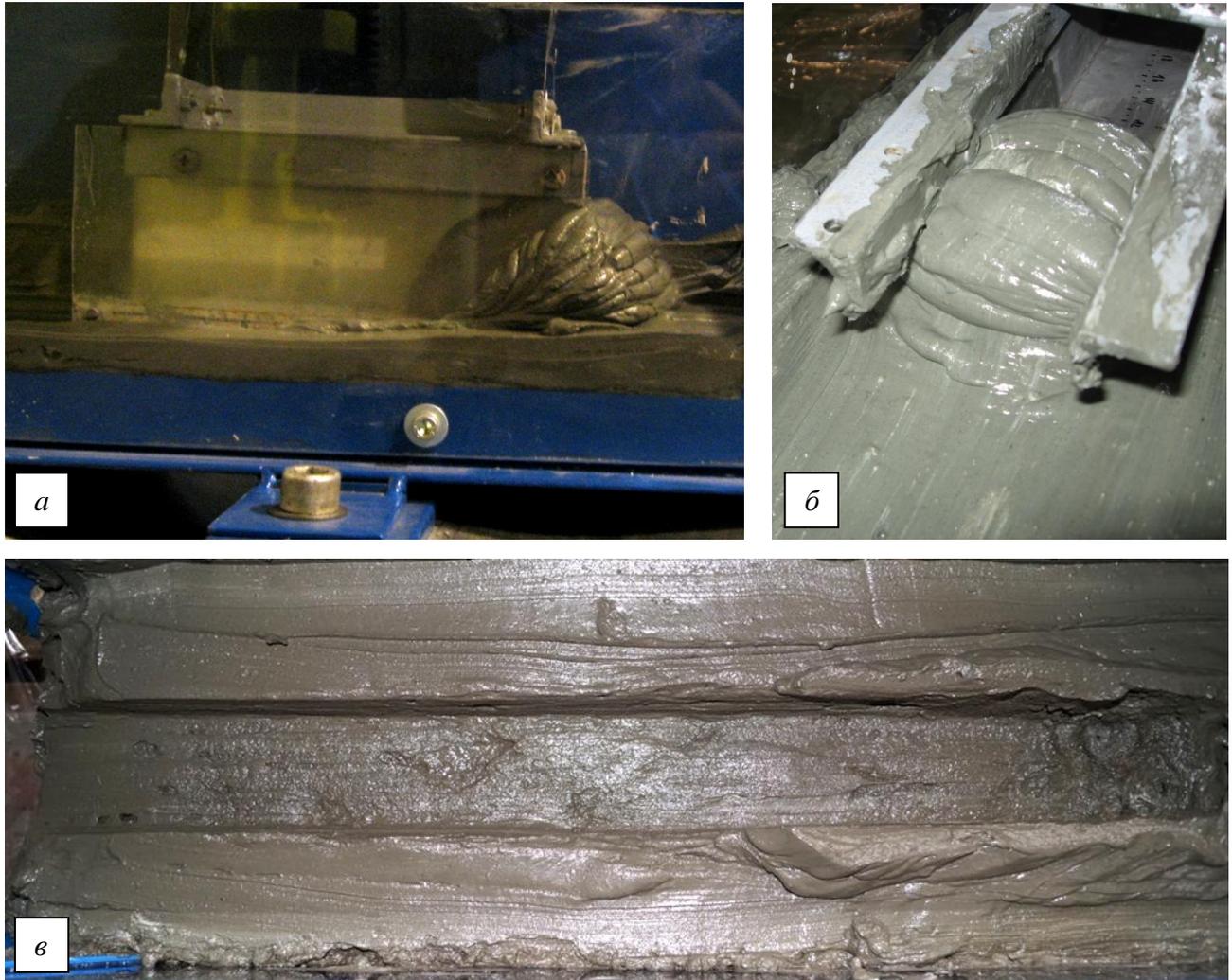


Рисунок 3.6 – Резание ГВОМО в атмосферных условиях

Для кокколитового ила функция $l_{пр}(v_0)$ является монотонно убывающей в пределах всего диапазона варьирования скоростей. Максимальное значение параметра $l_{пр}$ при $v_0 = 0,05$ м/с превышает минимальное при $v_0 = 1,0$ м/с почти на 18%.

Изменение функции $h_{пр}(v_0)$ мало зависит от скорости резания. Для сапропелевого ила максимальное значение предельной высоты заполнения от минимального в исследуемом диапазоне скоростей отличается всего на 6%, для кокколитового – на 7,6 %.

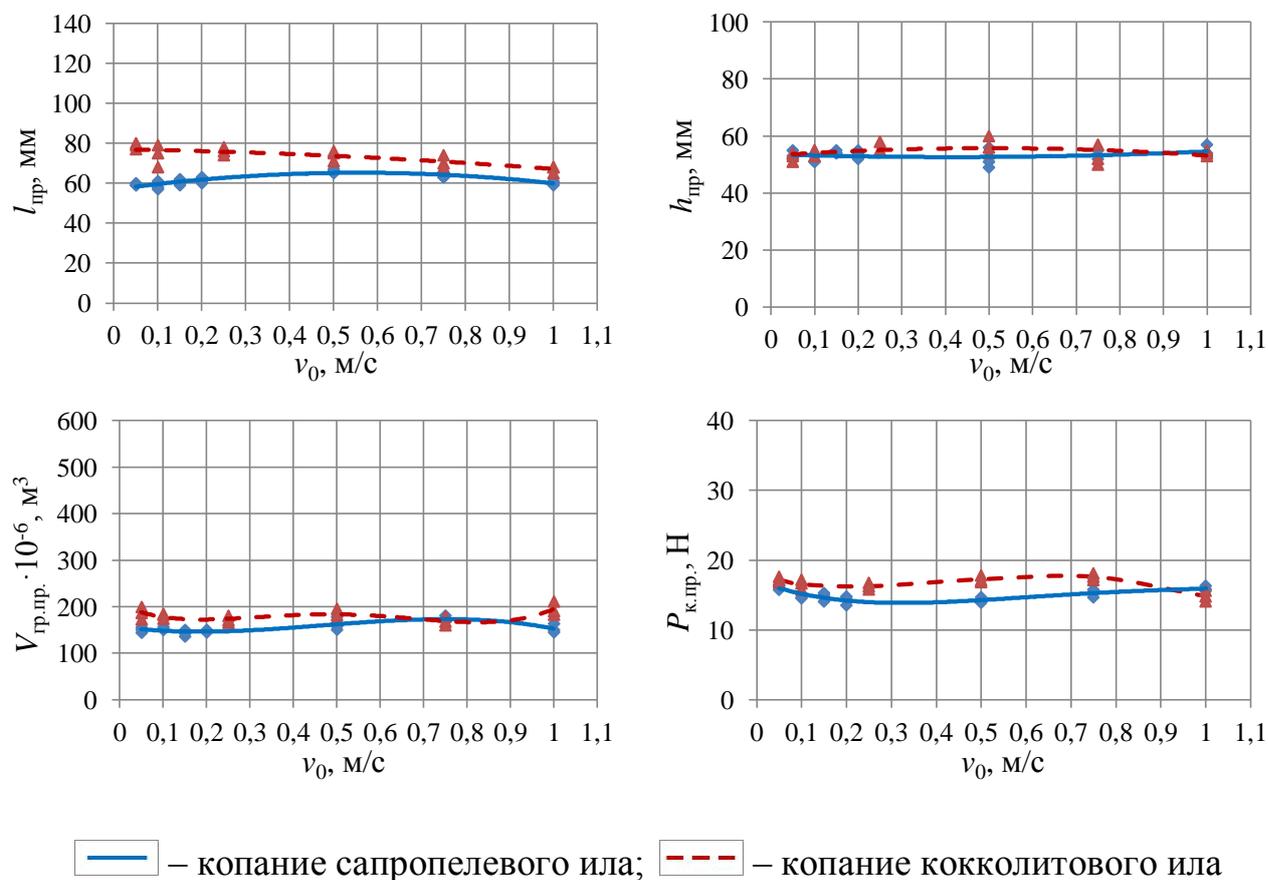


Рисунок 3.7 – Графики зависимостей предельных параметров заполнения ковша и предельного усилия копания от скорости резания

Функция $V_{гр.пр.}(v_0)$ имеет волнообразный вид как для сапропелевого, так и для кокколитового илов. Для сапропелевого ила функция $V_{гр.пр.}(v_0)$ убывает на участке 0,05...0,20 м/с, после чего возрастает в интервале скоростей резания 0,20...0,75 м/с, после чего снова убывает. Максимальное значение соответствует скорости резания 0,75 м/с, минимальное – при 0,15 м/с. Разница между максимальным и минимальным значениями составляет 21,8% относительно минимального значения.

При резании кокколитового ила функция $V_{гр.пр.}(v_0)$ принимает максимальное значение при скорости резания 1,0 м/с, минимальное – при 0,75 м/с. Разница между максимальным и минимальным значением предельного объема забранного грунта составляет 15,4%.

Функция $P_{к.пр.}(v_0)$ при копании сапропелевого ила убывает в интервале 0,05...0,30 м/с, после чего плавно возрастает. Минимальное значение усилия

копания сапропелевого ила соответствует скорости резания 0,30 м/с. Значения усилия копания при $v_0 = 0,05$ м/с и $v_0 = 1,0$ м/с почти одинаковы. Разница между минимальным и максимальным значениями в диапазоне скоростей резания 0,05...1,0 м/с составляет 13,5%.

При копании кокколитового ила функция $P_{к.пр.}(v_0)$ возрастает в интервале скорости резания 0,25...0,75 м/с. В интервалах 0,05...0,25 м/с и 0,75...1,0 м/с функция является убывающей. Минимальное значение усилия сопротивления кокколитового ила копанию соответствует скорости резания 1,0 м/с, максимальное наблюдается при $v_0 = 0,75$ м/с. Разница между минимальным и максимальным значениями усилия копания в диапазоне скоростей резания 0,05...1,0 м/с составляет 18,7% относительно меньшего значения.

Сложный характер зависимостей рассматриваемых параметров от скорости резания можно объяснить следующим образом. Сопротивление перемещению грунта в ковш зависит от величины сил вязкого трения. Согласно уравнению Бингама-Шведова при увеличении градиента скорости резания силы вязкого трения возрастают, что приводит к увеличению сопротивления перемещению грунта в ковш. При увеличении сил сопротивления в ковш поступает меньший объем грунта. Вместе с тем, при увеличении скорости резания увеличивается скоростной напор грунта, воздействующий на призму волочения в состоянии предельного заполнения. Скоростной напор создает дополнительное давление на грунт и таким образом способствует его продвижению в ковш. Поэтому характер зависимостей параметров заполнения и усилия копания от скорости резания в большей степени обусловлен особенностями реологических и физико-механических характеристик разрабатываемых грунтов.

Из графиков на рис. 3.7 видно, что изменение скорости резания не оказывает значительного влияния на параметры заполнения ковша $l_{пр}$ и $h_{пр}$, а также предельное усилие сопротивления грунта копанию $P_{к.пр.}$. Проанализируем влияние фактора v_0 на указанные параметры, используя классический дисперсионный анализ нормально распределенных случайных величин [102]. Методика и результаты расчетов приведены в приложении И.

Полученные результаты показывают, что выборочные дисперсии параметра $h_{\text{пр}}$ при изменении уровня фактора v_0 не отличаются значимо как для кокколитового, так и для сапропелевого илов. Из этого следует вывод о незначимом влиянии скорости резания на параметр $h_{\text{пр}}$. Влияние скорости резания на параметры $l_{\text{пр}}$ и $P_{\text{к.пр.}}$ с точки зрения статистики следует признать значимым.

3.5.4.2 Влияние глубины резания и ширины ковша на параметры его заполнения и усилие сопротивления грунта копанью

При увеличении глубины резания и ширины ковша параметры $l_{\text{пр}}$, $h_{\text{пр}}$, $V_{\text{гр.пр.}}$ и $P_{\text{к.пр.}}$ увеличиваются (рис. 3.8, 3.9). Это объясняется повышением прочности поступающей в ковш стружки за счет увеличения площади ее поперечного сечения, что способствует продвижению грунта в ковш на большее расстояние от режущей кромки.

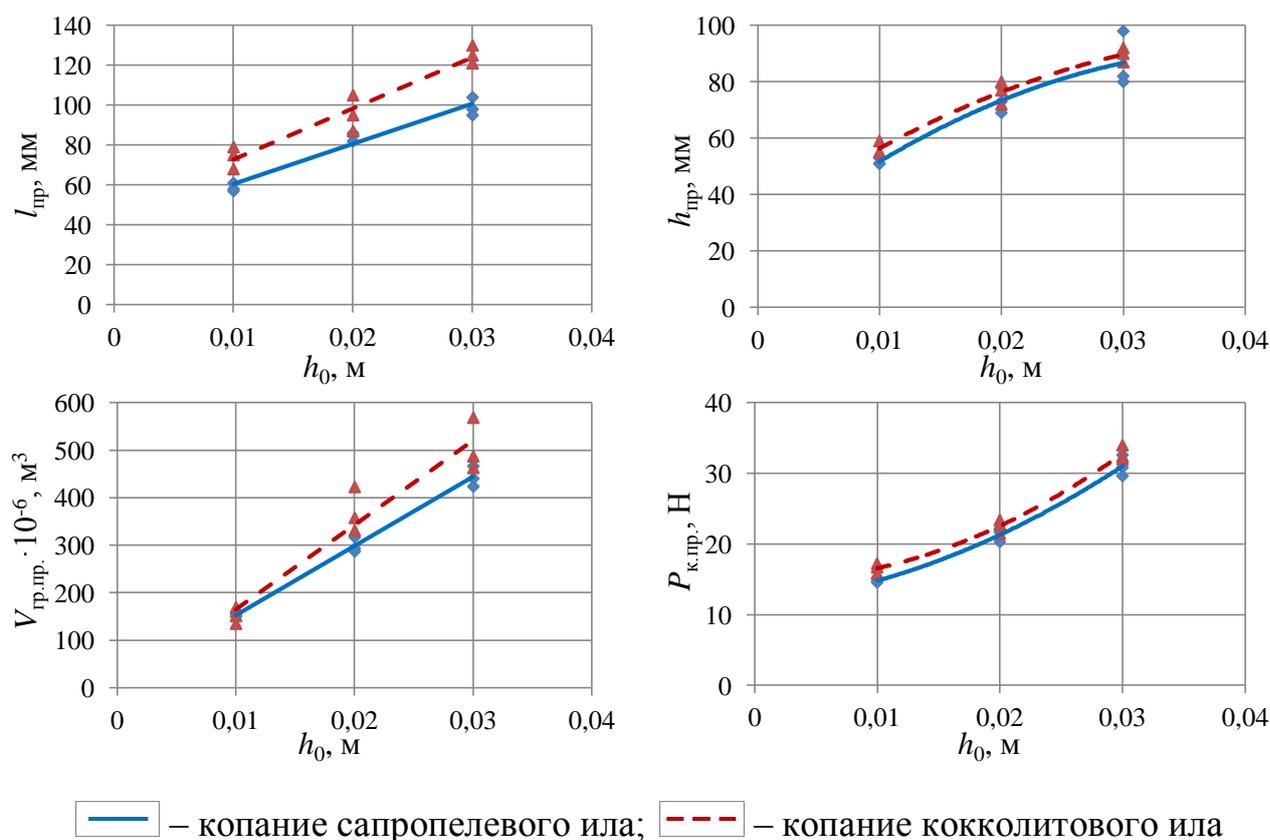


Рисунок 3.8 – Графики зависимостей предельных параметров заполнения ковша от глубины резания

При увеличении предельных параметров заполнения помимо увеличения объема грунта в ковше возрастает площадь трения срезаемой стружки о внутренние поверхности ковша, что обуславливает рост усилия сопротивления ковша заполнению.

При копании кокколитового ила функции $l_{\text{пр}}(h_0)$, $l_{\text{пр}}(b)$, $V_{\text{гр.пр.}}(h_0)$ и $P_{\text{к.пр.}}(h_0)$ возрастают более интенсивно, чем при копании сапропелевого ила. Предельная длина заполнения при кропании кокколитового ила примерно в 1,1–1,25 раз больше, чем при копании сапропелевого ила, что обусловлено более высокими прочностными свойствами и более низкой пластической вязкостью используемых образцов кокколитовых осадков. Интенсивность возрастания предельной высоты заполнения при копании сапропелевого и кокколитового илов почти одинаковы. Предельная высота заполнения при копании кокколитового ила почти совпадает с соответствующей при копании сапропелевого ила (отличие в среднем составляет 5%).

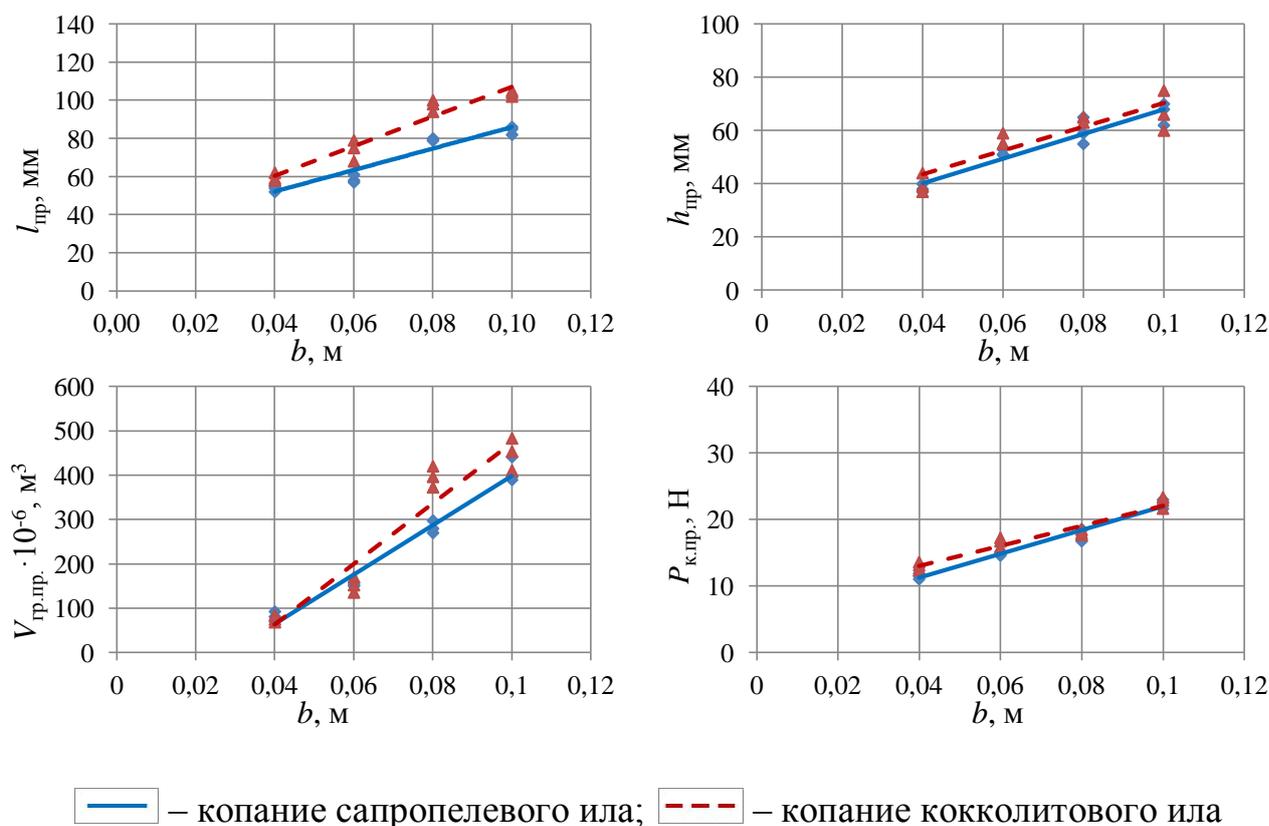


Рисунок 3.9 – Графики зависимостей предельных параметров заполнения ковша от ширины ковша

Интенсивность возрастания функции $P_{к.пр.}(h_0)$ одинакова как для кокколито-вого, так и для сапропелевого илов. Причем значение усилия сопротивления грунта копанию для одинаковых глубин резания отличается незначительно. Функция $P_{к.пр.}(b)$ при копании сапропелевого ила возрастает несколько более интенсивно, чем при копании кокколитового ила.

При варьировании скорости резания, глубины резания и ширины ковша соотношение высоты и длины призмы волочения изменялось в относительно узком диапазоне. Среднее значение угла φ (см. рис. 2.14) для сапропелевого ила составило $49,0^\circ$ при среднеквадратическом отклонении $\sigma = 5,2^\circ$ и коэффициенте вариации $\nu = 10,7\%$; для кокколитового ила среднее значение φ составило $48,6^\circ$ при $\sigma = 5,5^\circ$, $\nu = 11,2\%$. Соотношение массы грунта в ковше к общей массе срезанного грунта в среднем составило для сапропелевых осадков $0,77$ ($\sigma = 0,055$; $\nu = 7,1\%$), для кокколитовых илов этот показатель в среднем составил $0,68$ ($\sigma = 0,06$; $\nu = 8,7\%$).

3.5.4.3 Исследование влияния угла наклона ковша на параметры его заполнения и усилие сопротивления грунта копанию

Испытания были проведены при копании кокколитового ила в атмосферных условиях при углах наклона ковша β_k $1,5$; 30 ; 45 ; 60 и 90° . На рис. 3.10 показаны снимки тела грунта. Черной линией изображен шаблон одинаковых размеров. По результатам испытаний было установлено, что при изменении угла наклона ковша в диапазоне $1,5 \dots 90^\circ$ контур тела грунта в ковше в состоянии предельного заполнения остается практически неизменным относительно соответствующего контура в ненаклоненном ковше.

Вертикальная полуось эллипсов на рис. 3.10 равна предельной высоте заполнения ковша, горизонтальная – предельной длине заполнения. Таким образом, эксперименты показывают, что $h_{пр}$ и $l_{пр}$ не зависят от угла наклона ковша. Однако с увеличением угла наклона объем грунта в ковше, ограничиваемого поверхностью ковша и вертикальной плоскостью, проходящей через режущую

кромку, уменьшается. Днище ковша при его наклоне как бы «отсекает» часть от тела грунта с полуосями $h_{пр}$ и $l_{пр}$, уменьшая объем грунта в ковше.

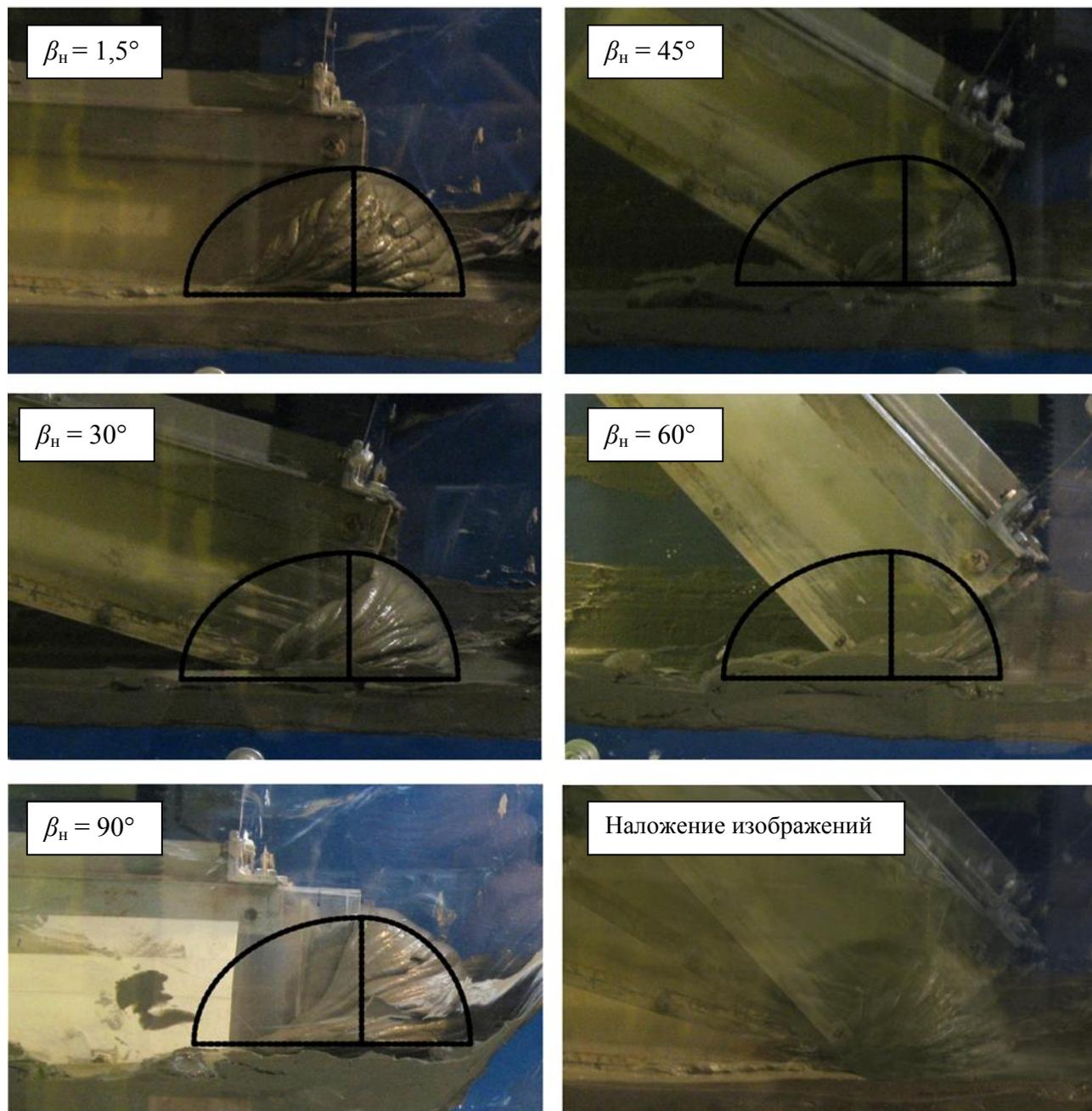


Рисунок 3.10 – Влияние угла наклона ковша на предельные параметры его заполнения (черной линией показан шаблон одинакового размера)

Осциллограммы усилий копания при углах наклона ковша 1,5 и 90° приведены на рис. 3.11. Как видно из графиков, предельное усилие копания при углах наклона ковша 1,5 и 90° находится на одном уровне. Однако возрастание усилия копания при угле наклона ковша 90° происходит более интенсивно, чем

при $1,5^\circ$. Это объясняется следующим образом. Для достижения состояния предельного заполнения ковша в обоих случаях высота призмы волочения должна принять значение $h_{пр}$. Однако требуемый для этого объем грунта для ковша при $\beta_n = 90^\circ$ будет меньшим, поскольку в этом случае весь срезаемый грунт будет расходоваться на формирование призмы волочения. При копании с углом наклона ковша $\beta_n = 1,5^\circ$ срезаемый грунт будет расходоваться на формирование тела грунта в ковше и призмы волочения, поэтому путь копания, а соответственно и предельное время заполнения, будет больше.

Из этого следует ценный практический вывод, что предельное усилие сопротивления ковша заполнению при копании пластичных водонасыщенных грунтов ковшом равно усилию копания грунта отвалом идентичной ширины при одинаковых параметрах процесса резания.

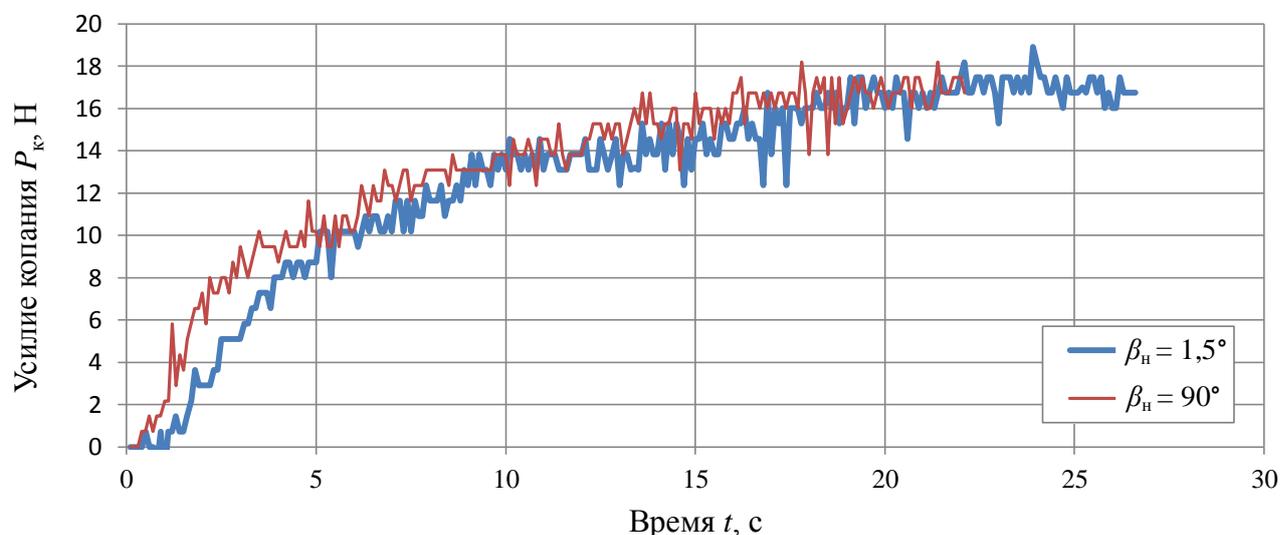


Рисунок 3.11 – Осциллограммы усилий копания при углах наклона ковша $1,5^\circ$ и 90°

Действительно, в состоянии предельного заполнения грунт внутри ковша остается неподвижным (вернее перемещается с очень малой скоростью, что обусловлено процессами ползучести в пластичной грунтовой среде). Поэтому все усилие расходуется на перемещение призмы волочения, параметры которой не зависят от длины и угла наклона ковша, и преодоление сил трения рабочего органа о грунт (при копании в воде прибавляется еще гидродинамическое

сопротивление). Поскольку призма волочения не контактирует с ковшом, сопротивление перемещению призмы волочения уравнивается реакцией тела грунта в ковше, численно равной усилию сопротивления ковша заполнению. При разработке грунта отвалом реакция от призмы волочения передается непосредственно на поверхность отвала. Поэтому при определении предельного усилия заполнения ковша эксперименты могут быть проведены с использованием отвала (при условии его минимального трения о поверхность грунта), ширина которого равна ширине ковша, при идентичных глубине и скорости резания.

3.5.5 Исследование процесса копания ГВОМО в водной среде

Как показали опыты, характер процесса копания ГВОМО в воде имеет существенные отличия от процесса копания в атмосферных условиях. Прежде всего, это проявляется в образовании трещин при деформировании срезаемого пласта, поступающего в ковш (рис. 3.12). Появление трещин наблюдалось даже при выдерживании исследуемого образца грунта под слоем воды в течение более 36 часов. При сливе воды из емкости трещины оплывали и становились мало заметными.

В процессе копания сначала происходило отделение сливной стружки, которая, деформируясь, продвигалась в ковш, формируя тело грунта (рис. 3.12, а, б). Перед ковшем формировалась призма волочения. При достижении состояния предельного заполнения процесс резания переходил в процесс раздвигания грунта. При этом отделялась элементная стружка, а с двух сторон симметрично образовывались валики в виде отдельных элементов грунта (а не сплошного пластичного тела, как при резании в атмосферных условиях). Вслед за ковшем формировалась прорезь, на которой также были отмечены трещины (рис. 3.12, в, г).

Образование трещин при копании ГВОМО в воде можно объяснить следующим. В процессе копания изменяется напряженно-деформированное

состояние срезаемой стружки. В случае превышения максимальными касательными напряжениями величины сцепления происходит сдвиг грунта по линиям скольжения. Образование при этом зазора между сдвигаемыми друг относительно друга элементами грунта зависит от способности частиц коагулировать. Для этого необходимо обеспечить как можно меньшее расстояние между частицами. В атмосферных условиях усредненная плотность ГВОМО значительно выше, чем в воде. Поэтому сближение частиц грунта происходит под действием веса вышележащего слоя. Кроме того, липкость ГВОМО, характеризующая способность частиц к слипанию, на воздухе примерно в 1,5 раза выше, чем в воде. Поэтому образовавшиеся трещины в плоскостях сдвига при копании ГВОМО в воде не затягиваются. Влияние скорости резания на процесс образования трещин не исследовалось.

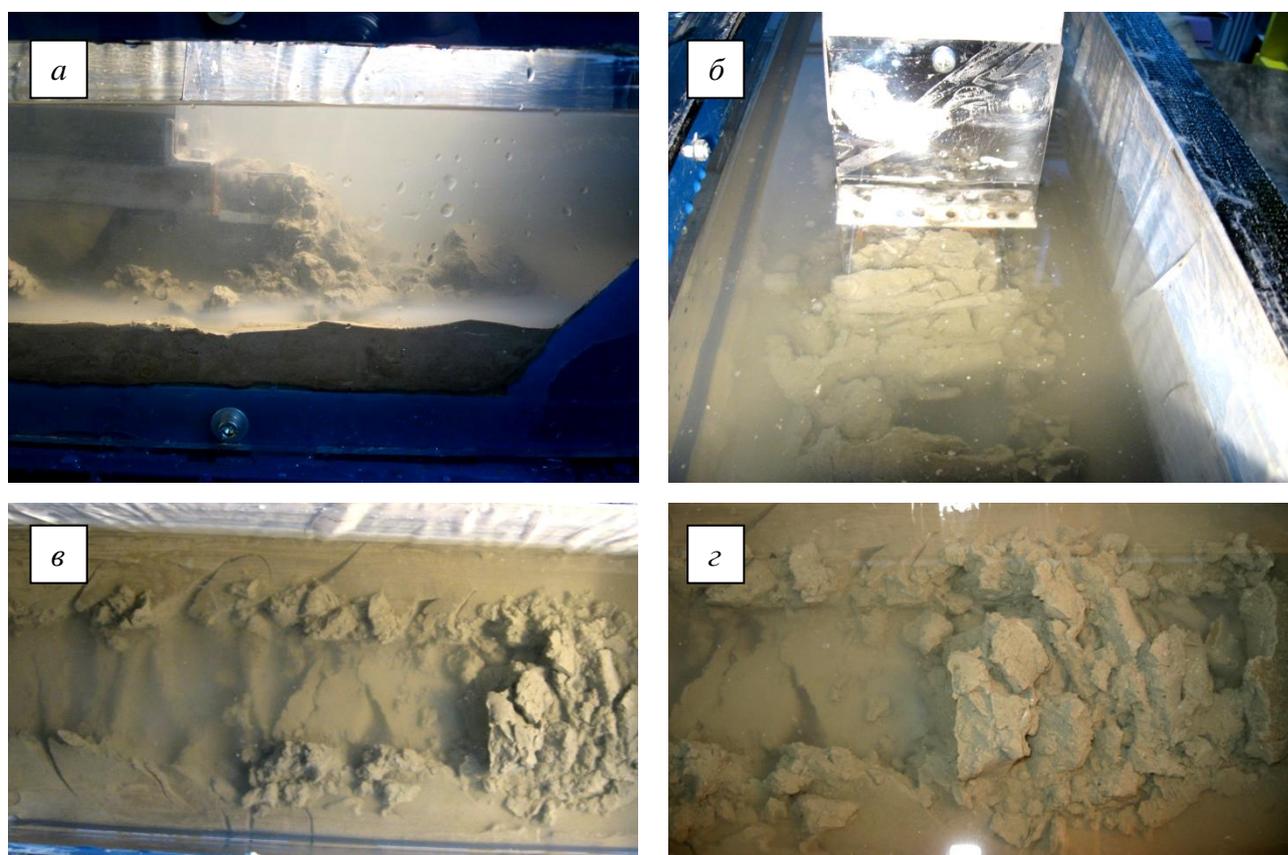


Рисунок 3.12 – Резание ГВОМО в воде

Осциллограммы усилий при копании кокколитового и сапропелевого илов в воде приведены на рис. 3.13. Как видно из осциллограмм, в отличие от реза-

ния в атмосферных условиях, при копании в воде предельное усилие копания сапропелевого ила превышает соответствующее при копании кокколитовых осадков. В то же время, при копании моделью ковша шириной 0,07 м в воде усилие копания кокколитового ила в среднем на 5 %, сапропелевого – на 12 % больше, чем при копании в атмосферных условиях, что связано с особенностями процесса копания грунта в водной среде. Благодаря взвешивающему действию воды, предельные высота и длина заполнения при копании в водной среде больше, чем при копании в атмосферных условиях. С ростом геометрических размеров тела грунта в ковше увеличивается и площадь трения грунта о стенки ковша, что обуславливает возрастание усилия сопротивления ковша заполнению. Значение предельной длины заполнения при копании кокколитового ила в воде в среднем на 20% превысило соответствующее значение при копании в атмосферных условиях. Для сапропелевого ила этот показатель в среднем составил 80%. Предельная высота заполнения при копании кокколитового ила в воде превысила данный параметр в атмосферных условиях в среднем на 12%, при копании сапропелевого ила – на 54%.

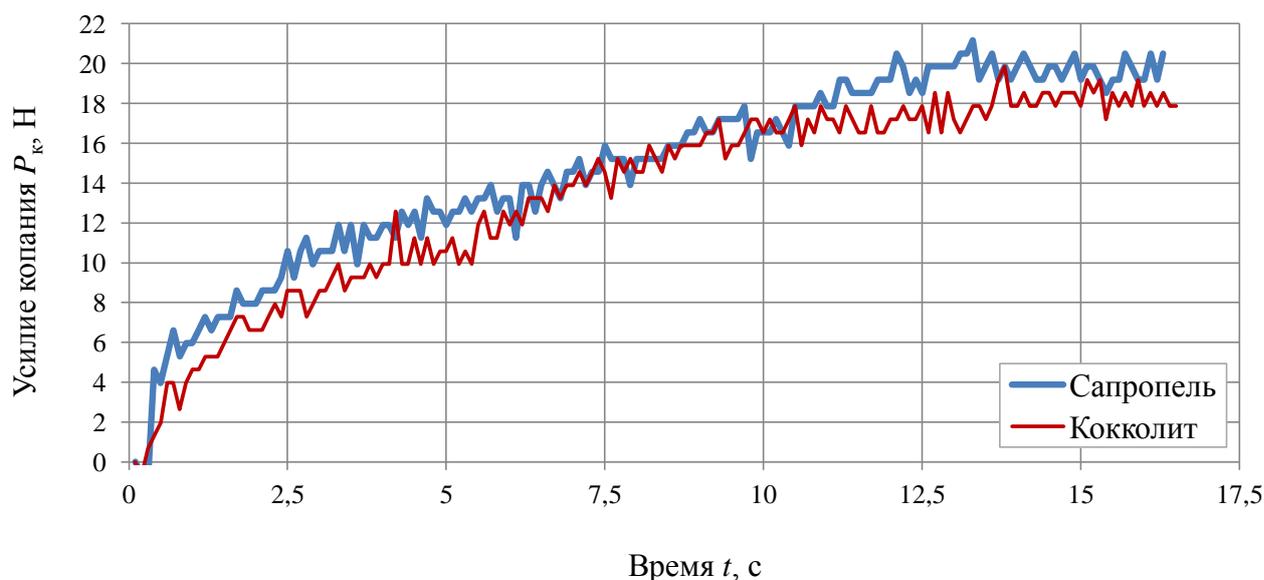


Рисунок 3.13 – Осциллограммы усилий копания ГВОМО в воде

Таким образом, экспериментальные исследования процесса копания ГВОМО в атмосферных условиях и в воде позволили выявить значимые отли-

чия, проявляющиеся в характере стружкообразования и формирования тела грунта при заполнении ковша. При этом физическая картина процесса заполнения ковша в обоих случаях остается прежней: продвижение грунта в ковш происходит при достаточной толщине срезаемой стружки; при достижении состояния предельного заполнения ковша процесс резания грунта переходит в процесс его раздвигания без отделения стружки. Поскольку при получении аналитических зависимостей срезаемая стружка рассматривалась как сплошная среда лишь при врезании ковша в грунтовый массив (до появления первого сдвига), принятая модель заполнения не противоречит физической картине процесса заполнения ковша при копании грунта в водной среде.

3.6 Исследования процесса глубоководного драгирования в Черном море

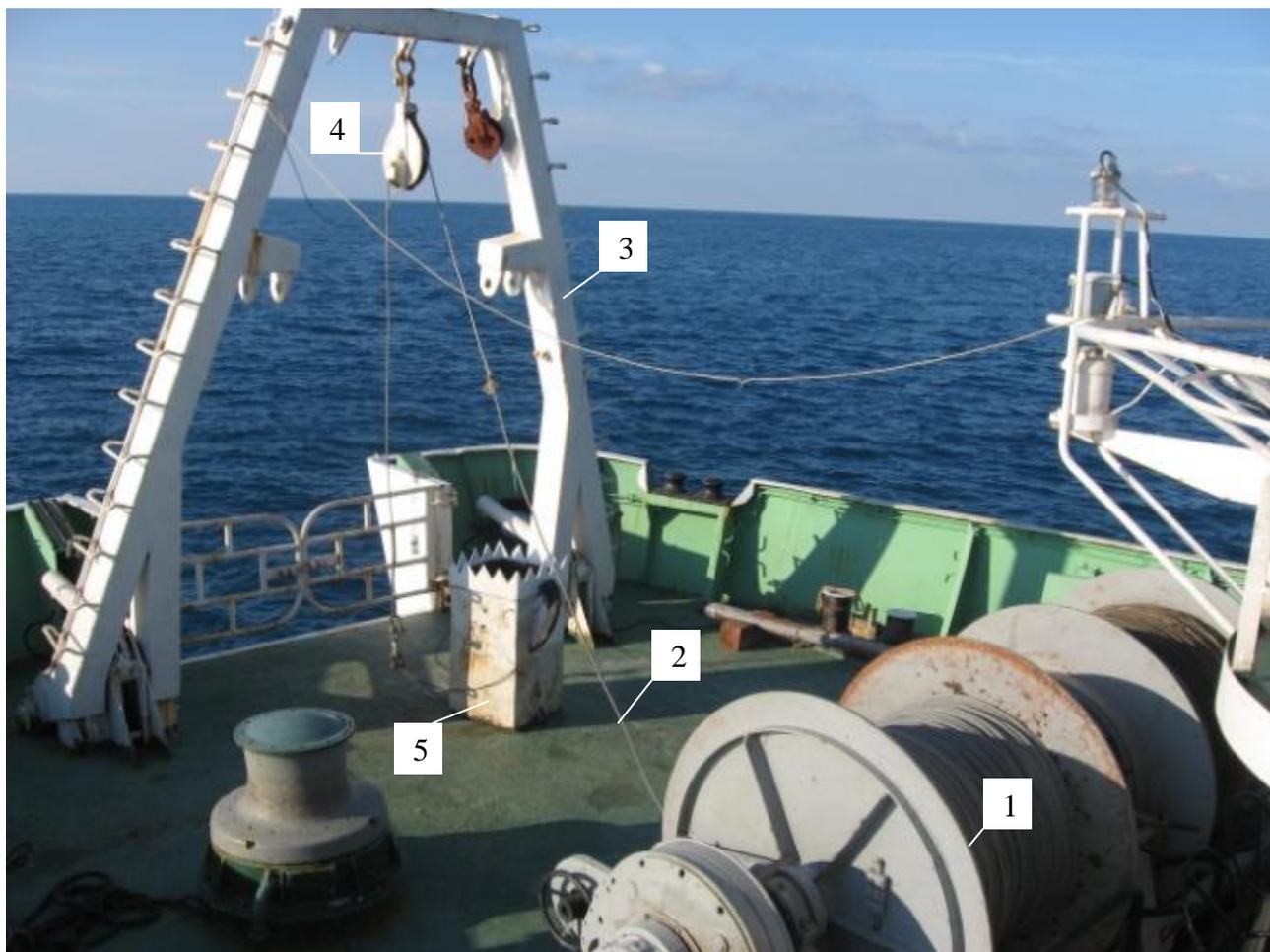
Эксперимент был проведен при отборе проб ковшем землечерпательного снаряда во время экспедиционных исследований на НИС «Профессор Водяницкий» (73-й рейс, 7–17 июня 2013г.). Место отбора проб – полигон «Сапропели». Номер станции – 18/73. Географические координаты: ш. $43^{\circ}39,88'$; д. $32^{\circ}26,80'$. Глубина моря – 1885м.

3.6.1 Условия проведения исследований и используемая аппаратура

Для отбора проб донных осадков нарушенной структуры в ходе экспедиционных исследований на НИС «Профессор Водяницкий» используется одноковшовый землечерпательный снаряд (рис. 3.14), в состав которого входит ковш емкостью $0,33 \text{ м}^3$ ($0,55 \times 0,55 \times 1,10 \text{ м}$), навешиваемый на канат глубоководной лебедки с многослойной навивкой каната на барабан, установленной на палубе в кормовой части судна [103]. Канат проходит через обводной блок П-образной рамы, осуществляющей вывод погружного оборудования за борт судна.

Целью эксперимента являлось исследование кинематических и динамических параметров ковша при отборе проб донных осадков. Для этого использо-

вано разработанное в Национальном горном университете акселерометрическое и тензометрическое оборудование, закрепляемое на ковше [104].



1 – двухбарабанная лебедка с многослойной навивкой каната на барабан; 2 – канат;
3 – П-образная рама; 4 – обводной блок; 5 – ковш

Рисунок 3.14 – Землечерпательный снаряд НИС «Профессор Водяницкий»

Разработанный тензорезисторный датчик натяжения каната (рис. 3.15) состоит из упругого элемента (рессоры), на который с противоположных сторон наклеены проволочные тензорезисторы. Деформирование упругого элемента осуществляется при натяжении каната, криволинейно запасованого в трех опорных точках на рессоре. Два тензорезистора вместе с резисторами постоянного и переменного сопротивлений были соединены в мостовую цепь. При этом тензорезисторы подключены в смежные плечи моста для компенсации изменения их сопротивления при колебаниях температуры и давления окружающей среды.



Рисунок 3.15 – Тензорезисторный датчик усилия натяжения каната конструкции НГУ

Изменение напряжения в тензорезисторной мостовой цепи фиксировалось милливольтметром. Сигнал от тензорезисторов через кабель-трос передавался на милливольтметр, размещенный на специально разработанной электронной плате, установленной в гермобоксе (рис. 3.16). Плата также включала трехосевой акселерометр и гироскоп. Питание электронного оборудования производилось от аккумуляторной батареи напряжением 9В. Результаты измерений фиксировались на карту памяти с частотой 10 Гц.

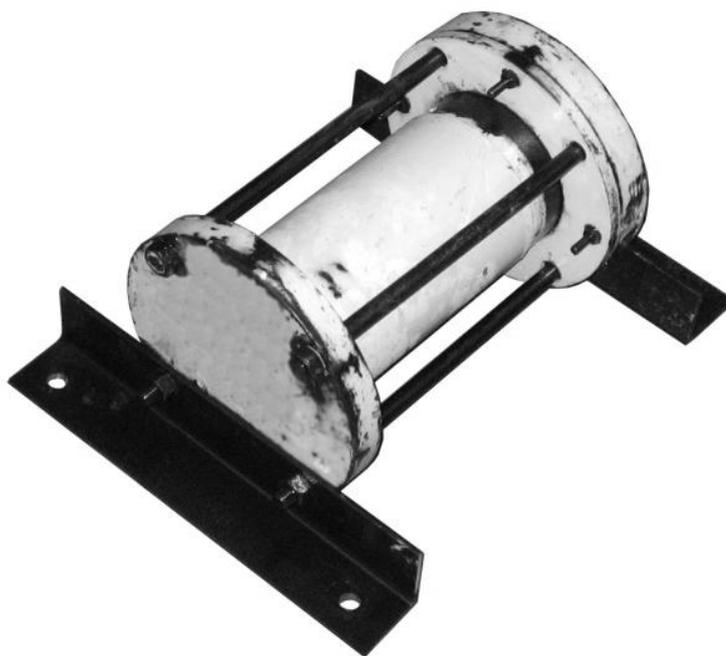


Рисунок 3.16 – Гермобокс конструкции НГУ

Тарировка разработанного электронного оборудования проводилась в два этапа. Задачей первого этапа являлось установление влияния гидростатическо-

го давления на показания тензоизмерительного оборудования. Для этого гермо-бокс с электроникой, кабель-трос и датчик усилия натяжения каната помещались в гидростат, заполненный водой (рис. 3.17, *а*). Повышение давления в гидростате осуществлялось при помощи ручного высоконапорного поршневого насоса ступенями по 10 атм. от 1 до 250 атм. с выдержкой по 5 мин. на каждой ступени. После проведения испытаний было установлено, что давление водной среды не влияет на показания тензоизмерительного оборудования.

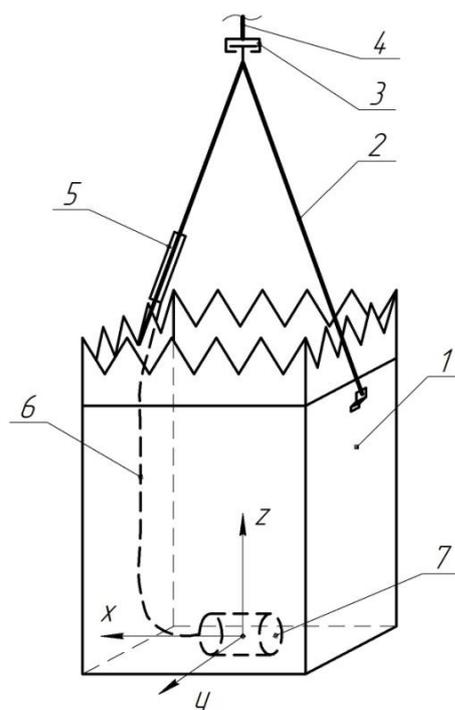
*а**б*

Рисунок 3.17 – Испытание и тарировка электроизмерительного оборудования в гидростате (*а*) и на механическом прессе (*б*)

Целью второго этапа тарировки являлось градуирование показаний тензоизмерительного оборудования в соответствии с усилием натяжения каната, создаваемого путем его растяжения на пятитонном механическом прессе (рис. 3.17, *б*). Растягивающая нагрузка на канат передавалась ступенями по 1000 Н от 0 до 7000 Н. По результатам серии испытаний была получена зависимость напряжения разбаланса мостовой цепи от усилия натяжения каната. Для полученной зависимости было выведено уравнение регрессии с коэффици-

ентом детерминации 0,997. Максимальная погрешность измерений с использованием разработанного тензоизмерительного оборудования составляет 150 Н.

Во время испытаний в море гермобокс был надежно закреплен при помощи болтовых соединений на задней стенке внутри ковша, датчик усилия крепился на стропе при помощи специальных канатных зажимов. Схема крепления измерительного оборудования и положение осей координат, относительно которых производились измерения линейных ускорений и углов наклона ковша в пространстве, показано на рис. 3.18.



- 1 – корпус; 2 – стропа; 3 – вертлюг; 4 – тяговый канат; 5 – датчик натяжения стропы;
6 – кабель-трос; 7 – гермобокс с измерительной аппаратурой

Рисунок 3.18 – Схема закрепления измерительного оборудования на ковше

После включения электронной аппаратуры на протяжении всего цикла драгирования велась запись в журнал о скорости хода судна, показаниях судового эхолота, скорости опускания каната и режиме работы траловой лебедки. Записи позволили при дальнейшем анализе полученных результатов сопоставить показания датчиков электронной аппаратуры с ходом ведения драгировочных работ.

3.6.2 Результаты исследований процесса глубоководного драгирования и их анализ

При подъеме на палубу судна ковш землечерпательного снаряда был заполнена на 50–60% своего объема кокколитовым илом. По визуальной оценке толщина срезанного пласта грунта находилась в диапазоне 0,25–0,30 м. Тяговый канат в области вертлюга был запутан, вследствие чего наблюдался перекокс ковша ориентировочно на 8–10° от вертикали.

После извлечения из гермобокса карты памяти, полученные данные были перенесены на персональный компьютер для обработки в программном пакете Mathcad. По результатам обработки построены осциллограммы усилия натяжения стропы ковша, графики ускорений и углов наклона ковша во время цикла пробоотбора (рис. 3.19).

Результаты обработки, приведенные на графиках, хорошо интерпретируются с записями в журнале о ходе проведения драгировочных работ. На осциллограмме усилий натяжения стропы (рис. 3.19, *а*) первый пик совпадает с подъемом ковша палубным грузоподъемным оборудованием (П-образной рамой) и его выводом за борт. Дальнейший спад обусловлен высокой скоростью вытравливания каната (2 м/с), соизмеримой со скоростью свободного падения ковша в воде [38]. При этом усилие натяжения стропы близко к нулю. Для этого же промежутка времени из графиков углов наклона ковша относительно горизонтальной плоскости видна сложная кинематика ковша во время его опускания на дно. Режущая часть для обеспечения заглубления ковша в грунт утяжелена, поэтому при свободном падении в воде ковш опускается зубьями вниз. Такому его положению дополнительно способствует высокая «парусность» полости ковша с перфорированной задней стенкой. Из графиков углов наклона (рис. 3.19, *б*) видно, что при опускании на малой скорости хода судна (около 0,3 мили/ч) ковш опускался с переменным углом режущей частью направленной ко дну моря.

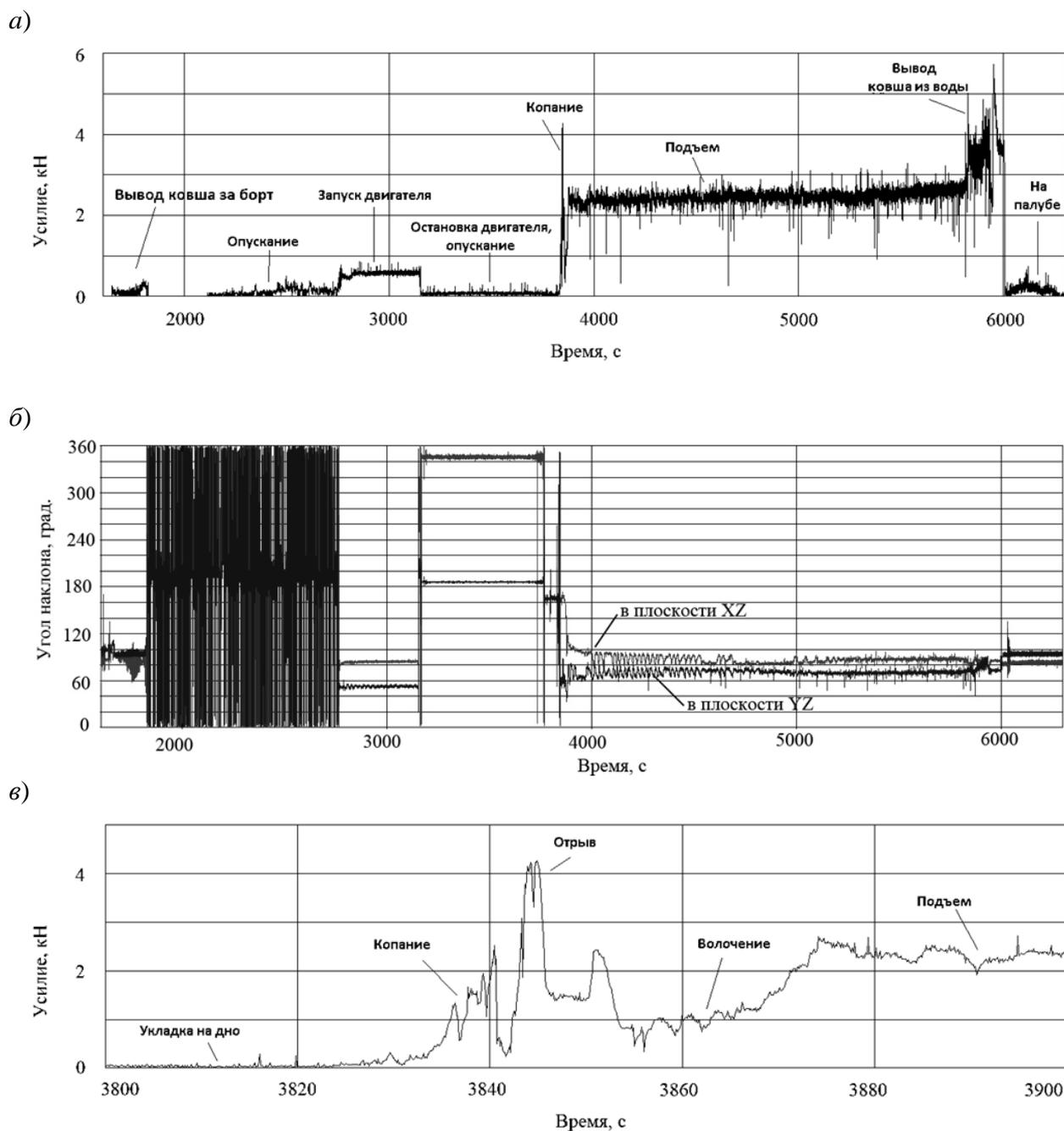


Рисунок 3.19 – Осциллограммы: усилия натяжения стропы ковша во время цикла отбора пробы (а) и при копании (в); углов наклона ковша относительно горизонтальной плоскости (б)

При отборе проб донных осадков ковшом землечерпательного снаряда судно должно иметь скорость хода порядка 2–3 миль/ч. В условиях слабого дрейфа для разгона судна был запущен двигатель, приводящий гребной винт во вращение. Поэтому наблюдаемый второй пик на осциллограмме усилий обусловлен увеличением усилия натяжения каната вследствие возрастания гидро-

динамического сопротивления перемещению ковша в воде при увеличении скорости хода судна с 0,3 до 3,0 миль/ч. При дальнейшем вытравливании каната лебедкой со скоростью 2 м/с ковш опускался наклонно к горизонту, но уже зубьями кверху. Натяжение стропы ковша, на которой был установлен датчик, в этот момент достигало 0,6 кН (расчетное усилие натяжения тягового каната, полученное путем сложения векторов натяжения строп ковша, составило 1,15 кН).

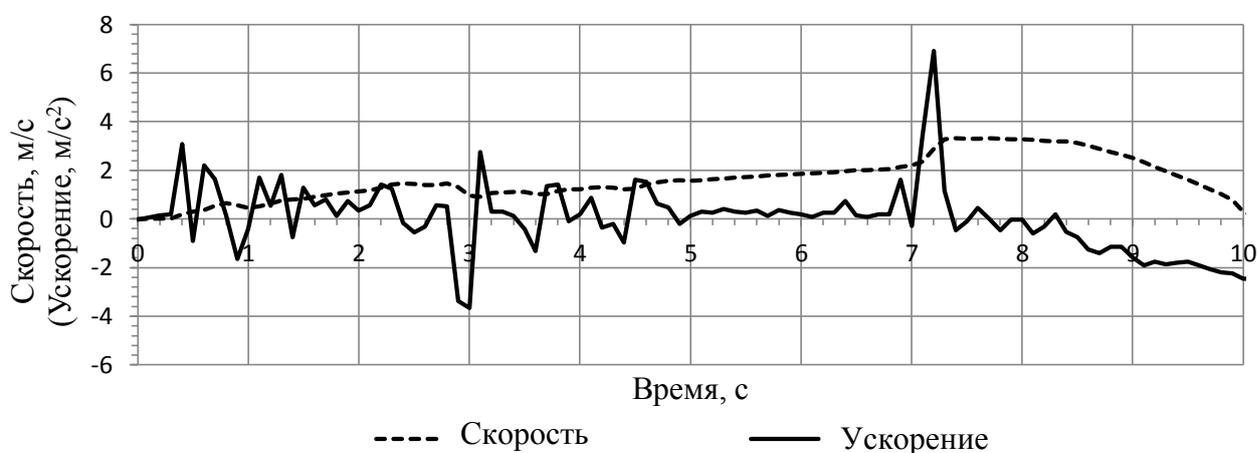
Следующий пик на осциллограмме усилий отслеживается во время копания грунта. Как показывает график углов наклона, ковш был уложен на дно под углом к горизонту немного меньше 15° и в таком положении оставался до натяжения каната. После укладки ковша на дно канат продолжали сматывать с траловой лебедки, видимо, образовав петлю вокруг ковша. При натяжении каната произошло стягивание образовавшейся петли и дальнейшее однократное опрокидывание ковша относительно режущей кромки. Именно это опрокидывание, как предполагается, привело к запутыванию тягового каната.

Запутывание тягового каната в области вертлюга привело к уменьшению длины стропы ковша без датчика. Данное обстоятельство обусловило усложнение расчетов по определению усилия натяжения тягового каната. Для определения последнего было произведено сравнение показаний силоизмерительного оборудования с весом заполненного ковша, поднятого над зеркалом воды. При этом учитывалась степень заполнения ковша кокколитовым илом (на 50% своего объема) и наличие воды в свободном от грунта объеме. В результате был получен поправочный коэффициент, позволяющий определить усилие натяжения тягового каната в зависимости от показаний используемого силоизмерительного оборудования.

Особый интерес представляет определение усилия сопротивления грунта копанию, включающего усилие сопротивления грунта резанию, заполнению ковша и его перемещению по донной поверхности. Для этого возникла необходимость определения усилия гидродинамического сопротивления перемещению ковша при копании. По осциллограммам углов наклона ковша и ускорения

вдоль оси z (см. рис. 3.18, 3.19) было установлено, что продолжительность процесса копания грунта составила менее 10 с. Для указанного промежутка времени с использованием метода графического интегрирования осциллограммы ускорения ковша вдоль оси z была построена функция, характеризующая скорость перемещения ковша при копании (рис. 3.20, *а*), что позволило определить усилие гидродинамического сопротивления с использованием методики, приведенной в [105]. Графики тягового усилия, определенного по показаниям силоизмерительного оборудования, и гидродинамического сопротивления, найденного расчетным путем, показаны на рис. 3.20, *б*. Усилие сопротивления грунта копанию (см. рис. 3.20, *б*) определено как разность тягового усилия и гидродинамического сопротивления в соответствующие моменты времени.

а)



б)

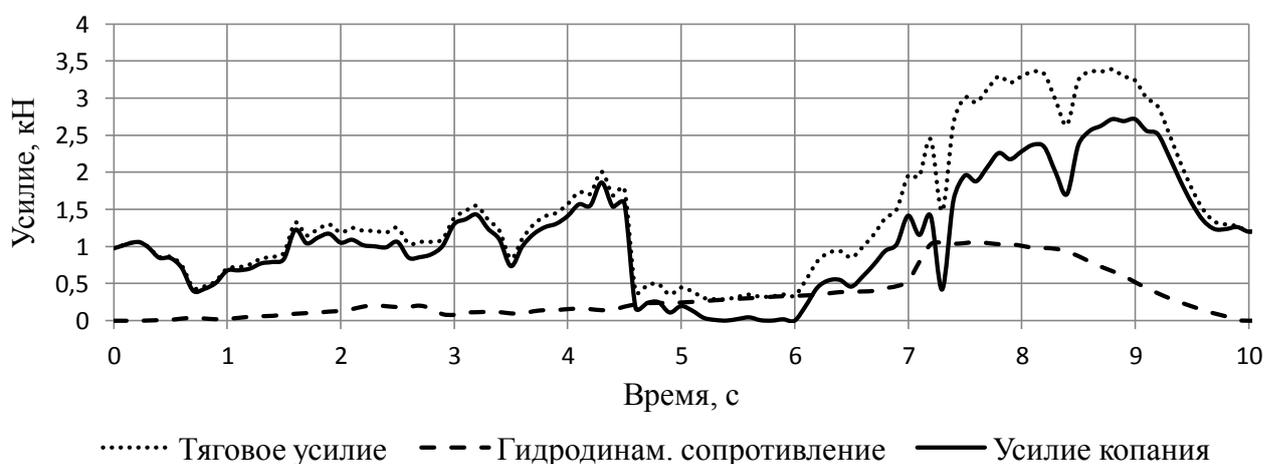


Рисунок 3.20 – Графики изменения скорости, ускорения (*а*) и усилий (*б*) при копании грунта ковшом

После копания грунта ковш, немного протянувшись нижней частью по донному илу под углом 35–45°, оторвался от дна, постепенно выравниваясь при подъеме до 80–85° относительно горизонта. Усилие натяжения тягового каната при подъеме изменяется незначительно и составляет около 2,0 кН. При выходе ковша из воды усилие натяжения тягового каната резко увеличивается до пиковых 4,5 кН вследствие прекращения действия архимедовой силы, а также динамических нагрузок, обусловленных качкой судна при волнении моря. По мере оттока воды из ковша через отверстия в стенках натяжение каната уменьшается до 2,7 кН и при опускании ковша на палубу судна падает до нуля.

Для определения свойств ГВОМО в месте отбора проб ковшом землечерпательного снаряда на полигоне «Сапропели», при помощи гравитационного трубчатого пробоотборника были отобраны образцы донного грунта условно ненарушенного сложения. Отбор, транспортирование и хранение образцов ГВОМО осуществлялись в соответствии с требованиями ДСТУ Б В.2.1-8-2001 «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов» [97]. Лабораторные исследования проводились с учетом ДСТУ Б В. 2.1-3-96 «Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения» [106] и ДСТУ Б В.2.1-5-96 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний» [107].

Из физических свойств ГВОМО определяли влажность и усредненную плотность по методике, приведенной в ДСТУ Б В.2.1-17:2009 «Грунты. Методы лабораторного определения физических свойств» [102]. Влажность определяли способом высушивания образцов, усредненную плотность – методом режущего кольца.

Исследования характеристик прочности и деформируемости ГВОМО были проведены на автоматизированном приборе трехосевого нагружения образцов (стабилометре) Triscan 10 (рис. 3.21) в соответствии с ДСТУ Б В.2.1-4-96 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости» [108]. Диаметр и высота образцов составляли соответственно 38 и 76 мм. Испытание производили без предварительного уплотнения образца и без отжатия из него воды в процессе всего испытания (неконсолидированно-

недренированная схема испытаний). После наполнения камеры водой для уравновешивания порового давления образец выдерживали 30 мин при выбранном для проведения испытаний давлении. Испытания для каждого типа илов проводили при давлении воды в камере стабилометра 100, 200 и 300 кПа. Скорость деформирования образца составляла 1 мм/мин. По результатам испытаний построены диаграммы разрушающих напряжений Мора, по которым определяли величину сцепления грунта и угол внутреннего трения. Графики деформирования образцов, а также диаграмма напряжений Кулона-Мора приведены в приложении К.

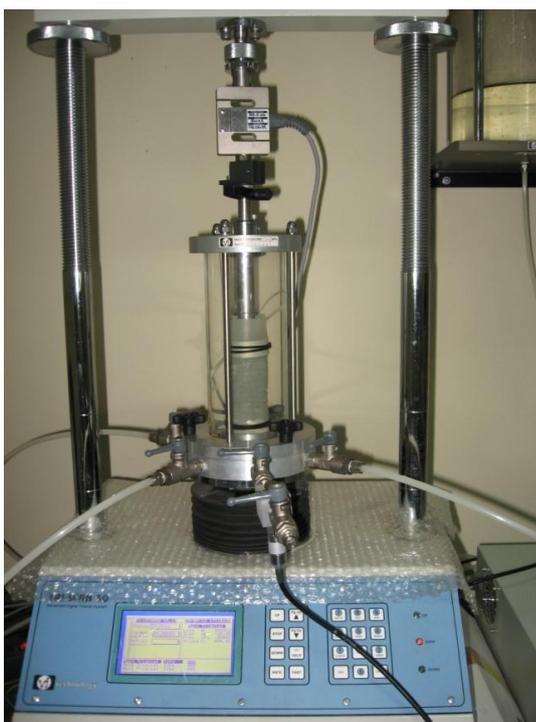


Рисунок 3.21 – Стабилометр Triscan 10 (производства Великобритании)

Результаты лабораторных исследований следующие. Значение влажности исследуемых образцов кокколитового ила в среднем составило 226,5%, сапропелевого – 379,2%, зеленовато-серого – 186,0%. Усредненная плотность кокколитового ила составила 1194 кг/м³, сапропелевого – 1110 кг/м³, зеленовато-серого – 1255 кг/м³. Сцепление кокколитового, сапропелевого и зеленовато-серого илов составило соответственно 0,48, 5,26 и 2,03 кПа. Угол внутреннего трения при всех испытаниях близок к нулю.

Практический интерес представляет выделение из усилия копания усилия резания и заполнения, для чего из общего тягового усилия необходимо вычесть усилие гидродинамического сопротивления и усилие сопротивления трению ковша о грунт (на участке с малым ускорением ковша с целью исключения из рассмотрения сил инерции). В НИПИОкеанмаш были проведены исследования сопротивления перемещению опорной части подводных машин с использованием модели типа «сани» (рис. 3.22). Модель массой 31 кг буксировали по дну водоема (Нижне-Чурбашское хвостохранилище, Керченский полуостров) с постоянной скоростью 0,05 м/с. При этом измеряли усилие натяжения тягового каната. Поверхность дна на опытном полигоне представлена глинистыми илами со следующими физико-механическими характеристиками: плотность – 1180–1330 кг/м³; сцепление – 0,2–0,7 кПа; влажность – 187–262%; несущая способность – 1,1–4,0 кПа. Максимальное тяговое усилие при проведении испытаний составило 330 Н.

Сравнивая условия проведения экспериментальных исследований на опытном участке в хвостохранилище и в Черном море можно в первом приближении определить диапазон усилия сопротивления трению ковша о грунт, которое с точки зрения автора не должно превышать 500–800 Н. Таким образом, максимальное усилие резания и заполнения при отборе проб ковшем землечерпательного снаряда на станции 18/73 не превысило 1,9–2,2 кН.

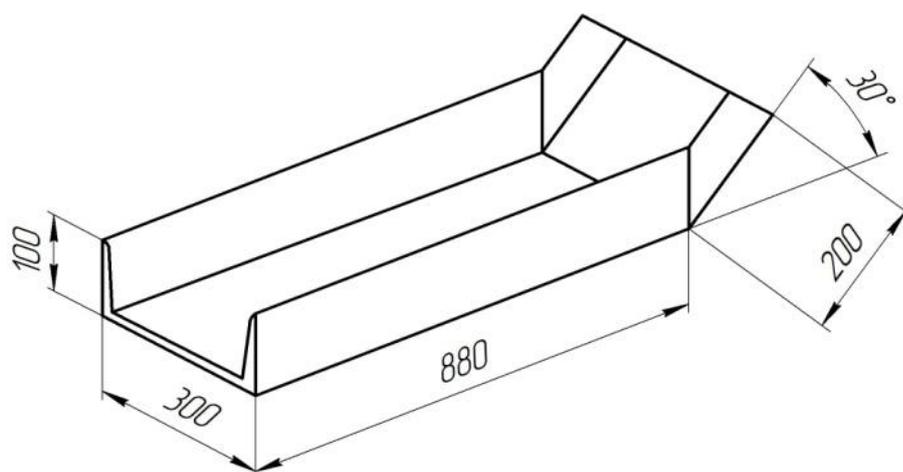


Рисунок 3.22– Общий вид модели типа «сани»

Полученные результаты натурных испытаний подтверждают положение о малозначимом влиянии гидростатического давления на величину усилия сопротивления пластичных водонасыщенных грунтов копанию. Максимальное тяговое усилие при отборе кокколитовых илов на станции 18/73 составило 3,4 кН, усилие резания и заполнения – 1,9–2,2 кН. При этом баланс гидродинамического сопротивления, согласно расчетным данным (на участке с малым ускорением), составил почти 30%, доля усилия резания и заполнения – 65%, усилие сопротивления трению ковша о грунт – около 5%. Сам процесс черпания грунта происходил неравномерно, рывками. Общая продолжительность процесса копания составила менее 10 с при длительности цикла драгирования более 1,5 ч.

3.7 Проверка адекватности разработанных математических моделей

Проверку адекватности разработанных математических моделей выполним в следующей последовательности:

1) Сформируем исходные данные для расчета параметров заполнения ковша.

2) Выполним расчет параметров $h_{пр}$, $l_{пр}$, $V_{гр.пр.}$ и $P_{к.пр.}$, используя зависимости соответственно (2.71), (2.72), (2.75) и (2.84). При этом расчет параметра $l_{пр}$ производим для двух расчетных случаев: $b_I = h_I$ и $2b_I/b_{II} = h_I/h_{II} = Q$.

3) Построим графики зависимостей параметров заполнения от скорости резания, глубины резания и ширины ковша.

4) Путем сравнения теоретических и экспериментальных кривых определим математическую модель для расчета параметра $l_{пр}$, которая более точно описывает поведение функций $l_{пр}(v_0)$, $l_{пр}(h_0)$ и $l_{пр}(b)$.

5) Выполним расчеты параметров заполнения при копании ГВОМО в воде в лабораторных и натурных условиях.

6) Определим отклонение экспериментальных данных от расчетных, используя методы математической статистики.

Физико-механические свойства образцов кокколитовых и сапропелевых илов, используемых при проведении лабораторных исследований, а также свойства илов, отобранных на полигоне «Сапропели» приведены ранее.

Данные для расчетов параметров заполнения ковша при проведении лабораторных и полевых исследований процесса копания ГВОМО сведены в табл. 3.6. Расчет параметра K_r приведен в приложении Л. Коэффициент k_p , учитывающий увеличение сопротивления перемещению стружки за счет увеличения ее толщины, для всех расчетных случаев принят равным 1.

Таблица 3.6

Исходные данные для расчета параметров заполнения ковша и усилия копания

Параметр	Обозначение	Ед. измерений	Значение		
			Лабораторные исследования		Полигон «Сапропели»
			Сапропель	Кокколит	Кокколит
Сцепление	τ_0	Па	156	187	480
Пластическая вязкость	$\eta_{пл}$	Па·с	807,4	226,8	226,8
Усредненная плотность грунта	ρ	кг/м ³	1219	1269	1200
Усредненная плотность грунта в воде	$\Delta\rho$	кг/м ³	219	269	200
Угол наклона отрезка, соединяющего полуоси эллипса, который описывает контур призмы волочения в плоскости симметрии ковша	φ	град.	49,0	48,6	48,6
Параметр, учитывающий изменение вязкости грунта при изменении скорости его деформирования	K_r	Па·м	130	130	130
Скорость резания	v_0	м/с	0...1,1	0...1,1	0,5
Глубина резания	h_0	м	0...0,04	0...0,04	0,25; 0,30
Ширина ковша	b	м	0...0,12	0...0,12	0,56

Результаты расчетов параметров заполнения при копании сапропелевого и кокколитового илов в атмосферных условиях в графическом виде приведены в приложении М. Как видно из графиков, функции $l_{пр}(v_0)$, $l_{пр}(h_0)$ и $l_{пр}(b)$ удовлетворительно описываются математической моделью для второго расчетного случая ($2b_I/b_{II} = h_I/h_{II} = Q$). Для первого расчетного случая ($b_I = h_I$) отклонение расчетных значений параметра $l_{пр}$ от экспериментальных данных значительное (более 40%), а поведение функции $l_{пр}(h_0)$ не соответствует физической картине процесса копания

грунта. Действительно, при увеличении глубины резания толщина области вязкопластического течения грунта увеличивается, и если полагать, что $b_I = h_I$, то при некотором значении h_0 получим суммарную толщину областей вязкопластического течения грунта у боковых стенок ковша большей, чем ширина ковша, что физически невозможно. Поэтому в дальнейшем для расчета параметра $l_{пр}$ полагаем справедливым соотношение $2b_I/b_{II} = h_I/h_{II} = Q$. Из этого следует, что параметры b_{II} и h_{II} необходимо определять по зависимостям соответственно (2.51) и (2.59).

Вместе с тем, приведенные графики показывают ограниченность в применении разработанных математических моделей. При значении $b < 2h_I$ функции $l_{пр}(b)$ и $P_k(b)$ стремительно возрастают, хотя с уменьшением ширины ковша указанные функции должны снижаться до 0. Это следует учитывать при расчете параметров заполнения, особенно если глубина резания превышает половину ширины ковша.

При $b < 2h_I$ можно воспользоваться линейной аппроксимацией. Для этого необходимо увеличить ширину ковша таким образом, чтобы b превышало значение $2h_I$, и для полученного расчетного значения $(l_{пр}; b)$ или $(P_k; b)$ определить значение исследуемого параметра, приняв координаты второй точки (0; 0).

Используя исходные данные из табл. 3.6, произведем расчет параметров заполнения при копании кокколитового ила в воде моделью ковша шириной 0,07 м при $h_0 = 0,01$ м, $v_0 = 0,1$ м/с. Данный расчет приведен в приложении Н. Теоретическая кривая $P_k(s)$ и осциллограмма усилия копания представлены на рис. 3.23.

Используя приведенный в приложении Н алгоритм расчета, определим параметры заполнения ковша для различных скоростей резания при копании сапропелевого и кокколитового илов в воде (исходные данные см. табл. 3.6) и сравним полученные результаты с результатами лабораторных исследований процесса копания ГВОМО моделью ковша шириной 0,07 м при скорости резания 0,01 м/с и глубине резания 0,01 м. Результаты расчета сведем в таблицу 3.7.

Отклонение Δ_A экспериментальных значений параметра A от расчетных рассчитываем по формуле:

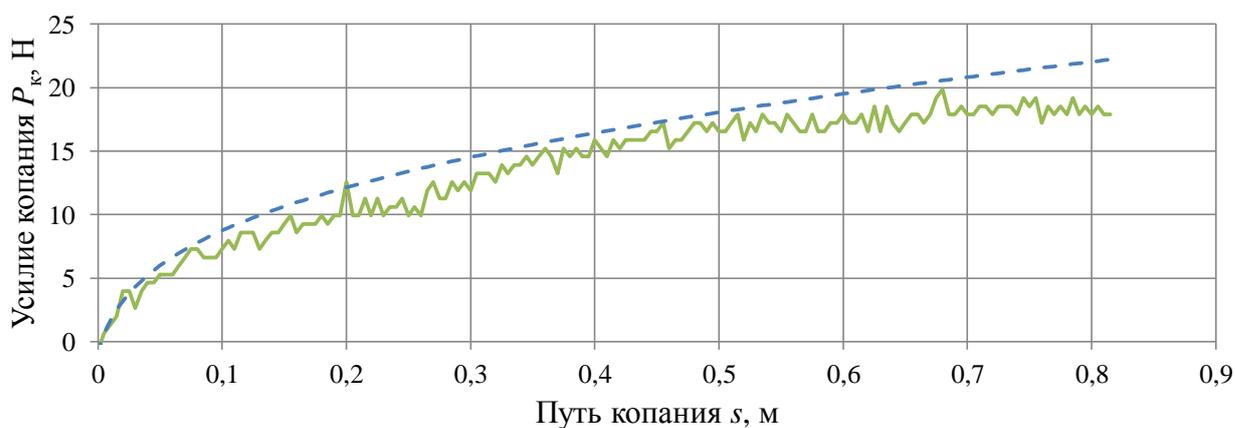


Рисунок 3.23 – Зависимость усилия копания от пути копания

(пунктирной линией обозначено теоретическая зависимость, сплошной – осциллограмма усилия копания кокколитового ила при $b = 0,07$ м, $h_0 = 0,01$ м).

$$\Delta_{Ai} = \sqrt{\left(\frac{A_{pi} - A_{эi}}{A_{pi}}\right)^2}, \quad (3.5)$$

где A_{pi} и $A_{эi}$ – соответственно расчетное и экспериментальное значение параметра A ($i = 1, 2, 3, \dots, n$).

Таблица 3.7

Результаты расчетов параметров заполнения при копании ГВОМО в воде моделью ковша при различных скоростях резания ($b = 0,07$ м; $h_0 = 0,01$ м)

Параметры заполнения	Расчетные значения					Средние экспериментальные значения ($v_0 = 0,01$ м/с)
	Скорость резания v_0 , м/с					
	0,1	0,25	0,50	0,75	1,00	
Сапропелевый ил						
$h_{пр} \cdot 10^{-3}$, м	78,6 (0,081)	78,6 (0,081)	78,6 (0,081)	78,6 (0,081)	78,6 (0,081)	85,0 $\sigma = 3,4; \nu = 0,04$
$l_{пр} \cdot 10^{-3}$, м	104,5 (0,206)	104,5 (0,206)	104,5 (0,206)	104,5 (0,206)	104,5 (0,206)	126,0 $\sigma = 11,4; \nu = 0,09$
$P_{к.пр.}$, Н	22,0 (0,100)	21,6 (0,083)	21,4 (0,075)	21,4 (0,075)	21,4 (0,075)	19,8 $\sigma = 1,4; \nu = 0,07$
Кокколитовый ил						
$h_{пр} \cdot 10^{-3}$, м	77,9 (0,140)	77,9 (0,140)	77,9 (0,140)	77,9 (0,140)	77,9 (0,140)	67,0 $\sigma = 2,0; \nu = 0,03$
$l_{пр} \cdot 10^{-3}$, м	103,5 (0,014)	103,4 (0,014)	103,4 (0,014)	103,4 (0,014)	103,4 (0,014)	102,0 $\sigma = 6,12; \nu = 0,06$
$P_{к.пр.}$, Н	24,2 (0,236)	22,8 (0,189)	22,3 (0,170)	22,1 (0,163)	22,0 (0,159)	18,5 $\sigma = 0,74; \nu = 0,04$

Примечание. Значения в скобках показывают относительное отклонение экспериментальных данных от расчетных, рассчитанное по формуле (3.5).

Как видно из таблицы 3.7, с увеличением скорости резания от 0,1 до 1,0 м/с расчетные параметры заполнения и усилие копания изменяются незначительно. Однако при малых скоростях резания отклонение экспериментальных данных от расчетных для параметра $P_{к.пр.}$ возрастает. Таким образом, при проведении расчетов параметров заполнения и усилия копания скорость резания может быть задана от 0,1 до 1,0 м/с. Использование в качестве исходных данных скоростей резания меньше 0,1 м/с приводит к увеличению погрешности расчетов усилия копания. С учетом реальных режимов эксплуатации глубоководных грунтообрабатывающих машин, значение скорости, задаваемое в исходных данных для расчета, рекомендуется принимать равным 0,5 м/с.

Расчет параметров заполнения ковша при копании кокколитовых илов ковшом землечерпательного снаряда в реальных условиях эксплуатации приведен в приложении П. Расчет производим для глубин резания 0,25 м и 0,30 м. Скорость резания зададим равной 0,5 м/с. Результаты расчетов сведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Результаты расчетов параметров заполнения при копании кокколитового ила ковшом землечерпательного снаряда на полигоне «Сапропели»

($b = 0,56$ м; $v_0 = 0,5$ м/с; $h_0 = 0,25 \dots 0,30$ м)

Параметры заполнения	Расчетные значения		Экспериментальные значения
	Глубина резания h_0 , м		
	0,25	0,30	
$h_{пр.}$, м	0,833	0,884	–
$l_{пр.}$, м	1,571	1,801	–
$P_{з.пр.}$, Н	1932,9	2368,9	1900–2200*

Примечание. Диапазон усилия заполнения получен полурасчетным методом (см. п. 3.6.2).

Как видно из таблицы, результаты расчета достаточно близки к результатам экспериментальных исследований. Относительная погрешность усилия сопротивления заполнению ковша, рассчитанная по формуле 3.5, находится в пределах 0,017...0,198 (при экспериментальном значении $P_{з.пр.} = 1900$ Н), и

0,071...0,138 (при экспериментальном значении $P_{з.пр.} = 2200$ Н). Таким образом, максимальное отклонение расчетных данных от экспериментальных следует ожидать менее 20 %.

Произведем статистическую обработку результатов экспериментальных исследований, проведенных на лабораторном стенде при копании образцов кокколитовых и сапропелевых илов в атмосферных условиях. Для увеличения объема данных при статистической оценке отклонений Δ_A расчетных данных параметра A от экспериментальных исследуем возможность объединения выборок $\Delta_A(v_0)$, $\Delta_A(h_0)$ и $\Delta_A(b)$ отдельно для результатов экспериментов по копанию сапропелевого и кокколитового илов. Для этого произведем проверку гипотезы однородности двух выборок по критерию Вилкоксона [109]. Данный критерий применим к случайным величинам, распределения которых неизвестны, требуется лишь, чтобы величины были непрерывными. Алгоритм проверки гипотезы об однородности двух выборок приведен в приложении Р.

Исследуем возможность объединения групп выборок $\Delta_{лпр}(h_0)$, $\Delta_{лпр}(b)$, $\Delta_{лпр}(v_0)$; $\Delta_{хпр}(h_0)$, $\Delta_{хпр}(b)$, $\Delta_{хпр}(v_0)$; $\Delta_{Vгр.пр.}(h_0)$, $\Delta_{Vгр.пр.}(b)$, $\Delta_{Vгр.пр.}(v_0)$; $\Delta_{Рк.пр.}(h_0)$, $\Delta_{Рк.пр.}(b)$ и $\Delta_{Рк.пр.}(v_0)$. Результаты расчетов приведены в приложении С.

В итоге были получены выборки:

1) при копании сапропелевого ила: $\Delta_{лпр}(v_0, h_0, b)$, $\Delta_{хпр}(h_0, b)$, $\Delta_{хпр}(v_0)$, $\Delta_{Vгр.пр.}(v_0, h_0, b)$, $\Delta_{Рк.пр.}(v_0, h_0, b)$;

2) при копании кокколитового ила: $\Delta_{лпр}(v_0, h_0)$, $\Delta_{лпр}(b)$, $\Delta_{хпр}(h_0, b)$, $\Delta_{хпр}(v_0)$, $\Delta_{Vгр.пр.}(h_0, b)$, $\Delta_{Vгр.пр.}(v_0)$, $\Delta_{Рк.пр.}(v_0)$, $\Delta_{Рк.пр.}(h_0, b)$.

Для полученных выборок определим закон распределения случайных величин. Для этого каждую из исследуемых выборок разделим на N интервалов и построим гистограммы распределения соответствующих параметров заполнения ковша. По виду гистограмм плотности распределения для полученных выборок выдвигаем гипотезу о виде закона распределения. Если гистограмма имеет выраженный пик – проводим проверку для нормального закона распределения; если частоты распределены равномерно – для равномерного закона распределения на заданном интервале распределения случайных величин; если

гистограмма имеет вид «убывающих ступенек», то производим проверку об экспоненциальном законе распределения [100].

Результаты проверки гипотез распределения выборок и расчета параметров \bar{x} и Δx приведены в приложении Г. Результаты расчетов математического ожидания и доверительного интервала для относительных отклонений расчетных и экспериментальных данных, взятых по объединенным выборкам, приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9

Отклонения расчетных данных от экспериментальных при копании ГВОМО
в атмосферных условиях

Ил	Выборка	Закон распределения	Математическое ожидание	Доверительный интервал ($\alpha = 0,95$)	Максимальное значение Δ_A ($\alpha = 0,95$)
Сапропель	$\Delta_{l_{np}}(v_0, h_0, b)$	равномерный	0,09	0,09	0,18
	$\Delta_{h_{np}}(h_0, b)$	экспоненциальный	0,03	0...0,09	0,09
	$\Delta_{h_{np}}(v_0)$	экспоненциальный	0,10	0...0,30	0,30
	$\Delta_{V_{гр.пр.}}(v_0, h_0, b)$	нормальный	0,12	0,12	0,24
	$\Delta_{P_{к.пр.}}(v_0, h_0, b)$	экспоненциальный	0,05	0...0,16	0,16
Кокколит	$\Delta_{l_{np}}(v_0, h_0)$	равномерный	0,05	0,05	0,10
	$\Delta_{l_{np}}(b)$	равномерный	0,16	0,11	0,27
	$\Delta_{h_{np}}(h_0, b)$	равномерный	0,12	0,10	0,22
	$\Delta_{h_{np}}(v_0)$	экспоненциальный	0,04	0...0,11	0,11
	$\Delta_{V_{гр.пр.}}(h_0, b)$	равномерный	0,23	0,17	0,40
	$\Delta_{V_{гр.пр.}}(v_0)$	экспоненциальный	0,06	0...0,19	0,19
	$\Delta_{P_{к.пр.}}(v_0)$	нормальный	0,10	0,11	0,21
	$\Delta_{P_{к.пр.}}(h_0, b)$	равномерный	0,19	0,14	0,33
Максимальные отклонения измеряемых параметров					
Сапропель	$\Delta_{l_{np}}(v_0, h_0, b)$	равномерный	0,09	0,09	0,18
	$\Delta_{h_{np}}(v_0)$	экспоненциальный	0,10	0...0,30	0,30
	$\Delta_{V_{гр.пр.}}(v_0, h_0, b)$	нормальный	0,12	0,12	0,24
	$\Delta_{P_{к.пр.}}(v_0, h_0, b)$	экспоненциальный	0,05	0...0,15	0,15
Кокколит	$\Delta_{l_{np}}(b)$	равномерный	0,16	0,11	0,27
	$\Delta_{h_{np}}(h_0, b)$	равномерный	0,12	0,10	0,22
	$\Delta_{V_{гр.пр.}}(h_0, b)$	равномерный	0,23	0,17	0,40
	$\Delta_{P_{к.пр.}}(h_0, b)$	равномерный	0,19	0,14	0,33

Как видно из таблицы 3.9, математическое ожидание отклонения расчетных значений от экспериментальных для параметра l_{np} не превышает 16%, h_{np} – 12%, $V_{гр.пр.}$ – 23%, $P_{к.пр.}$ – 19%. Максимальные отклонения расчетных значений

от экспериментальных составляют соответственно 27%, 22%, 40% и 33% при доверительной вероятности 0,95.

Выводы

1. При копании пластичных водонасыщенных грунтов в водной среде и в атмосферных условиях ковшем любой емкости имеет место состояние предельного заполнения ковша, при котором процесс резания грунта переходит в процесс его раздвигания без отделения стружки. При этом заполнение ковша прекращается, а по бокам прорези формируются грунтовые валики.

2. Зависимость предельных параметров заполнения ковша от скорости резания при копании ГВОМО в атмосферных условиях в диапазоне скоростей от 0,05 до 1,0 м/с имеет сложный характер. Разница между максимальным и минимальным значениями параметров заполнения в указанном диапазоне скорости резания при копании сапропелевого ила составила (относительно меньшего значения): $l_{пр}(v_0) - 12\%$, $V_{гр.пр.}(v_0) - 21,8\%$, $P_{к.пр.}(v_0) - 13,5\%$; при копании кокколитового ила: $l_{пр}(v_0) - 18\%$, $V_{гр.пр.}(v_0) - 15,4\%$, $P_{к.пр.}(v_0) - 18,7\%$. Влияние скорости резания на параметр $h_{пр}$ является незначимым.

3. Предельные высота, длина и объем тела грунта в ковше, а также усилие сопротивления грунта копанию возрастают при увеличении глубины резания и ширины ковша.

4. При изменении угла наклона ковша от 1,5 до 90° относительно горизонтальной плоскости внешний контур тела грунта в плоскости симметрии ковша в состоянии предельного заполнения остается неизменным относительно соответствующего контура тела грунта, образуемого в ковше, наклоненного под углом 1,5° к горизонту. При этом значения усилия копания при наклоне ковша 1,5° и 90° практически одинаковы.

5. При копании кокколитового ила в водной среде параметры $l_{пр}$, $h_{пр}$ и $P_{к.пр.}$ в среднем на 20%, 12% и 5% соответственно превысили соответствующие параметры при копании в атмосферных условиях. При копании сапропелевого

ила указанная разница составила соответственно 80%, 54% и 12%.

6. По результатам проведенных исследований кинематики и динамики ковша одноковшового землечерпательного снаряда в реальных условиях эксплуатации было установлено, что усилие копания слабых водонасыщенных грунтов на глубине 1885 м ковшом емкостью $0,33 \text{ м}^3$ соизмеримо с соответствующим показателем при канатно-скреперной разработке обводненных континентальных месторождений, что подтверждает положение о малозначимом влиянии гидростатического давления на усилие сопротивления пластичных водонасыщенных грунтов копанию. Максимальное тяговое усилие при копании кокколитовых илов ковшом на станции 18/73 составило 3,4 кН. При этом доля усилия гидродинамического сопротивления, согласно расчетам, составила почти 30%, усилия резания и заполнения – 65%, усилия сопротивления трению ковша о грунт – около 5%.

7. По результатам статистической обработки данных установлены отклонения расчетных данных от экспериментальных: отклонение параметра $l_{\text{пр}}$ не превышает 27%, $h_{\text{пр}}$ – 22%, $P_{\text{к.пр.}}$ – 33% при доверительной вероятности 0,95.

РАЗДЕЛ 4 РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

4.1 Постановка задачи

В предыдущих разделах настоящей работы получены зависимости для определения рациональных геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и нагрузок на ковш при копании пластичных водонасыщенных грунтов, а также установлены ограничения их применимости.

Поставим задачу на основе установленных аналитических зависимостей разработать инженерную методику расчета геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и нагрузок на ковш при копании глубоководных органо-минеральных осадков.

4.2 Разработка инженерной методики расчета

Алгоритм расчета параметров заполнения ковша и усилия копания в виде блок-схемы приведен на рис. 4.1.

Приведенная блок-схема состоит из блоков: исходных данных для расчета параметров заполнения ковша и усилия копания 1, определения предельной высоты заполнения ковша 2, расчета коэффициентов подобия и толщин твердой области и области вязкопластического течения грунта 3, условия применимости математической модели для расчета предельной длины заполнения 4, расчета предельных параметров: длины заполнения, объема грунта в ковше, объема призмы волочения и пути копания, определение коэффициента распределения грунта 5, выбор длины и высоты ковша 6, определение пути копания 7, расчет параметра R и коэффициента формы тела грунта в ковше 8, определение усилия сопротивления ковша заполнению 9, определение усилия сопротивления грунта копанию 10.

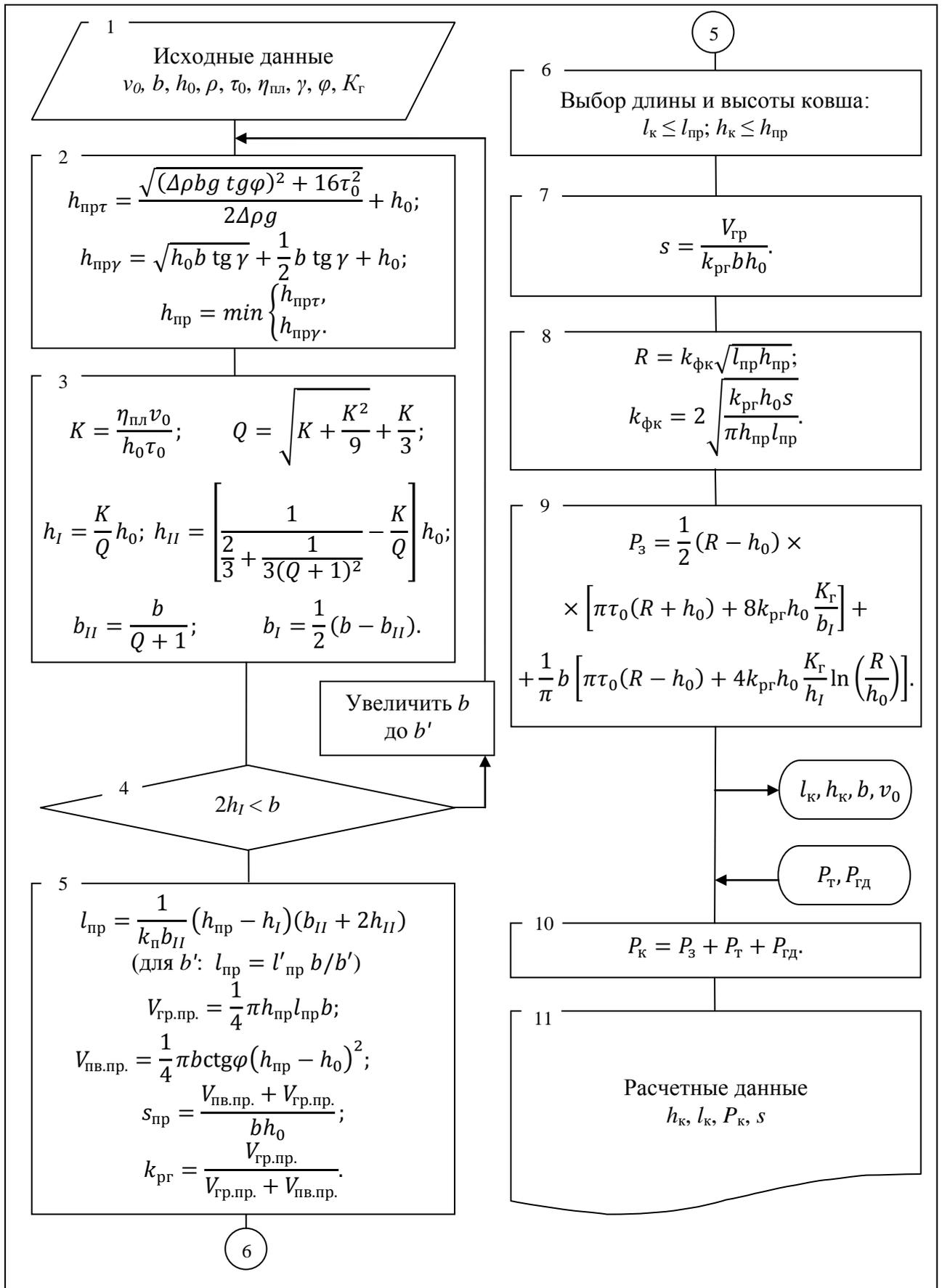


Рисунок 4.1. – Алгоритм расчета параметров ковша и усилия копания при разработке пластичных водонасыщенных грунтов

4.2.1 Исходные данные для расчета

Исходными данными для расчета являются:

а) свойства разрабатываемых грунтов:

- усредненная плотность ρ , кг/м³;
- сцепление τ_0 , Па;
- пластическая вязкость $\eta_{пл}$, Па·с;
- угол естественного откоса грунта в разрыхленном состоянии γ , градусов;
- угол φ , градусов;
- параметр K_G , Па·м.

б) параметры резания:

- глубина резания h_0 , м;
- скорость резания v_0 , м/с.

г) параметры ковша:

- ширина ковша b , м.

Физико-механические свойства грунтов следует определять в соответствии с требованиями ДСТУ Б В.2.1-4-96 “Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости” [108] и ДСТУ Б В.2.1-17:2009 “Грунты. Методы лабораторного определения физических свойств” [101], пластическую вязкость – в соответствии с инструкцией по эксплуатации используемого прибора.

Угол φ определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{h_{пр} - h_0}{l_{пв}}, \quad (4.1)$$

где $h_{пр}$ и $l_{пв}$, соответствующие глубине резания h_0 , определяются экспериментальным путем с использованием уменьшенной модели ковша (вместо ковша также может быть использована модель отвала).

Для ГВОМО Черного моря значение угла φ может быть принято равным 49°.

Параметр K_r определяется по результатам вискозиметрических испытаний образцов грунта с использованием выражения:

$$K_r = ka\eta \frac{d\lambda}{dt}. \quad (4.2)$$

Параметры η и $d\lambda/dt$ определяется по реологической кривой $\eta = f(d\lambda/dt)$. Произведение $\eta \cdot d\lambda/dt$ рассчитывается как среднее для нескольких точек в пределах диапазона $d\lambda/dt$ от 0,5 до 55 с^{-1} (по возможности, равноудаленных от значения $d\lambda/dt = 25 \text{ с}^{-1}$). При этом следует отдавать предпочтение значениям функции η_i в точках $(d\lambda/dt)_i$, где $i = 1, 2, \dots, n$, полученных в ходе эксперимента, а не по сглаженной кривой.

Для ГВОМО Черного моря значение параметра K_r может быть принятым равным 130 Па·м.

Коэффициент $k_{\text{п}}$, который входит в выражение для определения параметра $l_{\text{пр}}$ и учитывает увеличение площади трения срезаемой стружки о боковые стенки ковша при увеличении ее толщины, применительно к разработке ГВОМО может быть принят равным единице.

4.2.2 Расчет предельных параметров заполнения

Предельная высота заполнения ковша определяется из условия:

$$h_{\text{пр}} = \min \begin{cases} h_{\text{пр}\tau}; \\ h_{\text{пр}\gamma}, \end{cases} \quad (4.3)$$

в котором параметры $h_{\text{пр}\tau}$ и $h_{\text{пр}\gamma}$ определяются зависимостями:

$$h_{\text{пр}\tau} = \frac{\sqrt{(\Delta\rho b g \text{tg}\varphi)^2 + 16\tau_0^2}}{2\Delta\rho g} + h_0; \quad (4.4)$$

$$h_{\text{пр}\gamma} = \sqrt{h_0 b \text{tg}\gamma} + \frac{1}{2} b \text{tg}\gamma + h_0, \quad (4.5)$$

где $\Delta\rho = \rho - \rho_{\text{в}}$ (плотность морской воды может быть принята равной 1020 кг/м^3);

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2,$$

Предельная длина заполнения ковша определяется по выражению:

$$l_{\text{пр}} = \frac{1}{k_{\text{п}} b_{\text{II}}} (h_{\text{пр}} - h_{\text{I}})(b_{\text{II}} + 2h_{\text{II}}), \quad (4.6)$$

где параметры h_{I} , h_{II} и b_{II} определяются зависимостями:

$$h_{\text{I}} = \frac{K}{Q} h_0; \quad (4.7)$$

$$h_{\text{II}} = \left[\frac{1}{\frac{2}{3} + \frac{1}{3(Q+1)^2}} - \frac{K}{Q} \right] h_0; \quad (4.8)$$

$$b_{\text{II}} = \frac{b}{Q+1}. \quad (4.9)$$

Коэффициенты подобия K и Q рассчитываются по формулам:

$$K = \frac{\eta_{\text{пл}} v_0}{h_0 \tau_0}; \quad (4.10)$$

$$Q = \sqrt{K + \frac{K^2}{9} + \frac{K}{3}}. \quad (4.11)$$

При этом должно соблюдаться условие:

$$2h_{\text{I}} < b. \quad (4.12)$$

Если данное условие не выполняется, следует увеличить значение ширины ковша b до b' и повторно произвести вычисления (4.3)–(4.11) до выполнения указанного условия. После этого необходимо рассчитать значение $l_{\text{пр}}'$, соответствующее b' , и определить предельную длину заполнения ковша $l_{\text{пр}}$, соответствующую исходному значению b . Для этого следует воспользоваться аппроксимацией:

$$l_{\text{пр}} = \frac{l_{\text{пр}}'}{b'} b. \quad (4.13)$$

Предельная высота заполнения ковша $h_{\text{пр}}$ должна соответствовать исходному значению b .

Находим толщину области вязкопластического течения грунта у боковых стенок ковша:

$$b_I = \frac{1}{2}(b - b_{II}). \quad (4.14)$$

По результатам расчетов строится четверть эллипса с вертикальной и горизонтальной полуосями соответственно $h_{\text{пр}}$ и $l_{\text{пр}}$. Функция, описывающая контур тела грунта в ковше в состоянии предельного заполнения имеет вид:

$$\frac{y^2}{h_{\text{пр}}^2} + \frac{x^2}{l_{\text{пр}}^2} = 1. \quad (4.15)$$

Предельный объем заполнения ковша может быть рассчитан по выражению:

$$V_{\text{гр.пр.}} = \frac{1}{4} \pi h_{\text{пр}} l_{\text{пр}} b. \quad (4.16)$$

Предельный объем призмы волочения $V_{\text{пв.пр.}}$ определяется как:

$$V_{\text{пв.пр.}} = \frac{1}{4} \pi b \operatorname{ctg} \varphi (h_{\text{пр}} - h_0)^2. \quad (4.17)$$

Предельный путь заполнения:

$$s_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{пв.пр.}} + V_{\text{гр.пр.}}}{bh_0}. \quad (4.18)$$

Коэффициент распределения грунта:

$$k_{\text{гр}} = \frac{V_{\text{гр.пр.}}}{V_{\text{гр.пр.}} + V_{\text{пв.пр.}}}. \quad (4.19)$$

На основе анализа предельных параметров заполнения выбираем длину ковша $l_k \leq l_{пр}$ и его высоту $h_{пр} \leq l_{пр}$.

4.2.3 Расчет параметров заполнения ковша при $t < t_{пр}$

При времени заполнения ковша $t < t_{пр}$ высота и длина тела грунта в ковше определяются зависимостями:

$$h(t) = k_{фк}(t)h_{пр}; \quad (4.20)$$

$$l(t) = k_{фк}(t)l_{пр}, \quad (4.21)$$

где коэффициент $k_{фк}(t) \leq 1$ рассчитывается с использованием выражения:

$$k_{фк}(t) = 2 \sqrt{\frac{k_{гр}h_0v_0t}{\pi h_{пр}l_{пр}}}, \quad (4.22)$$

либо как функция от пути копания:

$$k_{фк}(s) = 2 \sqrt{\frac{k_{гр}h_0s}{\pi h_{пр}l_{пр}}}. \quad (4.23)$$

Контур тела грунта в ковше описывается уравнением:

$$\frac{y(t)^2}{(k_{фк}(t)h_{пр})^2} + \frac{x(t)^2}{(k_{фк}(t)l_{пр})^2} = 1. \quad (4.24)$$

Максимальный объем грунта в ковше $V_{гр.макс}$ в момент времени $t \leq t_{пр}$ определяется зависимостью:

$$V_{гр.макс}(t) = \frac{1}{4} \pi k_{фк}^2(t) h_{пр} l_{пр} b. \quad (4.25)$$

Фактический объем грунта в ковше рассчитывается как разность:

$$V_{гр} = V_k - V_{п}, \quad (4.26)$$

где $V_k = bh_k l_k$;

$V_{\Pi} = S_{\Pi}b$ – объем пустот в ковше;

S_{Π} – площадь незаполненной области ковша, определяемая из эскиза контура тела грунта в момент времени t , на который наложен контур ковша.

Объем призмы волочения:

$$V_{\text{пв}}(t) = \frac{1}{4} \pi b \operatorname{ctg} \varphi [k_{\text{фк}}(t)h_{\text{пр}} - h_0]^2. \quad (4.27)$$

Путь заполнения ковша, м:

$$s = \frac{V_{\text{пв}} + V_{\text{гр}}}{bh_0}. \quad (4.28)$$

Путь копания грунта не должен превышать значение $s_{\text{пр}}$.

4.2.4. Определение усилия сопротивления грунта копанию

Усилие сопротивления грунта копанию определяется выражением:

$$P_{\text{к}} = P_{\text{з}} + P_{\text{т}} + P_{\text{гд}}, \quad (4.29)$$

где $P_{\text{т}}$ определяется с учетом конструктивных особенностей ковша, режима работы землеройной машины и характера взаимодействия рабочего органа с забоем при копании грунта.

Составляющая усилия копания $P_{\text{гд}}$ может быть определена по известной методике для определения гидродинамического сопротивления при обтекании тел жидкостью [105]:

$$P_{\text{гд}} = 0,5c_x S_{\text{к}} \rho_{\text{в}} v_0^2, \quad (4.30)$$

где $S = bh_{\text{к}}$ – площадь поперечного сечения ковша;

c_x – коэффициент лобового сопротивления; для коробчатого ковша квадратного и прямоугольного поперечных сечений может быть принят равным 1,16.

Усилие заполнения ковша рассчитывается по выражению:

$$P_3 = \frac{1}{2}(R - h_0) \left[\pi \tau_0 (R + h_0) + 8k_{\text{пр}} h_0 \frac{K_r}{b_I} \right] + \frac{1}{\pi} b \left[\pi \tau_0 (R - h_0) + 4k_{\text{пр}} h_0 \frac{K_r}{h_I} \ln \left(\frac{R}{h_0} \right) \right]. \quad (4.31)$$

При времени заполнения $t \geq t_{\text{пр}}$ значение параметра R следует определять по зависимости:

$$R_{\text{пр}} = \sqrt{l_{\text{пр}} h_{\text{пр}}}. \quad (4.32)$$

При $t < t_{\text{пр}}$ расчет параметра R следует производить по выражению:

$$R(t) = k_{\phi}(t) \sqrt{l_{\text{пр}} h_{\text{пр}}}. \quad (4.33)$$

При невыполнении условия (4.12) для расчета параметра P_3 необходимо воспользоваться аппроксимацией:

$$P_3 = \frac{P'_3}{b'} b, \quad (4.34)$$

где P'_3 соответствует ширине ковша b' .

Пример расчета рациональных геометрических параметров землечерпательного снаряда приведен в приложении Ф. Акт о внедрении разработанной инженерной методики расчета геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и нагрузок на ковш при копании ГВОМО приведен в приложении Х. Акт о внедрении результатов исследований в учебный процесс приведен в приложении Ц.

4.3 Исследование зависимостей параметров ковша, удельных усилий и работы заполнения при копании ГВОМО от параметров резания на основе численного эксперимента

Поставим задачу: определить соотношение высоты ковша к его длине, при котором достигается наибольшая емкость ковша при максимальном значении

коэффициента наполнения; установить влияние ширины ковша и глубины резания на удельное усилие сопротивления ковша заполнению; установить влияние величины емкости ковша на удельную работу заполнения.

Поскольку параметры заполнения ковша мало зависят от скорости резания (см. 3.5.4.1), в качестве варьируемых параметров выберем глубину резания h_0 и ширину ковша b . Свойства ГВОМО выберем усредненные по результатам исследований в Черном море для четырех типов илов (см. табл. 1.2). Исходные данные для расчета:

1) ил биогенный сильноизвестковый, пелитовый, зеленовато-серый, тонкослоистый (кокколитовый), вязкотекучий: $\tau_0 = 800$ Па; $\eta_{пл} = 226,8$ Па·с; $\Delta\rho = 160$ кг/м³; $\varphi = \gamma = 49^\circ$; $K_r = 130$ Па·м;

2) ил биогенный, сильноизвестковый, пелитовый, зеленовато-серый, тонкослоистый (кокколитовый), текучепластичный: $\tau_0 = 880$ Па; $\eta_{пл} = 226,8$ Па·с; $\Delta\rho = 220$ кг/м³; $\varphi = \gamma = 49^\circ$; $K_r = 130$ Па·м;

3) ил теригенный, глинистый, серый, мягкопластичный: $\tau_0 = 7980$ Па; $\eta_{пл} = 807,4$ Па·с; $\Delta\rho = 440$ кг/м³; $\varphi = \gamma = 49^\circ$; $K_r = 130$ Па·м;

4) ил биогенный, пелитовый, сапропелевый, упруго-пластичный: $\tau_0 = 3470$ Па; $\eta_{пл} = 807,4$ Па·с; $\Delta\rho = 230$ кг/м³; $\varphi = \gamma = 49^\circ$; $K_r = 130$ Па·м.

Ограничимся максимальной шириной ковша $b = 3$ м и максимальной глубиной резания $h_0 = 0,3$ м.

Исследуем поведение функций $h_{прт}$ и $h_{прг}$ для различных типов илов. Результаты расчетов показаны на рис. 4.2, где номер под графиками соответствует номеру ила в исходных данных.

Как видно из приведенных графиков, в зависимости от глубины резания, ширины ковша и свойств разрабатываемого ила для заданных исходных данных меньшее значение может иметь как функция $h_{прт}$, так и $h_{прг}$. Из этого следует, что при расчете предельной высоты заполнения ковша при копании ГВОМО, определяемой меньшим из значений $h_{прт}$ и $h_{прг}$, необходимо рассматривать обе функции.

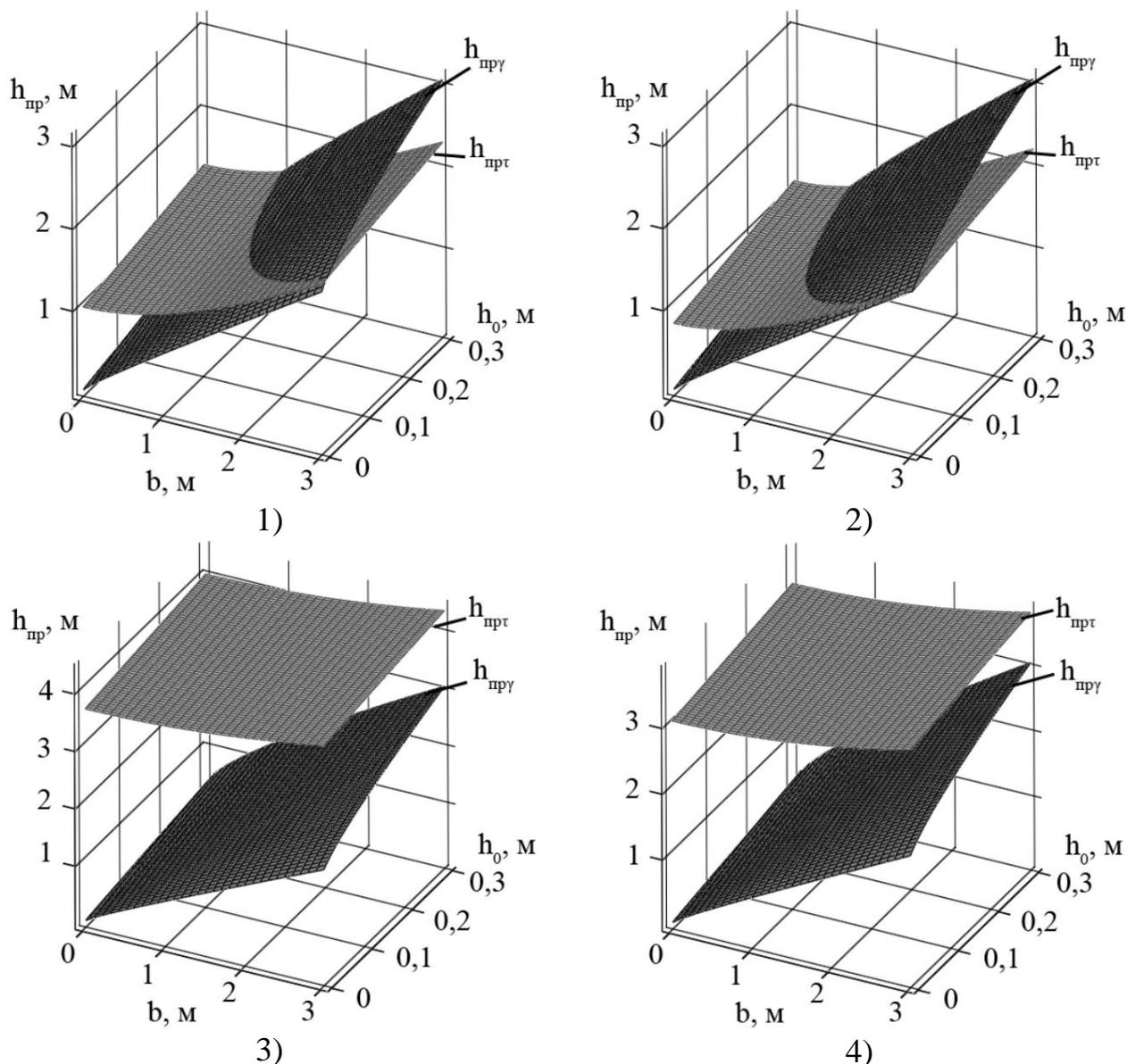


Рисунок 4.2 – Зависимость параметров $h_{прт}$ и $h_{прγ}$ от h_0 и b для различных типов илов

Согласно (2.82), наибольшая емкость ковша при максимальном значении коэффициента его наполнения достигается при значении отношения высоты ковша к его длине равным $h_{пр}/l_{пр}$. Определим величину указанного соотношения для заданных исходных данных, используя выражения (4.3) и (4.6). Графики зависимостей $h_{пр}$ и $l_{пр}$ для первого типа ила (см. исходные данные) приведены на рис. 4.3.

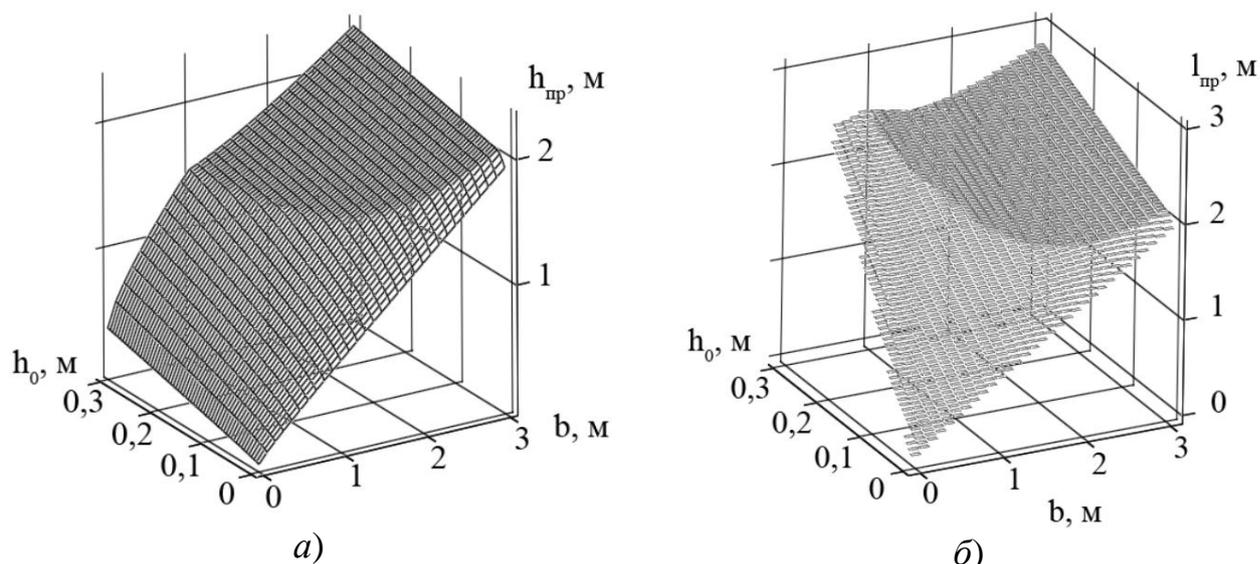


Рисунок 4.3 – Зависимости $h_{пр}$ (а) и $l_{пр}$ (б) от h_0 и b при копании ила в подводных условиях ($\tau_0 = 800$ Па; $\eta_{пл} = 226,8$ Па·с; $\Delta\rho = 160$ кг/м³; $\varphi = \gamma = 49^\circ$)

В результате проведенного расчета для четырех типов илов установлено, что при копании ГВОМО в воде ковшем шириной от 0,5 до 2,5 м при глубине резания от 0,1 до 0,25 м среднее значение отношения $h_{пр}/l_{пр} = 0,75$ при $\nu = 0,12$, изменяясь от 0,49 до 0,93 (рис. 4.4). Результаты расчетов для каждого из рассматриваемых илов приведены в табл. 4.1. Таким образом, при добыче ГВОМО наибольшая емкость ковша при максимальном значении коэффициента его наполнения для указанных пределов ширины ковша и глубины резания достигается при среднем значении отношения высоты ковша к его длине равным 0,75.

Таблица 4.1

Результаты расчета отношения $h_{пр}/l_{пр}$

Тип ила	Значение отношения $h_{пр}/l_{пр}$			Коэф. вариации
	минимальное	максимальное	среднее	
биогенный сильноизвестковый, пелитовый, зеленовато-серый, тонкослоистый (кокколитовый), вязкотекучий	0,49	0,92	0,75	0,121
биогенный, сильноизвестковый, пелитовый, зеленовато-серый, тонкослоистый (кокколитовый), текучепластичный	0,49	0,93	0,76	0,124
теригенный, глинистый, серый, мягкопластичный	0,49	0,92	0,74	0,121
биогенный, пелитовый, сапропелевый, упруго-пластичный	0,49	0,92	0,73	0,122

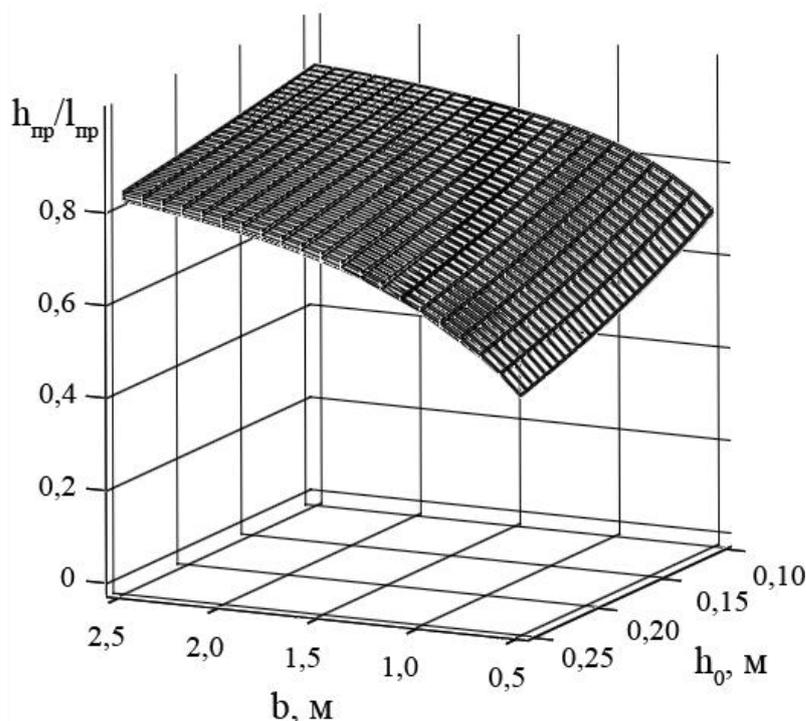


Рисунок 4.4 – Зависимость отношение $h_{\text{пр}}/l_{\text{пр}}$ при копании ГВОМО от b и h_0 (наложенные поверхности для четырех типов илов)

Используя выражение (2.107), определим работу заполнения A_3 при величине пути копания $s_{\text{пр}}$:

$$A_3 = \int_{h_0}^{s_{\text{пр}}} P_3(s) ds.$$

Работа, затрачиваемая на перемещение в ковш единицы объема грунта (удельная работа заполнения) $A_{\text{з.уд}}$ определяется зависимостью:

$$A_{\text{з.уд}} = \frac{A_3}{V_{\text{гр.пр}}}.$$

В графическом виде результаты расчета $A_{\text{з.уд}}$ для первого типа ила приведены на рис. 4.5. Из графика видно, что с увеличением ширины ковша и глубины резания (а значит и предельного объема заполнения ковша грунтом) удельная работа заполнения уменьшается. Из этого следует, что увеличение емкости ковшей приводит к снижению удельной работы заполнения.

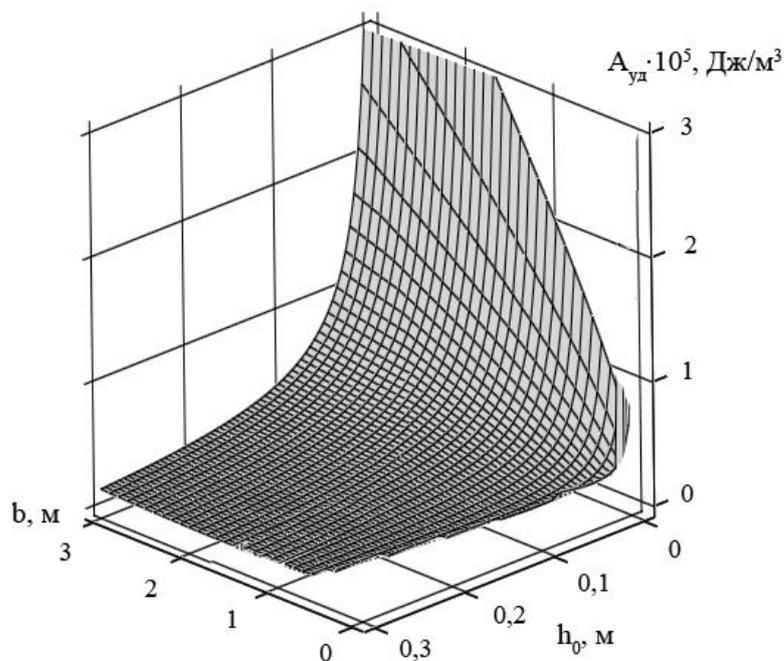


Рисунок 4.5 – Зависимость удельной работы заполнения от h_0 и b при копании ГВОМО

Определим зависимость h_0 от b , при которой обеспечивается заданный объем грунта в ковше. Для этого зададим значения $V_{гр.пр.}$ и b , после чего решим уравнение, составленное на основании (4.16), относительно h_0 . Затем для полученных b и h_0 определим предельное усилие сопротивления ковша заполнению $P_{з.пр.}$ и отнесем полученное значение к $V_{гр.пр.}$, получив таким образом удельное сопротивление ковша заполнению $P_{з.уд.}$. Результаты расчетов приведены на рис. 4.5.

Из полученных графиков следует, что для уменьшения усилия сопротивления ковша заполнению при отборе заданного объема грунта следует стремиться к уменьшению глубины резания и увеличению ширины ковша.

4.4 Перспективы использования результатов исследований

Результаты исследований могут быть использованы при разработке ковшей землечерпательных снарядов циклического и непрерывного действия для глубоководной добычи донных осадков, а также при обосновании технологии ведения подводных добычных работ.

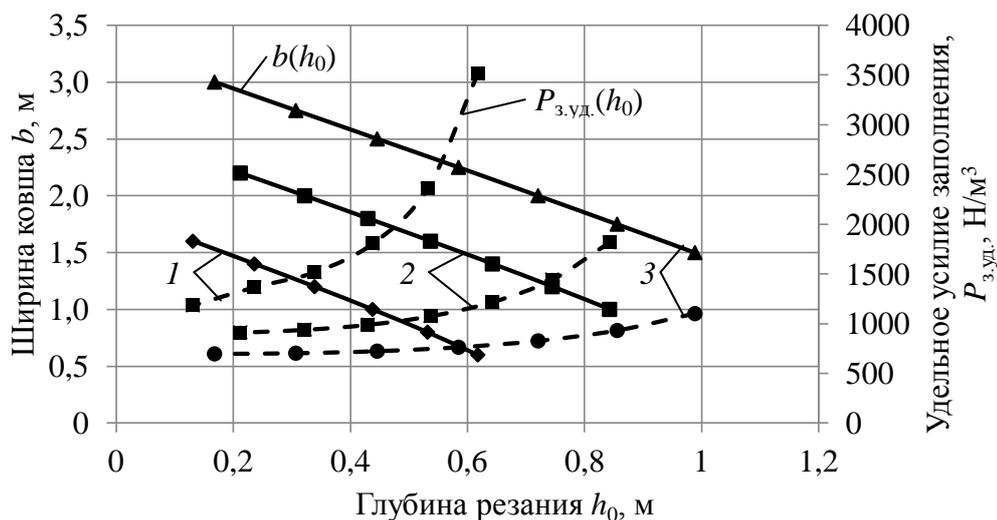


Рисунок 4.6 – Зависимости $b(h_0)$ и $P_{з.уд.}(h_0)$ при $V_{з.пр.} = const$

$$(1 - V_{з.пр.} = 2 \text{ м}^3; 2 - V_{з.пр.} = 5 \text{ м}^3; 3 - V_{з.пр.} = 10 \text{ м}^3;$$

свойства грунта: $\tau_0 = 800 \text{ Па}$; $\eta_{пл} = 226,8 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\Delta\rho = 160 \text{ кг/м}^3$; $\varphi = \gamma = 49^\circ$)

Учет закономерностей формирования тела грунта в ковше дает возможность определить месторасположение отверстий для оттока воды из ковша в процессе черпания горной массы, что необходимо для исключения образования замкнутых объемов с водой, которые обуславливают снижение коэффициента наполнения ковша. Учет закономерностей формирования призмы волочения и методика расчета ее параметров позволяют обосновать параметры и конструкцию обтекателей для уменьшения воздействия встречных потоков воды на грунт в ковше, что обеспечит уменьшение потерь полезного компонента вследствие вымывания грунта при перемещении заполненного ковша в воде и позволит значительно снизить уровень загрязнения водной среды мутьевыми потоками, возникающих при ведении добычных работ.

На основе расчетных значений предельных параметров заполнения ковша для заданных условий ведения горнодобычных работ могут быть обоснованы геометрические параметры ковшей максимальной емкости, что является особенно актуальным при добыче глубоководных осадков землечерпательными снарядами циклического действия. Предложенная методика позволяет определить емкость ковша и продолжительность копания, что необходимо для расчета

производительности добычного комплекса, а также усилие копания для обоснования параметров привода рабочего органа.

Состояние предельного заполнения ковша может быть использовано при обосновании технологии ведения подводных добычных работ. При необходимости, можно обеспечить или исключить возможность формирования грунтовых валиков вдоль прорези для изменения или обеспечения постоянства условий последующего черпания.

Выводы

1. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана инженерная методика расчета геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и нагрузок на ковш при копании глубоководных органо-минеральных осадков, позволяющая определить рациональные геометрические параметры ковша для обеспечения высокого значения коэффициента его наполнения и усилие сопротивления грунта копанию для обоснования параметров привода рабочего органа. Разработанная методика внедрена в Государственном научном учреждении «Отделение морской геологии и осадочного рудообразования» НАН Украины.

2. На основе численного эксперимента установлено, что при копании ГВОМО в воде ковшем шириной от 0,5 до 2,5 м при глубине резания от 0,1 до 0,25 м наибольшая емкость ковша при максимальном значении коэффициента наполнения достигается при среднем значении отношения высоты ковша к его длине равным 0,75.

3. При увеличении емкости ковша удельная работа его заполнения снижается. Для уменьшения усилия сопротивления ковша заполнению при отборе заданного объема грунта следует стремиться к уменьшению глубины резания и увеличению ширины ковша.

4. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке конструкций ковшей землечерпательных снарядов и их элементов, а также при обосновании технологии ведения подводных добычных работ.

Общие выводы

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная научная задача, которая состоит в установлении аналитических зависимостей рациональных геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и усилия сопротивления ковша заполнению при глубоководной добыче органо-минеральных осадков от параметров резания и свойств разрабатываемого грунта, что позволило определить: отношение высоты ковша к его длине, обеспечивающего наибольшую емкость ковша при максимальном значении коэффициента наполнения, которое для ковшей шириной от 0,5 до 2,5 м при глубине резания от 0,1 до 0,25 м в среднем составляет 0,75; усилие сопротивления ковша заполнению, которое находится как сумма линейной, логарифмической и степенной с показателем степени 0,5 зависимостей от пути копания, на котором происходит заполнение ковша; разработать инженерную методику расчета геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и нагрузок на ковш при глубоководной добыче органо-минеральных осадков.

1. По результатам анализа патентов и обзора литературных источников установлено, что требованиям к оборудованию для промышленной разработки месторождений ГВОМО в Черном море соответствует многоковшовый землечерпательный снаряд с придонным блоком проекта НИПИОкеанмаш (г. Днепропетровск), ковши которого оснащены обтекателями для исключения вымывания горной массы при подъеме в толще воды.

2. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена закономерность процесса заполнения ковша при копании пластичных водонасыщенных грунтов: продвижение стружки вдоль ковша происходит лишь при достаточной величине ее толщины, необходимой для уравнивания за счет собственного веса грунта вертикальной составляющей нормальных напряжений от трения стружки о поверхности внутреннего объема ковша. В противном случае толщина стружки уве-

личивается до выполнения условия продвижения грунта вдоль ковша, чем обусловлено увеличение толщины стружки в ковше с ростом ее длины.

3. При копании пластичных водонасыщенных грунтов ковшом определенной ширины при сколь угодно больших его прочих габаритных размерах имеет место состояние предельного заполнения ковша, при котором процесс заполнения прекращается, а процесс резания грунта переходит в процесс его раздвигания без отделения стружки. Для обеспечения высокого значения коэффициента наполнения проектируемого ковша землечерпательного снаряда, его высота и длина должны быть меньше соответственно предельной высоты и предельной длины заполнения, для определения которых были разработаны аналитические зависимости. Отклонение расчетных значений геометрических параметров тела грунта в ковше в состоянии предельного заполнения от экспериментальных не превышает 27% при доверительной вероятности 0,95.

4. На основе численного эксперимента установлено, что при копании ГВОМО в воде ковшом шириной от 0,5 до 2,5 м при глубине резания от 0,1 до 0,25 м наибольшая емкость ковша при максимальном значении коэффициента наполнения достигается при среднем значении отношения высоты ковша к его длине равным 0,75.

5. При изменении угла наклона ковша в диапазоне от 0 до $\pi/2$ относительно горизонтальной плоскости, а также положения его задней стенки, внешний контур тела грунта в ковше в состоянии предельного заполнения остается неизменным относительно контура тела грунта, формируемого в состоянии предельного заполнения в ненаклоненном к горизонту ковше равной ширины при сколь угодно больших его прочих габаритных размерах при идентичных параметрах процесса резания.

6. При копании органико-минеральных осадков усилие сопротивления ковша заполнению находится как сумма линейной, логарифмической и степенной с показателем степени 0,5 зависимостей от пути копания. Максимальное усилие сопротивления ковша заполнению не зависит от длины ковша и угла его наклона в диапазоне углов наклона днища ковша относительно горизонтальной плос-

кости от 0 до $\pi/2$. Отклонение значений предельного усилия сопротивления ковша заполнению, рассчитанных с использованием разработанной аналитической зависимости, от экспериментальных данных, включая натурный эксперимент в Черном море, не превышает 33% при доверительной вероятности 0,95.

7. При увеличении емкости ковшей удельная работа заполнения снижается. Для уменьшения усилия сопротивления ковша заполнению при отборе заданного объема грунта следует стремиться к уменьшению глубины резания и увеличению ширины ковша.

8. Усилие сопротивления пластичных водонасыщенных грунтов копанию определяется как сумма усилий сопротивления ковша заполнению, его трению о грунт и гидродинамического сопротивления перемещению ковша в водной среде.

9. На основе натурального эксперимента в Черном море при отборе проб кокколитового ила одноковшовым землечерпательным снарядом НИС «Профессор Водяницкий» с ковшом емкостью 0,33 м³ на глубине 1885 м подтверждено положение о малозначимости влияния гидростатического давления на величину усилия сопротивления пластичного водонасыщенного грунта копанию.

10. Разработанная инженерная методика расчета параметров ковша землечерпательного снаряда позволяет определить рациональные геометрические параметры ковша для обеспечения высокого значения коэффициента его наполнения, нагрузки на ковш при копании ГВОМО и путь копания, требуемый для его заполнения. Инженерная методика расчета геометрических параметров ковшей землечерпательных снарядов и нагрузок на ковш при копании ГВОМО принята к использованию при разработке ковшей одноковшовых землечерпательных снарядов в Государственном научном учреждении «Отделение морской геологии и осадочного рудообразования» НАН Украины.

Список литературы

1. Бабинец А.Е. Гидрологические и геохимические особенности глубоководных отложений Черного моря / Бабинец А.Е., Митропольский А.Ю., Ольштынский С.П. – К.: Наук. думка, 1973. – 160 с.
2. Димитров Д.П. Геология и нетрадиционни ресурси на Черно море / Д.П. Димитров. – Варна: "Онгъл", 2010. – 270 с.
3. Шнюков Е.Ф. Минеральные богатства Черного моря / Е.Ф. Шнюков, А.П. Зиборов. – Киев: «Карбон-ЛТД», 2004. – 290 с.
4. Шнюков Е.Ф. Результаты исследований сапропелевых осадков / Шнюков Е.Ф., Клещенко С.А., Блохина Т.С., Клещенко Л.Г. // Геологические исследования рейса НИС «Ак.Вернадский» в Черное море. – К.: ОМГОР, 1993. – С.53 – 57. – (Препр./АНУ, ОМГОР ЦНПМ; 93-1).
5. Шнюков Е.Ф. Сапропелевые осадки Восточной и Западной Впадин Черного моря / Е.Ф. Шнюков, С.А. Клещенко, Т.С. Куковская // Геофизический журнал. – 2003. – № 2. – С. 100 – 121.
6. Зиборов А.П. Добывать или не добывать в Украине черноморские сапропели? / А.П. Зиборов // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2006. – №1. – С. 92 – 98.
7. Зиборов А.П. О промышленном освоении месторождений морских сапропелей / А.П. Зиборов // Геологический журнал. – 2003. – С. 50 – 53.
8. Шнюков Е.Ф. Результаты исследований макро- и микрокомпонентного состава сапропелевых осадков / Е.Ф. Шнюков, С.А. Клещенко, Т.С. Блохина // Геологические исследования НИС «Ихтиандр» в Черное море. – 1993. – С. 76 –81.
9. Шнюков Е.Ф. Исследование сапропелевых отложений / Е.Ф. Шнюков, С.А. Клещенко, Т.С. Блохина // Геологические исследования НИС «Проф. Водяницкий» в Черном море (47-й рейс). – 1995 г. – С.137 – 154.
10. Куковская Т.С. К вопросу о генезисе сапропелевых осадков / Т.С. Куковская // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2006. – №1. – С. 81 – 91.

11. Шимкус К.М. Донные отложения и черты позднечетвертичной истории Черного моря / К.М.Шимкус, Е.М. Емельянов, Э.С. Тримонис // Земная кора и история развития Черноморской впадины. – 1975. – С. 84–97.
12. Щербаков Ф.А. Сапропелевые отложения Черного моря и условия их накопления / Ф.А. Щербаков, П.Н. Куприн, Л.И. Потапова // Материалы по минералогии, пнтрографии, геохимии осадочных пород и руд. – №4. – 1976. – С. 31 – 36.
13. Димитров П.С. Върху възможностите за използване на дълбоководните сапропелоидни тини на Черно море за агробиологични и промишлени цели / П.С. Димитров, В.Х. Велев // Океанология. – 1988. – №17. – С. 92 – 95.
14. Dimitrov D. Some results from the use of deep organogenetic-mineral sediments from the Black Sea bottom / D. Dimitrov, G. Georgiev, P. Dimitrov // Geology and minerals resources of World Ocean. – 2006. – № 1. – P. 28 – 36.
15. Dimitrov P. Application of Black Sea bottom sediments for natural ecological fertilizer and recultivation of exhausted soils / P. Dimitrov, D. Dimitrov, D. Solakov// Geology and Mineralogy Resources of the Black Sea: Intern. Conf., 24 – 28 November 1999. – Kiev: OMGOR, 1999. – P. 418.
16. Dimitrov P. Application of Black sea bottom sediments – natural ecological fertilizer, recultivation of exhauster solis / P. Dimitrov, N. Nikovov, D.Dimitrov and P.Petrov // Geology and mineral resources of the Black sea. Kyiv. – №1. – 2003. – P. 182 – 189.
17. Dimitrov P. Alternative energy resources from the bottom of the Black sea / P. Dimitrov, D. Dimitrov // Geology and mineral resources of the Black sea. – 1999. – №2. – P. 223 – 226.
18. Шнюков Е.Ф. Результаты предварительной разведки месторождений сапропеля / Е.Ф. Шнюков, С.А. Клещенко, Т.С. Блохина // Геологические исследования НИС «Киев» в Черном море (4-й рейс). – 1996. – С.42 – 49.
19. Шнюков Е.Ф. Сапропелевые илы Черного моря – новый вид минерального сырья / Е.Ф. Шнюков, С.А. Клещенко, Т.С. Куковская // Геология и полезные ископаемые Черного моря. – 1999. – С. 399 – 412.

20. Дегодюк Е.Г. Агрономічна цінність сапропелевих и коколітових мулів Чорного моря та питання техногенної безпеки / Е.Г. Дегодюк, С.А. Клещенко, С.Е. Дегодюк, О.О. Юшин // Геологія Чорного и Азовського морей. – 2000. – С. 164 – 174.
21. Велев В.Х. Строеж и състав на холоценските сапропелоиди от западната част на Черно море / В.Х. Велев, П.С. Димитров, М.М.Файер // Океанология. – 1992. – №1. – С. 58 – 64.
22. Nikolov N. Possibility of application of Black Sea sediments (sapropels) for neutralization of soil acidity and increasing of hygroscopic capacity of the soils / N. Nikolov, N. Artinova, D. Dimitrov, P. Dimitrov, D. Solakov //Assesment of the Black sea sedimentary system since the last glacial exrreme, 23 – 26 October 2004: Abstracts. – Varna, Bulgaria.
23. Дегодюк Е.Г. Агрономическая ценность сапропелевых и кокколитовых илов Чорного моря и вопросы техногенной безопасности / Е.Г. Дегодюк, С.Е. Дегодюк, Е.П. Черний и др. // Геологія Чорного и Азовського морей. – 2000. – С. 164 – 174.
24. Димитров Д.П. Некоторые результаты применения глубоководных органо-минеральных осадков дна Чорного моря для агротехнических целей / Д.П. Димитров, Г.Ц. Георгиев, П.С. Димитров // Геологія и полезные ископаемые Мирового океана. – 2006. – №1. – С. 74 – 80.
25. Димитров П.С. О создании Международного концорциума для разведки и добычи глубоководных органо-минеральных осадков со дна Чорного моря / [П.С. Димитров, Д.П. Димитров, Д.П. Солаков,Геологія и др.] // Полезные ископаемые Мирового океана. – 2007. – №1. – С. 52 – 56.
26. Проблема сапропелей Чорного моря / [гл. ред. Е.Ф. Шнюков]. – К.: ОМГОР, 2010. – 148 с.
27. Добрецов В.Б. Мировой океан и континентальные водоемы: минеральные ресурсы, освоение, экология / В.Б. Добрецов, В.А. Рогалев, Д.С. Опрышко. – СПб.: Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы, 2007. – 796 с.

28. Емельянов В.А. Физико-механические свойства глубоководных осадков Черного моря / Емельянов В.А. – К.: Ин-т геол. наук АН УССР, 1977. – 46 с. – (Препринт Ин-та геол. наук АН УССР, 77-1).
29. Fukuoka M. Problems of soil mechanics of ocean floor / M. Fukuoka, A. Nacase // Special lecture on 8th Intern. Conf. on soil Mechan. and Found. Engineering, 1973: Preprints. – Moscow, 1973. – P. 1 – 25.
30. Inderbitzen A.L. A study of the effects of various core samples on mass physical properties in marine sediments / A.L. Inderbitzen // Sediments. Petrol. – 1968. – №2. – P. 473 – 489.
31. Бабинец А.Е. Физико-механические свойства донных осадков Черного моря / [Бабинец А.Е., Митропольский А.Ю. и др.]. – К.: Наук. думка, 1981. – 204 с.
32. Непрочнов Ю.П. Изменение скорости распространения упругих волн в рыхлых отложениях / Ю.П. Непрочнов, Г.Б. Удинцев // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1959. – №11. – С. 1699 – 1702.
33. Емельянов В.А. Новые данные об инженерно-геологических свойствах донных осадков глубоководной части Черного моря / В.А. Емельянов, С.Н. Довбыш // Сборник научных трудов института геологических наук НАН Украины. – 2009. – №2. – С. 62 – 68.
34. Газово-грязевой вулканизм Керченско-Таманского сектора Черного моря / [гл. ред. Е.Ф. Шнюков]. – Киев: ОМГОР, 2011. – 136 с.
35. Грунти. Терміни та визначення: ДСТУ Б А.1.1-25-94. – [чинний від 1994-12-04]. – К.: Держбуд України, 2001. – 52 с. – (Державні стандарти України).
36. Добрецов В.Б. Освоение минеральных ресурсов шельфа / В.Б. Добрецов. – Ленинград: Недра, 1980. – 272 с.
37. Величко Е.А. За рудой в глубины океана / Е.А. Величко, Е.А. Контарь, О.К. Тареева. – М.: Недра, 1980. – 96 с.
38. Меро Дж. Минеральные богатства океана / Дж. Меро; [перев. с англ. И.М. Варенцова]. – М.: Прогресс, 1969. – 440 с.

39. Ржевский В.В. Технология добычи полезных ископаемых со дна озер, морей и океанов / В.В. Ржевского, Г.А. Нурок. – М.: Недра, 1979. – 381 с.
40. Rybar P. Polymetalicke konkrecie: bohatstvo na dne mori a oceanov / [Rybar P., Namrak H., Kosco J. & oth.]. – Kosice, Slovak republic : TU, FBERG, 2011. – 257 p.
41. Иванов В.А. Суда технического флота [Учебник для вузов водн. трансп.] / В.А. Иванов, Н.В. Лукин, С.Н. Разживин. – М.: Транспорт, 1982. – 366 с.
42. Patzold V. Der Nassabbau: Erkundung, Gewinnung, Aufbereitung, Bewertung / V. Patzold, G. Gruhn, C. Drebenstedt. – Berlin: Almas Schimmel, 2008. – 428 p.
43. Bray R.N. A guide to cost standards for dredging equipment / R.N. Bray. – London : George Green Library of Science and Engineering, 2009. – 61 p.
44. Bray R.N. Enviromental aspects of dredging / R.N. Bray. – Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis, 2008. – 386 p.
45. Bray R.N. Dredging [a handbook for engineers] / R.N. Bray. – Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 1996. – 448 p.
46. Richardson M.J. The Dynamics of Dredging / M.J. Richardson. – Irvine, California, USA : Plaser Management Corp., 2001. – 413 p.
47. Пат. 3777377 США, МПК E02F1/00. Method of collecting submarine resources / Toritani M.; заявитель и патентообладатель Toritani M. – USD3777377 19711027; опубл. 11.12.1973.
48. Пат. 4185404 США, МПК E02F5/00. Nodule dredging bucket / Charles C., Hue J.-P., Le Foll F.; заявитель и патентообладатель Centre National Exploit Oceans (France). – US770835314 19770921; опубл. 29.01.1980.
49. Пат. 3365823 США. Ocean floor mining system / Vogt R.; заявитель и патентообладатель Scientia Corp. Опубл. 30.01.1968.
50. Пат.1239178 Великобритания, МПК E02F3/08. Improvements in dredging / Masuda Y., Facuda H.; заявитель и патентообладатель Masuda Y. – №18619/70; опубл. 14.07.1971.

51. Пат. 4226035 США, МПК E02F3/08, E02F3/14. Apparatus for continuously dredging submarine mineral deposit / Saito N.; заявитель и патентообладатель Saito N. – US780871197 19780121; опубл. 07.10.1980.
52. Пат. 7208061 Япония, МПК E21C50/00. Bucket mining device of deep-sea minerals / Masuda Y.; заявитель и патентообладатель Fukada Hideaki. – JP940023064 940125; опубл. 08.08.1995.
53. Пат. 3672079 США, МПК E02F3/14. Method and apparatus for mining manganese nodules from the deep sea-bottom / Masuda Y., Murakami T.; заявитель и патентообладатель Masuda Y., Murakami T. – USD3672079 19700422; опубл. 27.06.1972.
54. Пат. 4802292 США. Continuous mining device for crust deposits, etc. and continuous line bucket method with turning movement / Masuda Y.; заявитель и патентообладатель Facuda Hideaki. – US870012453; опубл. 07.02.1989.
55. Пат. 3908291 США, МПК E02F3/14, A01K74/00, A01K79/00. Apparatus for preventing tangle of endless rope in mining or sea life gathering / Masuda Y.; заявитель и патентообладатель Masuda Y. – US730428834 19731227; опубл. 30.09.1975.
56. Пат. 3889403 США, МПК E02F5/00. Method and apparatus for continuous underwater mining using plural ships / Gauthier M., Tessier M., Fleruy D., Jegousse M.; заявитель и патентообладатель Centre Nat. Exploit. Oceans. – US730360594; опубл. 17.06.1975.
57. Пат. 3943644 США, МПК E02F3/08. Mining dredge having endless bucket conveyor and flexible gulde train / Walz A.; заявитель и патентообладатель Walz A. – US740483068 19740625; опубл. 16.03.1976.
58. Пат. 3955294 США, МПК E02F3/14. Elevator apparatus for towed deep-sea particle harvester / Morgenstein M.; заявитель и патентообладатель Hawaii Marine Research Inc. – US750548483 19750210; опубл. 11.05.1976.
59. Пат. 3999313 США, МПК E02F3/14. Towed sled for deep-sea particle harvest / Andrews J.; заявитель и патентообладатель Hawaii Marine Research Inc. – US750548301 19750210; опубл. 28.12.1976.

60. Пат. 4055006 США, МПК E02F3/08. Deep-sea ore collecting and hoisting apparatus / Shibata J.; заявитель и патентообладатель Mitsubishi Kaihatsu Kabushiki. – US760673591 19760405; опубл. 25.10.1977.
61. Пат. 0302762 European Patent Organization, МПК E02F7/00, E02F3/08, E21C45/00. Ocean floor dredging / Maleca M.; заявитель и патентообладатель Manaco International (Switzerland). – EP880307320 19880808; опубл. 08.02.1989.
62. Пат. 25339 Україна, МПК E21C50/00. Установка для підводної розробки корисних копалин / Зіборов А.П., Мішин В.В., Мажбіц А.Г., Нагорна В.Г.; заявник та патентовласник Державна гірнична академія України. – № 95010325; заяв. 24.01.95; опубл. 15.02.01, Бюл. №1.
63. Федоров Д.И. Рабочие органы землеройных машин [2-е изд., переработ. и доп.] / Д.И. Федоров. – М.: Машиностроение, 1989. – 288 с.
64. Машины для земляных работ: навчальний посібник / [Л.А. Хмара, С.В. Кравець, В.В. Нічке та ін.]; під загальною редакцією проф. Хмари Л.А. та проф. Кравця С.В. – Харків: [б.в.], 2010. – 557с.
65. Волков С.А. Строительные машины [учеб. для строит. вузов] / С.А. Волков, С.А. Евтюков. – СПб.: Изд-во ДНК, 2012. – 704 с.
66. Сукач М.К. Рабочие процессы глубоководных машин / М.К. Сукач. – К.: Наук. думка, 2004. – 364 с.
67. Тургумбаев Д.Д. Моделирование процессов подводного резания грунтов землеройными машинами для прогнозирования рабочих нагрузок: автореф. дис. на соискание науч. степени докт. техн. наук: спец. 05.05.04 "Дорожные и строительные машины" / Д.Д. Тургумбаев. – Москва, 1992. – 39 с.
68. Моисеенко В.Г. Прогнозирование рабочих нагрузок землеройных машин в особых условиях / В.Г. Моисеенко. – К.: Вища школа, 1987. – 194 с.
69. Сукач М.К. Ідентифікація робочих процесів глибоководних ґрунторозробних машин: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.05.04 "Машины для земляных та дорожніх робіт" / М.К. Сукач. – Київ, 1999. – 33 с.

70. Лобанов В. А. Справочник по технике освоения шельфа / В. А. Лобанов. – Л.: Судостроение, 1983. – 288 с.
71. Майминд В.Я. Скреперные комплексы на открытых горных разработках / В.Я. Майминд, А.И. Арсентьев. – М.: "Недра", 1976. – 204 с.
72. Домбровский Н.Г. Строительные машины [учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. "Строит. и дор. машины и оборуд." в 2-х ч.] / Н.Г. Домбровский. – М.: Высш. шк., 1985. – Ч. II. – 1985. – 224 с.
73. Зеленин А.Н. Физические основы теории резания грунтов / А.Н. Зеленин. – М.: АН СССР, 1950. – 355 с.
74. Баловнев В.И. Повышение производительности машин для земляных работ / В.И. Баловнев, Л.А. Хмара. – К.: Будівельник, 1988. – 152с.
75. Недорезов И.А. Машины строительного производства [учеб. пособие] / И.А. Недорезов, А.Г. Савельев. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 119 с.
76. Ухов С.Б. Механика грунтов, основания и фундаменты [учебник] / С.Б. Ухов, В.В. Знаменский, В.В. Семенов и др. – М.: Высш. шк., 1994. – 527 с.
77. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическим способом [изд. 2-е, перераб. и доп.] / А.Н. Зеленин. – М.: "Машиностроение", 1968. – 375 с.
78. Гилев А.В. Обоснование параметров рабочего органа канатного скрепера, применяемого при разработке обводненных месторождений полезных ископаемых / А.В. Гилев, Ф.Э. Шейн // Горное оборудование и электромеханика. – №8. – 2011 г. – С. 2 – 5.
79. Баладинский В.Л. Эксплуатационные характеристики подводных грунтов в расчетах землеройных машин / В.Л. Баладинский, М.К. Сукач // Известия вузов. Строительство. – №1. – 1999. – С. 120 – 123.
80. Сукач М.К. Реологические модели подводного грунта / М.К. Сукач // Строительное производство: Межвед. науч.-техн. сб. – №41.– 2001. – С. 5 – 10.
81. Сукач М.К. Модель резания пластичного водонасыщенного грунта ножом землеройной машины / М.К. Сукач, В.И. Магнушевский // Зб. наук. праць ХНАДУ. – Вип. 29 – 2005. – С. 74 – 79.

82. Добрецов В.Б. Канатно-скреперная разработка малых континентальных и прибрежно-морских россыпей / В.Б. Добрецов, Д.С. Опрышко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – №16. – 2006. – С. 229 – 239.
83. Ялтанец И.М. Технология разработки обводненных песчаных месторождений в условиях Крайнего Севера / И.М. Ялтанец, Е.А. Бессонов. – М.: Центральное правление Всесоюзного научно-технического горного общества, 1989. – 49 с.
84. Булік Ю.В. Обґрунтування процесу і параметрів механізму для добування сапропелів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук по спец. 05.05.11 "Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва" / Ю.В. Булік. – Луцьк, 2005. – 20 с.
85. Багаутинов Г.А. Автоматизация драг [учеб. пособие] / Г.А. Багаутинов, Х.Б. Юнусов. – Екатеринбург: УГГГА, 1997. – 121 с.
86. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. – М.: Гостехиздат, 1960. – 241 с.
87. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов [учеб. пособие для строительных вузов] / С.С. Вялов. – М.: Высш. школа, 1978. – 447 с.
88. Дарков А.В. Соппротивление материалов [учебник для втузов] / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. – М.: "Высш. шк.", 1975. – 654 с.
89. Александров А.В. Основы теории упругости и пластичности [учеб. для строит. спец. вузов] / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М.: Высш. шк., 1990. – 400 с.
90. Охоцимский Д.Е. Основы механики космического полета [учеб. пособие] / Д.Е. Охоцимский, Ю.Г. Сихарулидзе. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 448 с.
91. Аркулис Г.Э. Теория пластичности [учеб. пособие для вузов] / Г.Э. Аркулис, В.Г. Дорогобид. – М.: Металлургия, 1987. – 352 с.
92. Бударин В.О. Метод расчета движения жидкости / В.О. Бударин. – Одесса: Астропринт, 2006. – 137 с.

93. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: "Наука", 1977. – 440 с.
94. Санников Р.Х. Теория подобия и моделирования. Планирование инженерного эксперимента / Р.Х. Санников. – Уфа: УГНТУ, 2010. – 271 с.
95. Козлов И.А. Исследование прочности деталей машин при помощи тензодатчиков сопротивления / И.А. Козлов, В.Г. Баженов, В.В. Матвеев и др. – К.: Техника, 1967. – 204 с.
96. Клокова Н.П. Тензорезисторы: теория, методики расчета, разработки / Н.П. Клокова. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
97. Грунти. Відбирання, упакування, транспортування і зберігання зразків [Текст]: ДСТУ Б В.2.1-8-2001. – Вид. офіц. – Вперше (зі скасуванням ГОСТ 12071-84); введ. 2001-11-30. – К.: Держкоммістобудування України, 2001. – 16 с. – (Система стандартизації та нормування в будівництві).
98. Данилов А.А. Метрологическое обеспечение измерительных систем [учеб. пособие] / А.А. Данилов. – Пенза: Профессионал, 2008. – 63 с.
99. Шалабанов А.К. Практикум по эконометрике с применением MS Excel: Линейные модели парной и множественной регрессии / А.К. Шалабанов, Д.А. Роганов. – Казань: "Тисби", 2008. – 53 с.
100. Воскобойников Ю.Е. Математическая статистика (с примерами в Excel) [учеб. пособие] / Ю.Е. Воскобойников, Е. И. Тимошенко. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2006. – 152 с.
101. Грунти. Метод лабораторного визначення фізичних властивостей [Текст]: ДСТУ Б В.2.1-17-2009. – Вид. офіц. – Вперше (зі скасуванням ГОСТ 5180-84); введ. 2010-10-01. – К.: Мінрегіонбуд України, 2001. – 22 с. – (Система стандартизації та нормування в будівництві).
102. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика [для инженеров и научных работников] / А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
103. Франчук В.П. Комплекс технологического оборудования судового базирования «Сапропель» для отбора проб глубоководных донных осадков /

В.П. Франчук, А.П. Зиборов, Т.В. Шепель // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2011. – №1. – С. 33-37.

104. Шепель Т.В. Устройство для исследования кинематики и динамики глубоководного грунторазрабатывающего оборудования / Т.В. Шепель, А.В. Сычев // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта 2014: материалы междунар. конф., 27 – 28 мар. 2014 г.: тез. докл. – Д.: НГУ, 2014. – С. 225 – 233.

105. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

106. Ґрунти. Лабораторні випробування. Загальні положення [Текст]: ДСТУ Б В.2.1-3-1996. – Вид. офіц. – Вперше; введ. 1997-01-01. – К.: Держкоммісобудування України, 1997. – 27 с. – (Система стандартизації та нормування в будівництві).

107. Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань [Текст]: ДСТУ Б В.2.1-5-1996. – Вид. офіц. – Вперше (зі скасуванням ГОСТ 20522-75); введ. 1997-01-01. – К.: Мінрегіонбуд України, 1997. – 14 с. – (Система стандартизації та нормування в будівництві).

108. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості [Текст]: ДСТУ Б В.2.1-4-96. – Вид. офіц. – Вперше (зі скасуванням ГОСТ 12248-78, ГОСТ 17245-79, ГОСТ 23908-79, ГОСТ 24586-90, ГОСТ 25585-83, ГОСТ 26518-85); введ. 1996-11-01. – К.: Держкоммісобудування України, 1996. – 76 с. – (Система стандартизації та нормування в будівництві).

109. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике [учеб. пособие для студентов вузов] / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2004. – 404 с.

110. Калинина В.Н. Математическая статистика / В.Н. Калинина, В.Ф. Панкин. – М.: Дрофа, 2002. – 366 с.

Критериальное моделирование процесса копания ГВОМО

Процесс заполнения ковша определяется параметрами, которые можно представить в виде функциональной зависимости:

$$F(\tau_0, \eta_{\text{пл}}, \Delta\rho, v_0, P_3, S_{\text{стр}}, l_{\text{пр}}, g, \beta_{\text{н}}) = 0.$$

Как принято в механике, за базисные единицы измерения выберем массу M , длину L и время T [94]. Тогда остальные параметры выразим через базисные: $P_i = [M]^{\alpha_i}[L]^{\beta_i}[T]^{\gamma_i}$, где P_i – любой из рассматриваемых параметров; α , β , γ – показатели степени. Результат представлен в таблице Б.1.

Таблица Б.1

Размерности физических величин

Параметры	Единица измерения	Показатели степеней		
		$[M]$	$[L]$	$[T]$
τ_0	Па	$\alpha_1 = 1$	$\beta_1 = -1$	$\gamma_1 = -2$
$\eta_{\text{пл}}$	Па·с	$\alpha_2 = 1$	$\beta_2 = -1$	$\gamma_2 = -1$
$\Delta\rho$	кг/м ³	$\alpha_3 = 1$	$\beta_3 = -3$	$\gamma_3 = 0$
v_0	м/с	$\alpha_4 = 0$	$\beta_4 = 1$	$\gamma_4 = -1$
P_3	Н	$\alpha_5 = 1$	$\beta_5 = 1$	$\gamma_5 = -2$
$S_{\text{стр}}$	м ²	$\alpha_6 = 0$	$\beta_6 = 2$	$\gamma_6 = 0$
$l_{\text{пр}}$	м	$\alpha_7 = 0$	$\beta_7 = 1$	$\gamma_7 = 0$
g	м/с ²	$\alpha_8 = 0$	$\beta_8 = 1$	$\gamma_8 = -2$
$\beta_{\text{н}}$	град.	$\alpha_9 = 0$	$\beta_9 = 0$	$\gamma_9 = 0$

Критерии подобия получим классическим способом на основе π -теоремы. Обозначив критерий подобия через π , можно записать:

$$\pi = [\tau_0]^{z_1}[\eta_{\text{пл}}]^{z_2}[\Delta\rho]^{z_3}[v_0]^{z_4}[P_3]^{z_5}[S_{\text{стр}}]^{z_6}[l_{\text{пр}}]^{z_7}[g]^{z_8}[\beta_{\text{н}}]^{z_9}. \quad (\text{Б.1})$$

Поскольку число участвующих в процессе параметров $n = 9$, а число основных параметров $r = 3$, то n величин должны дать $n - r = 9 - 3 = 6$ критериев подобия.

Выражая параметры в (Б.1) через базисные величины, получаем:

$$\pi = \{[L]^{\alpha_1}[M]^{\beta_1}[T]^{\gamma_1}\}^{z_1} \cdot \{[L]^{\alpha_2}[M]^{\beta_2}[T]^{\gamma_2}\}^{z_2} \cdot \dots \cdot \{[L]^{\alpha_9}[M]^{\beta_9}[T]^{\gamma_9}\}^{z_9}. \quad (\text{Б.2})$$

Значения показателей степени z_1, z_2, \dots, z_9 определяются из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \dots + \alpha_9 z_9 = 0, \\ \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \dots + \beta_9 z_9 = 0, \\ \gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2 + \dots + \gamma_9 z_9 = 0. \end{cases} \quad (\text{Б.3})$$

С учетом значений α_i, β_i и γ_i система (Б.3) примет вид:

$$\begin{cases} z_1 + z_2 + z_3 + z_5 = 0, \\ -z_1 - z_2 - 3z_3 + z_4 + z_5 + 2z_6 + z_7 + z_8 = 0, \\ -2z_1 - z_2 - z_4 - 2z_5 - 2z_8 = 0. \end{cases} \quad (\text{Б.4})$$

Из системы (Б.4) определяются лишь три неизвестных, остальные задаем произвольно. Одни из возможных результатов решения системы (Б.4) приведены в табл. Б.2.

Таблица Б.2

Результаты решения системы уравнений (Б.4)

№ п/п	Значения показателей степени							
	заданные					рассчитанные		
	z_1	z_2	z_3	z_7	z_8	z_4	z_5	z_6
1	1	0	0	0	0	0	-1	1
2	0	1	0	0	0	1	-1	0,5
3	0	0	1	0	0	2	-1	1
4	0	0	0	1	0	0	0	-0,5
5	0	0	0	0	1	-2	0	0,5

Путем подстановки комбинаций значений z_i в (Б.1) получаем критерии подбора:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \tau_0 P_3^{-1} S_{\text{стр}} = \frac{\tau_0 S_{\text{стр}}}{P_3}; \\ \pi_2 &= \eta_{\text{пл}} v_0 P_3^{-1} S_{\text{стр}}^{0,5} = \frac{\eta_{\text{пл}} v_0 \sqrt{S_{\text{стр}}}}{P_3}; \\ \pi_3 &= \Delta \rho v_0^2 P_3^{-1} S_{\text{стр}} = \frac{\Delta \rho v_0^2 S_{\text{стр}}}{P_3}; \end{aligned}$$

$$\pi_4 = S_{\text{стр}}^{-0,5} l_{\text{пр}} = \frac{l_{\text{пр}}}{\sqrt{S_{\text{стр}}}};$$

$$\pi_5 = v_0^{-2} S_{\text{стр}}^{0,5} g = \frac{g \sqrt{S_{\text{стр}}}}{v_0^2}.$$

Шестым критерием подобия характеризующий геометрическое подобие процессов, является угол $\beta_{\text{н}}$:

$$\pi_6 = \beta_{\text{н}}.$$

Определяем отношения масштабов моделирования (индикаторы подобия), которые согласно первой теореме для подобных систем равны единице:

$$I_1 = \frac{k_{\tau_0} k_{S_{\text{стр}}}}{k_{P_3}} = 1;$$

$$I_2 = \frac{k_{\eta_{\text{пл}}} k_{v_0} \sqrt{k_{S_{\text{стр}}}}}{k_{P_3}} = 1;$$

$$I_3 = \frac{k_{\Delta\rho} k_{v_0}^2 k_{S_{\text{стр}}}}{k_{P_3}} = 1;$$

$$I_4 = \frac{k_{l_{\text{пр}}}}{\sqrt{k_{S_{\text{стр}}}}} = 1;$$

$$I_5 = \frac{k_g \sqrt{k_{S_{\text{стр}}}}}{k_{v_0}^2} = 1;$$

$$I_6 = k_{\beta_{\text{н}}} = 1,$$

где масштаб k_{P_i} является отношением соответствующего параметра P_i оригинала и модели.

При физическом моделировании процесса копания с использованием образцов натурального грунта масштабы моделирования $k_{\tau_0} = k_{\eta_{\text{пл}}} = k_{\Delta\rho} = 1$. В земных условиях масштаб $k_g = 1$. Тогда индикаторы подобия примут значения:

$$I_1 = \frac{k_{S_{\text{стр}}}}{k_{P_3}} = 1;$$

$$I_2 = \frac{k_{v_0} \sqrt{k_{S_{\text{стр}}}}}{k_{P_3}} = 1;$$

$$I_3 = \frac{k_{v_0}^2 k_{S_{\text{стр}}}}{k_{P_3}} = 1;$$

$$I_4 = \frac{k_{l_{\text{пр}}}}{\sqrt{k_{S_{\text{стр}}}}} = 1;$$

$$I_5 = \frac{\sqrt{k_{S_{\text{стр}}}}}{k_{v_0}^2} = 1;$$

$$I_6 = k_{\beta_{\text{н}}} = 1.$$

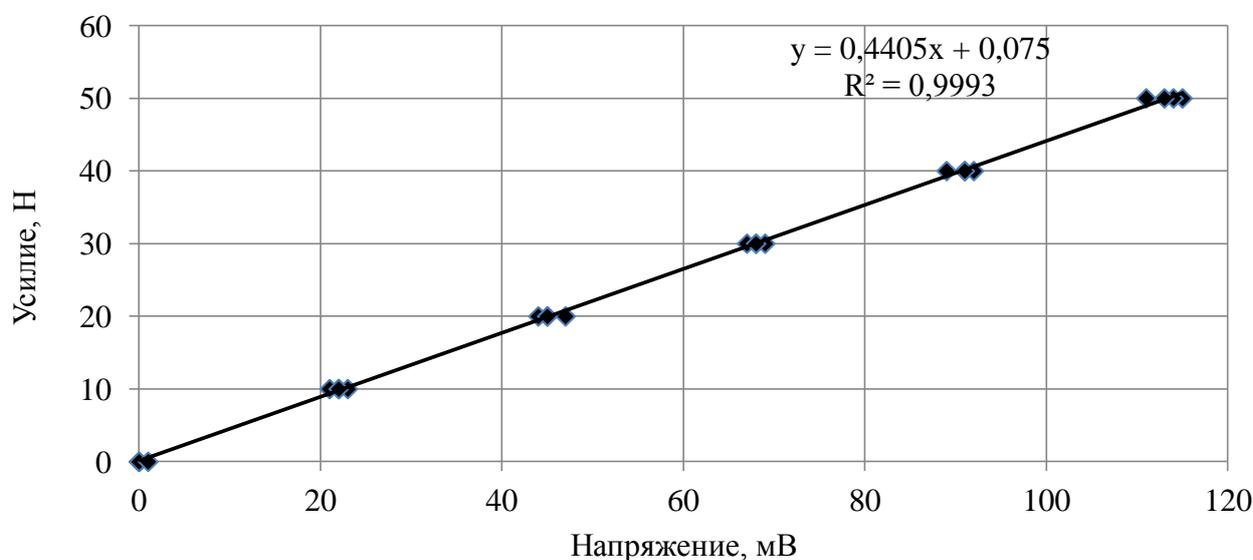
Анализируя полученные индикаторы подобия нетрудно заметить, что отношение I_3/I_1 дает значение масштаба $k_{v_0} = 1$, который в свою очередь при подстановке в I_5 дает $k_{S_{\text{стр}}} = 1$. Таким же путем получаем $k_{P_3} = 1$ и $k_{l_{\text{пр}}} = 1$. Это означает, что результаты экспериментальных исследований в лабораторных условиях на уменьшенных физических моделях с использованием образцов натурального грунта могут быть напрямую использованы для проверки теоретических выкладок без пересчета полученных данных через масштабные коэффициенты.

Результаты тарирования электронного силоизмерительного оборудования

1. Таблица результатов измерений

Усилие натяжения шнура, Н	Напряжение разбаланса тензомоста, мВ			
	Серия опытов №1		Серия опытов №2	
	нагрузка	разгрузка	нагрузка	разгрузка
0	0	0	0	1
10	22	23	21	22
20	44	45	47	45
30	68	67	69	68
40	89	91	92	91
50	115	114	111	113

2. График зависимости усилия натяжения шнура (касательной составляющей усилия копания) от напряжения разбаланса тензомоста:



3. Результаты статистического анализа:

Уравнение регрессии: $y(x) = 0,4405x + 0,075$

Коэффициент корреляции: $R = 0,9996$

Коэффициент детерминации: $R^2 = 0,9993$

Фактическое значение F -критерия Фишера: $F = 31\,804,91$

Остаточная дисперсия на одну степень свободы: $S^2_{\text{ост}} = 0,2199$

Стандартная ошибка: $S_{\text{ост}} = 0,4690$

Стандартные ошибки для параметров регрессии ($a = 0,4405$; $b = 0,075$):

$m_a = 0,0025$; $m_b = 0,1694$

Фактические значения t -критерия Стьюдента:

$t_a = 178,3393$; $t_b = 0,4425$

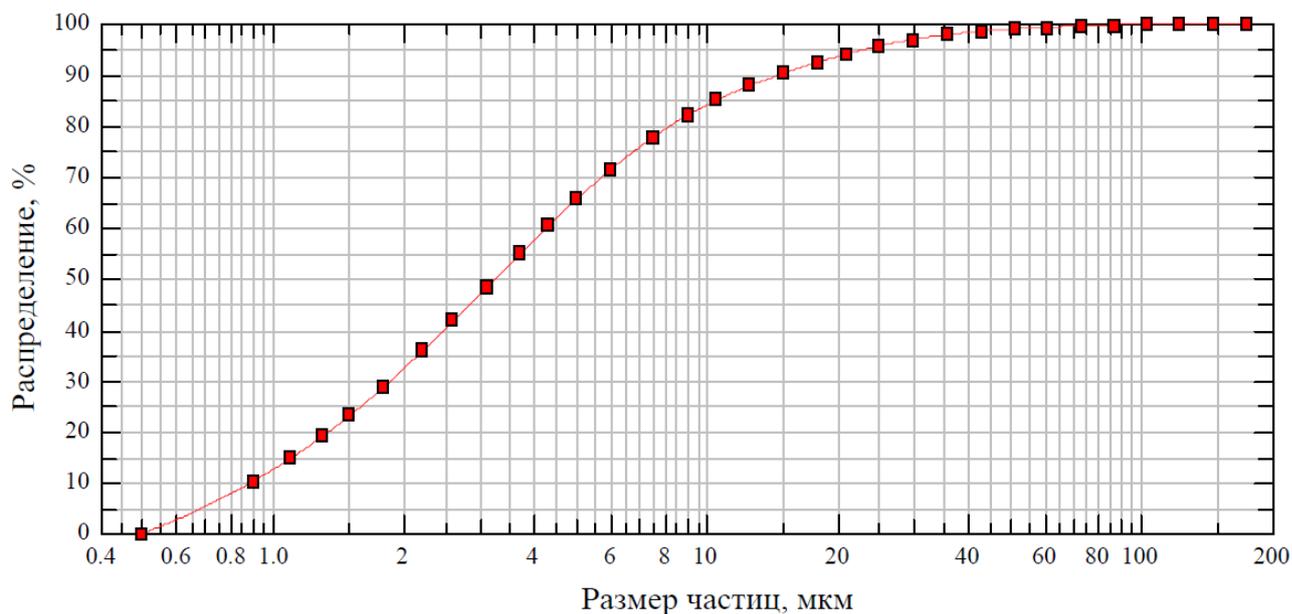
Доверительные интервалы при значении доверительной вероятности 0,99:

$0,4335 \leq a \leq 0,4475$; $-0,4025 \leq b \leq 0,5525$.

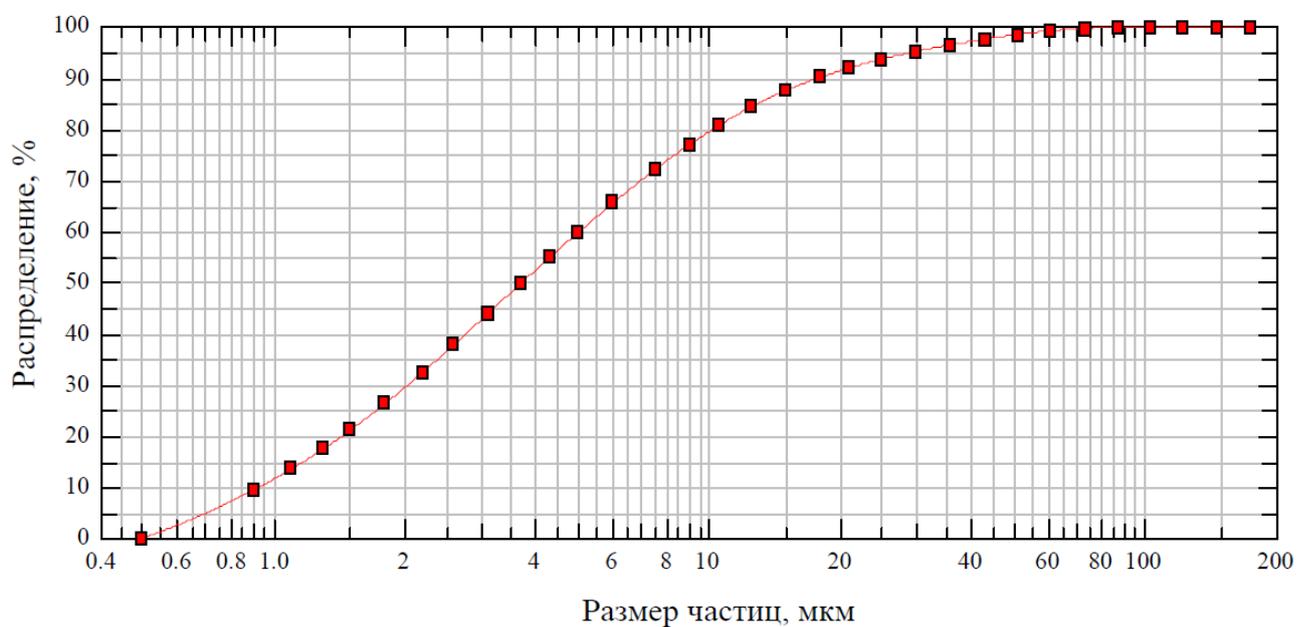
Результаты исследований гранулометрического состава ГВОМО

Используемое оборудование – лазерный дифракционный анализатор HELOS (H0735) & QUIXEL, R3: 0.5/0.9...175 μ m.

1. Сапропелевый ил

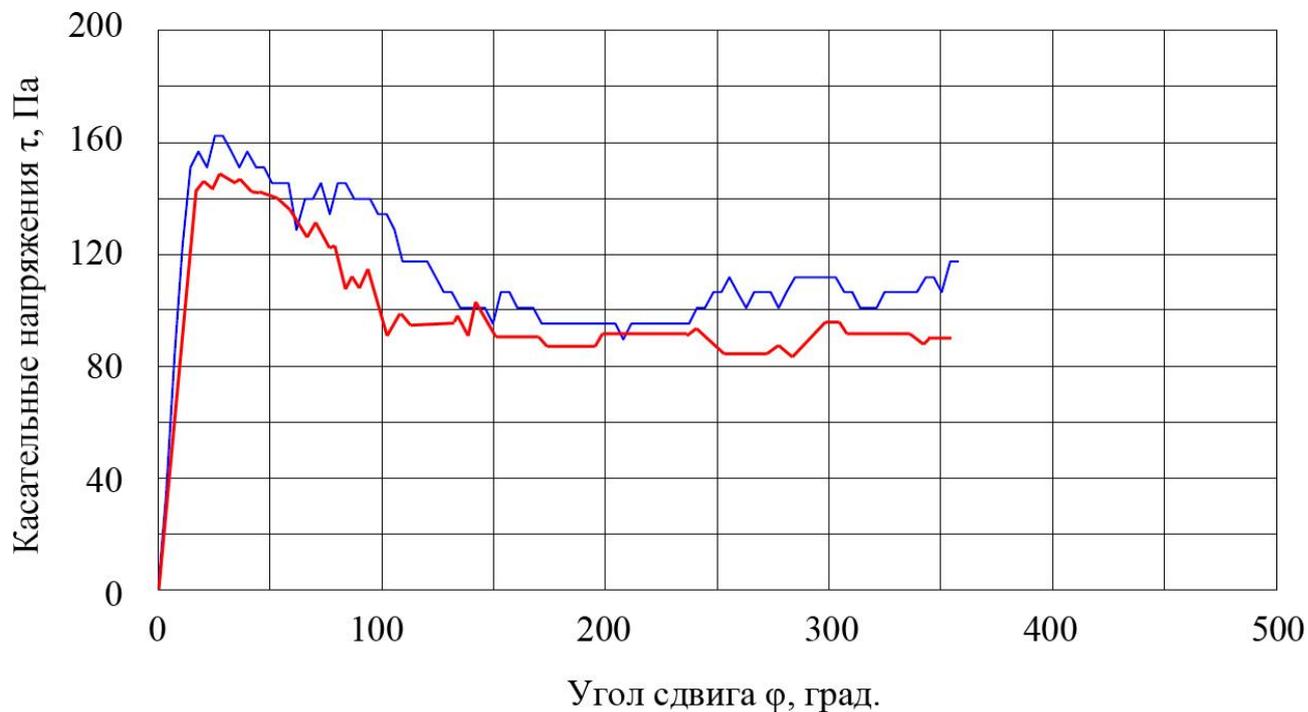


2. Кокколитовый ил

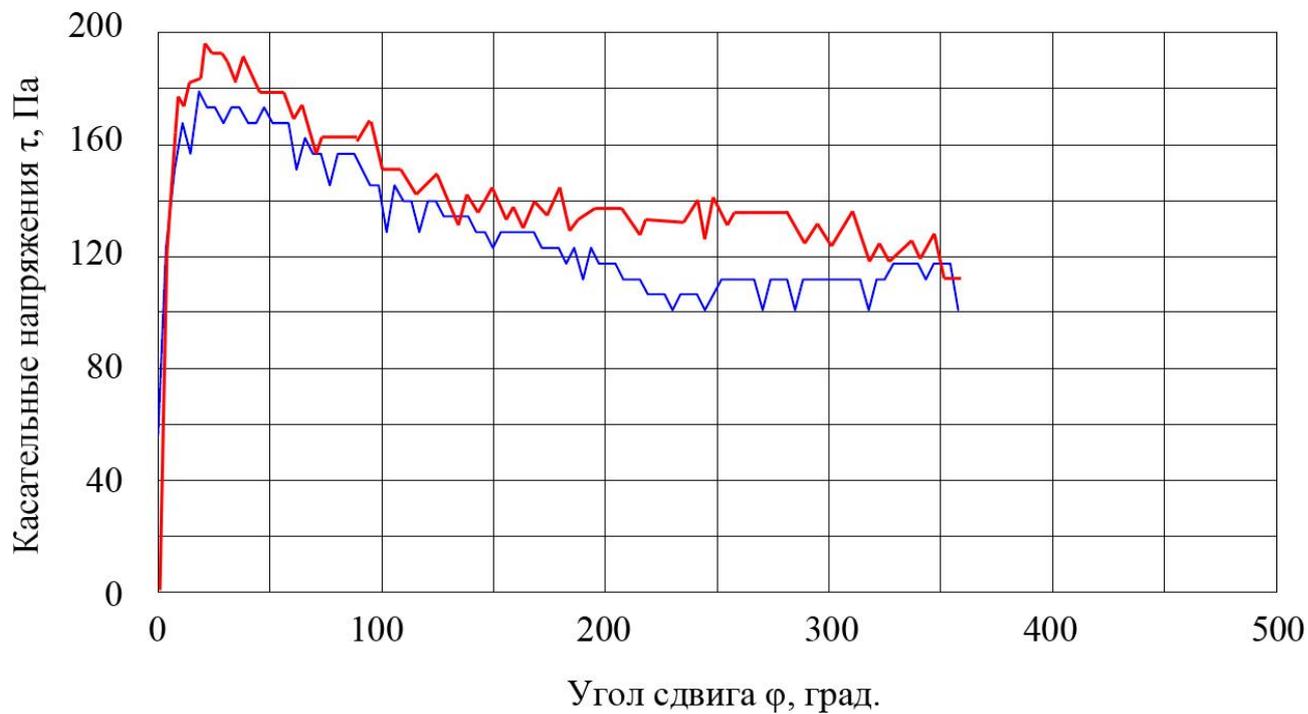


Результаты испытаний ГВОМО на сдвиг методом вращательного среза

1. Сапропелевый ил

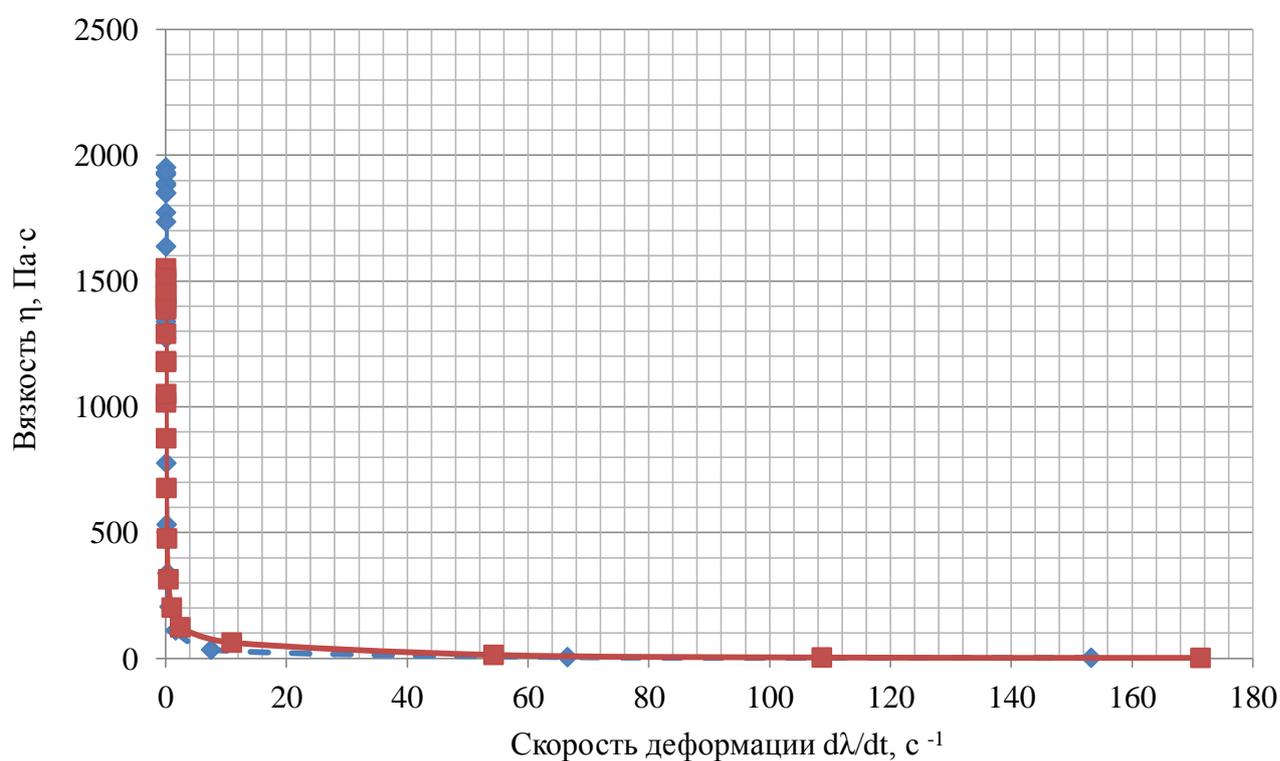
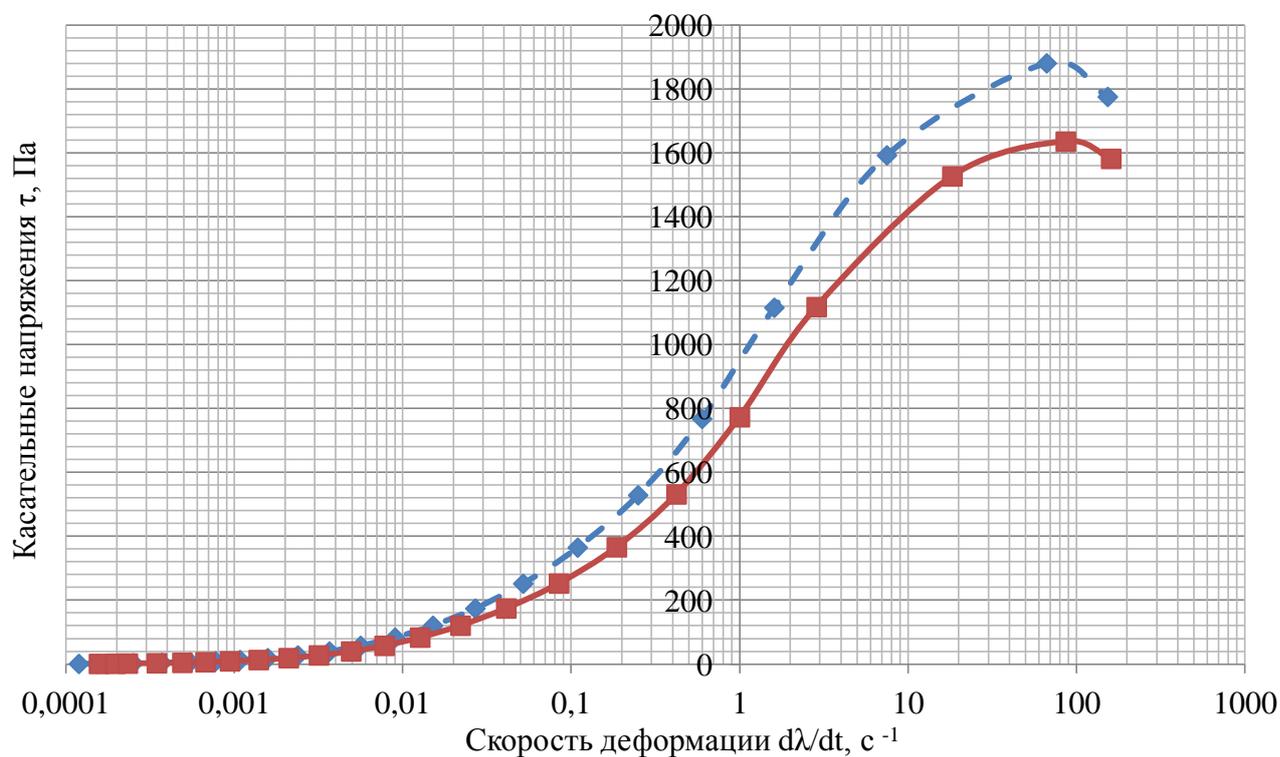


2. Кокколитовый ил

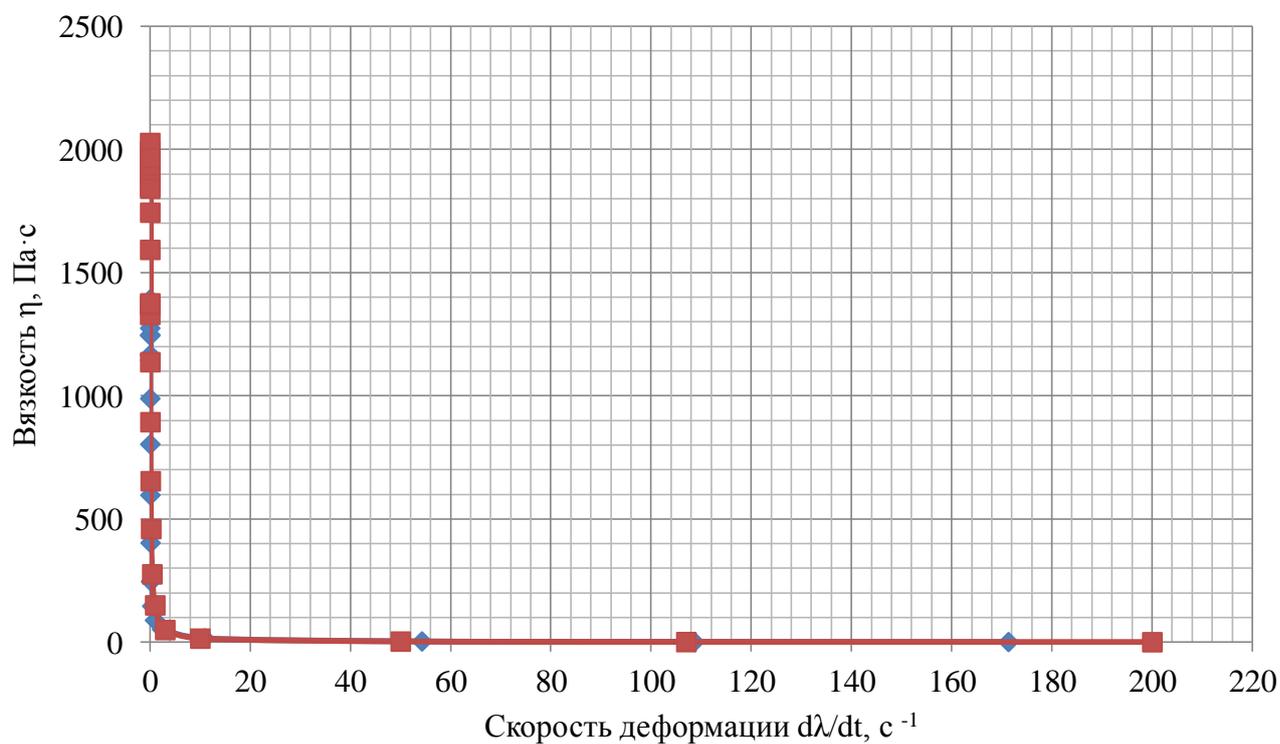
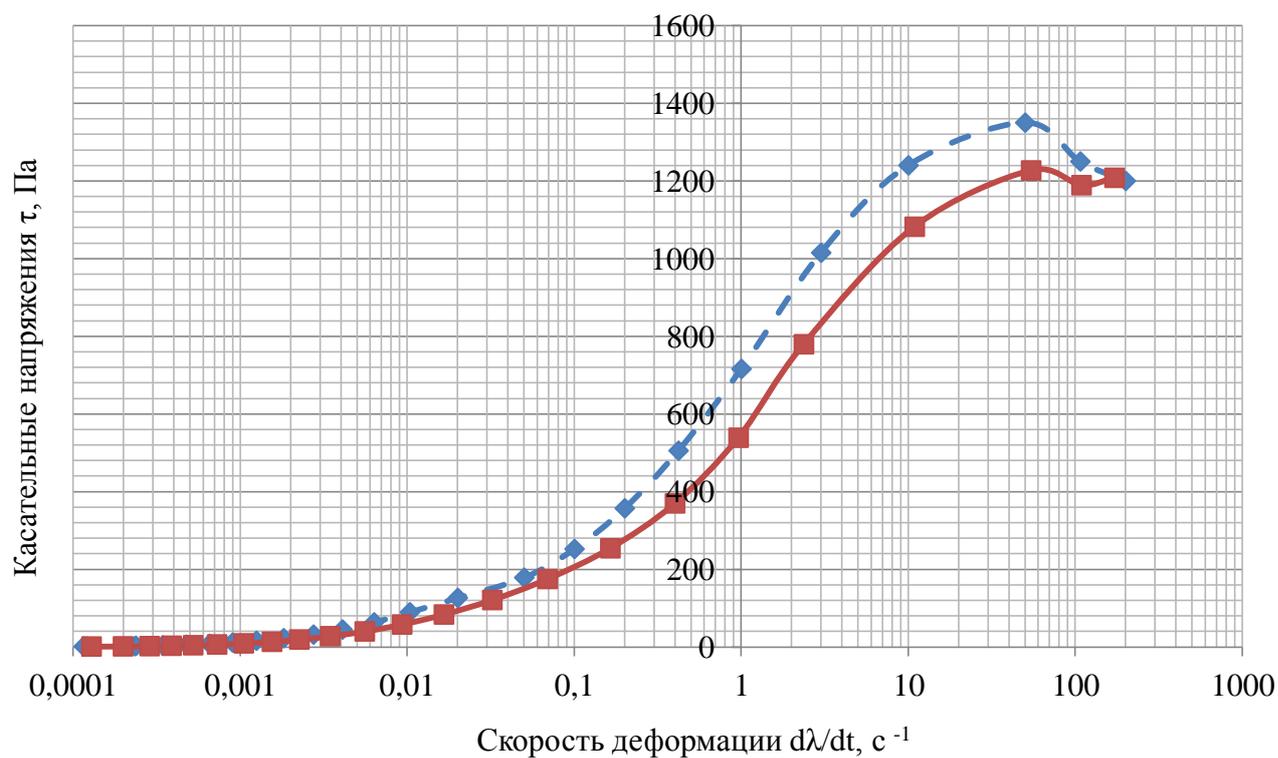


Результаты вискозиметрических испытаний ГВОМО

I. Испытание сапропелевого ила



II. Испытание кокколитового ила



Проверка гипотезы о нормальном законе распределения параметра $l_{пр}$

Опыты были проведены с использованием сапропелевого ила, который по сравнению с кокколитовым характеризуется большим разбросом физико-механических свойств. Параметры резания: $h_0 = 0,01$ м, $b = 0,06$ м, $v_0 = 0,1$ м/с. Количество параллельных опытов $n = 16$. Результаты 16 наблюдений в виде вариационного ряда в возрастающем порядке представлены в табл. Ж.1.

Таблица Ж.1

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$l_{пр}$, мм	55	56	56	57	57	58	58	58	58	59	60	60	61	61	62	64

Используя критерий согласия Пирсона, проверим гипотезу, что распределение случайных величин $l_{пр}$ не противоречит нормальному закону на уровне значимости $\alpha = 0,1$.

Размах значений $R_{l_{пр}} = l_{пр,max} - l_{пр,min} = 9$ мм. Определим количество классов N , на которое требуется разбить гистограмму эмпирического распределения. Для этого используем рекомендации, приведенные в [102], согласно которым границы интервалов рекомендуется выбирать случайно, исходя из условия $p_i = 1/N = \text{const}$. Данное условие будет соблюдаться, если границы интервалов определить кратными 0,5 мм. Выберем минимальный шаг равным 2 мм. В этом случае количество классов будет равно 5, а границы распределения примут значения 54,5 и 64,5 мм.

В этой же работе предложена другая зависимость для определения количества классов:

$$N = 1 + 3,32 \lg(n) = 1 + 3,32 \lg(16) = 5. \quad (\text{Ж.1})$$

Для доверительной вероятности 95 % и степеней свободы $f = N - 3 = 2$ критическое значение критерия Пирсона $\chi^2_{кр}$ равно 6,0 [110].

Вычислим действительные частоты и распределение теоретической случайной величины, для чего составим расчетные табл. Ж.2 – Ж.4.

Таблица Ж.2

Номер интервала i	Границы интервалов		Варианта	Частота	$x_i - \bar{x}$	$x_{i+1} - \bar{x}$
	x_i	x_{i+1}	$x_i^* = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$	n_i		
1	54,5	56,5	55,5	3	–	-2,13
2	56,5	58,5	57,5	6	-2,13	-0,13
3	58,5	60,5	59,5	3	-0,13	1,87
4	60,5	62,5	61,5	3	1,87	3,87
5	62,5	64,5	63,5	1	3,87	–
Сумма				16		

Таблица Ж.3

Номер интервала i	Нормированные границы интервалов		Значения функции Лапласа		Вероятность попадания в интервал	Расчетная частота
	$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$	$z_{i+1} = \frac{x_{i+1} - \bar{x}}{\sigma}$	$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$	$P_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$	$n_i' = n \cdot P_i$
1	$-\infty$	-0,880	-0,5000	-0,3106	0,1894	3,030
2	-0,880	-0,054	-0,3106	-0,0215	0,2891	4,626
3	-0,054	0,773	-0,0215	0,2802	0,3017	4,827
4	0,773	1,599	0,2802	0,4451	0,1649	2,638
5	1,599	∞	0,4451	0,5000	0,0549	0,878
Сумма					1	16

Таблица Ж.4

Номер интервала i	Частоты		$(n_i - n_i')^2$	$\frac{(n_i - n_i')^2}{n_i}$	n_i^2	$\frac{n_i^2}{n_i}$
	n_i	n_i'				
1	3	3,030	0,0009	0,0003	9	2,97
2	6	4,626	1,8879	0,4081	36	7,78
3	3	4,827	3,3379	0,6915	9	1,86
4	3	2,638	0,1310	0,0497	9	3,41
5	1	0,878	0,0149	0,0170	1	1,14
Сумма	16	16		$\chi^2 = 1,17$		17,17

В приведенных таблицах расчетные параметры определялись по следующим зависимостям:

– выборочная средняя \bar{x} и выборочное среднеквадратическое отклонение σ :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^* n_i}{n} = 58,63; \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N n_i (x_i^* - \bar{x})^2}{n - 1}} = 2,42;$$

– значение функции Лапласа:

$$\Phi(z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_i} e^{-\frac{z^2}{2}} dz.$$

При доверительной вероятности 95 % соблюдается неравенство $\chi_{\text{набл}} < \chi_{\text{кр}}$ ($1,17 < 6,0$), поэтому нет оснований отвергнуть гипотезу о нормальном распределении генеральной совокупности.

Анализ влияния скорости резания v_0 на параметры $l_{пр}$, $h_{пр}$ и P_k

Детально рассмотрим влияние фактора v_0 на параметр $l_{пр}$ при копании сапропелевого ила. Расположим экспериментальные данные в виде таблицы И.1.

Таблица И.1

Результаты измерений параметра $l_{пр}$ (мм) для различных значений v_0 при резании сапропелевого ила

Номер наблюдения	Уровни фактора v_0 , м/с						
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,5	0,75	1,00
1	60	58	62	60	67	65	60
2	59	57	59	63	65	63	59
3	59	61	60	61	66	63	61
Среднее	59,33	58,67	60,33	61,33	66,00	63,67	60,00
Дисперсия	0,33	4,33	2,33	2,33	1,00	1,33	1,00

Из предпосылок дисперсионного анализа следует, что должно иметь место равенство $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2$. Поскольку количество наблюдений в каждой выборке одинаково, проверку положения о равенстве дисперсий произведем по критерию Кохрана при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

Дисперсии по выборкам определим по формуле [102]:

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2,$$

где n и j – соответственно количество наблюдений и номер выборки (натуральные числа).

Результаты расчетов дисперсий по выборкам приведены в табл. И.1. Сумма дисперсий по выборкам составляет:

$$\sum_{i=1}^7 s_i^2 = 12,67.$$

Максимальное значение дисперсии соответствует $s_2^2 = 4,33$. Отношение максимальной дисперсии к сумме дисперсий по выборкам будет равно:

$$g = \frac{4,33}{12,67} = 0,342.$$

Для $n = 3$ наблюдений, количества выборок $k = 7$ и $\alpha = 0,95$ по таблице определяем критическое значение статистики Кохрана $g_{0,95} = 0,664$.

Так как $g = 0,342 < g_{0,95} = 0,664$, то нулевая гипотеза не отклоняется.

Вычислим последовательно суммы:

$$X_j = \sum_{i=1}^n x_{ij};$$

$$Q_1 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_{ij}^2;$$

$$Q_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k X_i^2;$$

$$Q_3 = \frac{1}{kn} \left(\sum_{i=1}^k X_i \right)^2.$$

Далее находим оценку дисперсии $S_{v_0}^2$, характеризующую изменение средних значений измеряемой величины \bar{x}_i , связанное с влиянием фактора v_0 :

$$S_{v_0}^2 = \frac{Q_2 - Q_3}{k - 1}.$$

Значение дисперсии вне влияния фактора v_0 определяется выражением:

$$S_0^2 = \frac{Q_1 - Q_2}{k(n - 1)}.$$

Влияние фактора A считается значимым, если выполняется условие:

$$\frac{S_A^2}{S_0^2} > F_\alpha,$$

где F_α – значение функции Фишера, соответствующее α .

Расчетные значения параметров составляют: $Q_1 = 79\,146$; $Q_2 = 79\,121$; $Q_3 = 78\,997$; $S_{v_0}^2 = 20,56$; $S_0^2 = 1,81$; $S_{v_0}^2/S_0^2 = 11,36$. Табличное значение $F_{0,95}$ для $f_1 = k - 1 = 6$, $f_2 = k(n - 1) = 12$ равно $F_{0,95}(6; 12) = 3,0$.

Поскольку $S_{v_0}^2/S_0^2 = 11,36 > F_{0,95}(6; 12) = 3,0$, то влияние фактора v_0 на поведение параметра $l_{пр}$ следует признать значимым.

Аналогичные расчеты были проведены для определения влияния фактора v_0 на параметры $h_{пр}$ и P_k . Результаты расчетов сведены в табл. И.2 – И.4.

Таблица И.2

Проверка гипотезы о равенстве дисперсий распределения величины $h_{пр}$ (мм)

Номер наблюдения	Уровни фактора v_0 , м/с						
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,5	0,75	1,00
1	55	53	54	55	56	55	57
2	52	51	55	52	49	52	53
3	53	51	54	54	51	53	54
Среднее	53,33	51,67	54,33	53,67	52,00	53,33	54,67
Дисперсия	1,56	0,89	0,22	1,56	8,67	1,56	2,89
$s_{max}^2/\sum s^2 = 0,5 < 0,664$ – нулевая гипотеза не отклоняется							

Таблица И.3

Проверка гипотез о равенстве дисперсий распределения случайной величины P_k (Н)

Номер наблюдения	Уровни фактора v_0 , м/с						
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,5	0,75	1,00
1	16,32	14,56	15	13,56	14,11	15,44	16,34
2	15,77	15,1	15,3	14,8	14,7	15,78	15,61
3	16,4	14,7	14,1	14,5	13,92	14,69	15,86
Среднее	16,16	14,79	14,80	14,29	14,24	15,30	15,94
Дисперсия	0,08	0,05	0,26	0,28	0,11	0,21	0,09
$s_{max}^2/\sum s^2 = 0,26 < 0,664$ – нулевая гипотеза не отклоняется							

Таблица И.4

Параметр	Q_1	Q_2	Q_3	S_A^2	S_0^2	$S_{v_0}^2/S_0^2$	$F_{0,95}$	Влияние
Сапропелевый ил								
$l_{пр}$	79 146	79 121	78 997	20,56	1,81	11,36	3,00	значимое
$h_{пр}$	59 701	59 649	59 626	3,71	3,71	1,0	3,00	не знач.
P_k	4 785	4 782	4 772	1,73	0,23	7,46	3,00	значимое
Кокколитовый ил								
$l_{пр}$	97 311	97 198	96 947	50,19	9,44	5,31	3,33	значимое
$h_{пр}$	53 454	53 394	53 356	7,69	5,0	1,54	3,33	не знач.
P_k	5 003	5 000	4 984	3,03	0,33	9,27	3,33	значимое

Результаты испытаний образцов ГВОМО на трехосное сжатие
(станция 10/73)

Диаграмма сжатия образцов кокколитового ила

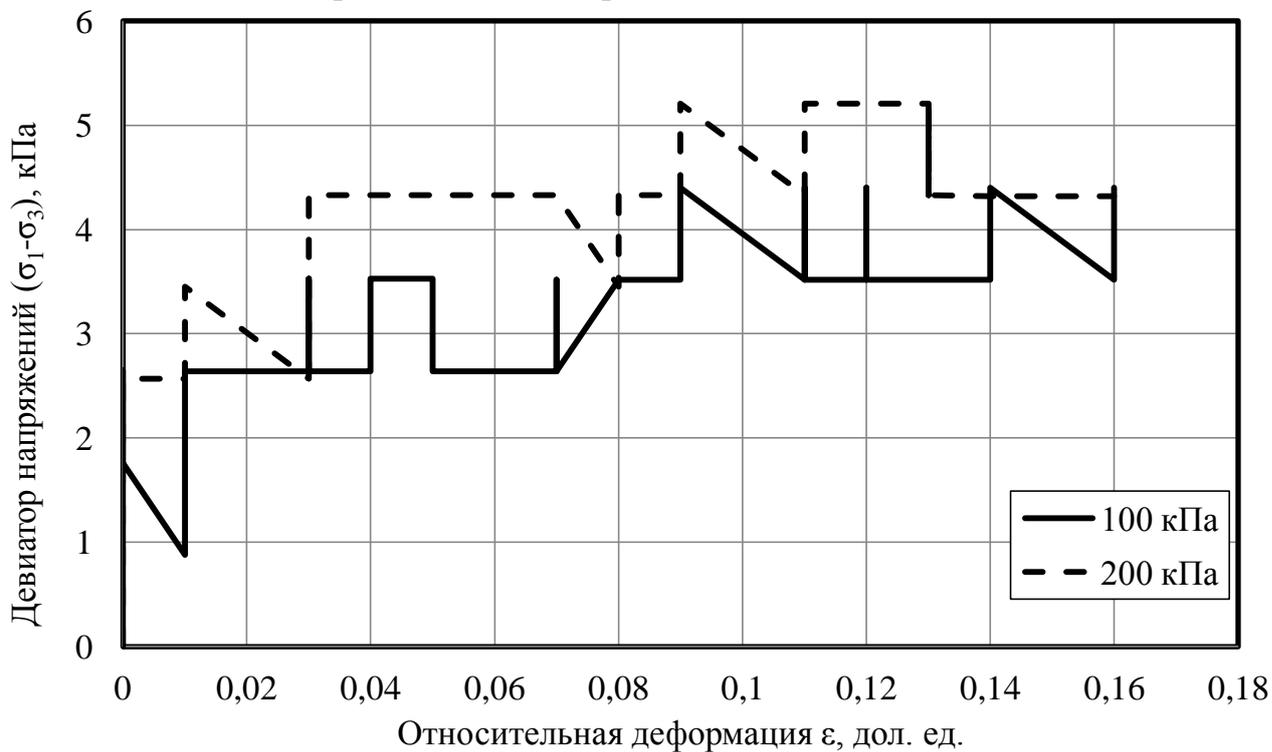


Диаграмма напряжений Кулона-Мора

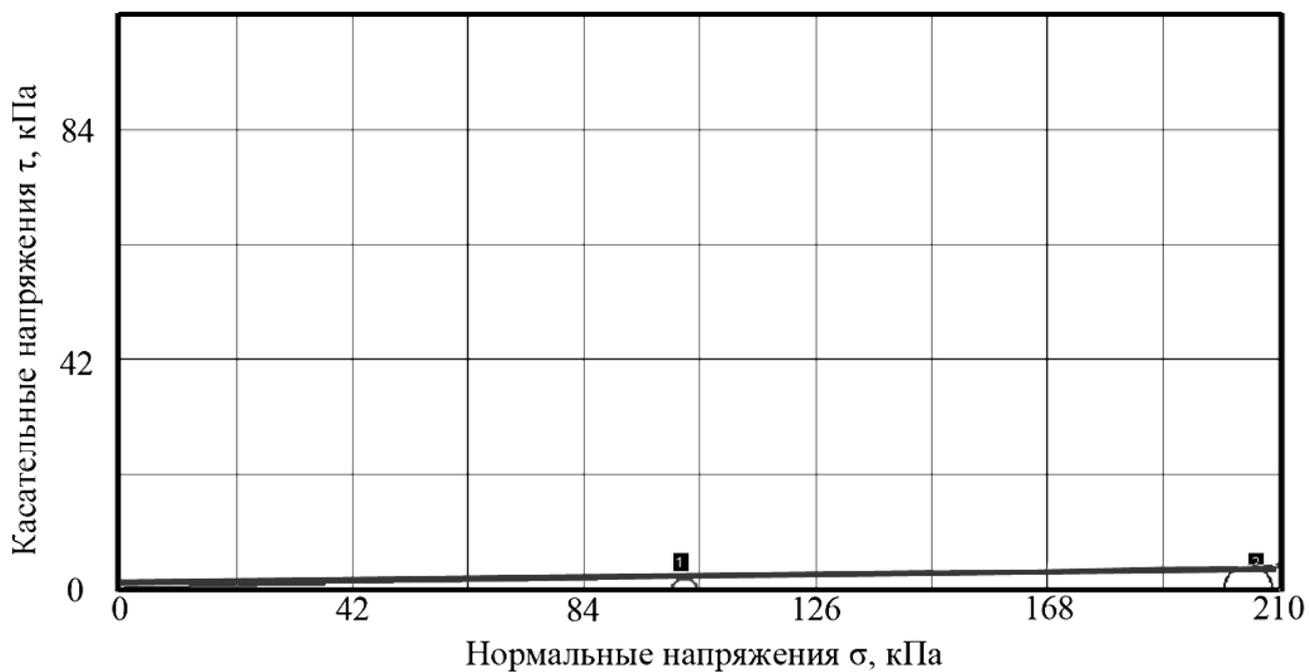


Диаграмма сжатия образцов сапропелевого ила

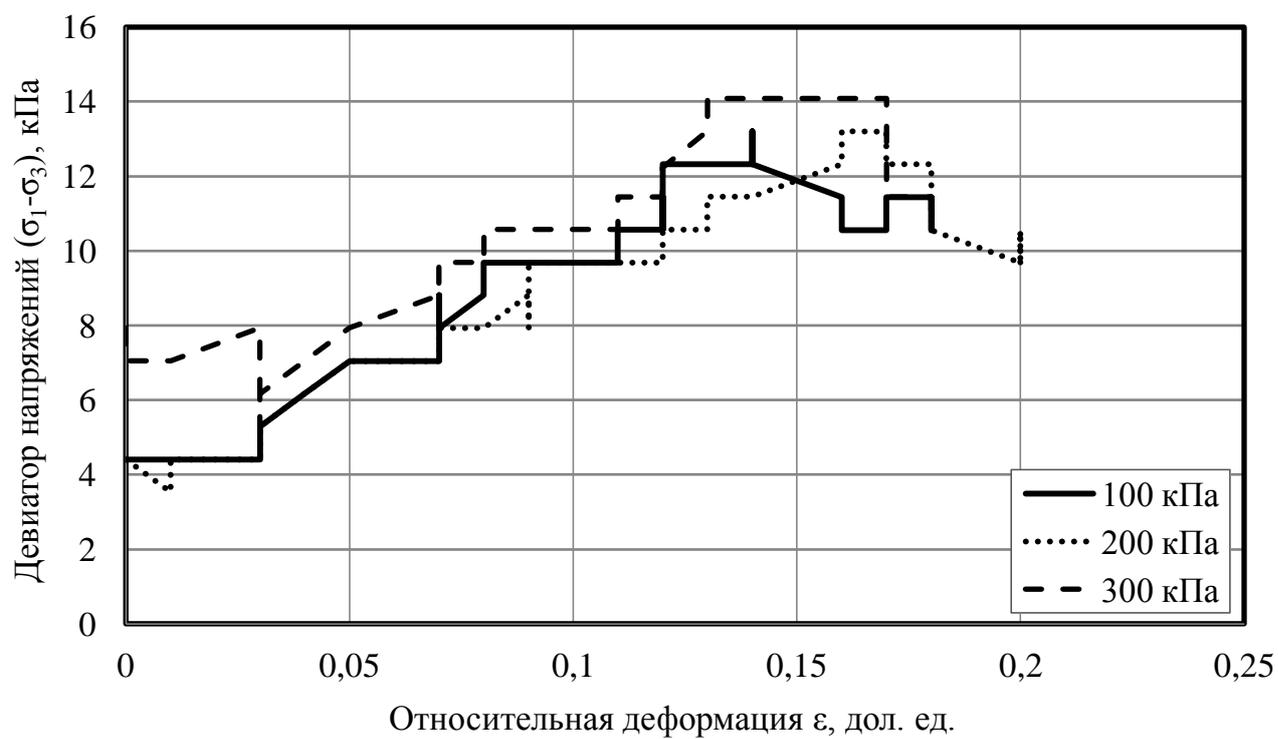


Диаграмма напряжений Кулона-Мора

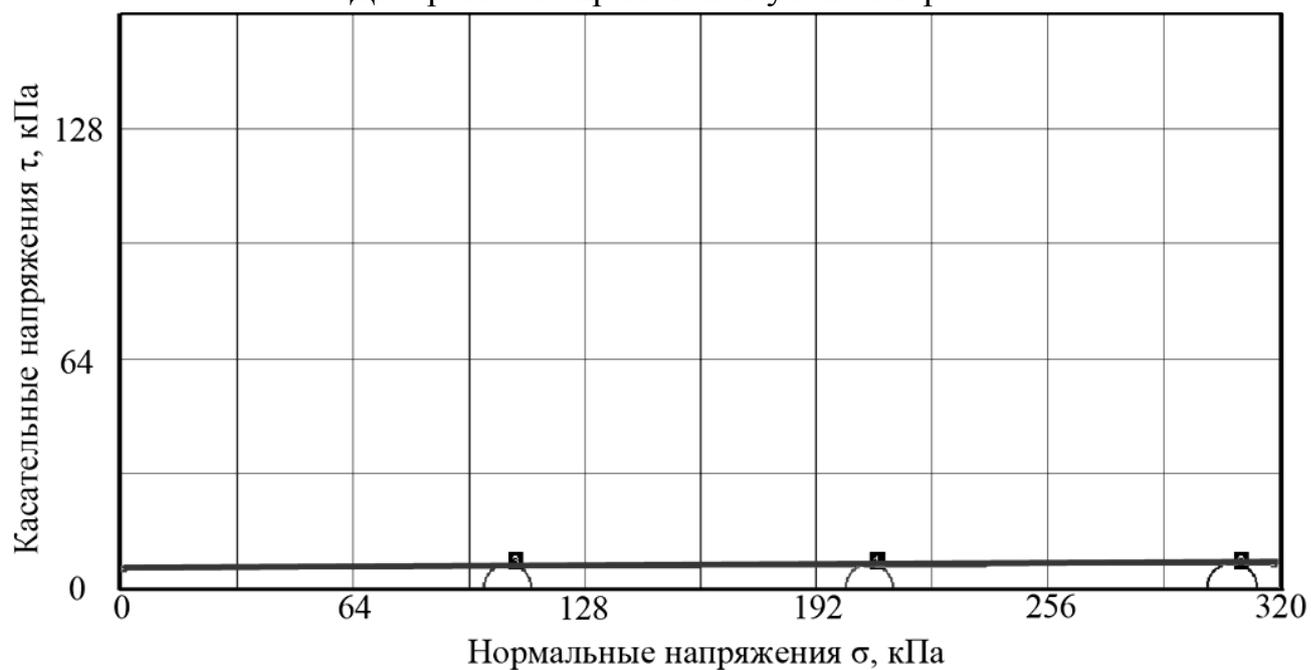


Диаграмма сжатия образцов зеленовато-серого ила

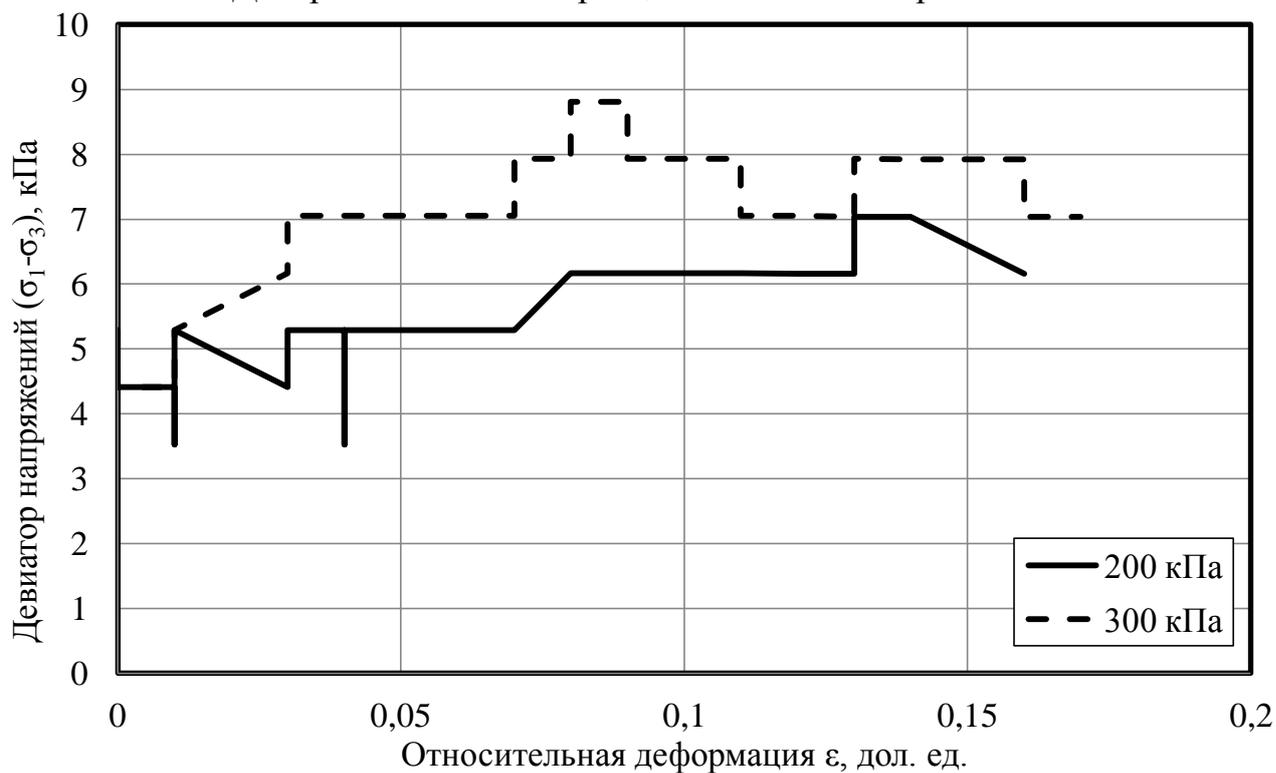


Диаграмма напряжений Кулона-Мора



Расчет параметра K_r для сапропелевого и кокколитового илов

Для наиболее распространенных режимов работы грунтоерабатывающих машин при копании пластичных водонасыщенных грунтов в подводных условиях, скорость угловых деформаций находится в диапазоне $0,7...50 \text{ с}^{-1}$. Функции $\eta(d\lambda/dt)$ для кокколитового и сапропелевого илов, которые были определены по результатам вискозиметрических испытаний, приведены в приложении Е. По кривой $\eta = f(d\lambda/dt)$ находим значения η и $d\lambda/dt$ для двух ближайших точек, лежащих справа и слева от значения $d\lambda/dt = 25 \text{ с}^{-1}$ (средина обозначенного диапазона скоростей угловых деформаций). Значения функций $\eta = f(d\lambda/dt)$ для двух таких точек для сапропелевого и кокколитового осадков приведены в табл. Л.1.

Таблица Л.1

Значения функции $\eta = f(d\lambda/dt)$ для сапропелевого и кокколитового осадков

Тип ила	Вязкость η , Па·с	Скорость угловых деформаций $d\lambda/dt$, с^{-1}
Сапропелевый ил	13,28	18,31
	3,017	86,29
Кокколитовый ил	15,81	10,89
	3,598	54,25

Принимая коэффициент $k = 0,6$, параметр $a = 1 \text{ м}$, по формуле (2.102) определяем параметр K_r для сапропелевого и кокколитового осадков для двух рассматриваемых точек функции $\eta = f(d\lambda/dt)$, Па·м:

1) сапропелевый ил:

$$K_r = ka\eta \frac{d\lambda}{dt} = 0,6 \cdot 1 \cdot 13,28 \cdot 18,31 = 145,89,$$

$$K_r = 0,6 \cdot 1 \cdot 3,017 \cdot 86,29 = 156,20;$$

2) кокколитовый ил:

$$K_r = 0,6 \cdot 1 \cdot 15,81 \cdot 10,89 = 103,30,$$

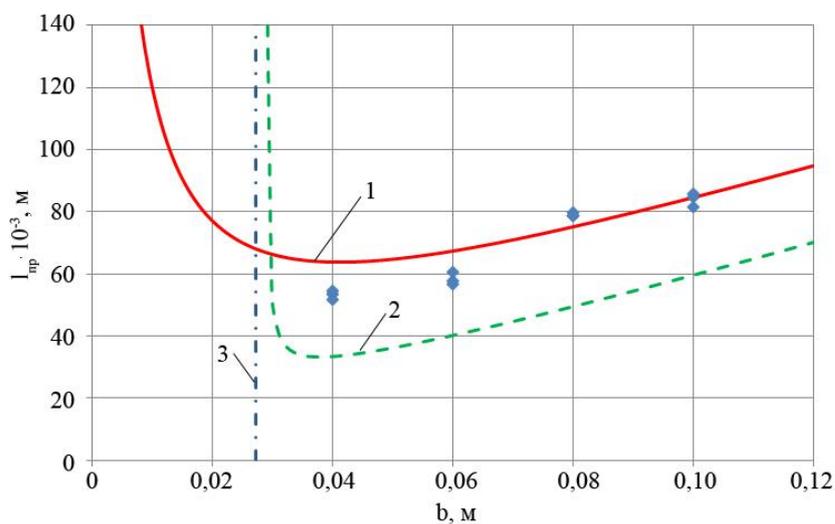
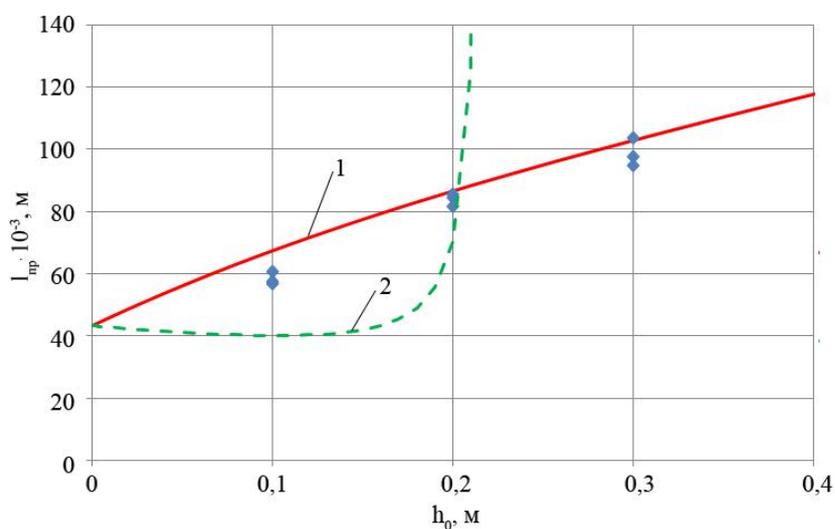
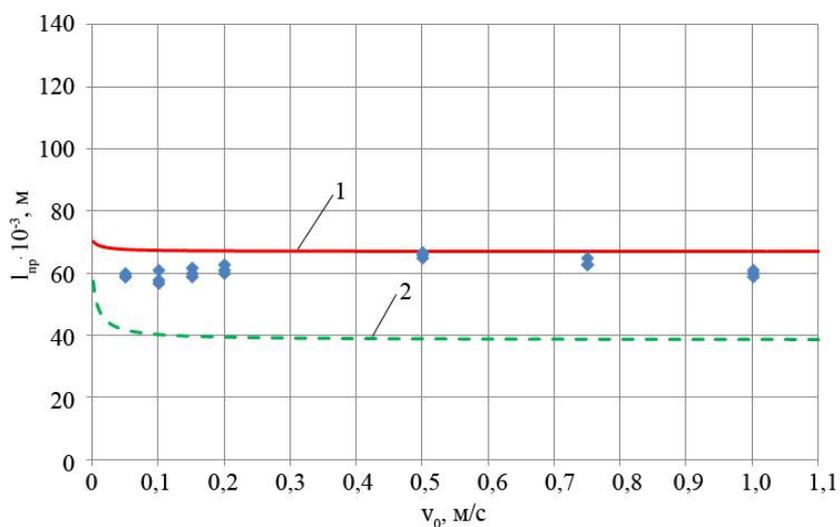
$$K_r = 0,6 \cdot 1 \cdot 3,598 \cdot 54,25 = 117,11.$$

Среднее значение параметра K_T для сапропелевого ила составляет 151,0 Па·м, для кокколитового – 110,2 Па·м. Поскольку ГВОМО могут включать как чистые сапропелевые и кокколитовые илы, так и их переходные разновидности, для упрощения инженерных расчетов определим среднее значение параметра K_T для ГВОМО, которое составляет $130,4 \approx 130$ Па·м. При этом отклонение усредненных значений параметров K_T для кокколитового и сапропелевого осадков относительно усредненного для ГВОМО значения не превышает 17 %.

Результаты расчетов предельных параметров заполнения ковша

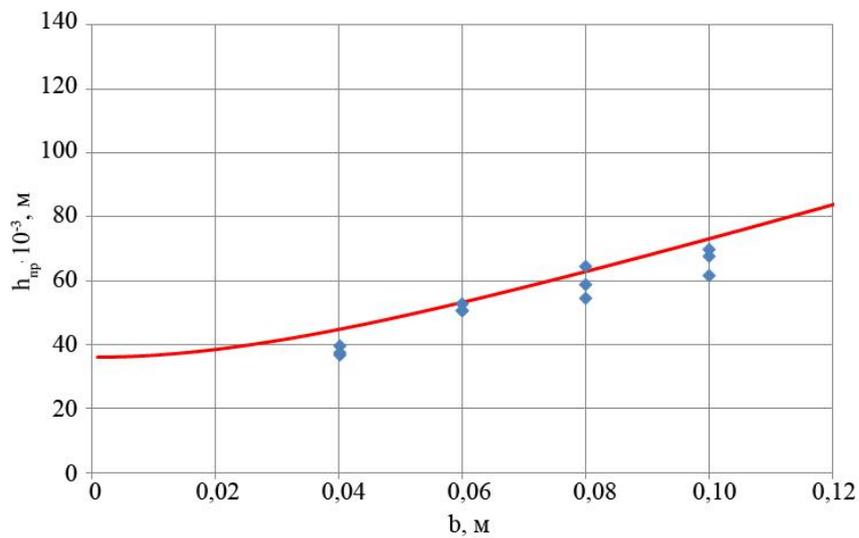
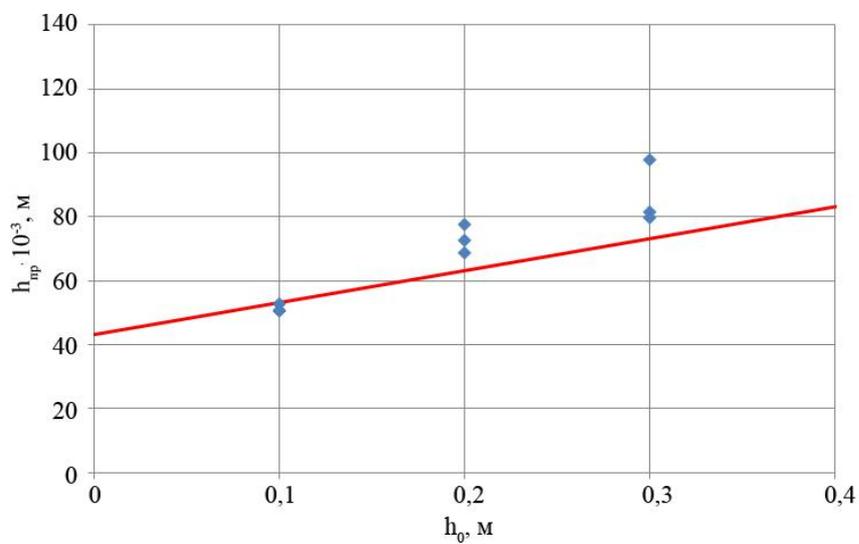
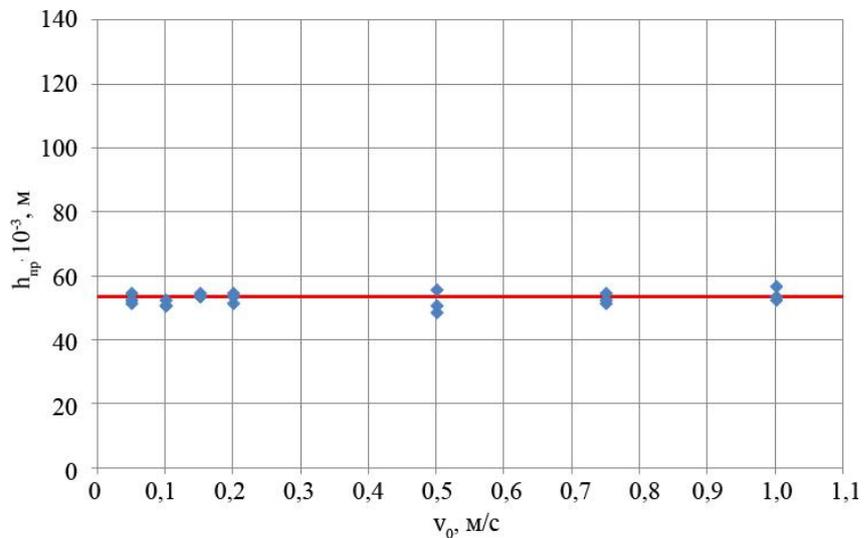
Результаты расчетов параметра $l_{пр}$ как функции от параметров резания при копании сапропелевого ила в атмосферных условиях

(1 – при $2b_I/b_{II} = Q$; 2 – при $b_I = h_I$; 3 – $b = 2h_I$)



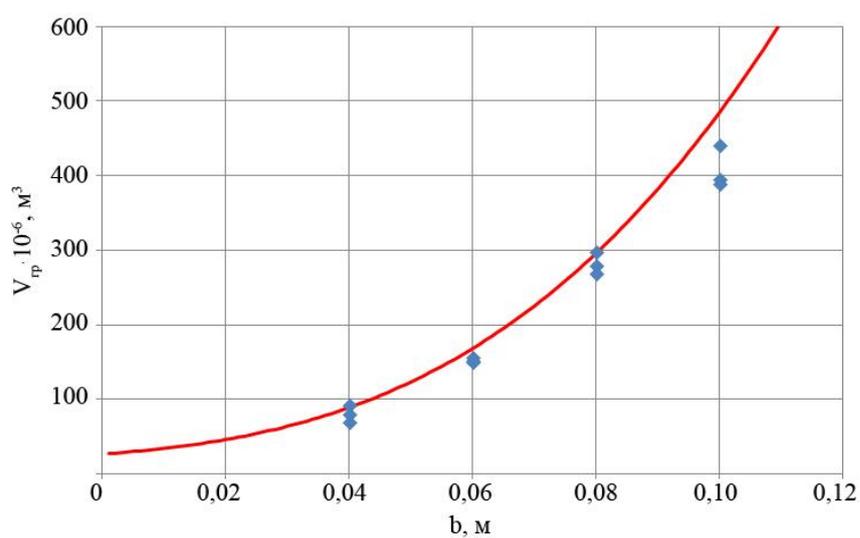
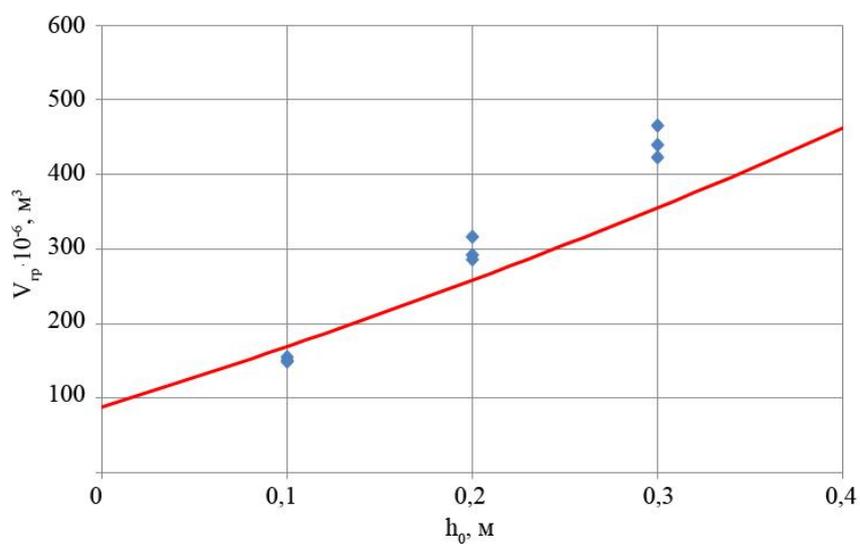
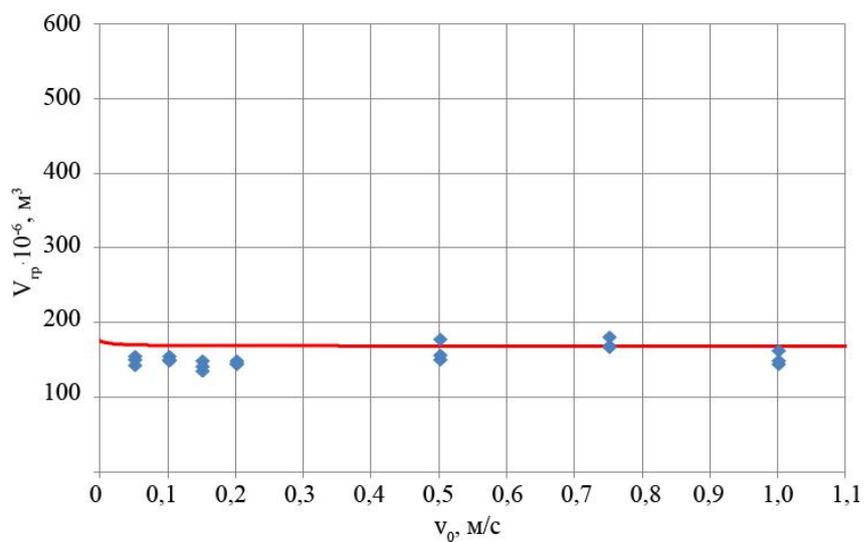
Приложение М (продолжение)

Результаты расчетов параметра h_{np} как функции от параметров резания при копании сапропелевого ила в атмосферных условиях



Приложение М (продолжение)

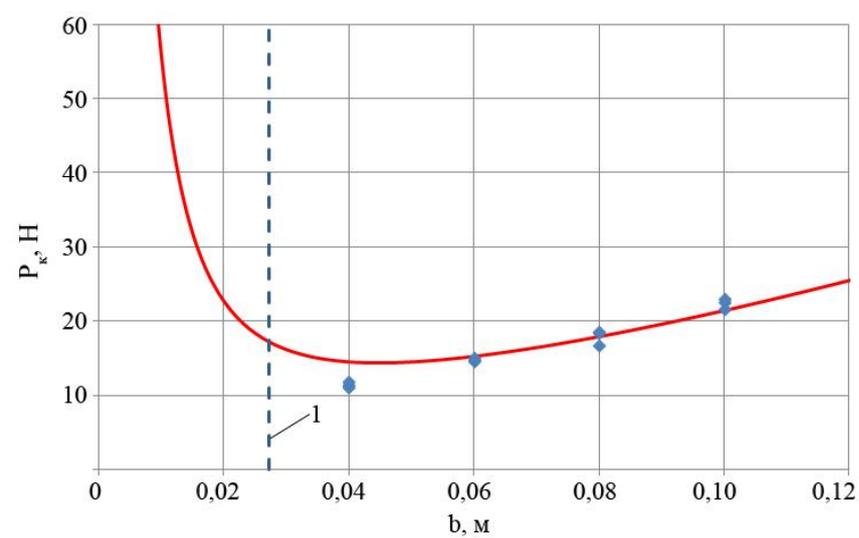
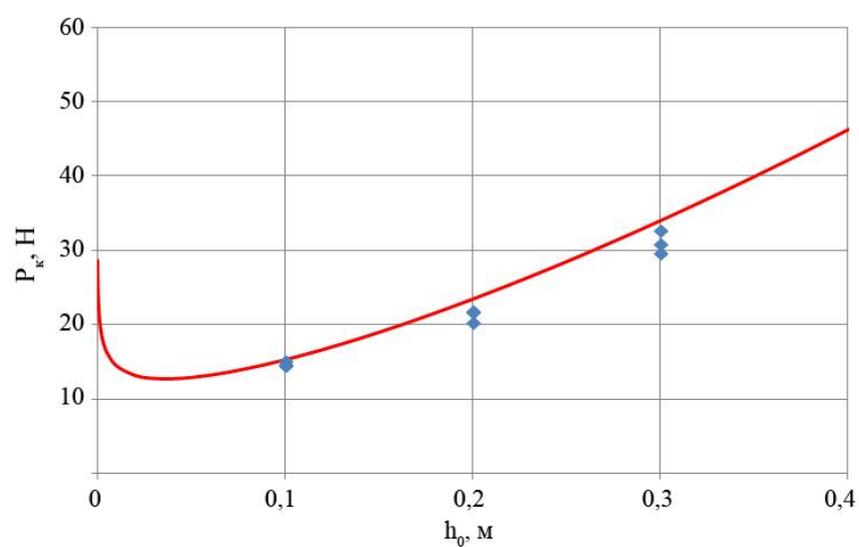
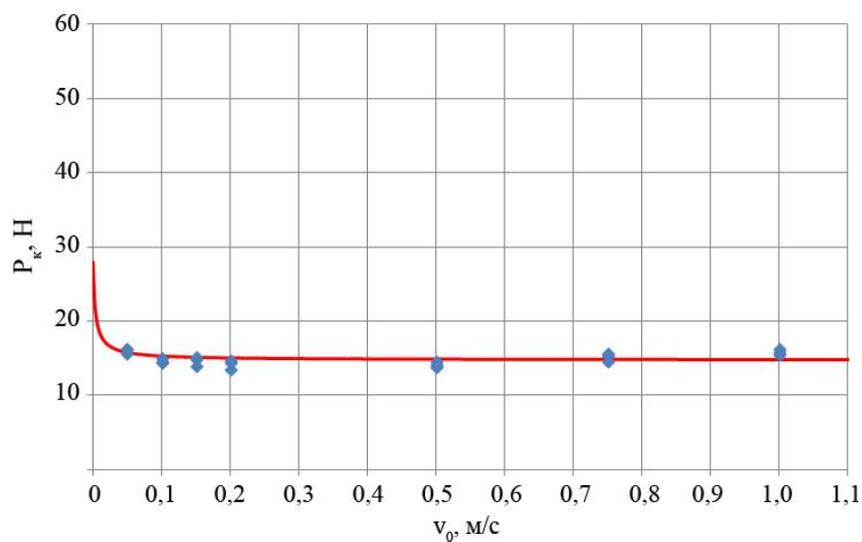
Результаты расчетов параметра $V_{гр}$ как функции от параметров резания при копании сапропелевого ила в атмосферных условиях



Приложение М (продолжение)

Результаты расчетов параметра P_k как функции от параметров резания
при копании сапропелевого ила в атмосферных условиях

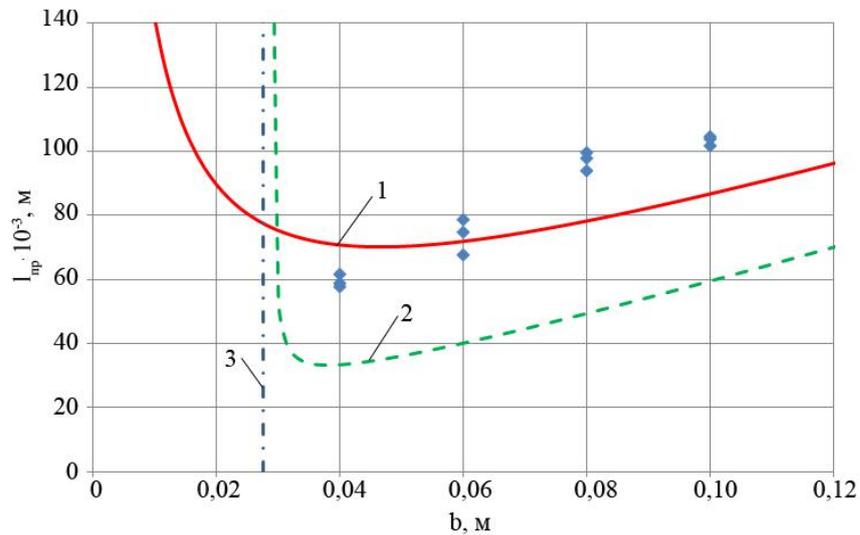
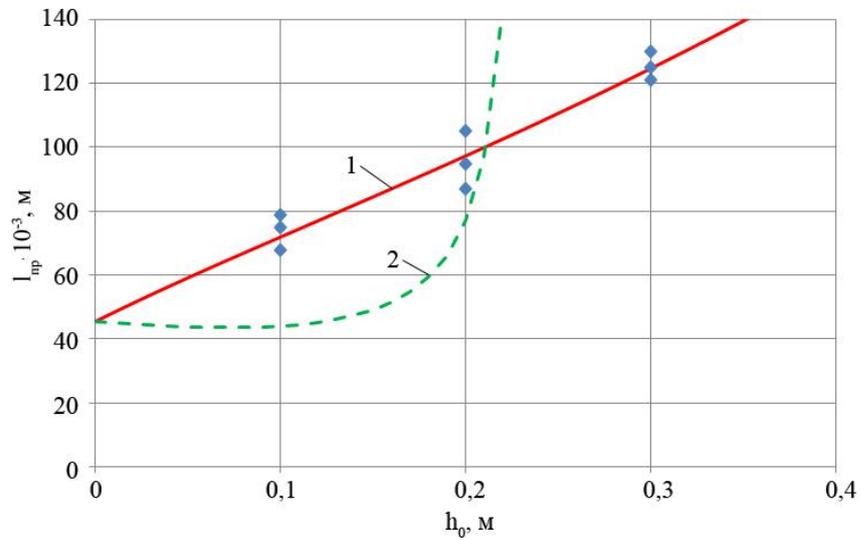
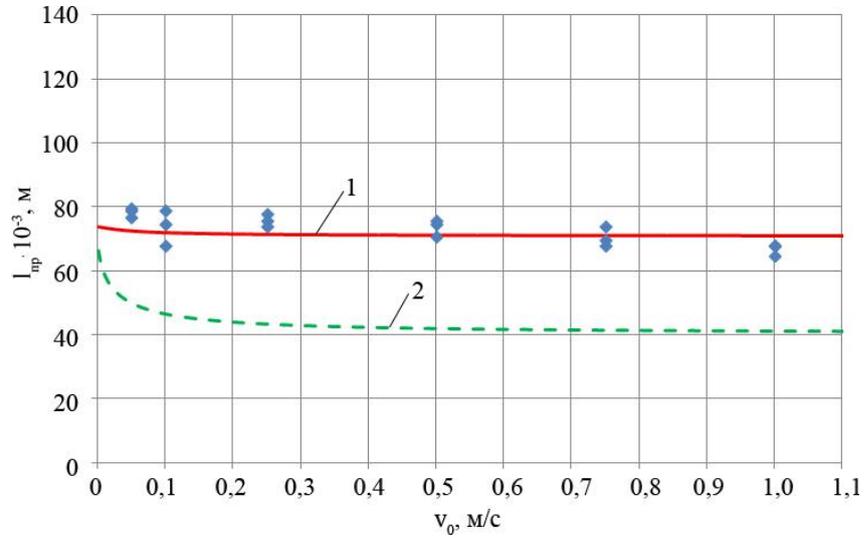
$$(1 - b = 2h_l)$$



Приложение М (продолжение)

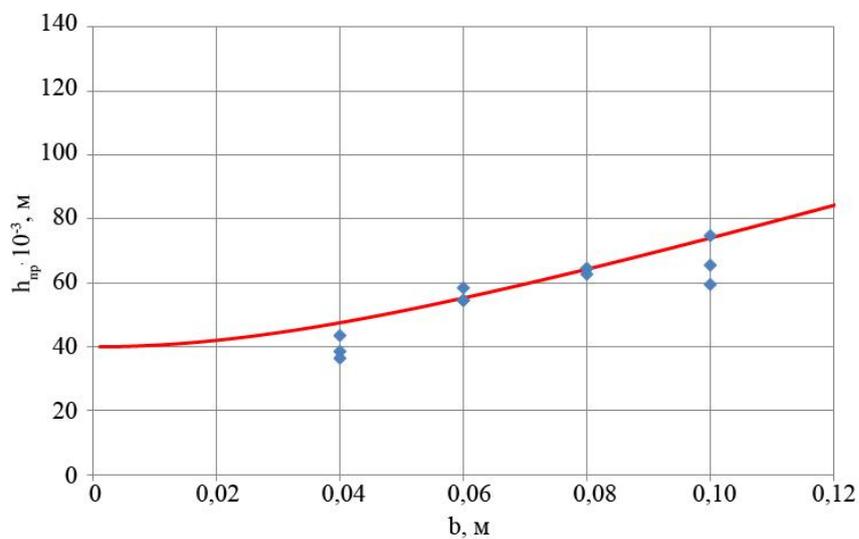
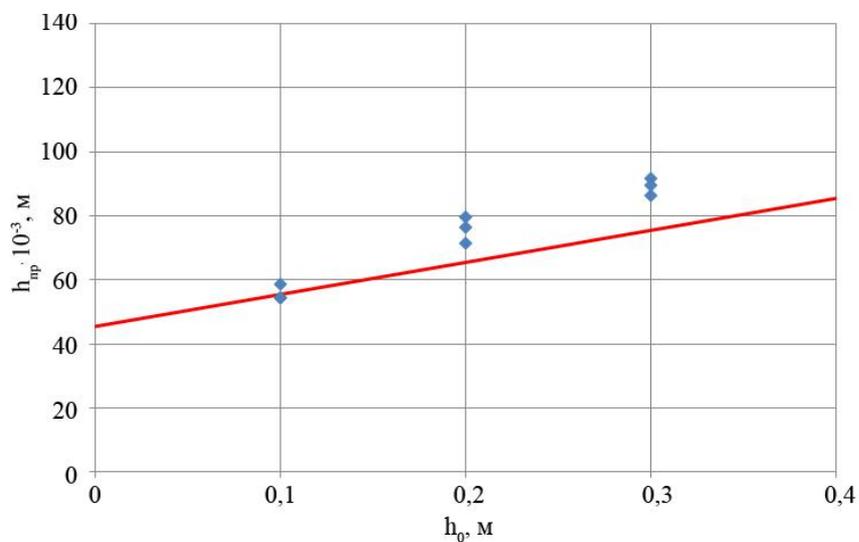
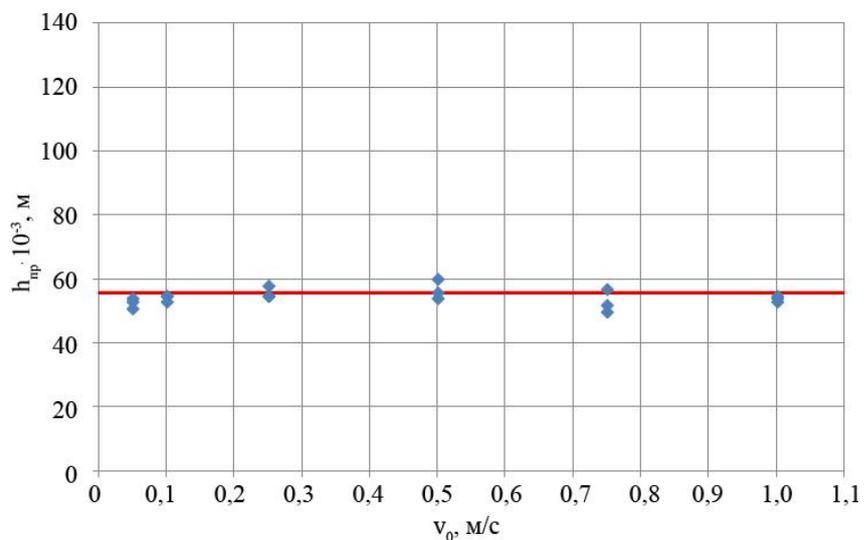
Результаты расчетов параметра $l_{пр}$ как функции от параметров резания при копании кокколитового ила в атмосферных условиях

(1 – при $2b_I/b_{II} = Q$; 2 – при $b_I = h_I$; 3 – $l_{пр}(b) = 2h_I$)



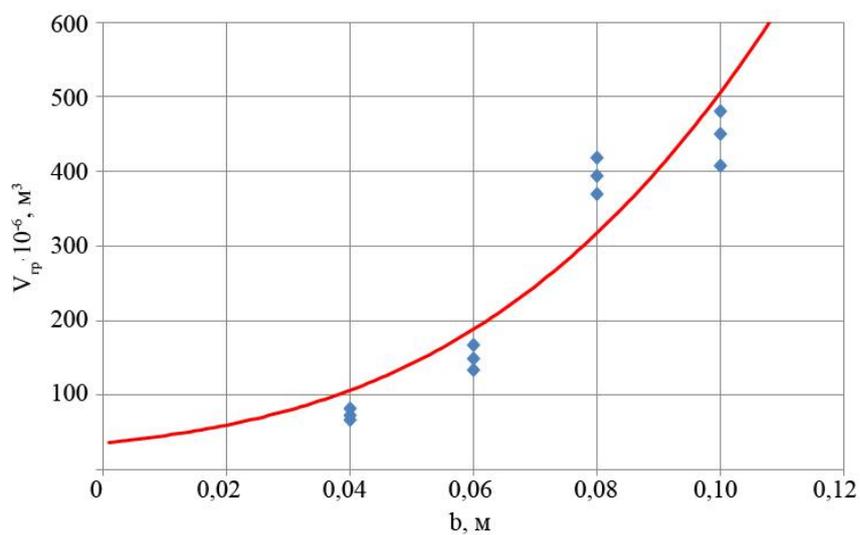
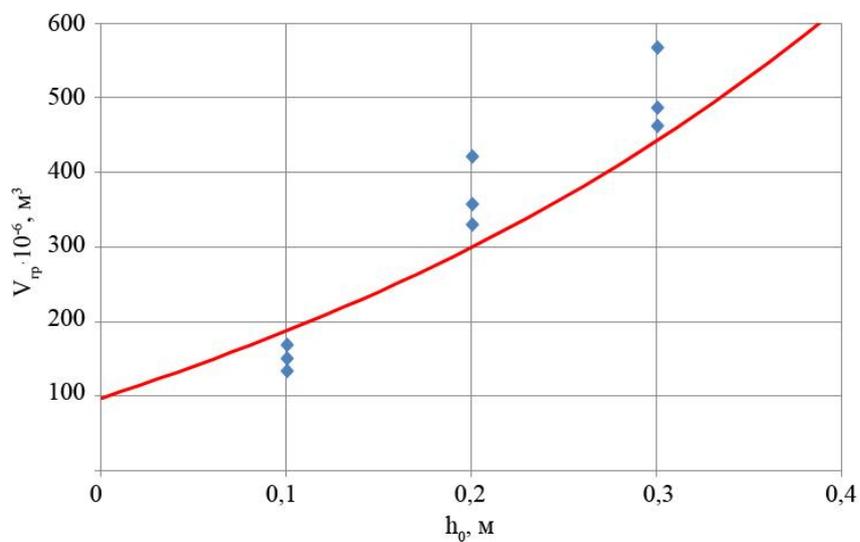
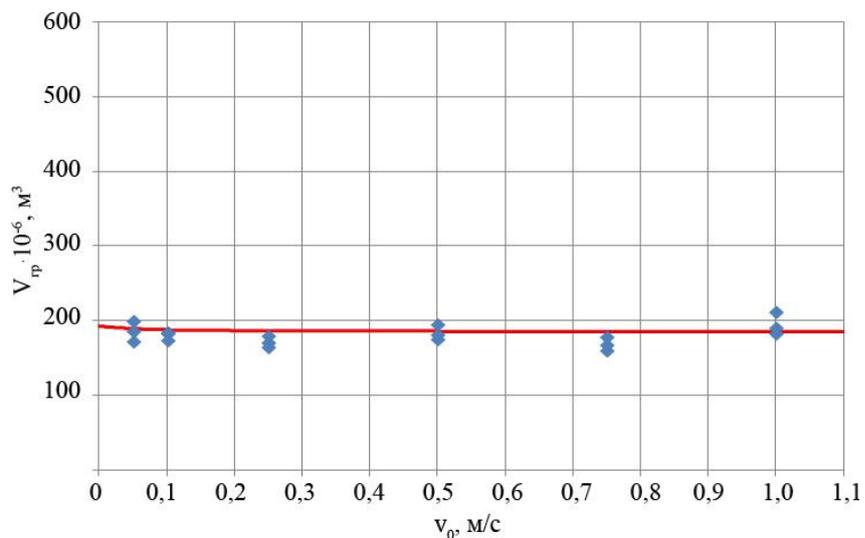
Приложение М (продолжение)

Результаты расчетов параметра h_{np} как функции от параметров резания
при копании кокколитового ила в атмосферных условиях



Приложение М (продолжение)

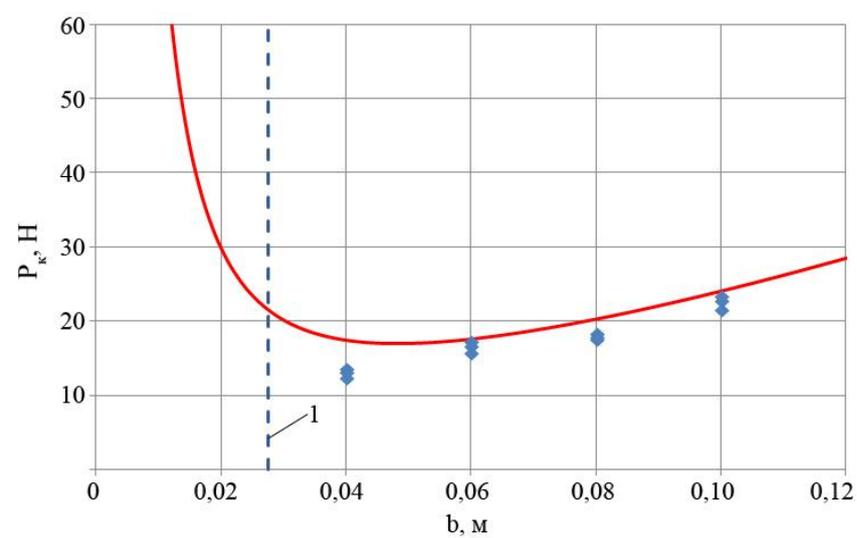
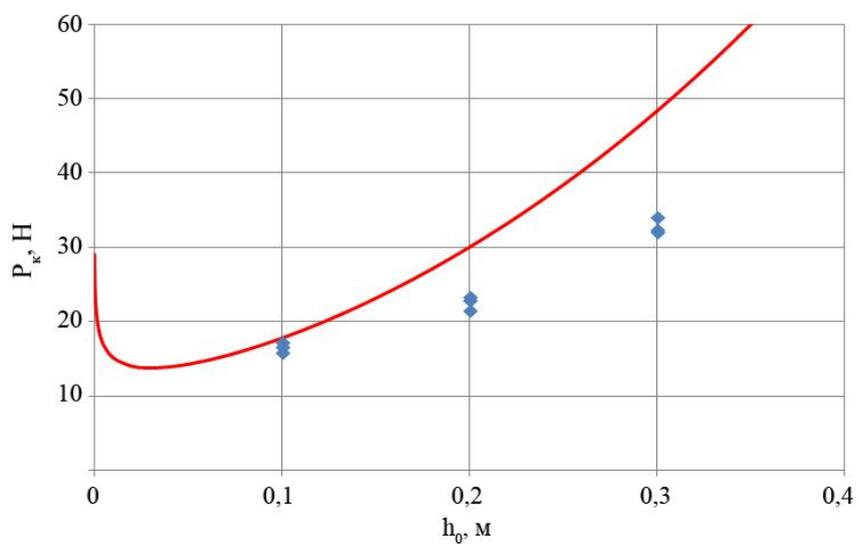
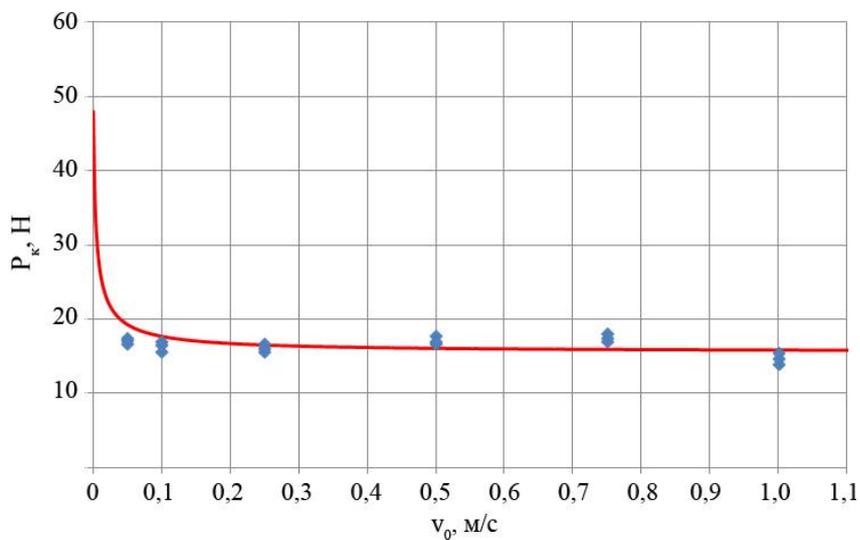
Результаты расчетов параметра $V_{гр}$ как функции от параметров резания при копании кокколитового ила в атмосферных условиях



Приложение М (окончание)

Результаты расчетов параметра P_k как функции от параметров резания
при копании кокколитового ила в атмосферных условиях

$$(1 - b = 2h_l)$$



Расчет параметров заполнения при копании кокколитового ила
 моделью ковша в воде

$$(b = 0,07 \text{ м}, h_0 = 0,01 \text{ м}, v_0 = 0,1 \text{ м/с})$$

Используя выражение (2.68), определим параметр $h_{\text{пр}\tau}$:

$$\begin{aligned} h_{\text{пр}\tau} &= \frac{\sqrt{(\Delta\rho b g \operatorname{tg}\varphi)^2 + 16\tau_0^2}}{2\Delta\rho g} + h_0 = \\ &= \frac{\sqrt{(269 \cdot 0,07 \cdot 9,81 \cdot \operatorname{tg} 48,6^\circ)^2 + 16 \cdot 187^2}}{2 \cdot 269 \cdot 9,81} + 0,01 = 0,157 \text{ (м)}. \end{aligned}$$

Параметр $h_{\text{пр}\gamma}$ находим по выражению (2.70), полагая $\gamma = \varphi$:

$$\begin{aligned} h_{\text{пр}\gamma} &= \sqrt{h_0 b \operatorname{tg}\gamma} + \frac{1}{2} b \operatorname{tg}\gamma + h_0 = \\ &= \sqrt{0,01 \cdot 0,07 \cdot \operatorname{tg} 48,6^\circ} + \frac{1}{2} 0,07 \cdot \operatorname{tg} 48,6^\circ + 0,01 = 0,077 \text{ (м)}. \end{aligned}$$

Поскольку $h_{\text{пр}\gamma} < h_{\text{пр}\tau}$, то за предельную высоту заполнения ковша принимаем значение $h_{\text{пр}\gamma}$.

По формулам (2.27) и (2.28) определяем значения коэффициентов подобия K и Q :

$$\begin{aligned} K &= \frac{\eta_{\text{пл}} v_0}{h_0 \tau_0} = \frac{226,8 \cdot 0,1}{0,01 \cdot 187} = 12,13, \\ Q &= \sqrt{K + \frac{K^2}{9} + \frac{K}{3}} = \sqrt{12,13 + \frac{12,13^2}{9} + \frac{12,13}{3}} = 9,38. \end{aligned}$$

Толщину области вязкпластического течения грунта рассчитываем по формуле (2.29):

$$h_l = \frac{K}{Q} h_0 = \frac{12,13}{9,38} 0,01 = 0,013 \text{ (м)}.$$

Проводим проверку условия $2h_l < b$:

$$2 \cdot 0,013 = 0,026 < 0,07 \text{ (м)}.$$

Условие выполняется.

По формулам (2.50) и (2.51) определяем толщину области вязкопластического течения грунта у боковых стенок b_I и толщину твердой области b_{II} :

$$b_I = \frac{b}{2} \left(1 - \frac{1}{Q+1} \right) = \frac{0,07}{2} \left(1 - \frac{1}{9,38+1} \right) = 0,032 \text{ (м)};$$

$$b_{II} = \frac{b}{Q+1} = \frac{0,07}{9,38+1} = 0,007 \text{ (м)}.$$

Рассчитываем толщину твердой области h_{II} , используя зависимость (2.59):

$$h_{II} = \left[\frac{1}{\frac{2}{3} + \frac{1}{3(9,38+1)^2}} - \frac{12,13}{9,38} \right] 0,01 = 0,002 \text{ (м)}.$$

Предельную длину заполнения ковша определяем по выражению (2.72), приняв $k_{II} = 1$:

$$\begin{aligned} l_{пр} &= \frac{1}{k_{II} b_{II}} (h_{пр} - h_I) (b_{II} + 2h_{II}) = \\ &= \frac{1}{0,007} (0,077 - 0,013) (0,007 + 2 \cdot 0,002) = 0,103 \text{ (м)}. \end{aligned}$$

Предельный объем заполнения ковша находим по формуле (2.75) для $k_{фк} = 1$:

$$V_{гр} = \frac{1}{4} \pi k_{фк}^2 h_{пр} l_{пр} b = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 0,077 \cdot 0,103 \cdot 0,07 = 4,35 \cdot 10^{-4} \text{ (м}^3\text{)}.$$

Предельный объем призмы волочения рассчитываем по зависимости (2.76):

$$\begin{aligned} V_{пв} &= \frac{1}{4} \pi k_{фк}^2 (h_{пр} - h_0)^2 \operatorname{ctg} \varphi b = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot (0,077 - 0,01)^2 \cdot \operatorname{ctg} 48,6^\circ \cdot 0,07 = \\ &= 2,53 \cdot 10^{-4} \text{ (м}^3\text{)}. \end{aligned}$$

Предельный путь заполнения определяем по выражению:

$$s_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{пв}} + V_{\text{гр}}}{bh_0} = \frac{2,53 \cdot 10^{-4} + 4,35 \cdot 10^{-4}}{0,07 \cdot 0,01} = 0,98 \text{ (м)}.$$

Коэффициент распределения грунта рассчитываем по формуле (2.78):

$$k_{\text{гр}} = \frac{V_{\text{гр}}}{V_{\text{гр}} + V_{\text{пв}}} = \frac{4,35 \cdot 10^{-4}}{4,35 \cdot 10^{-4} + 2,53 \cdot 10^{-4}} = 0,636.$$

По формуле (2.105) определяем параметр R для состояния предельного заполнения ковша:

$$R_{\text{пр}} = \sqrt{l_{\text{пр}} h_{\text{пр}}} = \sqrt{0,103 \cdot 0,077} = 0,089 \text{ (м)}.$$

Предельное усилие сопротивления ковша заполнению рассчитывается по выражению (2.103):

$$\begin{aligned} P_{\text{з.пр.}} &= \frac{1}{2} (R_{\text{пр}} - h_0) \left[\pi \tau_0 (R_{\text{пр}} + h_0) + 8 k_{\text{гр}} h_0 \frac{K_{\text{г}}}{b_l} \right] + \\ &+ \frac{1}{\pi} b \left[\pi \tau_0 (R_{\text{пр}} - h_0) + 4 k_{\text{гр}} h_0 \frac{K_{\text{г}}}{h_l} \ln \left(\frac{R_{\text{пр}}}{h_0} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{2} (0,089 - 0,01) \left[3,14 \cdot 187 \cdot (0,089 + 0,01) + 8 \cdot 0,636 \cdot 0,01 \cdot \frac{130}{0,032} \right] + \\ &+ \frac{1}{3,14} \cdot 0,07 \cdot [3,14 \cdot 187 \cdot (0,089 - 0,01) + \\ &+ 4 \cdot 0,636 \cdot 0,01 \cdot \frac{130}{0,013} \cdot \ln \left(\frac{0,089}{0,01} \right)] = 24,2 \text{ (Н)}. \end{aligned}$$

Полагая усилие трения днища модели ковша о грунт и усилие гидродинамического сопротивления малыми, усилие копания определяем по выражению (2.85):

$$P_{\text{к}} = P_{\text{з}} + P_{\text{т}} + P_{\text{гд}} = 24,2 + 0 + 0 = 24,2 \text{ Н}.$$

Используя выражение (2.79), определим коэффициент формы тела грунта, как функцию от пути копания:

$$k_{\phi k}(s) = 2 \sqrt{\frac{k_{\text{пр}} h_0 s}{\pi h_{\text{пр}} l_{\text{пр}}}} = 2 \sqrt{\frac{0,636 \cdot 0,01 \cdot s}{3,14 \cdot 0,077 \cdot 0,103}} = 1,01 \cdot \sqrt{s}.$$

При $t < t_{\text{пр}}$ параметр R будет определяться выражением (2.106):

$$R(s) = k_{\phi}(s) \sqrt{l_{\text{пр}} h_{\text{пр}}} = 0,09 \cdot \sqrt{s} \text{ (м)}.$$

Усилие копания как функция от перемещения будет иметь вид:

$$\begin{aligned} P_k &= \frac{1}{2} (0,09 \cdot \sqrt{s} - 0,01) [3,14 \cdot 187 \cdot (0,09 \cdot \sqrt{s} + 0,01) + \\ &+ 8 \cdot 0,636 \cdot 0,01 \cdot \frac{130}{0,032}] + \frac{1}{3,14} \cdot 0,07 \cdot [3,14 \cdot 187 \cdot (0,09 \cdot \sqrt{s} - 0,01) + \\ &+ 4 \cdot 0,636 \cdot 0,01 \cdot \frac{130}{0,013} \ln \left(\frac{0,09 \cdot \sqrt{s}}{0,01} \right)] = \\ &= 2,38s + 2,84 \ln s + 10,48\sqrt{s} + 11,27 \text{ (Н)}. \end{aligned} \quad (\text{Н.1})$$

Полученная функциональная зависимость характеризует изменение усилия копания от пути копания, которая приведена на рис. Н.1.

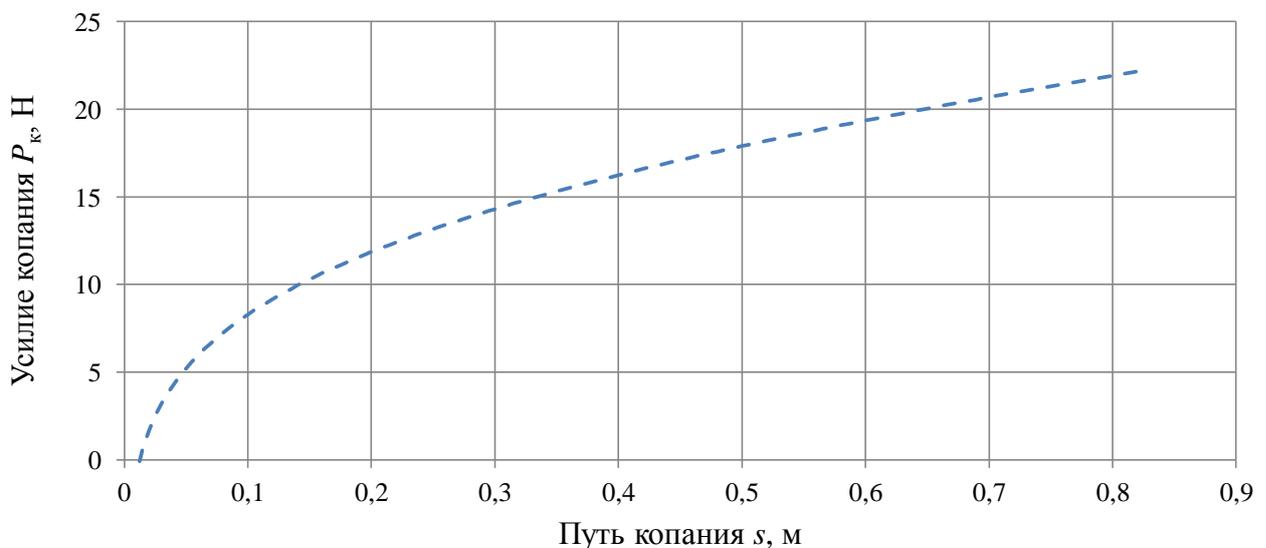


Рисунок Н.1 – Зависимость усилия копания от пути копания

Расчет параметров заполнения ковша при копании кокколитовых илов ковшом землечерпательного снаряда емкостью $0,33 \text{ м}^3$ в реальных условиях эксплуатации

Параметр $h_{\text{пр}\tau}$:

$$h_{\text{пр}\tau} = \frac{\sqrt{(\Delta\rho b g \operatorname{tg}\varphi)^2 + 16\tau_0^2}}{2\Delta\rho g} + h_0 =$$

$$= \frac{\sqrt{(200 \cdot 0,56 \cdot 9,81 \cdot \operatorname{tg} 48,6^\circ)^2 + 16 \cdot 480^2}}{2 \cdot 200 \cdot 9,81} + 0,25 = 0,833 \text{ (м)}.$$

Параметр $h_{\text{пр}\gamma}$ (принимая $\gamma = \varphi$):

$$h_{\text{max}} = \sqrt{h_0 b \operatorname{tg}\gamma} + \frac{1}{2} b \operatorname{tg}\gamma + h_0 =$$

$$= \sqrt{0,25 \cdot 0,56 \cdot \operatorname{tg} 48,6^\circ} + \frac{1}{2} \cdot 0,56 \cdot \operatorname{tg} 48,6^\circ + 0,25 = 0,966 \text{ (м)}.$$

Поскольку $h_{\text{пр}\tau} < h_{\text{пр}\gamma}$, то за предельную высоту заполнения ковша принимаем значение $h_{\text{пр}\tau}$.

Значения коэффициентов подобия K и Q :

$$K = \frac{\eta_{\text{пл}} v_0}{h_0 \tau_0} = \frac{226,8 \cdot 0,5}{0,25 \cdot 480} = 0,945,$$

$$Q = \sqrt{K + \frac{K^2}{9}} + \frac{K}{3} = \sqrt{0,945 + \frac{0,945^2}{9}} + \frac{0,945}{3} = 1,34.$$

Толщина области вязкопластического течения грунта у днища ковша:

$$h_l = \frac{K}{Q} h_0 = \frac{0,945}{1,34} 0,25 = 0,176 \text{ (м)}.$$

Проводим проверку условия $2h_l < b$:

$$2 \cdot 0,176 = 0,352 < 0,56 \text{ (м)}.$$

Условие выполняется.

Толщина области вязкопластического течения грунта у боковых стенок:

$$b_I = \frac{b}{2} \left(1 - \frac{1}{Q+1} \right) = \frac{0,56}{2} \left(1 - \frac{1}{1,34+1} \right) = 0,16 \text{ (м)}.$$

Ширина твердой области b_{II} :

$$b_{II} = \frac{b}{Q+1} = \frac{0,56}{1,34+1} = 0,24 \text{ (м)}.$$

Толщина твердой области h_{II} :

$$h_{II} = \left[\frac{1}{\frac{2}{3} + \frac{1}{3(Q+1)^2}} - \frac{K}{Q} \right] h_0 = \left[\frac{1}{\frac{2}{3} + \frac{1}{3(1,34+1)^2}} - \frac{0,945}{1,34} \right] 0,25 = 0,167 \text{ (м)}.$$

Предельная длина заполнения ковша:

$$\begin{aligned} l_{\text{пр}} &= \frac{1}{b_{II}} (h_{\text{пр}} - h_I) (b_{II} + 2h_{II}) = \\ &= \frac{1}{0,24} (0,833 - 0,176) (0,24 + 2 \cdot 0,167) = 1,571 \text{ (м)}. \end{aligned}$$

Предельный объем заполнения ковша:

$$V_{\text{гр}} = \frac{1}{4} \pi h_{\text{пр}} l_{\text{пр}} b = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 0,833 \cdot 1,571 \cdot 0,56 = 0,575 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Объем призмы волочения:

$$\begin{aligned} V_{\text{пв}} &= \frac{1}{4} \pi (h_{\text{пр}} - h_0)^2 \operatorname{ctg} \varphi b = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot (0,833 - 0,25)^2 \cdot \operatorname{ctg} 48,6^\circ \cdot 0,56 = \\ &= 0,132 \text{ (м}^3\text{)}. \end{aligned}$$

Предельный путь заполнения:

$$s_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{пв}} + V_{\text{гр}}}{bh_0} = \frac{0,575 + 0,132}{0,56 \cdot 0,25} = 5,05 \text{ (м)}.$$

Коэффициент распределения грунта:

$$k_{\text{гр}} = \frac{V_{\text{гр}}}{V_{\text{гр}} + V_{\text{пв}}} = \frac{0,575}{0,575 + 0,132} = 0,813.$$

Параметр R для предельного состояния заполнения ковша:

$$R_{\text{пр}} = \sqrt{l_{\text{пр}} h_{\text{пр}}} = \sqrt{1,571 \cdot 0,833} = 1,144 \text{ (м)}.$$

Предельное усилие сопротивления ковша заполнению:

$$\begin{aligned} P_{\text{з.пр.}} &= \frac{1}{2} (R - h_0) \left[\pi \tau_0 (R + h_0) + 8 k_{\text{гр}} h_0 \frac{K_{\text{Г}}}{b_I} \right] + \\ &+ \frac{1}{\pi} b \left[\pi \tau_0 (R - h_0) + 4 k_{\text{гр}} h_0 \frac{K_{\text{Г}}}{h_I} \ln \left(\frac{R}{h_0} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{2} (1,144 - 0,25) \left[3,14 \cdot 480 \cdot (1,144 + 0,25) + 8 \cdot 0,813 \cdot 0,25 \cdot \frac{130}{0,16} \right] + \\ &+ \frac{1}{3,14} \cdot 0,56 \cdot [3,14 \cdot 480 \cdot (1,144 - 0,25) + \\ &+ 4 \cdot 0,813 \cdot 0,25 \cdot \frac{130}{0,176} \cdot \ln \left(\frac{1,144}{0,25} \right)] = 1932,9 \text{ (Н)}. \end{aligned}$$

Для глубины резания $h_0 = 0,30$ м расчет выполняем аналогично. Результаты расчетов сведены в табл. П.1.

Таблица П.1

Результаты расчетов параметров заполнения ковша при копании кокколитового ила ковшом землечерпательного снаряда в реальных условиях эксплуатации
($b = 0,56$ м; $v_0 = 0,5$ м/с; $h_0 = 0,25 \dots 0,30$ м)

Параметры заполнения	Расчетные значения		Экспериментальные значения
	Глубина резания h_0 , м		
	0,25	0,30	
$h_{\text{пр}}$, м	0,833	0,884	—
$l_{\text{пр}}$, м	1,571	1,801	—
$P_{\text{з.пр.}}$, Н	1932,9	2368,9	1900-2200*

Примечание. Диапазон усилия заполнения получен полурасчетным методом (см. п. 3.6.2).

Алгоритм проверки гипотезы об однородности двух выборок
по критерию Вилкоксона

Если выборки однородны, то считают, что они извлечены из одной и той же генеральной совокупности и, следовательно, имеют одинаковые, причем неизвестные непрерывные функции распределения. Нулевая гипотеза состоит в том, что при всех значениях аргумента функции распределения равны между собой: $F_1(X) = F_2(X)$. Для того чтобы при заданном уровне значимости α проверить нулевую гипотезу $H_0: F_1(X) = F_2(X)$ об однородности двух независимых выборок объемов n_1 и n_2 ($n_1 \leq n_2$) при конкурирующей гипотезе $H_1: F_1(X) \neq F_2(X)$, необходимо выполнить следующие действия:

1. Расположить значения обеих выборок в возрастающем порядке в виде одного числового ряда. Пронумеровать все значения этой возрастающей числовой последовательности.

2. Найти наблюдаемое значение критерия $W_{\text{набл.}}$ – сумму порядковых номеров значений первой выборки.

3. По таблице критических точек критерия Вилкоксона найти нижнюю критическую точку:

$$W_{\text{н.кр.}} = W(Q', n_1, n_2),$$

где $Q' = \alpha/2$;

n_1 и n_2 – объемы выборок ($n_1 \leq n_2$).

4. Найти верхнюю критическую точку по формуле:

$$W_{\text{в.кр.}} = (n_1 + n_2 + 1)n_1 - W_{\text{н.кр.}} \quad (\text{Р.1})$$

Если $W_{\text{набл.}} < W_{\text{н.кр.}}$ или $W_{\text{набл.}} > W_{\text{в.кр.}}$, нулевую гипотезу отвергают. Если $W_{\text{н.кр.}} < W_{\text{набл.}} < W_{\text{в.кр.}}$ – нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу.

При составлении числовых рядов используем правило: если несколько значений только одной выборки одинаковы, то в общем числовом ряду им при-

писываем обычные порядковые номера. Если же совпадают значения разных выборок, то всем им приписываем один и тот же порядковый номер, равный среднему арифметическому порядковых номеров, которые имели бы эти значения до совпадения.

Проверим гипотезу однородности двух выборок $\Delta_{\text{лп}}(h_0)$ и $\Delta_{\text{лп}}(b)$, полученные при исследовании процесса копания сапропелевого ила. Запишем элементы каждой из выборок в виде возрастающего вариационного ряда (табл. P.1).

Таблица P.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta_{\text{лп}}(h_0)_i$	0,007	0,012	0,018	0,047	0,053	0,076	0,095	0,139	0,154	–	–	–
$\Delta_{\text{лп}}(b)_i$	<u>0,005</u>	<u>0,017</u>	<u>0,031</u>	<u>0,051</u>	<u>0,051</u>	<u>0,064</u>	<u>0,095</u>	<u>0,138</u>	<u>0,139</u>	<u>0,154</u>	<u>0,154</u>	<u>0,185</u>

Расположим значения обеих выборок в возрастающем порядке в виде одного числового ряда (табл. P.2).

Таблица P.2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X_i	<u>0,00</u> <u>5</u>	0,07	0,01 2	<u>0,01</u> <u>7</u>	0,01 8	<u>0,03</u> <u>1</u>	0,04 7	<u>0,05</u> <u>1</u>	<u>0,05</u> <u>1</u>	0,05 3	<u>0,06</u> <u>4</u>
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	–
X_i	0,07 6	0,09 5	<u>0,09</u> <u>5</u>	<u>0,13</u> <u>8</u>	0,13 9	<u>0,13</u> <u>9</u>	0,15 4	<u>0,15</u> <u>4</u>	<u>0,15</u> <u>4</u>	<u>0,18</u> <u>5</u>	–

Одинаковым значениям одной выборки припишем обычные порядковые номера, одинаковым значениям разных выборок – порядковый номер, равный среднему арифметическому порядковых номеров. В итоге получим числовой ряд, приведенный в табл. P.3.

Таблица P.3

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X_i	<u>0,00</u> <u>5</u>	0,07	0,01 2	<u>0,01</u> <u>7</u>	0,01 8	<u>0,03</u> <u>1</u>	0,04 7	<u>0,05</u> <u>1</u>	<u>0,05</u> <u>1</u>	0,05 3	<u>0,06</u> <u>4</u>
№	12	13,5	13,5	14	15,5	15,5	16,5	16,5	17	18	–
X_i	0,07 6	0,09 5	<u>0,09</u> <u>5</u>	<u>0,13</u> <u>8</u>	0,13 9	<u>0,13</u> <u>9</u>	0,15 4	<u>0,15</u> <u>4</u>	<u>0,15</u> <u>4</u>	<u>0,18</u> <u>5</u>	–

Определяем сумму порядковых номеров значений первой (меньшей) выборки:

$$W_{\text{набл.}} = 2 + 3 + 5 + 7 + 10 + 12 + 13,5 + 15,5 + 16,5 = 84,5.$$

По таблице критических точек критерия Вилкоксона находим нижнюю критическую точку для $\alpha = 0,05$ ($Q' = 0,025$) [102]:

$$W_{\text{н.кр.}} = W(Q', n_1, n_2) = W(0,025; 9; 12) = 71.$$

По формуле (Р.1) определяем верхнюю критическую точку:

$$W_{\text{в.кр.}} = (9 + 12 + 1)9 - 71 = 127.$$

Поскольку $W_{\text{н.кр.}} < W_{\text{набл.}} < W_{\text{в.кр.}}$ ($71 < 84,5 < 127$) – нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу.

Результаты проверки гипотезы об однородности распределения выборок

Проверка гипотезы об однородности выборок $\Delta_{\text{лпр}i}$ для результатов исследований процесса копания сапропелевого ила

I. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta_{\text{лпр}}(h_0)_i$	0,007	0,012	0,018	0,047	0,053	0,076	0,095	0,139	0,154	–	–	–
$\Delta_{\text{лпр}}(b)_i$	0,005	0,017	0,031	0,051	0,051	0,064	0,095	0,138	0,139	0,154	0,154	0,185

Объединенная выборка:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X_i	0,005	0,07	0,012	0,017	0,018	0,031	0,047	0,051	0,051	0,053	0,064
№	12	13,5	13,5	14	15,5	15,5	16,5	16,5	17	18	–
X_i	0,076	0,095	0,095	0,138	0,139	0,139	0,154	0,154	0,154	0,185	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{\text{н.кр}}$	$W_{\text{набл}}$	$W_{\text{в.кр}}$	ВЫВОД
9	12	71	84,5	127	выборки однородны

II. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta_{\text{лпр}}(h_0)_i \cup \Delta_{\text{лпр}}(b)_i$	0,005	0,007	0,012	0,018	0,031	0,047	0,051	0,051	0,053	0,064	0,076
$\Delta_{\text{лпр}}(v_0)_i$	0,001	0,016	0,030	0,031	0,060	0,060	0,063	0,079	0,090	0,092	0,095
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	–
$\Delta_{\text{лпр}}(h_0)_i \cup \Delta_{\text{лпр}}(b)_i$	0,095	0,095	0,138	0,139	0,139	0,154	0,154	0,154	0,185	0,017	–
$\Delta_{\text{лпр}}(v_0)_i$	0,104	0,107	0,108	0,114	0,119	0,123	0,129	0,129	0,139	0,154	–

Объединенная выборка:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9,5	9,5	10	11
X_i	0,001	0,005	0,007	0,012	0,016	0,017	0,018	0,030	0,031	0,031	0,047	0,051
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21,5	21,5	22
X_i	0,051	0,053	0,060	0,060	0,063	0,064	0,076	0,079	0,090	0,092	0,095	0,095
№	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33,5	33,5
X_i	0,095	0,104	0,107	0,108	0,114	0,119	0,123	0,129	0,129	0,138	0,139	0,139
№	34	35,5	35,5	36,5	37,5	38,5	–	–	–	–	–	–
X_i	0,139	0,154	0,154	0,154	0,154	0,185	–	–	–	–	–	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{\text{н.кр}}$	$W_{\text{набл}}$	$W_{\text{в.кр}}$	ВЫВОД
21	21	373	404	530	выборки однородны

Приложение С
(продолжение)

Результаты проверки гипотезы об однородности распределения выборок Δ_{hnp_i}
для результатов исследований процесса копания сапропелевого ила

I. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta_{hnp}(h_0)_i$	0,006	0,043	0,043	0,090	0,091	0,119	0,153	0,232	0,337	–	–	–
$\Delta_{hnp}(b)_i$	<u>0,006</u>	<u>0,033</u>	<u>0,043</u>	<u>0,043</u>	<u>0,044</u>	<u>0,062</u>	<u>0,071</u>	<u>0,107</u>	<u>0,126</u>	<u>0,152</u>	<u>0,153</u>	<u>0,174</u>

Объединенная выборка:

№	1,5	1,5	2	3	4,5	4,5	5	6	7	8	9
X_i	<u>0,006</u>	0,006	<u>0,033</u>	<u>0,043</u>	<u>0,043</u>	0,043	0,043	<u>0,044</u>	<u>0,062</u>	<u>0,071</u>	0,090
№	10	11	12	13	14	15,5	15,5	16	17	18	10
X_i	0,091	<u>0,107</u>	0,119	<u>0,126</u>	<u>0,152</u>	<u>0,153</u>	0,153	<u>0,174</u>	0,232	0,337	0,091

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{н.кр}$	$W_{набл}$	$W_{в.кр}$	ВЫВОД
9	12	71	92,5	127	выборки однородны

II. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta_{hnp}(h_0)_i \cup \Delta_{hnp}(b)_i$	0,006	0,006	0,033	0,043	0,043	0,043	0,043	0,044	0,062	0,071	0,090
$\Delta_{hnp}(v_0)_i$	<u>0,01</u>	<u>0,02</u>	<u>0,02</u>	<u>0,02</u>							
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	–
$\Delta_{hnp}(h_0)_i \cup \Delta_{hnp}(b)_i$	0,091	0,107	0,119	0,126	0,152	0,153	0,153	0,174	0,232	0,337	–
$\Delta_{hnp}(v_0)_i$	<u>0,03</u>	<u>0,03</u>	<u>0,03</u>	<u>0,03</u>	<u>0,04</u>	<u>0,04</u>	<u>0,04</u>	<u>0,05</u>	<u>0,07</u>	<u>0,08</u>	–

Объединенная выборка:

№	1	2	3	4,5	4,5	5	6	7	8	9	10	11
X_i	<u>0,006</u>	<u>0,006</u>	<u>0,006</u>	<u>0,006</u>	0,006	0,006	<u>0,013</u>	<u>0,013</u>	<u>0,013</u>	<u>0,013</u>	<u>0,024</u>	<u>0,024</u>
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20,5	20,5	21	22
X_i	<u>0,024</u>	<u>0,032</u>	<u>0,032</u>	<u>0,032</u>	<u>0,032</u>	0,033	<u>0,043</u>	<u>0,043</u>	<u>0,043</u>	0,043	0,043	0,043
№	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
X_i	0,043	0,044	<u>0,051</u>	0,062	<u>0,069</u>	0,071	<u>0,081</u>	0,090	0,091	0,107	0,119	0,126
№	35	36	37	38	39	40	–	–	–	–	–	–
X_i	0,152	0,153	0,153	0,174	0,232	0,337	–	–	–	–	–	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{н.кр}$	$W_{набл}$	$W_{в.кр}$	ВЫВОД
21	21	373	576	530	выборки НЕ однородны

Приложение С
(продолжение)

Результаты проверки гипотезы об однородности распределения выборок Δ_{Vi}
для результатов исследований процесса копания сапропелевого ила

I. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta_V(h_0)_i$	0,076	0,107	0,111	0,112	0,136	0,193	0,228	0,240	0,313	–	–	–
$\Delta_V(b)_i$	0,001	0,022	0,061	0,076	0,094	0,094	0,106	0,107	0,112	0,187	0,200	0,228

Объединенная выборка:

№	1	2	3	4,5	4,5	5	6	7	8	9,5	9,5
X_i	0,001	0,022	0,061	0,076	0,076	0,094	0,094	0,106	0,107	0,107	0,111
№	10	11	12	13,5	13,5	14	15,5	15,5	16	17	–
X_i	0,112	0,112	0,136	0,187	0,193	0,200	0,228	0,228	0,240	0,313	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{н.кр}$	$W_{набл}$	$W_{в.кр}$	ВЫВОД
9	12	71	109	127	выборки однородны

II. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta_V(h_0)_i \cup \Delta_V(b)_i$	0,001	0,022	0,061	0,076	0,076	0,094	0,094	0,106	0,107	0,107	0,111
$\Delta_V(v_0)_i$	0,002	0,009	0,028	0,060	0,063	0,075	0,076	0,087	0,106	0,107	0,109
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	–
$\Delta_V(h_0)_i \cup \Delta_V(b)_i$	0,112	0,112	0,136	0,187	0,193	0,200	0,228	0,228	0,240	0,313	–
$\Delta_V(v_0)_i$	0,110	0,112	0,112	0,115	0,132	0,138	0,142	0,152	0,156	0,195	–

Объединенная выборка:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10,5	10,5	11
X_i	0,001	0,002	0,009	0,022	0,028	0,060	0,061	0,063	0,075	0,076	0,076	0,076
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
X_i	0,087	0,094	0,094	0,106	0,106	0,107	0,107	0,107	0,109	0,110	0,111	0,112
№	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
X_i	0,112	0,112	0,112	0,115	0,132	0,136	0,138	0,142	0,152	0,156	0,187	0,193
№	36	37	38	39	40	41	–	–	–	–	–	–
X_i	0,195	0,200	0,228	0,228	0,240	0,313	–	–	–	–	–	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{н.кр}$	$W_{набл}$	$W_{в.кр}$	ВЫВОД
21	21	373	499,5	530	выборки однородны

Приложение С
(продолжение)

Результаты проверки гипотезы об однородности распределения выборок Δ_{PKi}
для результатов исследований процесса копания сапропелевого ила

I. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta_{PK}(h_0)_i$	0,013	0,039	0,041	0,048	0,064	0,074	0,094	0,129	0,132	–	–	–
$\Delta_{PK}(b)_i$	<u>0,005</u>	<u>0,013</u>	<u>0,026</u>	<u>0,035</u>	<u>0,039</u>	<u>0,046</u>	<u>0,048</u>	<u>0,066</u>	<u>0,067</u>	<u>0,180</u>	<u>0,209</u>	<u>0,240</u>

Объединенная выборка:

№	1	2,5	2,5	3	4	5,5	5,5	6	7	8,5	8,5
X_i	<u>0,005</u>	<u>0,013</u>	0,013	<u>0,026</u>	<u>0,035</u>	<u>0,039</u>	0,039	0,041	<u>0,046</u>	<u>0,048</u>	0,048
№	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	–
X_i	0,064	<u>0,066</u>	<u>0,067</u>	0,074	0,094	0,129	0,132	<u>0,180</u>	<u>0,209</u>	<u>0,240</u>	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{н,кр}$	$W_{набл}$	$W_{в,кр}$	ВЫВОД
9	12	71	85,5	127	выборки однородны

II. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta_{PK}(h_0)_i \cup \Delta_{PK}(b)_i$	0,005	0,013	0,013	0,026	0,035	0,039	0,039	0,041	0,046	0,048	0,048
$\Delta_{PK}(v_0)_i$	<u>0,002</u>	<u>0,007</u>	<u>0,007</u>	<u>0,007</u>	<u>0,013</u>	<u>0,013</u>	<u>0,013</u>	<u>0,020</u>	<u>0,033</u>	<u>0,033</u>	<u>0,037</u>
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	–
$\Delta_{PK}(h_0)_i \cup \Delta_{PK}(b)_i$	0,064	0,066	0,067	0,074	0,094	0,129	0,132	0,180	0,209	0,240	–
$\Delta_{PK}(v_0)_i$	<u>0,038</u>	<u>0,039</u>	<u>0,043</u>	<u>0,047</u>	<u>0,048</u>	<u>0,059</u>	<u>0,066</u>	<u>0,066</u>	<u>0,068</u>	<u>0,096</u>	–

Объединенная выборка:

№	1	2	3	4	5	6	7,5	7,5	8	9	10	11
X_i	<u>0,002</u>	0,005	<u>0,007</u>	<u>0,007</u>	<u>0,007</u>	0,013	0,013	<u>0,013</u>	<u>0,013</u>	<u>0,013</u>	<u>0,020</u>	0,026
№	12	13	14	15	16	17	18,5	18,5	19	20	21	22
X_i	<u>0,033</u>	<u>0,033</u>	0,035	<u>0,037</u>	<u>0,038</u>	0,039	0,039	<u>0,039</u>	0,041	<u>0,043</u>	0,046	<u>0,047</u>
№	23	24,5	24,5	25	26	27	28	29	30	31	32	33
X_i	0,048	0,048	<u>0,048</u>	<u>0,059</u>	0,064	0,066	<u>0,066</u>	<u>0,066</u>	0,067	<u>0,068</u>	0,074	0,094
№	34	35	36	37	38	39	–	–	–	–	–	–
X_i	<u>0,096</u>	0,129	0,132	0,180	0,209	0,240	–	–	–	–	–	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{н,кр}$	$W_{набл}$	$W_{в,кр}$	ВЫВОД
21	21	373	496,5	530	выборки однородны

Приложение С
(продолжение)

Результаты проверки гипотезы об однородности распределения выборок $\Delta_{\text{лпр}i}$
для результатов исследований процесса копания кокколитового ила

I. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta_{\text{лпр}}(h_0)_i$	0,003	0,023	0,029	0,043	0,043	0,054	0,080	0,099	0,105	–	–	–
$\Delta_{\text{лпр}}(b)_i$	0,043	0,054	0,099	0,124	0,167	0,176	0,181	0,200	0,202	0,211	0,253	0,279

Объединенная выборка:

№	1	2	3	4,5	4,5	5	6,5	6,5	7	8,5	8,5
X_i	0,003	0,023	0,029	0,043	0,043	0,043	0,054	0,054	0,080	0,099	0,099
№	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	–
X_i	0,105	0,124	0,167	0,176	0,181	0,200	0,202	0,211	0,253	0,279	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{\text{н,кр}}$	$W_{\text{набл}}$	$W_{\text{в,кр}}$	ВЫВОД
9	12	71	46,5	127	выборки НЕ однородны

II. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta_{\text{лпр}}(h_0)_i$	0,003	0,023	0,029	0,043	0,043	0,054	0,080	0,099	0,105	–	–
$\Delta_{\text{лпр}}(v_0)_i$	0,000	0,013	0,038	0,041	0,041	0,041	0,043	0,044	0,054	0,056	0,064
№	12	13	14	15	16	17	18	–	–	–	–
$\Delta_{\text{лпр}}(h_0)_i$	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
$\Delta_{\text{лпр}}(v_0)_i$	0,066	0,070	0,083	0,091	0,094	0,099	0,105	–	–	–	–

Объединенная выборка:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10,5	10,5	11
X_i	0,000	0,003	0,013	0,023	0,029	0,038	0,041	0,041	0,041	0,043	0,043	0,043
№	12	13,5	13,5	14	15	16	17	18	19	20	21	22,5
X_i	0,044	0,054	0,054	0,056	0,064	0,066	0,070	0,080	0,083	0,091	0,094	0,099
№	22,5	23,5	23,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_i	0,099	0,105	0,105	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{\text{н,кр}}$	$W_{\text{набл}}$	$W_{\text{в,кр}}$	ВЫВОД
9	16	82	110	152	выборки однородны

Приложение С
(продолжение)

Результаты проверки гипотезы об однородности распределения выборок Δ_{hnp_i}
для результатов исследований процесса копания кокколитового ила

I. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta_{hnp}(h_0)_i$	0,007	0,007	0,065	0,101	0,154	0,177	0,194	0,220	0,223	–	–	–
$\Delta_{hnp}(b)_i$	0,007	0,007	0,009	0,009	0,011	0,022	0,065	0,078	0,111	0,182	0,191	0,224

Объединенная выборка:

№	1	2,5	2,5	3	4,5	4,5	5	6	7,5	7,5	8
X_i	0,007	0,007	0,007	0,007	0,009	0,009	0,011	0,022	0,065	0,065	0,078
№	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	–
X_i	0,101	0,111	0,154	0,177	0,182	0,191	0,194	0,220	0,223	0,224	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{н,кр}$	$W_{набл}$	$W_{в,кр}$	ВЫВОД
9	12	71	93	127	выборки однородны

II. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta_{hnp}(h_0)_i \cup \Delta_{hnp}(b)_i$	0,007	0,007	0,007	0,007	0,009	0,009	0,011	0,022	0,065	0,065	0,078
$\Delta_{hnp}(v_0)_i$	0,025	0,007	0,007	0,083	0,097	0,007	0,043	0,007	0,007	0,025	0,061
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	–
$\Delta_{hnp}(h_0)_i \cup \Delta_{hnp}(b)_i$	0,101	0,111	0,154	0,177	0,182	0,191	0,194	0,220	0,223	0,224	–
$\Delta_{hnp}(v_0)_i$	0,043	0,079	0,043	0,047	0,011	0,029	0,025	–	–	–	–

Объединенная выборка:

№	1	2	3	4	5,5	5,5	6	7	8	9	10	11,5
X_i	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,009	0,009	0,011
№	11,5	12,5	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
X_i	0,011	0,022	0,025	0,025	0,025	0,029	0,043	0,043	0,043	0,047	0,061	0,065
№	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
X_i	0,065	0,078	0,079	0,083	0,097	0,101	0,111	0,154	0,177	0,182	0,191	0,194
№	35	36	37	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_i	0,220	0,223	0,224	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{н,кр}$	$W_{набл}$	$W_{в,кр}$	ВЫВОД
18	21	290	258	430	выборки НЕ однородны

Приложение С
(продолжение)

Результаты проверки гипотезы об однородности распределения выборок Δ_{V_i}
для результатов исследований процесса копания кокколитового ила

I. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta_{V(h_0)_i}$	0,045	0,097	0,100	0,104	0,192	0,193	0,282	0,283	0,409	–	–	–
$\Delta_{V(b)_i}$	0,045	0,097	0,104	0,177	0,189	0,193	0,212	0,252	0,282	0,301	0,327	0,361

Объединенная выборка:

№	1	2	3,5	3,5	4	5	6	7	8	9	10,5
X_i	0,0446	0,0452	0,0969	0,0969	0,0998	0,1040	0,1045	0,1770	0,1892	0,1923	0,1935
№	10,5	11	12	13,5	13,5	14	15	16	17	18	–
X_i	0,1935	0,2120	0,2519	0,2817	0,2817	0,2831	0,3012	0,3267	0,3607	0,4089	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{н,кр}$	$W_{набл}$	$W_{в,кр}$	ВЫВОД
9	12	71	78,5	127	выборки однородны

II. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta_{V(h_0)_i} \cup \Delta_{V(b)_i}$	0,0123	0,0124	0,0171	0,0187	0,0255	0,0303	0,0308	0,0341	0,0535	0,0543	0,0569
$\Delta_{V(v_0)_i}$	0,0446	0,0452	0,0969	0,0969	0,0998	0,1040	0,1045	0,1770	0,1892	0,1923	0,1935
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	–
$\Delta_{V(h_0)_i} \cup \Delta_{V(b)_i}$	0,0717	0,0816	0,0874	0,0937	0,1113	0,1362	0,1410	–	–	–	–
$\Delta_{V(v_0)_i}$	0,1935	0,2120	0,2519	0,2817	0,2817	0,2831	0,3012	0,3267	0,3607	0,4089	–

Объединенная выборка:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X_i	0,0123	0,0124	0,0171	0,0187	0,0255	0,0303	0,0308	0,0341	0,0446	0,0452	0,0535	0,0543
№	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
X_i	0,0569	0,0717	0,0816	0,0874	0,0937	0,0969	0,0969	0,0998	0,1040	0,1045	0,1113	0,1362
№	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
X_i	0,1410	0,1770	0,1892	0,1923	0,1935	0,1935	0,2120	0,2519	0,2817	0,2817	0,2831	0,3012
№	37	38	39	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_i	0,3267	0,3607	0,4089	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{н,кр}$	$W_{набл}$	$W_{в,кр}$	ВЫВОД
18	21	290	198	430	выборки НЕ однородны

Приложение С
(окончание)

Результаты проверки гипотезы об однородности распределения выборок Δ_{PKi}
для результатов исследований процесса копания кокколитового ила

I. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta_{PK}(h_0)_i$	0,034	0,062	0,112	0,221	0,239	0,285	0,297	0,329	0,337	–	–	–
$\Delta_{PK}(b)_i$	0,034	0,041	0,061	0,062	0,102	0,111	0,112	0,126	0,140	0,221	0,247	0,290

Объединенная выборка:

№	1,5	1,5	2	3	4,5	4,5	5	6	7,5	7,5	8
X_i	0,034	0,034	0,041	0,061	0,062	0,062	0,102	0,111	0,112	0,112	0,126
№	9	10,5	10,5	11	12	13	14	15	16	17	–
X_i	0,140	0,221	0,221	0,239	0,247	0,285	0,290	0,297	0,329	0,337	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{н,кр}$	$W_{набл}$	$W_{в,кр}$	ВЫВОД
9	12	71	96	127	выборки однородны

II. Исходные выборки:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta_{PK}(h_0)_i \cup \Delta_{PK}(b)_i$	0,034	0,034	0,041	0,061	0,062	0,062	0,102	0,111	0,112	0,112	0,126
$\Delta_{PK}(v_0)_i$	0,010	0,020	0,034	0,047	0,048	0,062	0,065	0,073	0,091	0,103	0,107
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	–
$\Delta_{PK}(h_0)_i \cup \Delta_{PK}(b)_i$	0,140	0,221	0,221	0,239	0,247	0,285	0,290	0,297	0,329	0,337	–
$\Delta_{PK}(v_0)_i$	0,112	0,113	0,121	0,133	0,134	0,167	0,207	–	–	–	–

Объединенная выборка:

№	1	2	3	4,5	4,5	5	6	7	8	9	10,5	10,5
X_i	0,010	0,020	0,034	0,034	0,034	0,041	0,047	0,048	0,061	0,062	0,062	0,062
№	11	12	13	14	15	16	17	18	19,5	19,5	20	21
X_i	0,065	0,073	0,091	0,102	0,103	0,107	0,111	0,112	0,112	0,112	0,113	0,121
№	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
X_i	0,126	0,133	0,134	0,140	0,167	0,207	0,221	0,221	0,239	0,247	0,285	0,290
№	34	35	36	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_i	0,297	0,329	0,337	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Результаты расчетов:

n_1	n_2	$W_{н,кр}$	$W_{набл}$	$W_{в,кр}$	ВЫВОД
18	21	290	258,5	430	выборки НЕ однородны

Проверка гипотезы о виде закона распределения и расчет основных
параметров выборок
(копание сапропелевого ила)

Выборка $\Delta_{\text{лр}}(v_0, h_0, b)$				Гистограмма плотности распределения		
Количество измерений (n)		42				
Количество интервалов (N)		5				
№	Границы интервалов		Частота n_i			
	x_i	x_{i+1}				
1	0,001	0,038	10			
2	0,038	0,075	8			
3	0,075	0,112	10			
4	0,112	0,149	9			
5	0,149	0,186	5			
6	—	—	—			
Проверяемый закон распределения:				равномерный		
№	Варианта	$x_i^* n_i$	$n_i(x_i - \bar{x}_B)$	n'_i	$n_i - n'_i$	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
	$x_i^* = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$					
1	0,020	0,200	0,044	9,480	0,520	0,029
2	0,057	0,456	0,007	8,960	-0,960	0,103
3	0,094	0,940	0,001	8,960	1,040	0,121
4	0,131	1,179	0,018	8,960	0,040	0,000
5	0,168	0,840	0,034	5,640	-0,640	0,073
Сумма						0,325
Параметр		Обозначение		Значение		
Выборочная средняя		\bar{x}_B		0,086		
Стандартное отклонение		σ		0,050		
Оценка		a^*		-0,001		
Оценка		b^*		0,172		
Теоретические частоты распределения:						
		n'_1		9,480		
		$n'_2 = \dots = n'_{N-1}$		8,960		
		n'_N		5,640		
Число степеней свободы		k		2		
Эмпирическое значения критерия $\chi^2_{\text{набл}}$				0,325		
Критическое значение критерия $\chi^2_{\text{кр}}$				6,0		
Вывод о справедливости выдвинутой гипотезы				принимается		
Параметры распределения						
Математическое ожидание \bar{x}				0,086		
Доверительный интервал Δx (при $\alpha = 0,95$)				0,088		

Проверка гипотезы о виде закона распределения и расчет основных параметров выборки (копание сапропелевого ила)

Выборка $\Delta_{\text{нпр}}(h_0, b)$				Гистограмма плотности распределения	
Количество измерений (n)		21			
Количество интервалов (N)		5			
№	Границы интервалов		Частота n_i		
	x_i	x_{i+1}			
1	0,0056	0,0206	8		
2	0,0206	0,0356	7		
3	0,0356	0,0506	3		
4	0,0506	0,0656	1		
5	0,0656	0,0806	2		
6	–	–	–	–	
Проверяемый закон распределения:				экспоненциальный	
№	Частота n_i	Теор. частота n'_i	Объединенные частоты		$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
			n_i	n'_i	
1	8	6,82	8	6,82	$1,86 \cdot 10^{-6}$
2	7	4,15	7	4,15	$6,89 \cdot 10^{-6}$
3	3	2,53	3	2,53	$9,38 \cdot 10^{-8}$
4	1	1,54	3	2,48	0,572
5	2	0,94	–	–	–
6	–	–	–	–	–
Сумма			2,358		
Параметр			Обознач.		Значение
Выборочная средняя			\bar{x}_B		0,03
Параметр эксп. распр.			λ		33,1
Число степеней свободы			k		2
Эмпирическое значения критерия $\chi^2_{\text{набл}}$			2,36		
Критическое значение критерия $\chi^2_{\text{кр}}$			6,0		
Вывод о справедливости выдвинутой гипотезы: ПРИНИМАЕТСЯ					
Параметры распределения					
Математическое ожидание \bar{x}			0,03		
Вероятность попадания СВ в интервал			$P(0 < x_i < 0,09) = 0,95$		

Проверка гипотезы о виде закона распределения и расчет основных параметров выборки (копание сапропелевого ила)

Выборка $\Delta_{\text{гипр}}(v_0)$				Гистограмма плотности распределения	
Количество измерений (n)		21			
Количество интервалов (N)		5			
№	Границы интервалов		Частота n_i		
	x_i	x_{i+1}			
1	0,006	0,072	10		
2	0,072	0,139	5		
3	0,139	0,205	4		
4	0,205	0,272	1		
5	0,272	0,338	1		
6	–	–	–		
Проверяемый закон распределения:				экспоненциальный	
№	Частота n_i	Теор. частота n'_i	Объединенные частоты		$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
			n_i	n'_i	
1	10	9,44	10	9,44	$3,56 \cdot 10^{-7}$
2	5	4,94	5	4,94	$1,63 \cdot 10^{-7}$
3	4	2,58	4	2,58	$5,26 \cdot 10^{-6}$
4	1	1,35	2	2,06	0,37
5	1	0,71			
6					
Сумма					0,82
Параметр				Обознач.	Значение
Выборочная средняя				\bar{x}_B	0,10
Параметр эксп. распр.				λ	9,82
Число степеней свободы				k	2
Эмпирическое значения критерия $\chi^2_{\text{набл}}$					0,82
Критическое значение критерия $\chi^2_{\text{кр}}$					6,0
Вывод о справедливости выдвинутой гипотезы: ПРИНИМАЕТСЯ					
Параметры распределения					
Математическое ожидание \bar{x}					0,10
Вероятность попадания СВ в интервал					$P(0 < x_i < 0,3) = 0,95$

Проверка гипотезы о виде закона распределения и расчет основных параметров выборки (копание сапропелевого ила)

Выборка $\Delta_V(v_0, h_0, b)$				Гистограмма плотности распределения			
Количество измерений (n)		42					
Количество интервалов (N)		6					
№	Границы интервалов		Частота n_i				
	x_i	x_{i+1}					
1	0,001	0,053	5				
2	0,053	0,106	12				
3	0,106	0,158	17				
4	0,158	0,211	4				
5	0,211	0,263	3				
6	0,263	0,316	1				
Проверяемый закон распределения:				нормальный			
№	Частота n_i	Теор. частота n'_i	Объединенные частоты		$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$		
			n_i	n'_i			
1	5	4,41	5	4,41	0,079		
2	12	11,49	12	11,49	0,023		
3	17	14,21	17	14,21	0,548		
4	4	8,35	4	8,35	2,266		
5	3	2,33	4	2,64	0,701		
6	1	0,31	—	—	—		
Сумма			3,616				
Параметр				Обознач.		Значение	
Выборочная средняя				\bar{x}_B		0,12	
Стандартное отклонение				σ		0,06	
Число степеней свободы				k		2	
Эмпирическое значения критерия $\chi^2_{\text{набл}}$						3,62	
Критическое значение критерия $\chi^2_{\text{кр}}$						6,0	
Вывод о справедливости выдвинутой гипотезы: ПРИНИМАЕТСЯ							
Параметры распределения							
Математическое ожидание \bar{x}				0,12			
Доверительный интервал Δx (при $\alpha = 0,95$)				0,12			

Проверка гипотезы о виде закона распределения и расчет основных параметров выборки (копание сапропелевого ила)

Выборка $\Delta_{F_k}(v_0, h_0, b)$				Гистограмма плотности распределения	
Количество измерений (n)		42			
Количество интервалов (N)		5			
№	Границы интервалов		Частота n_i		
	x_i	x_{i+1}			
1	0,002	0,050	27		
2	0,050	0,098	10		
3	0,098	0,146	2		
4	0,146	0,194	1		
5	0,194	0,242	2		
6	–	–	–		
Проверяемый закон распределения:				экспоненциальный	
№	Частота n_i	Теор. частота n'_i	Объединенные частоты		$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
			n_i	n'_i	
1	27	23,8	27	23,8	0,443
2	10	9,84	10	9,84	$2,54 \cdot 10^{-3}$
3	2	4,08	2	4,08	1,058
4	1	1,69	3	2,39	0,156
5	2	0,7	–	–	–
6	–	–	–	–	–
Сумма					1,66
Параметр				Обознач.	Значение
Выборочная средняя				\bar{x}_B	0,054
Параметр эксп. распр.				λ	18,36
Число степеней свободы				k	2
Эмпирическое значения критерия $\chi^2_{\text{набл}}$					1,66
Критическое значение критерия $\chi^2_{\text{кр}}$					6,0
Вывод о справедливости выдвинутой гипотезы: ПРИНИМАЕТСЯ					
Параметры распределения					
Математическое ожидание \bar{x}					0,054
Вероятность попадания СВ в интервал					$P(0 < x_i < 0,16) = 0,95$

Проверка гипотезы о виде закона распределения и расчет основных параметров выборки (копание кокколитового ила)

Выборка $\Delta_{\text{гр}}(v_0, h_0)$				Гистограмма плотности распределения		
Количество измерений (n)		27				
Количество интервалов (N)		5				
№	Границы интервалов		Частота n_i			
	x_i	x_{i+1}				
1	0,000	0,021	3			
2	0,021	0,042	6			
3	0,042	0,063	7			
4	0,063	0,084	5			
5	0,084	0,105	6			
6	—	—	—			
Проверяемый закон распределения:				равномерный		
№	<i>Варианта</i>	$x_i^* n_i$	$n_i(x_i - \bar{x}_B)$	n'_i	$n_i - n'_i$	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
	$x_i^* = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$					
1	0,011	0,032	0,006	3,633	-0,633	0,110
2	0,032	0,189	0,004	5,855	0,145	0,004
3	0,053	0,368	0,000	5,855	1,145	0,224
4	0,074	0,368	0,001	5,855	-0,855	0,125
5	0,095	0,567	0,009	5,802	0,198	0,007
Сумма						0,469
Параметр		Обозначение		Значение		
Выборочная средняя		\bar{x}_B		0,056		
Стандартное отклонение		σ		0,028		
Оценка		a^*		0,008		
Оценка		b^*		0,105		
Теоретические частоты распределения:						
		n'_1		3,633		
		$n'_2 = \dots = n'_{N-1}$		5,855		
		n'_N		5,802		
Число степеней свободы		k		2		
Эмпирическое значения критерия $\chi^2_{\text{набл}}$				0,47		
Критическое значение критерия $\chi^2_{\text{кр}}$				6,00		
Вывод о справедливости выдвинутой гипотезы				ПРИНИМАЕТСЯ		
Параметры распределения						
Математическое ожидание \bar{x}				0,053		
Доверительный интервал Δx (при $\alpha = 0,95$)				0,050		

Проверка гипотезы о виде закона распределения и расчет основных параметров выборки (копание кокколитового ила)

Выборка $\Delta_{\text{лр}}(b)$				Гистограмма плотности распределения		
Количество измерений (n)		12				
Количество интервалов (N)		5				
№	Границы интервалов		Частота n_i			
	x_i	x_{i+1}				
1	0,043	0,090	2			
2	0,090	0,137	2			
3	0,137	0,184	3			
4	0,184	0,231	3			
5	0,231	0,278	2			
6	—	—	—			
Проверяемый закон распределения:				равномерный		
№	Варианта $x_i^* = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$	$x_i^* n_i$	$n_i(x_i - \bar{x}_B)$	n'_i	$n_i - n'_i$	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
1	0,067	0,133	0,019	2,022	-0,022	0,000
2	0,114	0,227	0,005	2,512	-0,512	0,104
3	0,161	0,482	0,000	2,512	0,488	0,095
4	0,208	0,623	0,006	2,512	0,488	0,095
5	0,255	0,509	0,016	2,441	-0,441	0,080
Сумма						0,374
Параметр		Обозначение		Значение		
Выборочная средняя		\bar{x}_B		0,165		
Стандартное отклонение		σ		0,065		
Оценка		a^*		0,052		
Оценка		b^*		0,277		
Теоретические частоты распределения:						
		n'_1		2,022		
		$n'_2 = \dots = n'_{N-1}$		2,512		
		n'_N		2,441		
Число степеней свободы		k		2		
Эмпирическое значения критерия $\chi^2_{\text{набл}}$				0,37		
Критическое значение критерия $\chi^2_{\text{кр}}$				6,00		
Вывод о справедливости выдвинутой гипотезы				ПРИНИМАЕТСЯ		
Параметры распределения						
Математическое ожидание \bar{x}				0,161		
Доверительный интервал Δx (при $\alpha = 0,95$)				0,112		

Проверка гипотезы о виде закона распределения и расчет основных параметров выборки (копание кокколитового ила)

Выборка $\Delta_{\text{нпр}}(h_0, b)$				Гистограмма плотности распределения		
Количество измерений (n)		21				
Количество интервалов (N)		5				
№	Границы интервалов		Частота n_i			
	x_i	x_{i+1}				
1	0,007	0,051	8			
2	0,051	0,094	3			
3	0,094	0,138	2			
4	0,138	0,181	2			
5	0,181	0,225	6			
6	—	—	—			
Проверяемый закон распределения:				равномерный		
№	Варианта	$x_i^* n_i$	$n_i(x_i - \bar{x}_B)$	n'_i	$n_i - n'_i$	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
	$x_i^* = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$					
1	0,029	0,232	0,047	6,076	1,924	0,609
2	0,072	0,217	0,003	3,506	-0,506	0,073
3	0,116	0,232	0,000	3,506	-1,506	0,647
4	0,159	0,319	0,006	3,506	-1,506	0,647
5	0,203	1,218	0,057	4,407	1,593	0,576
Сумма						2,551
Параметр		Обозначение		Значение		
Выборочная средняя		\bar{x}_B		0,106		
Стандартное отклонение		σ		0,075		
Оценка		a^*		-0,025		
Оценка		b^*		0,236		
Теоретические частоты распределения:						
		n'_1		6,076		
		$n'_2 = \dots = n'_{N-1}$		3,506		
		n'_N		4,407		
Число степеней свободы		k		2		
Эмпирическое значения критерия $\chi^2_{\text{набл}}$				2,55		
Критическое значение критерия $\chi^2_{\text{кр}}$				6,00		
Вывод о справедливости выдвинутой гипотезы				ПРИНИМАЕТСЯ		
Параметры распределения						
Математическое ожидание \bar{x}				0,116		
Доверительный интервал Δx (при $\alpha = 0,95$)				0,104		

Проверка гипотезы о виде закона распределения и расчет основных параметров выборки (копание кокколитового ила)

Выборка $\Delta_{\text{лп}}(v_0)$				Гистограмма плотности распределения			
Количество измерений (n)		18					
Количество интервалов (N)		4					
№	Границы интервалов		Частота n_i				
	x_i	x_{i+1}					
1	0,0072	0,0298	10				
2	0,0298	0,0524	4				
3	0,0524	0,0750	1				
4	0,0750	0,0976	3				
5	–	–	–	–			
6	–	–	–	–			
Проверяемый закон распределения:				экспоненциальный			
№	Частота n_i	Теор. частота n'_i	Объединенные частоты		$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$	Гистограмма наблюдаемой плотности распределения и полигон теор. частот	
			n_i	n'_i			
1	10	6,74	10	6,74	1,577		
2	4	3,68	4	3,68	0,028		
3	1	2,01	4	3,11	0,255		
4	3	1,10	–	–	–		
5	–	–	–	–	–		
6	–	–	–	–	–		
Сумма					1,859		
Параметр				Обознач.	Значение		
Выборочная средняя				\bar{x}_B	0,037		
Параметр эксп. распр.				λ	26,79		
Число степеней свободы				k	1		
Эмпирическое значения критерия $\chi^2_{\text{набл}}$					1,86		
Критическое значение критерия $\chi^2_{\text{кр}}$					3,8		
Вывод о справедливости выдвинутой гипотезы: ПРИНИМАЕТСЯ							
Параметры распределения							
Математическое ожидание \bar{x}					0,037		
Вероятность попадания СВ в интервал					$P(0 < x_i < 0,11) = 0,95$		

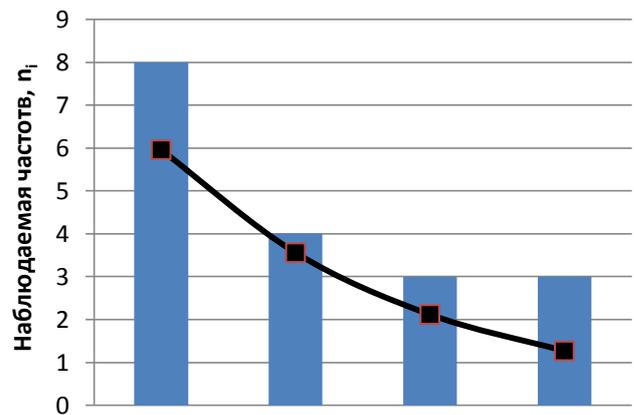
Проверка гипотезы о виде закона распределения и расчет основных параметров выборки (копание кокколитового ила)

Выборка $\Delta_V(h_0, b)$				Гистограмма плотности распределения		
Количество измерений (n)		21				
Количество интервалов (N)		4				
№	Границы интервалов		Частота n_i			
	x_i	x_{i+1}				
1	0,045	0,136	7			
2	0,136	0,227	6			
3	0,227	0,318	5			
4	0,318	0,409	3			
5	–	–	–			
6	–	–	–			
Проверяемый закон распределения:				равномерный		
№	Варианта	$x_i^* n_i$	$n_i(x_i - \bar{x}_B)$	n'_i	$n_i - n'_i$	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
	$x_i^* = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$					
1	0,090	0,631	0,082	6,617	0,383	0,022
2	0,181	1,087	0,002	5,624	0,376	0,025
3	0,272	1,361	0,027	5,624	-0,624	0,069
4	0,363	1,089	0,081	3,135	-0,135	0,006
Сумма						0,122
Параметр		Обозначение		Значение		
Выборочная средняя		\bar{x}_B		0,198		
Стандартное отклонение		σ		0,098		
Оценка		a^*		0,029		
Оценка		b^*		0,368		
Теоретические частоты распределения:						
		n'_1		6,617		
		$n'_2 = \dots = n'_{N-1}$		5,624		
		n'_N		3,135		
Число степеней свободы		k		1		
Эмпирическое значения критерия $\chi^2_{\text{набл}}$				0,12		
Критическое значение критерия $\chi^2_{\text{кр}}$				3,80		
Вывод о справедливости выдвинутой гипотезы				ПРИНИМАЕТСЯ		
Параметры распределения						
Математическое ожидание \bar{x}				0,227		
Доверительный интервал Δx (при $\alpha = 0,95$)				0,173		

Проверка гипотезы о виде закона распределения и расчет основных параметров выборки (копание кокколитового ила)

Выборка $\Delta_V(v_0)$				Гистограмма плотности распределения	
Количество измерений (n)		18			
Количество интервалов (N)		4			
№	Границы интервалов		Частота n_i		
	x_i	x_{i+1}			
1	0,0123	0,0445	8		
2	0,0445	0,0767	4		
3	0,0767	0,1089	3		
4	0,1089	0,1411	3		
5	–	–	–	–	
6	–	–	–	–	
Проверяемый закон распределения:				экспоненциальный	
№	Частота n_i	Теор. частота n'_i	Объединенные частоты		$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
			n_i	n'_i	
1	8	5,96	–	–	0,699
2	4	3,56	–	–	0,055
3	3	2,12	–	–	0,363
4	3	1,27	–	–	2,371
5	–	–	–	–	–
6	–	–	–	–	–
Сумма					3,489
Параметр				Обознач.	Значение
Выборочная средняя				\bar{x}_B	0,062
Параметр эксп. распр.				λ	16,03
Число степеней свободы				k	2
Эмпирическое значения критерия $\chi^2_{\text{набл}}$					3,49
Критическое значение критерия $\chi^2_{\text{кр}}$					6,0
Вывод о справедливости выдвинутой гипотезы: ПРИНИМАЕТСЯ					
Параметры распределения					
Математическое ожидание \bar{x}					0,062
Вероятность попадания СВ в интервал					$P(0 < x_i < 0,19) = 0,95$

Гистограмма наблюдаемой плотности распределения и полигон теор. частот



Проверка гипотезы о виде закона распределения и расчет основных параметров выборки (копание кокколитового ила)

Выборка $\Delta_{F_k}(h_0, b)$				Гистограмма плотности распределения		
Количество измерений (n)		21				
Количество интервалов (N)		4				
№	Границы интервалов		Частота n_i			
	x_i	x_{i+1}				
1	0,034	0,110	7			
2	0,110	0,186	5			
3	0,186	0,262	4			
4	0,262	0,338	5			
5	–	–	–			
6	–	–	–			
Проверяемый закон распределения:				равномерный		
№	Варианта	$x_i^* n_i$	$n_i(x_i - \bar{x}_B)$	n'_i	$n_i - n'_i$	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
	$x_i^* = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$					
1	0,072	0,502	0,072	6,280	0,720	0,082
2	0,148	0,739	0,003	5,064	-0,064	0,001
3	0,224	0,895	0,010	5,064	-1,064	0,223
4	0,300	1,499	0,080	4,593	0,407	0,036
Сумма						0,34
Параметр		Обозначение		Значение		
Выборочная средняя		\bar{x}_B		0,17		
Стандартное отклонение		σ		0,09		
Оценка		a^*		0,02		
Оценка		b^*		0,33		
Теоретические частоты распределения:						
				n'_1	6,28	
				$n'_2 = \dots = n'_{N-1}$	5,06	
				n'_N	4,59	
Число степеней свободы		k		1		
Эмпирическое значения критерия $\chi^2_{\text{набл}}$				0,34		
Критическое значение критерия $\chi^2_{\text{кр}}$				3,8		
Вывод о справедливости выдвинутой гипотезы				принимается		
Параметры распределения						
Математическое ожидание \bar{x}				0,19		
Доверительный интервал Δx (при $\alpha = 0,95$)				0,14		

Приложение Г
(окончание)

Проверка гипотезы о виде закона распределения и расчет основных параметров выборки (копание кокколитового ила)

Выборка $\Delta_{F_k}(v_0)$				Гистограмма плотности распределения			
Количество измерений (n)		18					
Количество интервалов (N)		4					
№	Границы интервалов		Частота n_i				
	x_i	x_{i+1}					
1	0,010	0,060	5				
2	0,060	0,110	6				
3	0,110	0,160	5				
4	0,160	0,210	2				
5	–	–	–				
6	–	–	–				
Проверяемый закон распределения:						нормальный	
№	Частота n_i	Теор. частота n'_i	Объединенные частоты			$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$	
			n_i				n'_i
1	5	3,41	–			–	0,744
2	6	6,98	–	–	0,139		
3	5	5,30	–	–	0,017		
4	2	1,49	–	–	0,175		
5	–	–	–	–	–		
6	–	–	–	–	–		
Сумма			1,075				
Параметр			Обознач.		Значение		
Выборочная средняя			\bar{x}_B		0,10		
Стандартное отклонение			σ		0,05		
Число степеней свободы			k		1		
Эмпирическое значения критерия $\chi^2_{\text{набл}}$					1,08		
Критическое значение критерия $\chi^2_{\text{кр}}$					3,8		
Вывод о справедливости выдвинутой гипотезы: ПРИНИМАЕТСЯ							
Параметры распределения							
Математическое ожидание \bar{x}			0,10				
Доверительный интервал Δx (при $\alpha = 0,95$)			0,106				

Пример расчета геометрических параметров ковша землечерпательного снаряда
и нагрузок на ковш при копании ГВОМО

Пример 1. Поставим задачу: рассчитать параметры ковша одноковшового землечерпательного снаряда для добычи ГВОМО в Черном море на полигоне «Сапропели», обеспечивающего производительность землечерпательного снаряда 2 м^3 за цикл. Определить усилие копания и параметры заполнения ковша. Глубину резания принять равной $0,2 \text{ м}$.

Решение задачи. Физико-механические свойства ГВОМО на полигоне «Сапропели»:

– ил сапропелевый: $\tau_0 = 5260 \text{ Па}$; $\eta_{\text{пл}} = 807,4 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\Delta\rho = 90 \text{ кг/м}^3$; $\varphi = \gamma = 49^\circ$;
 $K_r = 130 \text{ Па}\cdot\text{м}$.

– ил кокколитовый: $\tau_0 = 480 \text{ Па}$; $\eta_{\text{пл}} = 226,8 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\Delta\rho = 174 \text{ кг/м}^3$; $\varphi = \gamma = 49^\circ$;
 $K_r = 130 \text{ Па}\cdot\text{м}$.

Примем ширину ковша $b = 1,0 \text{ м}$, скорость резания $v_0 = 0,5 \text{ м/с}$. Обозначим индексами «С» и «К» результаты расчета параметров при копании соответственно сапропелевого и кокколитового илов.

1. Определение предельных параметров заполнения ковша

Параметр $h_{\text{пр}\tau}$, м:

$$h_{\text{пр}\tau}^{\text{С}} = \frac{\sqrt{(\Delta\rho b g \operatorname{tg}\varphi)^2 + 16\tau_0^2}}{2\Delta\rho g} + h_0 = 12,13;$$

$$h_{\text{пр}\tau}^{\text{К}} = 1,00.$$

Параметр $h_{\text{пр}\gamma}$ (полагаем $\gamma = \varphi$), м:

$$h_{\text{пр}\gamma}^{\text{С}} = \sqrt{h_0 b \operatorname{tg}\gamma} + \frac{1}{2} b \operatorname{tg}\gamma + h_0 = 1,25;$$

$$h_{\text{пр}\gamma}^{\text{К}} = 1,25.$$

При копании кокколитового ила $h_{\text{пр}\tau}^{\text{К}} < h_{\text{пр}\gamma}^{\text{К}}$, поэтому принимаем $h_{\text{пр}}^{\text{К}} = 1,00 \text{ м}$; при копании сапропелевого ила $h_{\text{пр}\gamma}^{\text{С}} < h_{\text{пр}\tau}^{\text{С}}$, поэтому $h_{\text{пр}}^{\text{С}} = 1,25 \text{ м}$.

Критерии подобия K и Q , дол. ед.:

$$K^C = \frac{\eta_{пл} v_0}{h_0 \tau_0} = 0,38;$$

$$K^K = 1,18;$$

$$Q^C = \sqrt{K + \frac{K^2}{9} + \frac{K}{3}} = 0,76;$$

$$Q^K = 1,55.$$

Толщина области вязкопластического течения грунта h_I , м:

$$h_I^C = \frac{K}{Q} h_0 = 0,101;$$

$$h_I^K = \frac{K}{Q} h_0 = 0,152.$$

Проводим проверку:

- копанье сапрпелевого ила: $2h_I = 0,202 \text{ м} < b$;
- копанье кокколитового ила: $2h_I = 0,304 \text{ м} < b$;

Условие выполняется.

Толщина области вязкопластического течения грунта у боковых стенок b_I , м:

$$b_I^C = \frac{b}{2} \left(1 - \frac{1}{Q+1} \right) = 0,216;$$

$$b_I^K = 0,304.$$

Ширина твердой области грунта b_{II} , м:

$$b_{II}^C = \frac{b}{Q+1} = 0,568;$$

$$b_{II}^K = 0,392.$$

Толщина твердой области h_{II} , м:

$$h_{II}^C = \left[\frac{1}{\frac{2}{3} + \frac{1}{3(Q+1)^2}} - \frac{K}{Q} \right] h_0 = 0,157;$$

$$h_{II}^K = 0,126.$$

Предельная длина заполнения ковша, м:

$$l_{\text{пр}}^C = \frac{1}{b_{II}} (h_{\text{пр}} - h_I)(b_{II} + 2h_{II}) = 1,79;$$

$$l_{\text{пр}}^K = 1,4.$$

Предельный объем заполнения ковша, м³:

$$V_{\text{гр.пр.}}^C = \frac{1}{4} \pi h_{\text{пр}} l_{\text{пр}} b = 1,77;$$

$$V_{\text{гр.пр.}}^K = 1,1.$$

Полученные расчетные значения $V_{\text{гр.пр.}}$ показывают, что при заданных глубине резания $h_0 = 0,2$ м и ширине ковша $b = 1$ м не удастся обеспечить требуемую производительность землечерпательного снаряда. Увеличим ширину ковша до 1,5 м и произведем расчет заново. В результате получим значения:

$$h_{\text{пр}}^C = 1,65 \text{ м}; \quad h_{\text{пр}}^K = 1,23 \text{ м};$$

$$l_{\text{пр}}^C = 2,12 \text{ м}; \quad l_{\text{пр}}^K = 1,54 \text{ м};$$

$$V_{\text{гр.пр.}}^C = 4,12 \text{ м}^3; \quad V_{\text{гр.пр.}}^K = 2,23 \text{ м}^3.$$

Объем призмы волочения, м³:

$$V_{\text{пв.пр.}}^C = \frac{1}{4} \pi (h_{\text{пр}} - h_0)^2 \text{ctg } \varphi b = 2,15;$$

$$V_{\text{пв.пр.}}^K = 1,09.$$

Предельный путь заполнения, м:

$$s_{\text{пр}}^C = \frac{V_{\text{пв.пр.}} + V_{\text{гр.пр.}}}{bh_0} = 20,93;$$

$$s_{\text{пр}}^K = 11,06.$$

Коэффициент распределения грунта:

$$k_{\text{гр}}^{\text{C}} = \frac{V_{\text{гр.пр.}}}{V_{\text{гр.пр.}} + V_{\text{пв.пр.}}} = 0,66;$$

$$k_{\text{гр}}^{\text{K}} = 0,67.$$

Параметр $R_{\text{пр}}$, м:

$$R_{\text{пр}}^{\text{C}} = \sqrt{l_{\text{пр}} h_{\text{пр}}} = 1,87;$$

$$R_{\text{пр}}^{\text{K}} = 1,38$$

Предельное усилие сопротивления ковша заполнению, Н:

$$P_{3.\text{пр.}}^{\text{C}} = \frac{1}{2}(R_{\text{пр}} - h_0) \left[\pi \tau_0 (R_{\text{пр}} + h_0) + 8k_{\text{гр}} h_0 \frac{K_{\text{Г}}}{b_{\text{Г}}} \right] +$$

$$+ \frac{1}{\pi} b \left[\pi \tau_0 (R_{\text{пр}} - h_0) + 4k_{\text{гр}} h_0 \frac{K_{\text{Г}}}{h_{\text{Г}}} \ln \left(\frac{R_{\text{пр}}}{h_0} \right) \right] = 42859,8;$$

$$P_{3.\text{пр.}}^{\text{K}} = 2847,0.$$

Вычертим контур тела грунта в ковше в состоянии предельного заполнения (эллипс с полуосями $l_{\text{пр}}$ и $h_{\text{пр}}$), который формируется в ковше при копании кокколитового и сапропелевого илов, рис. Ф.1. На этом же эскизе покажем контур ковша с геометрическими параметрами меньшими $l_{\text{пр}}^{\text{K}}$ и $h_{\text{пр}}^{\text{K}}$. Длина ковша $l_{\text{к}}$ составляет 1,50 м, высота $h_{\text{к}} - 1,00$ м.

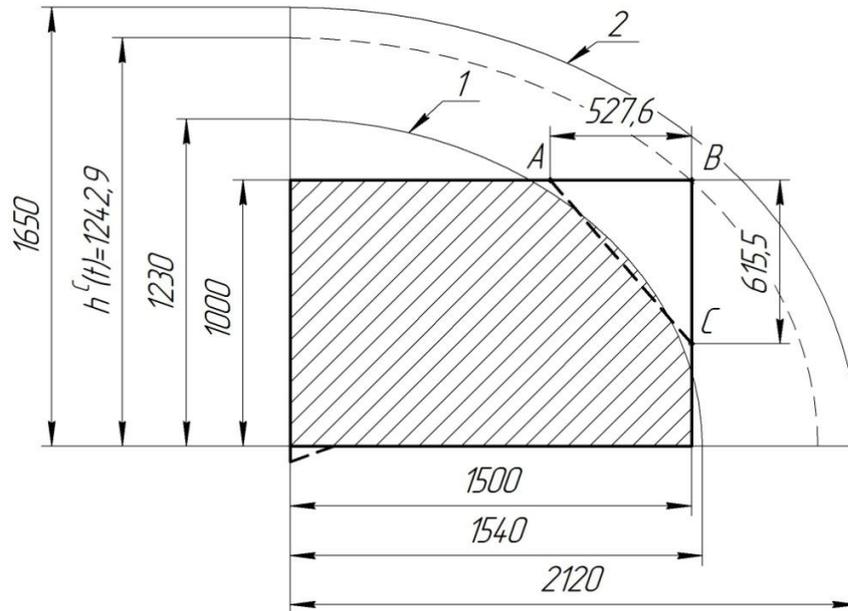
Рассчитаем емкость ковша по формуле, м³:

$$V_{\text{к}} = l_{\text{к}} h_{\text{к}} b = 2,25.$$

Объем грунта в ковше при копании кокколитового ила определим с учетом незаполненного объема, изображенного на рис. Ф.1 в виде треугольника ΔABC , м³:

$$V_{\text{гр}}^{\text{K}} = V_{\text{к}} - S_{\Delta ABC} b = 2,01.$$

Учитывая криволинейную траекторию вывода ковша из забоя, объем грунта в ковше при копании кокколитового ила следует ожидать не менее 2,01 м³.



1 и 2 – контур тела грунта в ковше в состоянии предельного заполнения при копании соответственно кокколитового и сапропелевого илов

Рисунок Ф.1 – Эскиз тела грунта в состоянии предельного заполнения и контур ковша

При копании сапропелевого ила контур тела грунта в состоянии предельного заполнения полностью перекрывает контур ковша (см. рис. Ф.1), поэтому объем грунта в ковше будет равен емкости ковша, м³:

$$V_{\text{гр}}^{\text{C}} = 2,25.$$

Таким образом, для достижения производительности одноковшового землечерпательного снаряда не менее 2 м³ ГВМО за цикл, при копании кокколитового ила параметры тела грунта $h^{\text{K}}(t)$ и $l^{\text{K}}(t)$ должны достигать своих предельных значений (см. рис. Ф.1), поэтому коэффициент формы тела грунта в ковше будет равен, дол. ед.:

$$k_{\text{фк}}^{\text{K}} = \frac{h^{\text{K}}(t)}{h_{\text{пр}}^{\text{K}}} = 1.$$

Для полного заполнения ковша при копании сапропелевого ила высота тела грунта должна составлять (см. рис. Ф.1): $h^{\text{C}}(t) = 1,24$ м. Определим коэффициент формы тела грунта, дол. ед.:

$$k_{\text{фк}}^{\text{C}} = \frac{h^{\text{C}}(t)}{h_{\text{пр}}^{\text{C}}} = 0,75.$$

Коэффициент наполнения ковша, дол. ед.:

$$k_{\text{н}}^{\text{C}} = \frac{V_{\text{гр}}}{V_{\text{к}}} = 1;$$

$$k_{\text{н}}^{\text{C}} = 0,89.$$

Объем призмы волочения, м³:

$$V_{\text{пв}}^{\text{C}} = \frac{1}{4} \pi (k_{\text{фк}} h_{\text{пр}} - h_0)^2 \text{ctg } \varphi b = 1,10;$$

$$V_{\text{пв}}^{\text{K}} = 1,09.$$

Путь заполнения ковша, м:

$$s^{\text{C}} = \frac{V_{\text{пв}} + V_{\text{гр}}}{bh_0} = 11,17;$$

$$s^{\text{K}} = 10,33.$$

Сопротивление ковша заполнению при копании кокколитового $P_3^{\text{K}} = P_{3.\text{пр}}^{\text{K}} = 2847,0$ Н, поскольку $k_{\text{фк}}^{\text{K}} = 1$.

Параметр R , м:

$$R^{\text{C}} = k_{\text{фк}} \sqrt{l_{\text{пр}} h_{\text{пр}}} = 1,40.$$

Усилие сопротивления ковша заполнению при копании сапропелевого ила, Н:

$$P_3^{\text{C}} = \frac{1}{2} (R - h_0) \left[\pi \tau_0 (R + h_0) + 8k_{\text{пр}} h_0 \frac{K_{\text{Г}}}{b_{\text{I}}} \right] + \frac{1}{\pi} b \left[\pi \tau_0 (R - h_0) + 4k_{\text{пр}} h_0 \frac{K_{\text{Г}}}{h_{\text{I}}} \ln \left(\frac{R}{h_0} \right) \right] = 26213,8.$$

Усилие сопротивления трению ковша о грунт, Н:

$$P_{\text{Т}}^{\text{C}} = 0,1P_3^{\text{C}} = 2621,4;$$

$$P_{\text{Т}}^{\text{K}} = 0,1P_3^{\text{K}} = 284,7.$$

Усилие гидродинамического сопротивления перемещению ковша в водной среде, Н:

$$P_{гд} = 0,5c_x S \rho_v v_0^2 = 221,9.$$

Усилие сопротивления грунта копанию при пути заполнения равным s , Н:

$$P_K^C = P_3 + P_T + P_{гд} = 29119,9;$$

$$P_K^K = 3353,6.$$

Предельное усилие сопротивления грунта копанию, Н:

$$P_{к.пр.}^C = 1,1P_{з.пр.} + P_{гд} = 47366,8;$$

$$P_{к.пр.}^K = 3353,6.$$

Рассчитанные параметры ковша одноковшового землечерпательного снаряда и параметры заполнения запишем в табл. X.1.

Таблица X.1

Результаты расчетов

Параметр	Ед. измерения	Значение	
		копание сапропелевого ила	копание кокколитового ила
Параметры ковша			
Длина ковша l_k	м	1,50	
Ширина ковша b	м	1,50	
Высота ковша h_k	м	1,00	
Емкость ковша V_k	м ³	2,25	
Параметры заполнения			
Рациональный путь заполнения ковша s	м	11,17	10,33
Предельны путь заполнения ковша $s_{пр}$	м	20,93	11,06
Усилие копания P_k при пути заполнения ковша s	кН	29,1	3,4
Предельное усилие копания $P_{к.пр.}$	кН	47,4	3,4
Коэффициент наполнения ковша k_H	дол. ед.	1,0	0,89

Приведенный пример расчета показывает, что при разработке ГВОМО на полигоне «Сапропели» одноковшовым землечерпательным снарядом с ковшом емкостью $2,25 \text{ м}^3$ усилие копания сапропелевого ила почти в 8,5 раз превышает усилие копания кокколитового ила, что обусловлено его более высокими прочностными свойствами. Рациональный путь копания составляет 11,17 м. Максимальное сопротивление грунта копанию при рациональном пути копания составит 29,1 кН, предельное усилие копания – 47,4 кН. Коэффициент наполнения ковша шириной 1,5 м, длиной 1,5 м и высотой 1 м при глубине резания 0,2 м следует ожидать не менее 0,89.

Пример 2. Выполним расчет параметров ковша многоковшового землечерпательного снаряда с придонным блоком, изображенным на рис. 1.8. Пускай данный землечерпательный снаряд предполагается использовать для добычи ГВОМО в Черном море на полигоне «Сапропели». Поставим задачу: определить рациональные геометрические параметры ковша емкостью $0,2 \text{ м}^3$, путь и нагрузки на ковш при копании ГВОМО. Ширина ковша – 0,4 м.

Решение задачи. Физико-механические свойства ГВОМО на полигоне «Сапропели»:

– ил сапропелевый: $\tau_0 = 5260 \text{ Па}$; $\eta_{\text{пл}} = 807,4 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\Delta\rho = 90 \text{ кг/м}^3$; $\varphi = \gamma = 49^\circ$;
 $K_r = 130 \text{ Па}\cdot\text{м}$.

– ил кокколитовый: $\tau_0 = 480 \text{ Па}$; $\eta_{\text{пл}} = 226,8 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\Delta\rho = 174 \text{ кг/м}^3$; $\varphi = \gamma = 49^\circ$;
 $K_r = 130 \text{ Па}\cdot\text{м}$.

Глубину резания примем равной 0,1 м. Скорость резания принимаем равной 0,5 м/с.

Проанализируем конструкцию добычной установки. После врезания в грунт ковш движется поступательно по направляющим; трением днища ковша о грунт можно пренебречь ($P_r = 0$), поскольку вертикальная составляющая от веса ковша с грунтом воспринимается роликоопорами придонного блока. Ковш имеет коробчатую форму с одной открытой поверхностью.

Обозначим индексами «С» и «К» результаты расчета параметров при копании соответственно сапропелевого и кокколитового илов.

Параметр $h_{\text{пр}\tau}$, м:

$$h_{\text{пр}\tau}^{\text{С}} = \frac{\sqrt{(\Delta\rho b g \operatorname{tg}\varphi)^2 + 16\tau_0^2}}{2\Delta\rho g} + h_0 = 12,02;$$

$$h_{\text{пр}\tau}^{\text{К}} = 0,71.$$

Параметр $h_{\text{пр}\gamma}$ (полагаем $\gamma = \varphi$), м:

$$h_{\text{пр}\gamma}^{\text{С}} = \sqrt{h_0 b \operatorname{tg}\gamma} + \frac{1}{2} b \operatorname{tg}\gamma + h_0 = 0,54;$$

$$h_{\text{пр}\gamma}^{\text{К}} = 0,54.$$

Поскольку для обоих типов илов $h_{\text{пр}\gamma} < h_{\text{пр}\tau}$, то за предельную высоту заполнения ковша принимаем значение $h_{\text{пр}\gamma}$, м:

$$h_{\text{пр}}^{\text{С}} = 0,54;$$

$$h_{\text{пр}}^{\text{К}} = 0,54.$$

Критерии подобия K и Q :

$$K^{\text{С}} = \frac{\eta_{\text{пл}} v_0}{h_0 \tau_0} = 0,77;$$

$$K^{\text{К}} = 2,36;$$

$$Q^{\text{С}} = \sqrt{K + \frac{K^2}{9} + \frac{K}{3}} = 1,17;$$

$$Q^{\text{К}} = 2,51.$$

Толщина области вязкопластического течения грунта h_l , м:

$$h_l^{\text{С}} = \frac{K}{Q} h_0 = 0,066 ;$$

$$h_l^{\text{К}} = 0,094.$$

Проводим проверку:

$$2h_I^C = 0,132 \text{ м} < b;$$

$$2h_I^K = 0,188 \text{ м} < b.$$

Условие выполняется.

Толщина области вязкопластического течения грунта у боковых стенок b_I , м:

$$b_I^C = \frac{b}{2} \left(1 - \frac{1}{Q+1} \right) = 0,108;$$

$$b_I^K = 0,143.$$

Ширина твердой области b_{II} , м:

$$b_{II}^C = \frac{b}{Q+1} = \frac{0,07}{9,38+1} = 0,184;$$

$$b_{II}^K = 0,114.$$

Толщина твердой области h_{II} , м:

$$h_{II}^C = \left[\frac{1}{\frac{2}{3} + \frac{1}{3(Q+1)^2}} - \frac{K}{Q} \right] h_0 = 0,07;$$

$$h_{II}^K = 0,05.$$

Предельная длина заполнения ковша, м:

$$l_{\text{пр}}^C = \frac{1}{k_{\text{п}} b_{II}} (h_{\text{пр}} - h_I) (b_{II} + 2h_{II}) = 0,84;$$

$$l_{\text{пр}}^K = 0,85.$$

Предельный объем заполнения ковша, м³:

$$V_{\text{гр.пр.}}^C = \frac{1}{4} \pi h_{\text{пр}} l_{\text{пр}} b = 0,14;$$

$$V_{\text{гр.пр.}}^K = 0,15.$$

Полученные расчетные значения $V_{\text{гр.пр.}}$ показывают, что при заданных глубине резания $h_0 = 0,1$ м и ширине ковша $b = 0,4$ м не удастся обеспечить высо-

кий коэффициент наполнения ковша емкостью $0,2 \text{ м}^3$, поскольку $V_{\text{гр.пр.}} < V_{\text{к}}$. Увеличим глубину резания до $h_0 = 0,15 \text{ м}$ и произведем расчет заново. В результате получим значения:

$$\begin{aligned} h_{\text{пр}}^{\text{C}} &= 0,64 \text{ м}; & h_{\text{пр}}^{\text{K}} &= 0,64 \text{ м}; \\ l_{\text{пр}}^{\text{C}} &= 1,16 \text{ м}; & l_{\text{пр}}^{\text{K}} &= 1,17 \text{ м}; \\ V_{\text{гр.пр.}}^{\text{C}} &= 0,23 \text{ м}^3; & V_{\text{гр.пр.}}^{\text{K}} &= 0,24 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

Объем призмы волочения, м^3 :

$$\begin{aligned} V_{\text{пв.пр.}}^{\text{C}} &= \frac{1}{4} \pi (h_{\text{пр}} - h_0)^2 \text{ctg } \varphi b = 0,066; \\ V_{\text{пв.пр.}}^{\text{K}} &= 0,066. \end{aligned}$$

Предельный путь заполнения, м:

$$\begin{aligned} s_{\text{пр}}^{\text{C}} &= \frac{V_{\text{пв.пр.}}^{\text{C}} + V_{\text{гр.пр.}}^{\text{C}}}{bh_0} = 5,01; \\ s_{\text{пр}}^{\text{K}} &= 5,03. \end{aligned}$$

Коэффициент распределения грунта:

$$\begin{aligned} k_{\text{гр}}^{\text{C}} &= \frac{V_{\text{гр}}}{V_{\text{гр}} + V_{\text{пв}}} = 0,78; \\ k_{\text{гр}}^{\text{K}} &= 0,78. \end{aligned}$$

Параметр $R_{\text{пр}}$, м:

$$\begin{aligned} R_{\text{пр}}^{\text{C}} &= \sqrt{l_{\text{пр}} h_{\text{пр}}} = 0,86; \\ R_{\text{пр}}^{\text{K}} &= 0,87 \end{aligned}$$

Предельное усилие сопротивления ковша заполнению, Н:

$$\begin{aligned} R_{\text{з.пр.}}^{\text{C}} &= \frac{1}{2} (R_{\text{пр}} - h_0) \left[\pi \tau_0 (R_{\text{пр}} + h_0) + 8k_{\text{гр}} h_0 \frac{K_{\text{г}}}{b_l} \right] + \\ &+ \frac{1}{\pi} b \left[\pi \tau_0 (R_{\text{пр}} - h_0) + 4k_{\text{гр}} h_0 \frac{K_{\text{г}}}{h_l} \ln \left(\frac{R_{\text{пр}}}{h_0} \right) \right] = 8087,9; \\ R_{\text{з.пр.}}^{\text{K}} &= 1127,8. \end{aligned}$$

Вычертим контуры тел грунта в ковше в состоянии предельного заполнения, формирующихся при копании сапропелевого и кокколитового илов, а также покажем контур ковша (рис. Ф.2).

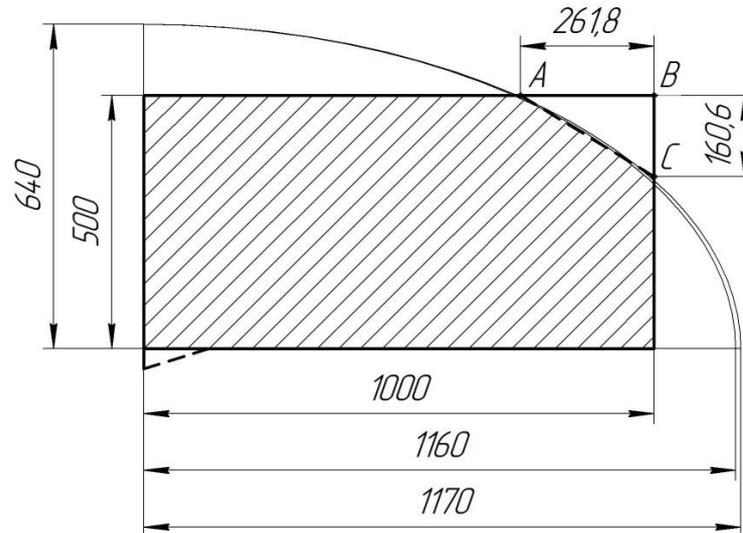


Рисунок Ф.2 – Схема для определения геометрических параметров ковша

Длину ковша примем равной $l_k = 1$ м. Тогда для обеспечения заданной в исходных данных емкости ковша $V_k = 0,2$ м³ при ширине ковша $b = 0,4$ м его высота должна составлять, м:

$$h_k = \frac{V_k}{bl_k} = 0,5.$$

Объем грунта в ковше определим с учетом незаполненного объема, изображенного на рис. Ф.2 в виде треугольника ΔABC , м³:

$$V_{гр} = V_k - S_{\Delta ABC}b = 0,192.$$

Учитывая криволинейную траекторию вывода ковша из забоя, объем грунта в ковше следует ожидать не менее $0,192$ м³.

Коэффициент формы тела грунта составит:

$$k_{фк} = \frac{h(t)}{h_{прк}} = 1.$$

Поскольку $k_{фк} = 1$ ($t = t_{пр}$), пересчет параметров заполнения с использованием приведенных в п.5.4 выражений производить не следует.

Коэффициент наполнения ковша:

$$k_n = \frac{V_{гр}}{V_k} = 0,96.$$

Усилие гидродинамического сопротивления, Н:

$$P_{гд} = 0,5c_x S \rho_v v_0^2 = 29,6.$$

Усилие сопротивления трению ковша о грунт принимаем равным нулю, поскольку ковш перемещается по направляющим придонного блока и днище ковша не взаимодействует с поверхностью дна.

Усилие копания ГВОМО, Н:

$$P_k^C = P_3 + P_T + P_{гд} = 8117,5;$$

$$P_k^K = 1157,4.$$

Рассчитанные параметры ковша и параметры заполнения запишем в табл. Ф.2.

Таблица Ф.2

Результаты расчетов

Параметр	Ед. измерения	Значение	
Параметры ковша			
Длина ковша l_k	м	1,00	
Ширина ковша b	м	0,40	
Высота ковша h_k	м	0,50	
Емкость ковша V_k	м ³	0,20	
Параметры заполнения		копание сапропелевого ила	копание кокколитового ила
Путь заполнения ковша s	м	5,01	5,03
Усилие копания P_k	кН	8,1	1,2
Коэффициент наполнения ковша k_n	дол. ед.	0,96	0,96

Приведенный пример расчета показывает, что при разработке ГВОМО на полигоне «Сапропели» ковшом емкостью $0,2 \text{ м}^3$ усилие копания сапропелевого ила почти в 7 раз превышает усилие копания кокколитового ила. Максимальное сопротивление ГВОМО копанию составит 8,1 кН. Коэффициент наполнения ковша многоковшового землечерпательного снаряда шириной 0,4 м, длиной 1 м и высотой 0,5 м при глубине резания 0,15 м следует ожидать не менее 0,96. Путь заполнения ковша – 5,03 м.

Приложение X (начало)

УЗГОДЖЕНО:

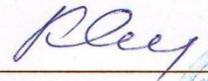
Проректор з наукової роботи
Державного ВНЗ «НГУ»,
д-р техн. наук, проф.


О.О. Бешта
«15» 09 2014



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зам. керівника по науці
ДНУ ВМГОР НАН України,
канд. геол.-мінерал. наук


Т.С. Куковська
«18» 09 2014



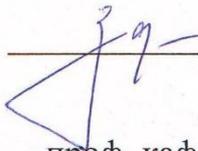
**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
науково-дослідницьких робіт**

Цим актом підтверджується, що Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» передав ДНУ ВМГОР НАН України для використання при проектуванні наступні результати науково-дослідницьких робіт: «Методика розрахунку геометричних параметрів ковшів землечерпакових снарядів та навантажень на ківш при копанні глибоководних органо-мінеральних осадів», затверджених проректором Державного ВНЗ «НГУ» в 2014 р.

Новизна результатів: розроблена методика розрахунку геометричних параметрів ковшів землечерпакових снарядів та навантажень на ківш при копанні глибоководних органо-мінеральних осадів, яка дозволяє визначати раціональні геометричні параметри ковша по умові його максимального заповнення та зусилля копання органо-мінеральних відкладень для обґрунтування параметрів приводу виконавчого органу землечерпакового снаряду.

Результати будуть використані в проектних роботах при розробці ковшів одноконшевих землечерпакових снарядів для відбору проб глибоководних органо-мінеральних осадів з dna моря.

Зав. кафедри гірничих машин та інж.
д-р техн. наук, проф.
К.С. Заболотний

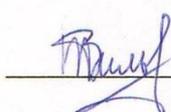


Керівник теми ГП-470,
проф. кафедри гірн. машин та інж.
д-р техн. наук, проф.



В.П. Франчук

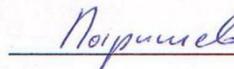
мол. наук. співроб., асп.
Т.В. Шепель



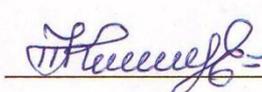
Канд. геол.-мінерал. наук,
вед. наук. співроб.
М.О. Маслаков



канд. геол.-мінерал. наук,
ст. наук. співроб.
О.О. Паришев



наук. співроб.
Г.Є. Княжевський



Приложение X (окончание)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СОГЛАСОВАНО:

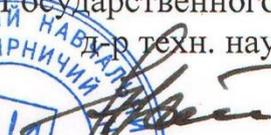
Зам. руководителя по науке
ГНУ ОМГОР НАН Украины,
канд. геол.-минерал. наук


Т.С. Куковская
« 18 » 09 2014



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
Государственного ВУЗ «НГУ»,
д-р техн. наук, проф.

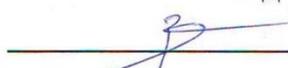

А.С. Бешта
« 15 » 09 2014

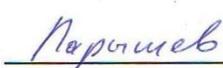


**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОВШЕЙ
ЗЕМЛЕЧЕРПАТЕЛЬНЫХ СНАРЯДОВ И НАГРУЗОК
НА КОВШ ПРИ КОПАНИИ
ГЛУБОКОВОДНЫХ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОСАДКОВ**

Канд. геол.-минерал. наук,
вед. научн. сотр.

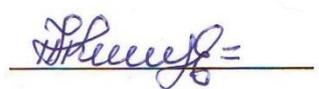
Н.А. Маслаков

Зав. кафедры горных машин и инж.
д-р техн. наук, проф.

К.С. Заболотный

канд. геол.-минерал. наук,
ст. научн. сотр.

А.А. Парышев

руководитель темы ГП-470,
проф. кафедры горных машин и инж.
д-р техн. наук, проф.

В.П. Франчук

научн. сотр.

Г.Е. Княжевский

мл. научн. сотр., асп.

Т.В. Шепель

Днепропетровск
2014

Приложение Ц (начало)



ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор з наукової роботи
 Державного ВНЗ «НГУ»,
 д-р. техн. наук, професор
 О.С. Бешта
 « 2 » 09 2014 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження Шепеля Тараса Вілійовича «Обґрунтування параметрів ковшів землечерпакових снарядів для глибоководного видобутку органо-мінеральних осадів» у навчальний процес механіко-машинобудівного факультету Державного ВНЗ «НГУ»

Акт складено комісією у складі:

- Голова: Декан механіко-машинобудівного факультету, канд. техн. наук, доцент Фелоненко С.В.
- Члени комісії: 1. Завідувач кафедри гірничих машин та інжинірингу, д-р. техн. наук, професор Заболотний К.С.
 2. Завідувач кафедри гірничої механіки, д-р. техн. наук, професор Самуся В.І.
 3. Канд. техн. наук, доцент Бондаренко А.О.

Комісія розглянула матеріали:

1. Дисертаційну роботу Шепеля Тараса Вілійовича «Обґрунтування параметрів ковшів землечерпакових снарядів для глибоководного видобутку органо-мінеральних осадів».
2. Робочу програму дисципліни «Основи конструювання гірничих машин для підводного видобутку корисних копалин» (викладається студентам денної форми навчання за програмою підготовки спеціалістів за спеціальністю 7.05050309 «Гірничі машини та комплекси»).
3. Видані навчально-методичні матеріали для вивчення вказаної дисципліни.

Висновок комісії:

1. Розроблені в дисертаційній роботі Шепеля Тараса Вілійовича «Обґрунтування параметрів ковшів землечерпакових снарядів для глибоководного видобутку органо-мінеральних осадів» методологічні і

Приложение Ц (окончание)

науково-теоретичні положення, а також практичні методики впроваджені як розділи курсу дисципліни «Основи конструювання гірничих машин для підводного видобутку корисних копалин».

2. Застосування в навчальному процесі механіко-машинобудівного факультету Державного ВНЗ «НГУ» матеріалів дисертаційного дослідження Шепеля Тараса Вілійовича «Обґрунтування параметрів ковшів землечерпакових снарядів для глибоководного видобутку органічно-мінеральних осадів» дало змогу адаптувати дисципліну «Основи конструювання гірничих машин для підводного видобутку корисних копалин» до сучасних умов розвитку напряму з глибоководного видобутку корисних копалин механічним способом з урахуванням пріоритетів щодо розширення мінерально-сировинної бази України за рахунок освоєння глибоководних родовищ корисних копалин, поглибити теоретико-методичні основи дисципліни, а в кінцевому підсумку – підвищити якість підготовки фахівців з зазначеної спеціальності.

Голова комісії:

С.В. Фелоненко

Члени комісії:

К.С. Заболотний

В.І. Самуся

А.О. Бондаренко