

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

На правах рукописи

ШЕВЧЕНКО Александр Евгеньевич

УДК 622.794.254; 622.794.3 (043.3)

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ФИЛЬТРОВАЛЬНО-ПУЛЬСАЦИОННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ
ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ 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

Днепр, Фрайберг – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	9
РАЗДЕЛ 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОСАДКОВ ЧЕРНОГО МОРЯ.....	17
1.1 Характеристика глубоководных органо-минеральных осадков Черного моря как объекта обезвоживания.....	17
1.2 Анализ и классификация оборудования для обезвоживания мелкодисперсных суспензий механическим способом.....	22
1.3 Анализ фильтровального оборудования для обезвоживания мелкодисперсных суспензий.....	26
1.4 Современное состояние исследований процесса фильтрования мелкодисперсных суспензий.....	35
1. 5 Пути повышения производительности фильтровальных машин.....	43
1.6 Выводы, цель и задачи исследований.....	48
РАЗДЕЛ 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ФИЛЬТРОВАЛЬНО-ПУЛЬСАЦИОННОЙ МАШИНЫ ПРИ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ДАВЛЕНИИ.....	50
2.1 Компоновочная схема и основные параметры фильтровально- пульсационной машины	50
2.2 Анализ процесса фильтрования тонкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении.....	58
2.3 Критериальное моделирование процесса обезвоживания тонкодисперсной суспензии.....	70
2.4 Определение параметров экспериментальной установки.....	74
Выводы по разделу.....	78

РАЗДЕЛ 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ФИЛЬТРОВАЛЬНО-ПУЛЬСАЦИОННОЙ МАШИНЫ.....	80
3.1 Выбор методов проведения экспериментальных исследований.....	80
3.2 Выбор факторов и интервалов варьирования.....	81
3.3 Постановка и проведение экспериментальных исследований.....	86
3.3.1 Лабораторные исследования свойств образцов суспензии.....	86
3.3.2 Исследование режима работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО при пульсирующем давлении.....	91
3.3.3 Исследование режима работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО при статическом давлении.....	101
3.4 Обработка результатов эксперимента и построение математической модели режима работы машины при пульсации давления.....	102
3.5 Математическая модель режима работы машины при статическом давлении.....	110
3.6 Анализ влияния параметров фильтровально-пульсационной машины на процесс фильтрации ГВОМО при пульсирующем давлении.....	113
3.7 Влияние динамической составляющей давления на процесс обезвоживания ГВОМО.....	127
Выводы по разделу.....	130
РАЗДЕЛ 4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	133
4.1 Обоснование параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО.....	133
4.2 Методика определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО	142
4.3 Эффективность обезвоживания ГВОМО при пульсирующем давлении и ожидаемый экономический эффект.....	150
4.4 Перспективы использования результатов исследований.....	154
Выводы по разделу.....	162

ВЫВОДЫ.....	164
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	167
Приложения	
Приложение А. Расчет параметров лабораторной фильтровальной установки.....	181
Приложение Б. Построение математической модели процесса фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении...	186
Приложение В. Результаты экспериментальных исследований процесса фильтрования ГВОМО при статическом давлении.....	190
Приложение Г. Экспериментальные исследования процесса уплотнения ГВОМО.....	196
Приложение Д. Методика определения рациональных параметров фильтровальной машины для обезвоживания морских органо-минеральных осадков.....	201
Приложение Е. Методика определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания органо-минеральных осадков.....	204
Приложение Ж. Методика определения параметров вибрационной фильтровальной машины для обезвоживания ГВОМО со шнековой выгрузкой осадка.....	207
Приложение И. Акты внедрения.....	210

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ

ε_s – коэффициент уплотнения, дол. ед.;

C – проницаемость осадка, м^2 ;

p_s – давление, передающееся на частицы обезвоживаемого материала, Па;

μ – динамическая вязкость жидкой фазы суспензии, Па·с;

d_p – эквивалентный диаметр частиц материала, м;

V'_s – скорость фильтрования, м/с;

S – площадь фильтровальной поверхности, м^2 ;

h – высота слоя осадка, образованного на фильтровальной перегородке, м;

V – объем фильтрата, м^3 ;

t – время, с;

ΔP – перепад давления, Па;

p – давление фильтрования, Па;

β – коэффициент сжимаемости, дол. ед.;

R_{oc} – удельное гидравлическое сопротивление слоя осадка, м^{-1} ;

$R_{фп}$ – удельное гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки, м^{-1} ;

r_o – удельное объемное сопротивление осадка м^{-2} ;

x_o – параметр, который численно равен отношению объема осадка к объему фильтрата, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

p_s – напряжение в скелете осадка, Па;

p_f – давление жидкой фазы суспензии, Па;

ε – пористость, дол. ед.;

q – объем фильтрата, полученный с единицы площади фильтровальной перегородки, $\text{м}^3/\text{м}^2$;

p_{st} – статическая составляющая давления, Па;

p_d – динамическая составляющая давления, Па;

- ω – круговая частота вибрации, рад/с;
 Ω – частота пульсации давления, Гц;
 ρ_s – плотность твердых частиц, кг/м³;
 p_p – суммарное пульсирующее давление, Па;
 ρ – плотность жидкой фазы суспензии, кг/м³;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 p_a – атмосферное давление, Па;
 d_{eq} – эквивалентный диаметр пор (каналов), м;
 d_p – эквивалентный диаметр частиц, м;
 l – длина канала (поры), м;
 v_f – обобщенная скорость движения жидкости в пористой системе, м/с;
 $r_{пр}$ – приведенное удельное сопротивление осадка, с/м²;
 Φ – фактор формы частиц суспензии, м/м;
 H – начальная высота слоя суспензии, м;
 W_k – абсолютная конечная влажность продукта (осадка), дол. ед.;
 W_0 – абсолютная начальная влажность суспензии, дол. ед.;
 e_0 – начальный коэффициент пористости, дол. ед.;
 e – коэффициент пористости, дол. ед.;
 ρ_s – плотность твердых частиц суспензии, кг/м³;
 i_h – степень уплотнения суспензии, м/м;
 ρ_w – плотность обезвоженного материала, кг/м³;
 W_Δ – безразмерный параметр, характеризующий изменение влажности материала и зависящий от его свойств, ед.;
 δ_k – расстояние между фильтровальными перегородками, м;
 n_k – количество фильтровальных камер фильтр-пресса, ед.;
 Π – критерий подобия (безразмерная величина), ед.;
 F_v – возмущающее усилие вибровозбудителя, Н;
 ω_0 – круговая частота собственных колебаний балки лабораторной фильтровальной установки, рад/с;

- l_v – расстояние от опоры до оси вибратора, м;
- q_L – приведенный объем фильтрата, численно равный отношению объема фильтрата к начальной высоте фильтруемого слоя суспензии и площади фильтровальной поверхности, $\text{м}^3/\text{м}^2$;
- p_r – приведенная статическая составляющая давления, равная отношению статической составляющей давления к атмосферному давлению, ед.;
- K_d – коэффициент динамичности, дол. ед.;
- ω_r – приведенная частота пульсации давления, ед.;
- T – приведенное время фильтрования, ед.;
- t_0 – время, протекающее от начала процесса фильтрования до его условной стабилизации, с;
- ρ_0 – средняя плотность суспензии, $\text{кг}/\text{м}^3$;
- i – номер опыта (строки матрицы планирования), ед.;
- k – число факторов (параметров), ед.;
- v – коэффициент вариации, дол. ед.;
- n – количество повторных опытов, шт.;
- N – количество опытов, шт.;
- t_α – табличное значение критерия Стьюдента, ед.;
- $r_{\text{пр}}^{\text{фп}}$ – приведенное удельное сопротивление фильтровальной перегородки, $\text{с}/\text{м}^2$;
- α_v – доверительная вероятность, дол. ед.;
- x_Δ – суммарное уплотнение слоя суспензии от статической и динамической нагрузки, м;
- $\dot{x}_d$ – динамическая составляющая скорости уплотнения суспензии, м/с;
- v_p – удельная производительность фильтровально-пульсационной машины по фильтрату для режима работы при пульсации давления, м/с;
- v_{st} – удельная производительность фильтровально-пульсационной машины по фильтрату для режима работы без пульсации давления, м/с;
- $Q_{\text{исх}}$ – требуемая производительность фильтровальной машины, $\text{м}^3/\text{с}$;

t_{Σ} – суммарное время вспомогательных операций фильтр-пресса, с;

ГВОМО – глубоководные органо-минеральные осадки (Черного моря);

НИС – научно-исследовательское судно;

ФП – фильтровальная перегородка;

ЦФЭ – цилиндрический фильтровальный элемент;

ПФЭ – полный факторный эксперимент;

ЦКП – центральный композиционный план;

МНК – метод наименьших квадратов.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Глубоководные органо-минеральные осадки (ГВОМО), прогнозные запасы которых только в Черном море составляют порядка 320 млрд. м³, представляют значительный интерес для экономического развития Украины. Исследования болгарских и украинских ученых подтверждают эффективность использования данного вида сырья в аграрно-химическом комплексе, медицине, строительстве и др. областях промышленности, что делает ГВОМО ценным природным ресурсом.

Одной из основных проблем на пути к промышленному освоению данного вида природных ресурсов является их обезвоживание, что обусловлено мелкодисперсной структурой (80 – 85% материала составляют фракции < 10 мкм), содержанием органического вещества и солей.

Обезвоживание ГВОМО в месте проведения добычных работ позволяет повысить концентрацию добываемого сырья, и, таким образом, значительно снизить удельные затраты на его транспортирования к береговой базе. Однако условия эксплуатации обезвоживающего оборудования в открытом море (качка плавсредства, ограниченные производственные площади и энергоресурсы и др.) предъявляют ряд специфических требований к обезвоживающему оборудованию, которым наиболее полно отвечает механические фильтр-прессы.

Основными параметрами фильтр-прессов являются: рабочее давление, площадь фильтровальной поверхности, расстояние между фильтровальными перегородками, количество фильтровальных плит, геометрические размеры машины и ее конструктивных элементов, удельная производительность (с единицы площади фильтровальной поверхности), время фильтрования (продолжительность обезвоживания), продолжительность вспомогательных операций, а также параметры обезвоживания (влажность суспензии, ее свойства и тип).

Как правило, современные фильтровальные машины имеют значительные габариты и являются металлоемкими, а эффективность их работы зависит от

свойств и гранулометрического состава суспензии, поэтому для повышения эффективности их работы используют разные методы интенсификации процесса фильтрации, протекающего в данных машинах. Одним из перспективных направлений повышения эффективности процесса обезвоживания суспензии и работы фильтровальных машин является метод вибрационного воздействия на суспензию, за счет чего в последней реализуется пульсирующее давление.

Разработка и обоснование параметров фильтровальных (фильтровально-пульсационных) машин, работающих при пульсирующем давлении, для обезвоживания тонкодисперсных суспензий представляет собой сложную техническую задачу, поэтому большинство проведенных работ так и не вышли за рамки лабораторных исследований, а существующие фильтровально-пульсационные машины не приспособлены для обезвоживания морских осадков с высоким содержанием микрочастиц, солей и органического вещества.

На сегодняшний день методы определения параметров фильтровально-пульсационных машин для обезвоживания тонкодисперсных суспензий отсутствуют ввиду большого количества факторов, влияющих на процесс фильтрации.

Поэтому, определение основных режимных и конструктивных параметров фильтровально-пульсационной машины и установление их зависимостей от показателей процесса фильтрации тонкодисперсной суспензии ГВОМО 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 госбюджетных работ Министерства образования и науки на период с 2012 г. по 2016 г., в которых автор брал участие как ответственный исполнитель: «Развитие теоретических основ создания и оптимизации параметров современного горного оборудования для подводной добычи полезных ископаемых» (ГП-452, № ГР 0112U000871), «Разработка метода проектирования перспективных конструк-

ций горных машин на основе рекуррентного метамоделирования» (ГП-470, № ГР 0114U006102), «Теоретико-прикладные основы создания энергоэффективных и экологически безопасных систем глубоководного подъема полезных ископаемых» (ГП-485, № ГР 0116U004622), 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., соответствует теме заявки на получение гранда Европейского союза «Горизонт 2020» (№ 689446) от 21 апреля 2015 г.

Цель работы заключается в обосновании параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО и повышении ее удельной производительности за счет использования пульсирующего давления и установления зависимостей основных параметров машины от показателей процесса фильтрования, а также разработке методики определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- анализ существующих методов и устройств для обезвоживания тонкодисперсных суспензий механическим способом, а также исследований по обоснованию параметров фильтровальных машин;
- определение основных параметров фильтровально-пульсационной машины и установление зависимостей этих параметров от показателей процесса фильтрования тонкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении;
- определение параметров и разработка экспериментальной установки для моделирования работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания тонкодисперсной суспензии;
- проведение экспериментальных исследований процесса обезвоживания ГВОМО при статическом и пульсирующем давлении в лабораторных условиях;
- построение математических моделей расчета параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО, работающей в режиме пульсирующего и статического давления, и оценка их адекватности;

- определение рациональных параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО;
- разработка конструкции и методики расчета параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО.

Объект исследований – процесс обезвоживания глубоководных органоминеральных осадков в фильтровально-пульсационной машине методом фильтрации при пульсирующем давлении.

Предмет исследований – режимные и конструктивные параметры фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания глубоководных органоминеральных осадков и их влияние на процесс фильтрации.

Идея работы заключается в использовании пульсации и учета влияния статической составляющей давления, коэффициента динамичности и частоты пульсации давления на технологические показатели процесса фильтрации тонкодисперсной суспензии, за счет чего повышается удельная производительность фильтровально-пульсационной машины.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовался комплексный метод решения научных задач. Данный метод включает в себя: теоретические исследования процесса фильтрации мелкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении, которые базируются на фундаментальных положениях механики сплошных сред и основных уравнениях движения вязкой жидкости в пористой среде (Навье-Стокса); методы физического моделирования, используемые при создании лабораторной установки; метод научно обоснованной постановки эксперимента с использованием теории регрессионного анализа и математической статистики; экспериментальные исследования процесса фильтрации ГВОМО в лабораторных условиях.

Научные положения, которые выносятся на защиту:

1. При фильтрации тонкодисперсной суспензии ГВОМО в фильтровально-пульсационной машине время фильтрации находится в экспоненциальной зависимости от частоты пульсации давления и обратно пропорцио-

нально статической составляющей давления с показателем степени, линейно зависящим от частоты.

2. Для обеспечения влажности ГВОМО от 45 до 50% при обезвоживании в фильтровально-пульсационной машине рекомендованными параметрами являются: частота пульсации давления от 50 до 60 Гц; величина статической составляющей давления от 1 до 2 МПа; коэффициент динамичности 0,3; расстояние между фильтровальными перегородками от 8 до 15 мм.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые разработана математическая модель, определяющая время фильтрования ГВОМО в фильтровально-пульсационной машине, работающей в режиме статического давления от 1 до 7 МПа, которая учитывает изменение влажности суспензии в диапазоне от 68% до 30%.

2. Впервые получена математическая модель, определяющая время фильтрования ГВОМО в фильтровально-пульсационной машине, работающей в режиме пульсирующего давления, в зависимости от статической составляющей давления от 1 до 4 МПа, коэффициента динамичности 0,3, частоты пульсации давления от 20 до 60 Гц и конечной влажности продукта от 68% до 30%.

3. Впервые установлено, что при фильтровании ГВОМО в фильтровально-пульсационной машине при пульсирующем давлении от 1 до 4 МПа с частотой пульсации от 20 до 60 Гц и коэффициентом динамичности 0,3 удельная производительность машины для режима ее работы при пульсирующем давлении на 40 – 58% выше, чем для режима без пульсации.

4. Впервые установлено, что при фильтровании ГВОМО в фильтровально-пульсационной машине для частоты пульсации от 50 до 60 Гц с увеличением статической составляющей давления от 1 до 4 МПа приращение удельного объема фильтрата, вызываемое динамической составляющей давления, будет постоянным и зависеть лишь от времени фильтрования.

5. Впервые установлено, что при обезвоживании ГВОМО в фильтровально-пульсационной машине при пульсирующем давлении от 1 до 4 МПа с час-

тотой пульсации в диапазоне от 20 до 60 Гц, изменение коэффициента динамичности в пределах от 0,3 до 0,9 оказывает незначительное влияние на процесс фильтрования.

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечены использованием фундаментальных методов механики сплошной среды, механики грунтов, теории фильтрования, математической статистики и регрессионного анализа в сочетании с применением научно обоснованных методов постановки экспериментальных исследований. Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительной сходимостью экспериментальных и расчетных данных. Для математической модели расчета параметров фильтровально-пульсационной машины, работающей в режиме пульсирующего давления при обезвоживании ГВОМО, максимальное относительное отклонение расчетных значений удельного объема фильтрата от экспериментальных составило 21% при доверительной вероятности 0,9; средняя суммарная относительная ошибка аппроксимации экспериментальных данных расчетными составила 6%, при этом коэффициент детерминации равен 0,98. Воспроизводимость результатов исследований обеспечивалась использованием стандартных измерительных приборов и типовой регистрирующей аппаратуры. Адекватность математических моделей – методами критериальной оценки согласно теории математической статистики и регрессионного анализа.

Научное значение работы заключается в установлении зависимости времени фильтрования ГВОМО в фильтровально-пульсационной машине от давления, коэффициента динамичности, частоты пульсации давления, влажности материала, высоты фильтруемого слоя суспензии и показателей, характеризующих свойства тонкодисперсной суспензии ГВОМО.

Практическое значение работы состоит в разработке методики определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО (камерного фильтр-пресса с пульсатором), позволяющей определить рациональные конструктивные и режимные параметры машины и методики оп-

ределения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО со шнековой выгрузкой осадка; на уровне изобретения предложена конструкция фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания тонкодисперсных суспензий.

Реализация результатов. Разработана методика определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания морских органических осадков, которая принята к использованию при разработке фильтровальных машин на предприятии ПАО «БМЗ «Прогресс» (акт от 12.04.2016), внедрена в институте с проектирования горных предприятий ГВУЗ «НГУ» (акт от 03.03.2016) и филии «ЦЗФ» Павлоградская» ПАО «ДТЕК Павлоградуголь» (акт от 14.04.2016); методика определения параметров вибрационной фильтровальной машины со шнековой выгрузкой осадка для обезвоживания ГВОМО, которая внедрена на предприятии ООО «Океанмашэнерго» (акт от 13.05.2016).

Личный вклад автора. Автором самостоятельно сформулированы цель и задачи исследований, научные положения и новизна. Выполнены теоретические исследования процесса фильтрации тонкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении, а также разработана методика экспериментальных исследований. При участии автора разработана и изготовлена конструкция лабораторной фильтровальной установки, поставлены и проведены экспериментальные исследования. Разработана инженерная методика расчета параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания глубоководных органических осадков. Автором определены перспективные направления совершенствования фильтровально-пульсационных машин, а также разработаны математические модели, определяющие основные параметры фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО, работающей в режиме пульсирующего и статического давления.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку: на XII Международ-

ной конференции по открытой и подводной разработке полезных ископаемых (г. Варна, Болгария, 2013 г.); на Международной конференции «Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта 2014» (г. Днепропетровск, 2014 г.); на Международной конференции «Форум горняков – 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.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 16 печатных трудов, из которых 9 статей в научных журналах и сборниках трудов в специализированных профессиональных изданиях, из них в том числе 3 в иностранных специализированных изданиях, 5 тезисов докладов на конференциях, получен патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников, 8 приложений. Основная часть работы содержит 122 страницы машинописного текста и 44 страницы, полностью заполненные рисунками и таблицами. Список использованных источников на 14 страницах из 128 наименований и 34 страницы приложений.

РАЗДЕЛ 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОСАДКОВ ЧЕРНОГО МОРЯ

1.1 Характеристика глубоководных органо-минеральных осадков Черного моря как объекта обезвоживания

Глубоководные органо-минеральные осадки [1] покрывают значительную площадь дна Черного моря. Первые исследования данных осадков были проведены еще во второй половине XIX века и продолжаются до сих пор. Их геологические особенности хорошо описаны в работах А.Е. Бабинца [1, 2], А.П. Зиборова [3], Е.Ф. Шнюкова [4, 5], В.А. Емельянова [6], Д.П. Димитрова [7] и др.

В настоящее время исследованиями глубоководных осадков Черного моря занимаются: Государственное научное учреждение «Отделение морской геологии и осадочного рудообразования» НАН Украины под руководством Е.Ф. Шнюкова, Институт океанологии Болгарской академии наук (П.С. Димитров, Д.П. Димитров и др.), а также другие научные учреждения государств Причерноморского региона. В ходе научно-исследовательских экспедиций на НИС «Академик», «Профессор Водяницкий», «Ломоносов», «Витязь», «Владимир Паршин» и др. был получен значительный объем данных о свойствах, распространении и условиях залегания глубоководных осадков Черного моря [7].

На сегодняшний день особый интерес представляют глубоководные органо-минеральные осадки (ГВОМО) Черного моря, залегающие на глубине свыше 400 м, для которых характерно повышенное содержание органического углерода $C_{\text{орг}}$ (свыше 3%). К ним относятся кокколитовые, сапропелевые, сапропелесодержащие и диатомовые осадки Черного моря.

Ценным компонентом ГВОМО является аморфное бесструктурное органическое вещество, называемое сапропелем. Морской сапропель (от греч. «са-

прос» – гнилой, «пелос» – ил) представляет собой темное вещество слоистой структуры, напоминающее на ощупь каучук, имеет слабый запах сероводорода. Черноморские сапропели описываются в трудах [4, 8 – 13]: П.Н. Куприна, К.М. Шимкуса, Ф.А. Щербакова, Т.С. Блохиной, П.С. Димитрова, Д.П. Димитрова, Е.Ф. Шнюкова, Т.С. Куковской и др.

По результатам проведенных в Украине и Болгарии исследований было установлено, что одной из наиболее перспективных сфер применения ГВОМО Черного моря является аграрно-химический комплекс. Использование ГВОМО в качестве удобрений позволяет значительно повысить урожайность при уменьшении весовой дозы вносимых удобрений [14]. Удобрения на основе ГВОМО могут применяться в земледелии, а также на зараженных радионуклидами и тяжелыми металлами землях. В настоящее время также проводятся исследования по применению ГВОМО в медицине, косметологии, строительстве, нанотехнологиях и др. областях [15, 16].

Сапропелевые осадки, как правило, залегают под слоем кокколитовых илов мощностью 0,5 – 1,0 м от поверхности морского дна. Мощность сапропелевого слоя составляет от 0,1 м до 0,5 м [4]. Кокколитовые илы в определенной степени обогащенные микроэлементами и органическим веществом, поэтому вместе с сапропелевыми илами представляют интерес для их комплексного использования, что позволяет ввести понятие технологического слоя, который может отрабатываться как единый горизонт [17, 18].

Химический состав ГВОМО приведен в таблице 1.1 [5].

Таблица 1.1 – Химический состав ГВОМО

1	Хим. эл-т	C _{орг}	CaCO ₃	SiO _{2вал}	SiO _{2аморф}	Al ₂ O ₃	Na ₂ O
2	Содержание, %	1,7-22,9	17,0	20-50	<10	5-16	0,9-4,4
1	Хим. эл-т	K ₂ O	P ₂ O ₅	Fe	Mn	Ti	Mo
2	Содержание, %	1-2,8	0,02-0,3	2,5-5	<5	0,15-0,2	0,02

Кроме приведенных в табл. 1.1 элементов, в ГВОМО также содержится U, Cu, Zn, Ni, As, Se, Ag, Au и др. микрокомпоненты. Среднее содержание органического углерода $C_{орг}$ в ГВОМО по площади бассейна Черного моря составляет 10,23%.

Физико-механические свойства ГВОМО Черного моря изменяются в широких пределах [2, 6, 19]. Основные физико-механические свойства сапропелевых и кокколитовых илов приведены в таблице 1.2.

Гранулометрический состав глубоководных черноморских осадков приведен в работах [1, 2, 15]. Осадки в основном сложены пелитовой (глинистой) фракцией, размеры частиц которой не превышают 10 мкм. Средние и крупные пески почти отсутствуют. Гранулометрический состав морских осадков приведен в таблице 1.3 [20].

В сапропелевых илах Западно-Черноморской впадины содержание глинистых фракций ($> 0,01$ мм) изменяется от 77,2 до 97,3%; в Восточно-Черноморской впадине глинистая фракция в среднем составляет 77,8%. [5].

Структура ГВОМО и их водные свойства описаны в работах [1, 2, 21]. Морской ил (осадки) представляет собой сложную физико-химическую систему, в состав которой в естественных условиях входят две фазы – твердая и жидкая. Твердая фаза представлена мелкодисперсным минеральным веществом, а жидкая – в основном поровой морской водой. Взаимодействие между этими фазами является сложным и зависит от физико-химических свойств минеральных частиц, содержания органического вещества, а также содержания растворенных в жидкости солей.

В черноморских осадках свободной и рыхло связанной (капиллярной) воды содержится значительно больше, чем прочносвязанной [2]. Наибольший коэффициент пористости осадков, соответствует наименьшей уплотняющей нагрузке, что говорит о сжимаемости осадков.

Средняя влажность ГВОМО (в условиях естественного залегания) составляет порядка 70%.

Таблица 1.2 – Физико-механические свойства ГВОМО Черного моря

Влажность, %	Плотность, г/см ³	Плотность частиц, г/см ³	Пористость, %	Пластическая прочность, кПа
Кокколитовый ил				
71,8-73,4	1,15-1,26	2,3-2,43	91,2-97,2	0,8-1,4
Сапропелевые илы				
64,5-75,6	1,16-1,39	2,12-2,32	83,1-95,2	2,7-5,7

Таблица 1.3 – Гранулометрический состав ГВОМО

Тип ила	Фракции (мм), содержание (%) (диапазон/среднее)						
	псамитовая		алевритовая		пелитовая		
	>0,1	0,1- 0,05	0,05- 0,01	0,01- 0,005	0,005- 0,002	0,002- 0,001	<0,001
тонкослоистый	0,2- 2,0	1,1- 2,4	10,2- 13,3	6,2-9,3	8,6-12,1	9,7-20,6	44,7- 51,2
	0,86	1,7	11,4	8,0	10,4	14,8	48,2
сапропелевый	0,1- 3,7	1,4- 28,8	7,6- 31,5	5,0-8,8	6,8-15,4	5,3-12,1	21,7- 55,0
	1,3	10,7	22,6	7,4	10,7	7,7	39,6
сапропель	0,5- 9,3	0,7- 31,7	22,3- 37,1	4,3- 12,8	5,4-9,1	3,6-9,1	25,4- 44,7
	4,8	12,1	27,4	9,0	7,4	5,4	33,7
глинистый	0,1	2,3	16,7	13,2	16,5	5,0	46,2

Частицы ГВОМО имеют четко выраженную пластинчатую (хлопьевидную) форму. Удельная поверхность этих частиц очень велика и зависит не только от размеров самих частиц, но и от их минерального состава.

Наиболее близким по гранулометрическому составу и физико-механическим свойствам к ГВОМО являются озерные сапропелевые илы [20, 22]. Обобщенная характеристика гранулометрического состава морских ГВОМО и озерных сапропелей представлена в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Гранулометрический состав морских ГВОМО и озерного сапропелевого ила

Тип ила	Фракции (мкм), содержание (%)				
	< 5	5-10	10-50	50-100	100-250
Морские ГВОМО	6,8-65,6	4,3-20,8	7,6-37,1	0,7-11,7	0,1-9,3
Озерные сапропели	2,0-30,0	2,1-83,4	6,9-88,5	0,1-12,6	0,1

В морских ГВОМО содержание фракции < 5 мкм приблизительно в 2 раза выше, чем у озерных сапропелей. Естественная влажность ГВОМО и озерных сапропелей почти одинаковая и зависит от степени уплотнения ила (70-75% для уплотненных слоев и выше 75% – для верхнего текучего слоя) [22]. Содержание органического вещества в озерных сапропелевых илах выше, чем у морских осадков и составляет от 10 до 90%.

Одной из основных отличительных особенностей ГВОМО, в сравнении с озерными илами, является высокое содержание солей, растворенных в воде (жидкой фазе материала). Из-за большой удельной поверхности ГВОМО, обусловленной высоким содержанием тонкодисперсной фракции, значительная часть влаги в материале удерживается двойным электрическим слоем за счет притяжения ионов солей, что сильно влияет на влажность материала, и следовательно, усложняет удаление влаги.

Таким образом, ГВОМО Черного моря можно рассматривать как тонкодисперсную (илистую) суспензию с особыми свойствами: высокой влажностью, склонностью к налипанию, мелкодисперсной структурой, высокими вязкостными свойствами, содержащую органическое вещество ($C_{\text{орг}}$) и значительное количество солей, растворенных в ее жидкой фазе.

1.2 Анализ и классификация оборудования для обезвоживания мелкодисперсных суспензий механическим способом

В настоящее время опыт обезвоживания ГВОМО Черного моря в промышленных масштабах отсутствует, а использование существующего оборудования, используемого для обезвоживания подобных тонкодисперсных суспензий, применительно к морским осадкам требует проведения исследований.

Поскольку горно-добычной комплекс будет расположен в море, для достижения удовлетворительных экономических показателей его работы, а также обеспечения транспортабельности добытого сырья целесообразным является организация первичного обезвоживания материала в месте проведения добычных работ [23]. В условиях ограниченного количества энергоресурсов для предварительного обезвоживания ГВОМО наиболее применимы механические методы, позволяющие снизить влажность осадков до 30 – 50%. Для большей степени обезвоживания необходимо применять энергозатратные термические методы (например, обезвоживание в сушильных установках, вакуумирование).

Оборудование для механического обезвоживания илистых суспензий можно разделить на несколько классов в зависимости от способа добычи ила, способа разделения суспензии и силового воздействия (рис. 1.1) [24]. К основным методам механического обезвоживания суспензий можно отнести осаждение (или сгущение) и фильтрование [25 – 28].

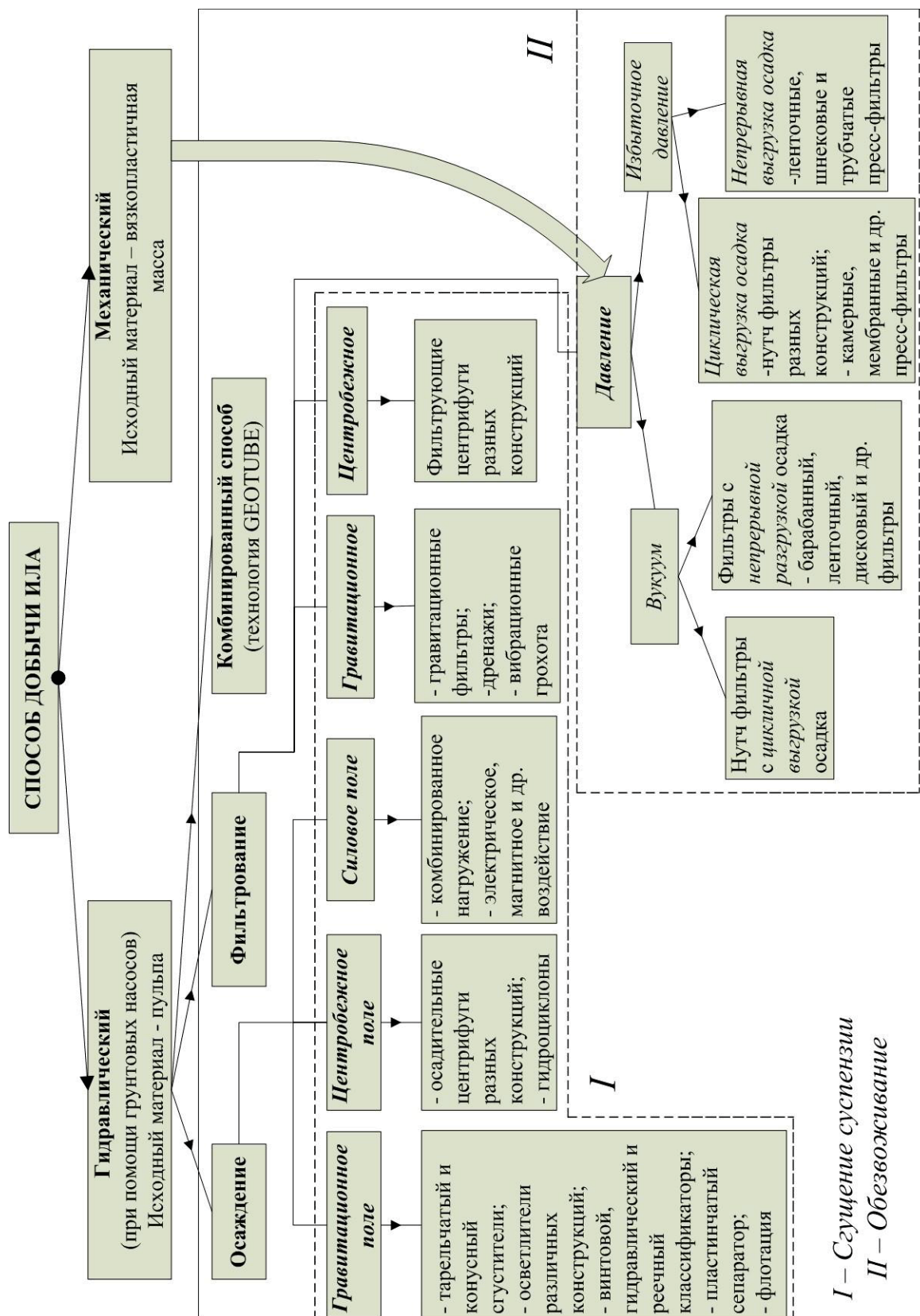
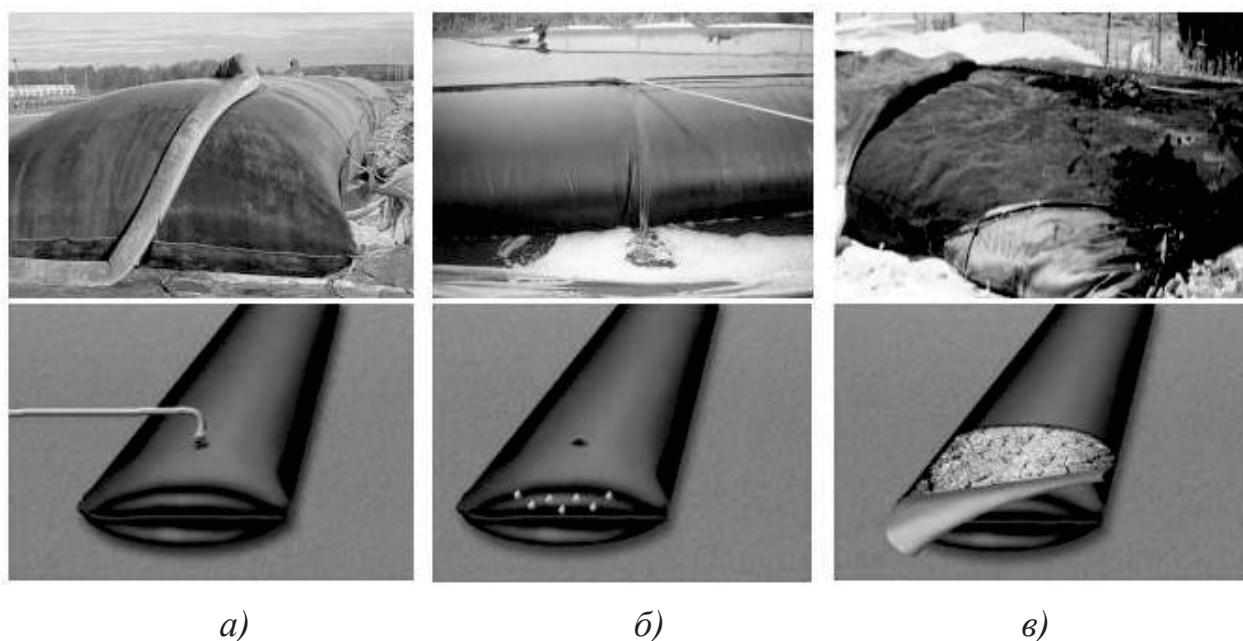


Рисунок 1.1 – Классификация оборудования для обезвоживания мелкодисперсных суспензий

При гидравлической добыче илов с использованием грунтовых насосов исходный материал представляет собой пульпу. Отделение твердого компонента от воды происходит, как правило, в два этапа (рис. 1.1): на этапе *I* осуществляется повышение концентрации твердого компонента в исходной суспензии (сгущение) методами осаждения или фильтрования; после сгущения суспензии до определенной влажности обезвоживание продукта осуществляется на фильтровальных машинах и установках (этап *II*) [25, 29 – 31].

Альтернативой вышеуказанным способам обезвоживания илистых суспензий служит технология обезвоживания в специальных геотекстильных контейнерах – технология Geotube (рис. 1.2), комбинирующая метод фильтрования и осаждения [32 – 35]. Данная технология эффективно используется в странах ЕС и США, а также прошла испытания в России и Украине при обезвоживании озерного сапропеля и угольного шлама.



а) – наполнение контейнера; *б)* – обезвоживание ила; *в)* – разгрузка

Рисунок 1.2 – Принцип действия технологии обезвоживания Geotube

Преимущества технологии Geotube: низкие капитальные затраты и энергоемкость, простота эксплуатации, относительно большая производительность,

экологичность. К недостаткам относятся: большие затраты времени на обезвоживание материала (1 – 3 месяца и более), значительная занимаемая площадь, относительно невысокая степень обезвоживания.

В промышленности для сгущения тонкодисперсных суспензий с низкой концентрацией твердого используются машины, работающие в гравитационном и центробежном поле [25, 26, 30, 36 – 41]. Установки, работающие в гравитационном поле, как правило, имеют большие габариты и предназначены для сгущения суспензий с массовой концентрацией твердого до 20% [24]. Альтернативой данному типу оборудования выступают осадительные машины, работающие в центробежном поле. Как правило, эти установки используются для сгущения суспензий с массовой концентрацией менее 5%. Также существуют центрифуги для сгущения высококонцентрированных суспензий с массовой концентрацией до 40%. Однако, потери твердого компонента при обезвоживании илистых суспензий на этих установках составляют от 20 до 30% [42].

Использование осадительных машин и аппаратов (работающих в гравитационном поле) для обезвоживания илистых суспензий, целесообразно лишь в условиях суши из-за больших габаритов оборудования и специфики его работы. Применение осадительных центрифуг в морских условиях также является затруднительным в связи с большими потерями полезного компонента, уносимого вместе с фильтратом в процессе работы машины.

На начальных этапах освоения месторождений морских ГВОМО планируется циклично-ковшовая разработка, осуществляемая при помощи канатно-ковшовых землечерпательных снарядов [17]. Исходная влажность добытого таким способом материала в среднем составляет 68 – 75%, а массовая концентрация твердого – от 29 до 35% в зависимости от типа ила. Исходя из опыта применения озерных сапропелей, ГВОМО с такой влажностью можно использовать в виде лечебных грязей (при этом не требуется его обезвоживание) [22].

Поскольку наиболее перспективной областью применения ГВОМО является аграрно-химический комплекс, влажность конечного продукта должна составлять порядка 60% – для удобрений и 25% – для кормовых добавок [22].

Установлено, что после подъема ГВОМО на судно необходимо снизить их влажность до 45 – 50% [23]. С точки зрения энергоемкости процесса обезвоживания ГВОМО эта влажность является рациональной, а продукт с такой влажностью можно транспортировать непосредственно потребителю без последующего обезвоживания. ГВОМО с влажностью 45 – 50% являются относительно плотными и пластичными (материал не течет), при этом их удобно транспортировать в контейнерах различных типов.

Фильтровальное оборудование является более универсальным классом обезвоживающих машин, используемых для обезвоживания тонкодисперсных суспензий с массовой концентрацией 0,2% – 80% [43, 44]. Фильтровальные машины могут быть приспособлены к морским условиям работы, однако они являются более сложными в конструктивном исполнении и обслуживании в сравнении с осадительными установками. Потери полезного компонента при разделении мелкодисперсных суспензий фильтрованием – минимальные.

1.3 Анализ фильтровального оборудования для обезвоживания мелкодисперсных суспензий

Фильтровальное оборудование можно разделить на два типа: машины, работающие в центробежном поле (фильтровальные центрифуги) и машины, работающие под давлением или вакуумом (фильтр-прессы и вакуум-фильтры). В зависимости от способа выгрузки осадка различают фильтры периодического и непрерывного действия. Основным элементом таких машин является фильтровальная перегородка, которая может быть выполнена в различном исполнении: жесткая (керамические и др. фильтры), зернистая (песочный фильтр и др.) и тканевая [44].

В таблице 1.5 приведены основные типы наиболее распространенных в промышленности фильтровальных машин для обезвоживания мелкодисперсных суспензий с массовой концентрацией > 29% (близкой к ГВОМО) [24].

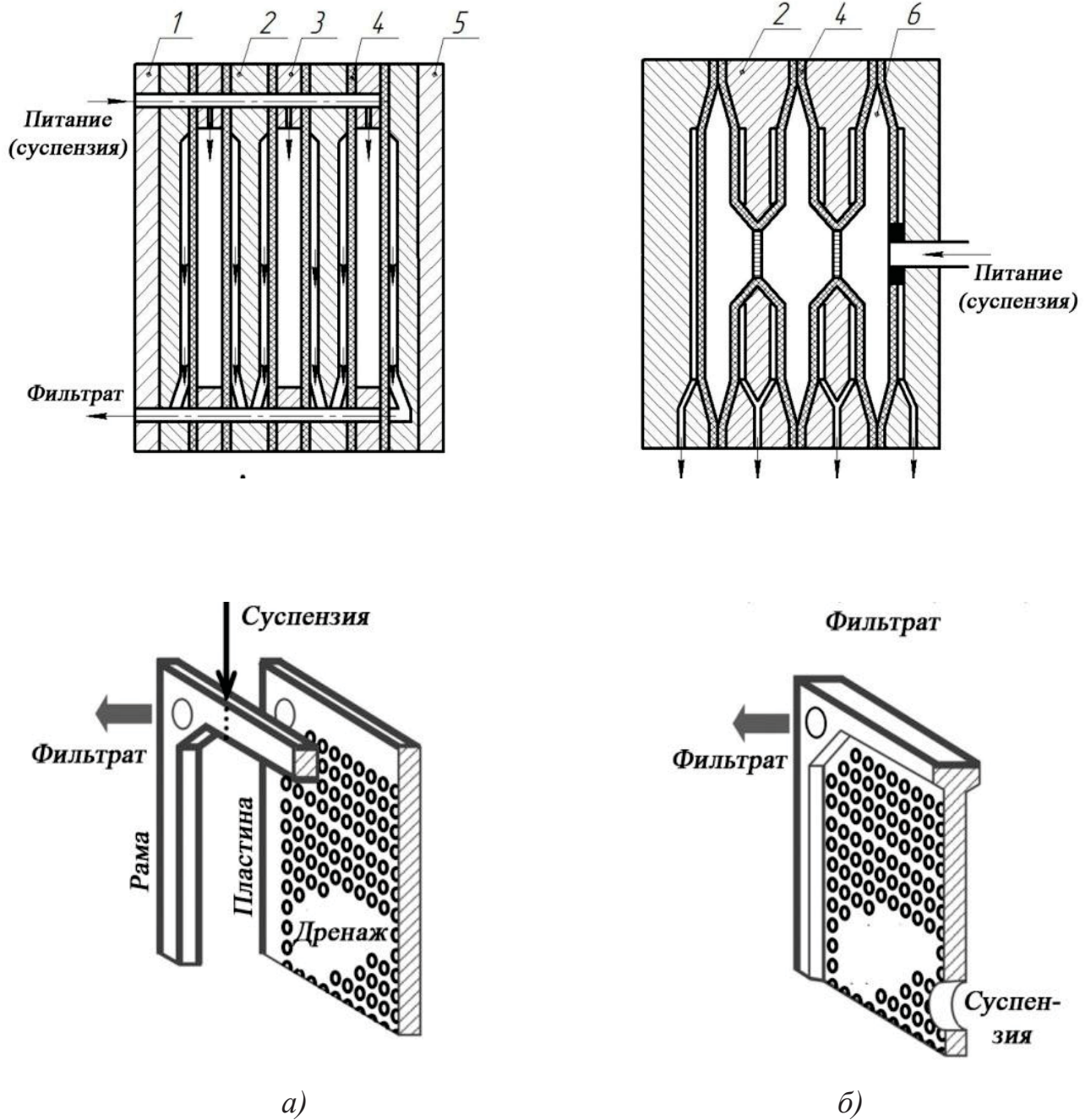
Таблица 1.5 – Основные характеристики фильтровальных машин

Оборудование	Сила	Размер частиц, мкм	Масс. концентрация, %
Центрифуга с ножевым съемом садка	Центробежная 800-2200g	2-1000	4-30
Горизонтальный мембранный фильтр-пресс	Давление 0,8-10 МПа	1-200	0,3-30
Вертикальный мембранный фильтр-пресс	Давление 0,8-10 МПа	1-200	0,2-30
Трубчатый фильтр-пресс	Давление 1,5-16 МПа	1-200	0,3-30
Шнековый фильтр-пресс	Давление до 40 МПа	1-200	10-80
Ленточный фильтр-пресс	Давление до 1,5 МПа	1-200	0,2-30

В отличие от традиционных перерабатываемых суспензий (текучих суспензий с невысокой концентрацией твердого компонента), ГВОМО представляют собой вязкую среду (сгущенную суспензию), по свойствам близкую к гелям [45, 46]. Обезвоживание таких материалов затруднительно и, как правило, происходит при высоком избыточном давлении (от 1 до 40 МПа). Процесс фильтрования при относительно высоком давлении осуществляется в шнековых, камерных, рамных, трубных и др. фильтр-прессах [22, 25, 26, 30, 44, 47].

Рамные и камерные фильтр-прессы представляют собой машины, состоящие из фильтровальных пакетов (камер), образованных двумя фильтровальными поверхностями, внутрь которых под давлением подается обезвоживаемая суспензия. Их отличие заключается в конструктивных особенностях фильтровальных камер и способе подачи суспензии. Схемы конструкции фильтровальных камер рамного и камерного фильтр-прессов приведены на рисунке 1.3.

Рамный фильтр-пресс (рис. 1.3, а) состоит из набора фильтровальных плит 2 и полых рам 3 одинакового размера. Между рамами и плитами находится слой фильтровальной ткани 4, покрывающей всю поверхность.



1 – подвижная плита; 2 – фильтровальная плита; 3 – полая рама; 4 – фильтровальная ткань; 5 – неподвижная плита; 6 – камера

Рисунок 1.3 – Схемы конструкции фильтровальных камер рамного (а) и камерного (б) фильтр-прессов

Плиты, фильтровальная ткань и рамы фильтр-пресса (рис. 1.3) зажаты между подвижной плитой 1 и неподвижной опорной плитой 5. В плитах и рамах предусмотрены отверстия для подачи суспензии и отвода фильтрата.

Основные достоинства рамных фильтр-прессов: возможность реализации высокого давления фильтрования (в сравнении с камерными фильтр-прессами); высокая производительность; высокая степень обезвоживания. К недостаткам относятся: сложность конструкции и металлоемкость; высокая стоимость.

Камерный фильтр-пресс состоит из набора плит 2 (рис. 1.3, б) с отверстием в центре, между которыми укладывается фильтровальная ткань 4 таким образом, чтобы не закрывались центральные отверстия [42]. При сжатии плит между ними образуются камеры 6, в которые под давлением подается суспензия. Отвод фильтрата осуществляется в каналы фильтровальных плит.

Процесс обезвоживания в таких машинах проходит в две стадии [44]. На первой стадии осуществляется процесс фильтрования с образованием слоя осадка в рабочей камере фильтр-пресса. После чего осуществляется отжим осадка и его разгрузка (после размыкания пластин). К достоинствам данных машин относятся: простота выгрузки осадка; высокая производительность; простота контроля фильтрации и промывки. Основные недостатки: высокая трудоемкость фильтрования; тяжелые условия работы машины и быстрый износ фильтровальной ткани.

ФПАКМ (фильтр-пресс автоматический камерный механизированный) состоит из набора горизонтально расположенных одна над другой фильтрующих пластин, между которыми зигзагообразно протянута бесконечная лента фильтровальной ткани, которая приводится в движение при помощи вращающихся приводных роликов. Конструктивная схема фильтр-пресса ФПАКМ представлена на рисунке 1.4.

Фильтровальные пластины фильтр-пресса ФПАКМ располагаются с зазором между верхней упорной плитой и нижней нажимной пластиной и могут сжиматься механизмом напора. Усилие зажима воспринимают стойки. Уплотнение между плитами, и рамами осуществляется резиновыми прокладками.

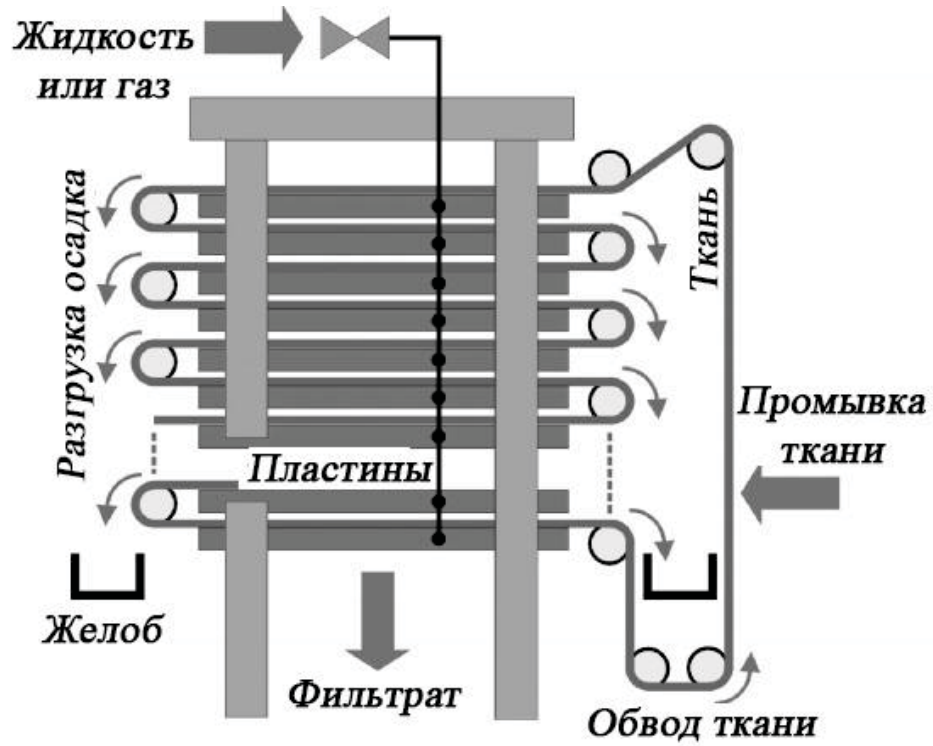


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема и общий вид фильтр-пресса ФПАКМ

Цикл работы фильтр-пресса включает стадии фильтрации, промывки и отжима, или просушки и выгрузки осадка [26, 42]. При сжатых рамах суспензия под давлением поступает в пространство над фильтровальной тканью. Жидкая фаза проходит через фильтровальную ткань, а твердая задерживается, образуя осадок. При достижении нужной толщины слоя осадка подачу суспензии прекращают и оставшуюся в полости рамы суспензию вытесняют резиновой диафрагмой, подавая к ней под давлением воду. В случае необходимости осадок промывают и затем прессуют диафрагмой или продувают сжатым газом. После этого плиты разжимаются, и осадок удаляется при помощи ножей, установленных по обе стороны установки. После снятия осадка лента проходит зону регенерации. Продолжительность цикла фильтрования составляет от 3 до 200 мин.

В последние годы за рубежом для обезвоживания тонкодисперсных материалов (в т.ч. и озерных сапропелей) часто используют непрерывно действующие ленточные фильтр-прессы (рис. 1.5) [30, 42].

Суспензия через загрузочный бункер непрерывно и равномерно распределяется по нижней фильтровальной ленте. В клиновой зоне верхняя фильтровальная лента создает равномерно возрастающее поверхностное давление, обеспечивающее формирование стабильного осадка. В зоне прессования процесс обезвоживания начинается на валке с L-образным профилем поверхности, обеспечивающим интенсивное удаление жидкости через обе ленты. Далее обезвоживаемый материал проходит через ряд прессующих валков с уменьшающимся расстоянием между валками. Увеличивающееся давление прессования и напряжение сдвига обеспечивают быстрое обезвоживание материала. Использование на конечной стадии специальных дожимных валков для лучшего отжима краевых зон осадка дополнительно увеличивает эффективность обезвоживания. Для достижения стабильно высокой производительности обе ленты непрерывно промываются водой под высоким давлением.

Достоинства ленточных фильтр-прессов: относительная дешевизна; низкий расход энергии; простота в эксплуатации и обслуживании; высокая степень обезвоживания.

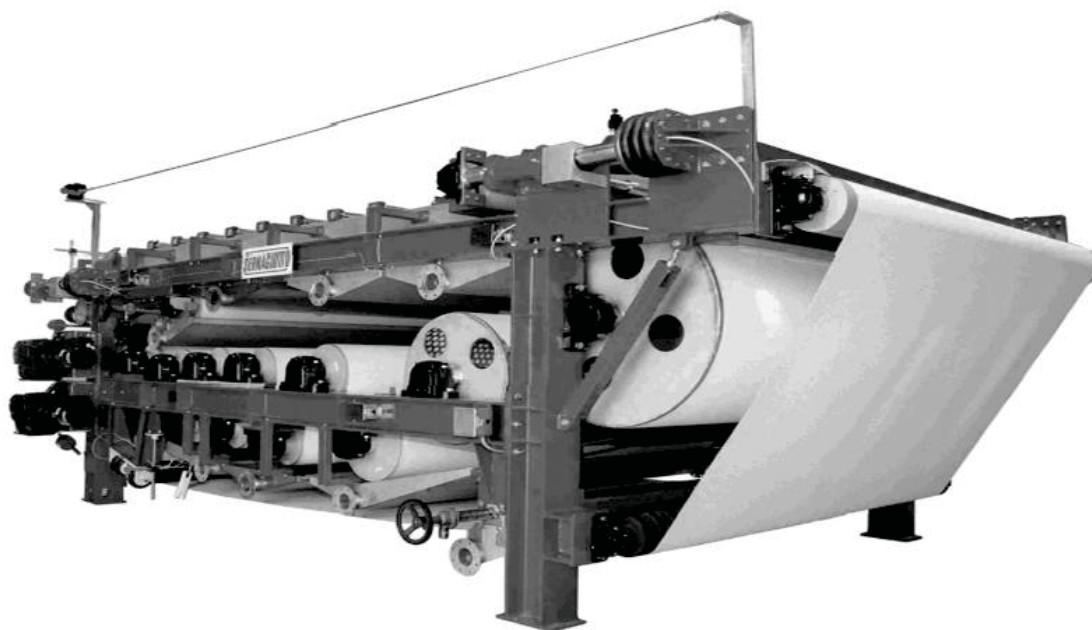
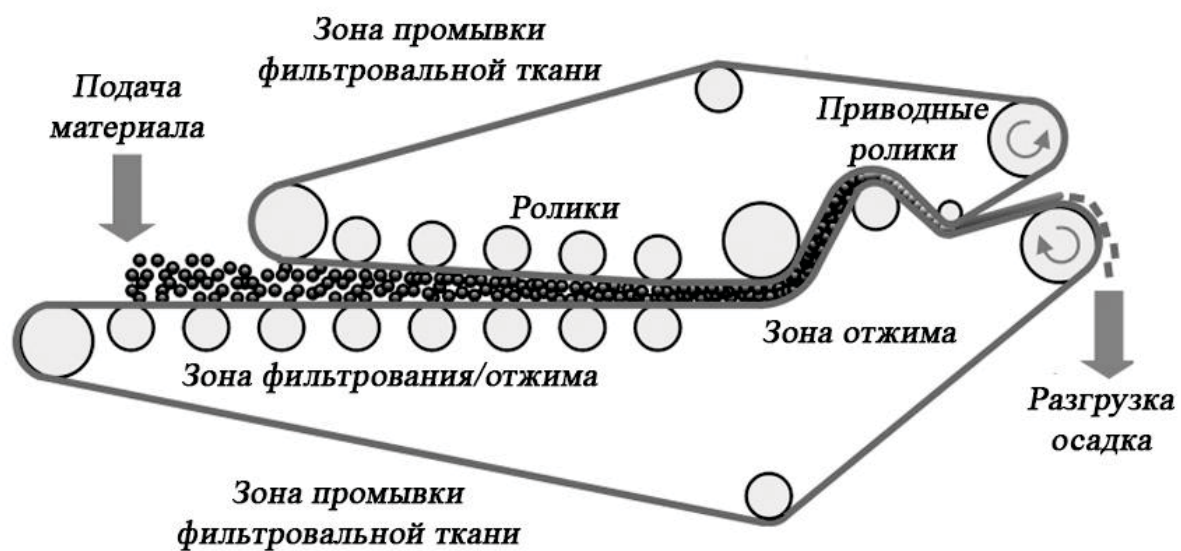


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема и общий вид ленточного фильтр-пресса

Основными недостатками ленточных фильтр-прессов являются быстрый износ фильтровальной ткани, сложность герметизации и конструкции.

Для обезвоживания любых видов осадков, образовавшихся в процессе очистки сточных вод, шламов, а также озерных сапропелей естественной влажности эффективно применяются шнековые фильтр-прессы [48 – 52].

Шнековый фильтр-пресс (рис. 1.6) состоит из шнека с переменным шагом спирали или конической конструкции, который установлен в подшипниковых опорах, и цилиндрического фильтровального элемента. Вращаясь с постоянной скоростью, шнек перемещает материал вдоль цилиндрического фильтра. В ходе перемещения материал уплотняется в зависимости от изменения объема межвиткового пространства шнека. При этом через фильтровальный элемент выдавливается фильтрат.

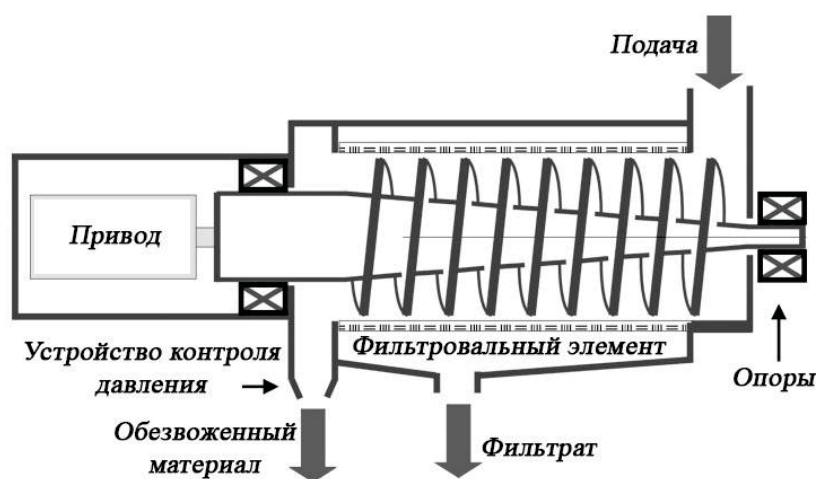


Рисунок 1.6 – Конструктивная схема шнекового фильтр-пресса

Отфильтрованная жидкость из шнекового фильтр-пресса попадает в сборник фильтрата, а уплотненный осадок разгружается через разгрузочный желоб. В конце машины установлено устройство регулирования давления.

К достоинствам шнековых фильтр-прессов относятся: компактность; возможность реализации высоких давлений фильтрования до 40 МПа; простота конструкции; небольшие затраты электроэнергии; простота в эксплуатации и

обслуживании. Основные недостатки: быстрый износ шнека и фильтровальной поверхности при обезвоживании абразивных материалов; сложность регенерации фильтровального элемента.

Современной фильтровальной машиной для обезвоживания глинистых материалов (крупностью от 1 до 100 мкм) является трубчатый фильтр-пресс [30], который состоит из двух концентрично расположенных труб, внутренняя труба которого является фильтровальным элементом. Фильтрация суспензии осуществляется путем ее подачи под давлением в кольцевой зазор между внутренним цилиндрическим фильтром и наружной трубой. В кольцевом зазоре образуется осадок, а фильтрат удаляется через внутреннюю полость фильтра. Процесс обезвоживания, как правило, протекает при давлении фильтрации от 1,5 до 16,0 МПа. Разгрузка осадка осуществляется механическим способом. Достоинствами трубчатых фильтр-прессов являются: компактность; простота конструкции; возможность осуществления регенерации фильтровального элемента. К недостаткам можно отнести: сложность регенерации фильтровального элемента и невысокую производительность.

Наряду с широко распространенным фильтровальным оборудованием для механического обезвоживания илистых суспензий (в т.ч. озерных сапропелей) используется и специальное оборудование: машина для обезвоживания сапропеля с барабанными и ленточными водоотделителями [53 – 60]; гипербар-фильтры непрерывного действия («HiBar-Oiste-Filters») [61]; фильтр-прессы специальных конструкций [61 – 64].

К общим достоинствам фильтровальных машин можно отнести: возможность обезвоживания материалов с размерами частиц твердой фазы менее 1 мкм; относительно высокую степень обезвоживания; возможность обезвоживания суспензий с низкой и высокой концентрацией твердого компонента. К недостаткам относятся: сложность конструкций машин, высокая стоимость оборудования и его обслуживания.

Таким образом, для обезвоживания ГВОМО в морских условиях наиболее перспективным является применение фильтровального оборудования.

По результатам проведенного анализа фильтровальных машин и аппаратов для обезвоживания мелкодисперсных суспензий определены наиболее перспективные из них, которые могут быть использованы для обезвоживания ГВОМО с исходной влажностью, получаемой при механическом способе добычи. Среди таких машин следует выделить камерные фильтр-прессы, основным достоинством которых является высокая производительность, однако такие машины, как правило, имеют значительные габариты. Также перспективными можно считать шнековые фильтр-прессы, имеющие небольшие габариты, однако уступающие по производительности камерным фильтр-прессам.

Использование шнековых и камерных фильтр-прессов для обезвоживания морских ГВОМО требует проведения исследований, так как данный материал имеет специфические свойства, в сравнении с наиболее распространенными в промышленности тонкодисперсными суспензиями.

1.4 Современное состояние исследований процесса фильтрования мелкодисперсных суспензий

Исследованиями процесса фильтрования тонкодисперсных суспензий, который протекает в фильтровальных машинах, занимались такие ученые, как В. А. Жужиков [43], Н. Е. Леонтьев [65], И. Н. Белоглазов [66], Х. Анлауф [61], Й. Томас [67], Ширато [68], Чи Тиен [69], А. Рустон [29], А. А. Березняк [70], А. Г. Касаткин [44] и др.

В общем виде процесс разделения суспензии на фильтровальной перегородке при воздействии избыточного давления можно рассматривать как процесс «фильтрование-консолидация», который описывается дифференциальным уравнением Тиллера-Ширато [71]:

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\varepsilon_s \frac{C}{\mu} \frac{\partial p_s}{\partial x} \right] - \frac{4}{\mu d_p} \frac{\partial}{\partial x} [\varepsilon_s C \lambda_w \tan \varphi_w p_s] + V'_s \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x} \quad (1.1)$$

$$(0 \leq x \leq h),$$

где ε_s – коэффициент уплотнения, дол. ед.; t – время, с; C – проницаемость осадка, м^2 ; p_s – давление, передающееся на частицы обезвоживаемого материала, Па; μ – динамическая вязкость жидкой фазы суспензии, Па·с; d_p – эквивалентный диаметр частиц материала, м; λ_w – давление на боковую стенку фильтра, Па; φ_w – угол трения о стенки фильтра, рад; V'_s – скорость фильтрования, м/с; S – площадь фильтровальной поверхности, м^2 ; x – координата, м; h – высота слоя осадка, образованного на фильтровальной перегородке (ФП), м.

Уравнение (1.1) получено на основании общих законов движения вязкой жидкости (уравнения Навье-Стокса) и уравнения неразрывности. Решение этого уравнения представляет определенные трудности, поэтому на практике для расчета параметров фильтрования используют более простые его формы или частные решения.

Процесс «фильтрование-консолидация» состоит из двух этапов: фильтрования (первый этап) и консолидации (второй этап). В процессе фильтрования суспензии при перепаде давления ΔP (рис.1.7) образуется осадок с некоторой средней влажностью. После этого осуществляется выдавливание жидкости из осадка (консолидация) до полного его уплотнения.

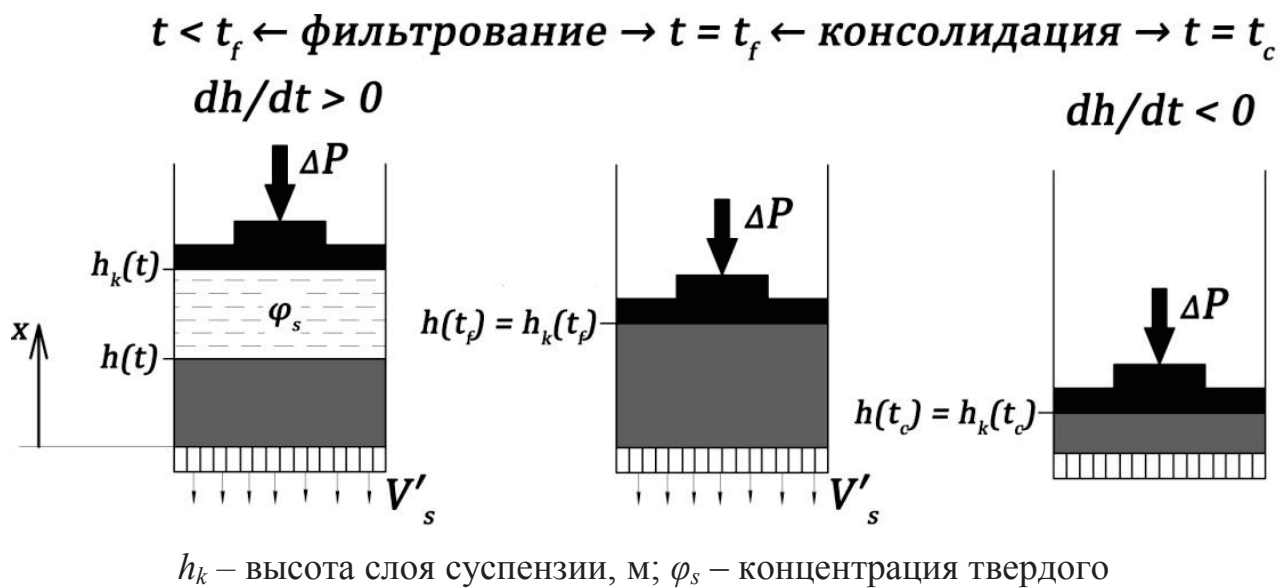


Рисунок 1.7 – Схема процесса фильтрование-консолидация

На практике для расчета параметров процесса фильтрования часто используется эмпирическое уравнение Э. Дарси, обозначаемое в литературе, как основное уравнение фильтрования [65]. В дифференциальной форме это уравнение имеет вид:

$$\frac{dV}{Sdt} = \frac{C \cdot \Delta P}{\mu \cdot h}, \quad (1.2)$$

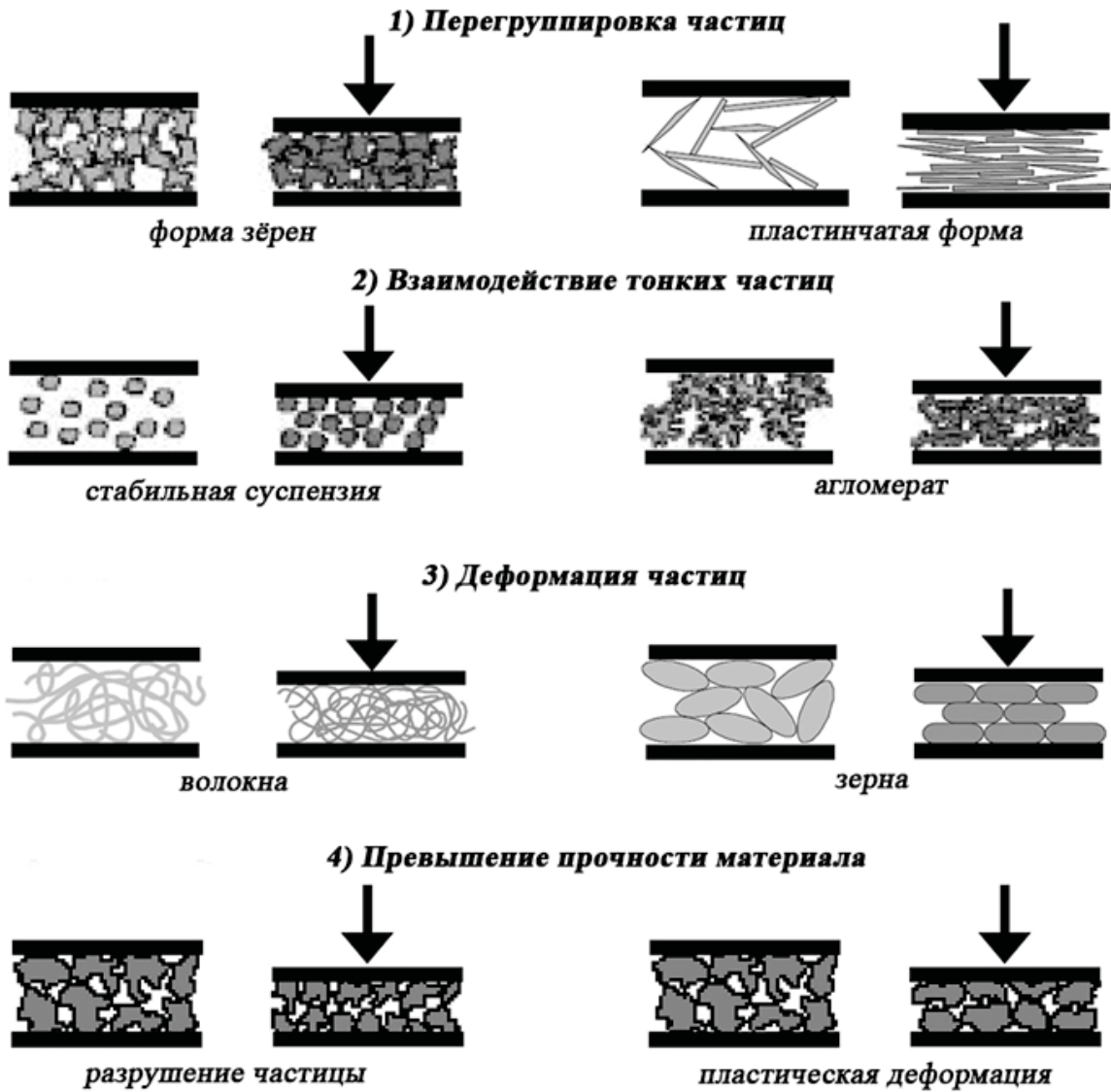
где V – объем фильтрата, м^3 ; ΔP – перепад давления, Па.

Данную зависимость (1.2) использовали в своих работах А.А. Березняк при моделировании процесса фильтрования дистена, Е.Е. Гарковенко [72] при обосновании параметров процесса обезвоживания угольного шлама и др.

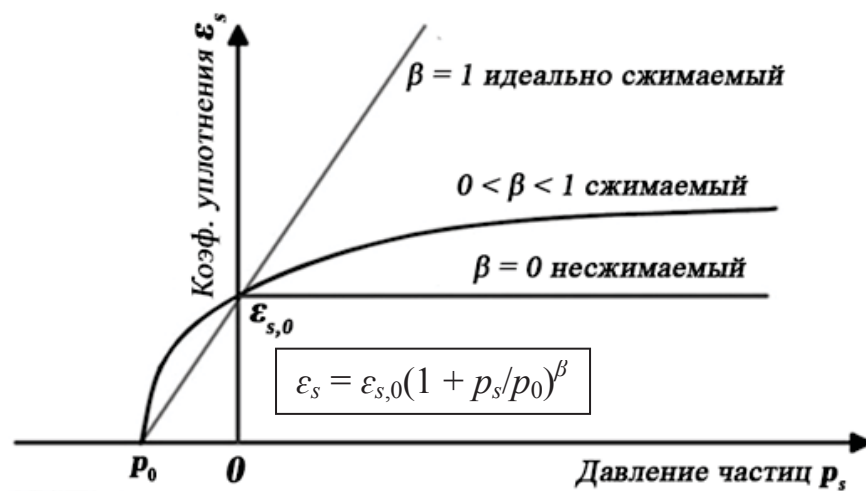
В зависимости от свойств суспензии процесс фильтрования можно разделить на фильтрование с образованием несжимаемых и сжимаемых осадков. Твердая фаза суспензии состоит из частиц различной формы, размеров, плотности. При воздействии на суспензию сжимающего давления может происходить перегруппировка (перестроение) частиц, их деформация или разрушение, что способствует сжимаемости осадков (рис. 1.8, *а*) [73]. Фильтровальные перегородки (ФП) также могут быть сжимаемыми (с переменным сопротивлением потоку жидкости) и несжимаемыми.

К несжимаемым осадкам можно отнести осадки, твердая фаза которых представлена твердыми частицами с размерами более 100 мкм (пески, металлические порошки и др.). К несжимаемым фильтровальным перегородкам относятся фильтровальные перегородки из керамических, стеклянных или металлических порошков.

Сжимаемость осадка можно определить по компрессионной зависимости (рис. 1.8, *б*) [67]. На рис. 1.8 (*б*) приняты обозначения: $\varepsilon_{s,0}$ – начальная пористость материала; p_0 – начальное давление (минимальное давление при котором начинается процесс фильтрования), Па; β – коэффициент сжимаемости. Основная характеристика сжимаемости осадков приведена в таблице 1.6.



а)



б)

а) – причины сжимаемости осадка; б) – компрессионная зависимость

Рисунок 1.8 – Сжимаемость осадков в зависимости от состава и форм частиц

Таблица 1.6 – Характеристика сжимаемости осадков

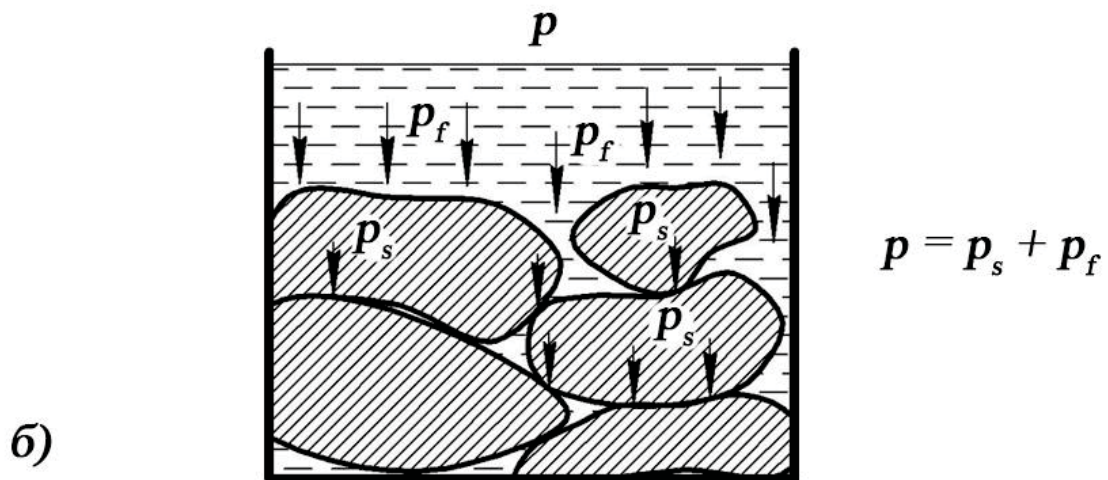
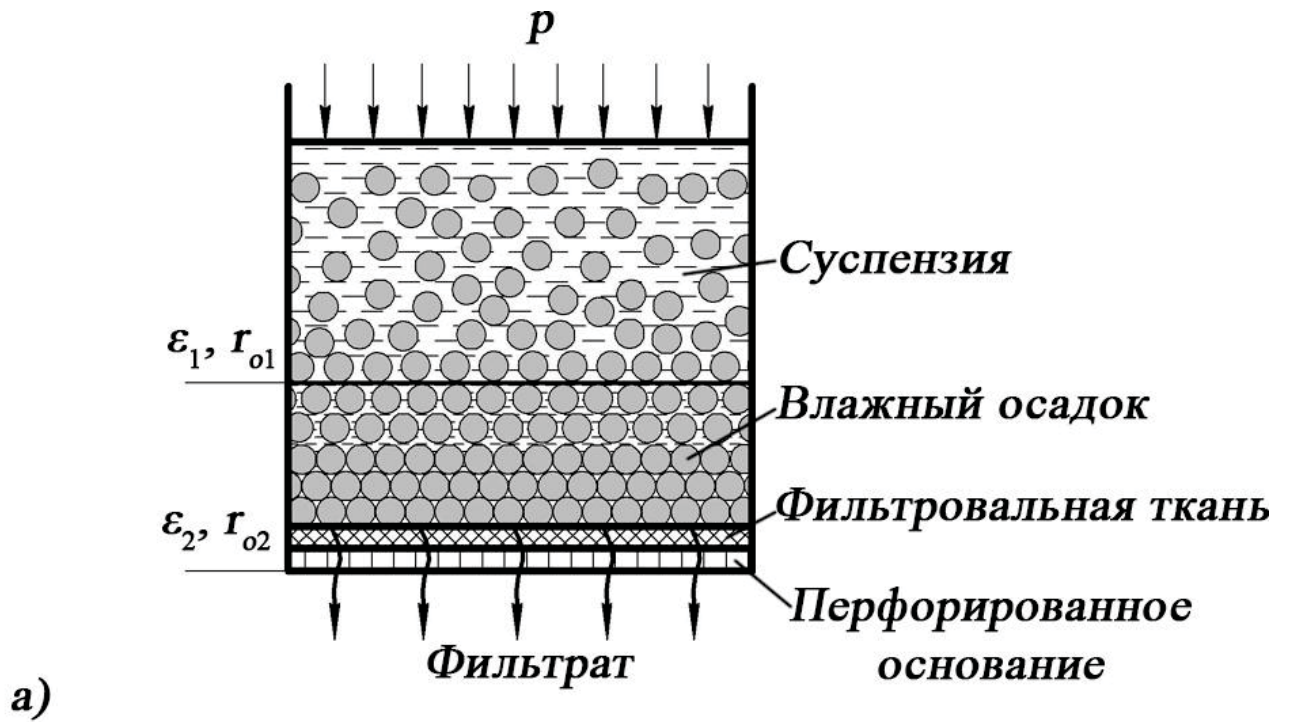
Коэффициент сжимаемости	Степень сжимаемости
$0 \leq \beta < 0,01$	несжимаемый
$0,01 \leq \beta < 0,05$	слабо сжимаемый
$0,05 \leq \beta < 0,1$	сжимаемый
$0,1 \leq \beta < 1$	сильно сжимаемый

Процесс фильтрования с образованием осадка (без дальнейшей консолидации осадка) можно представить следующим образом (рис. 1.9). При действующем на суспензию перепаде давлений ΔP , определяющемся как разность давления по обе стороны ФП с задержанными на ней частицами твердой фазы, образуется влажный осадок. Жидкая фаза суспензии вытесняется, проходя через поровое пространство осадка и фильтровальной перегородки, образуя фильтрат. Пренебрегая атмосферным давлением, действующим с противоположной стороны ФП, примем $\Delta P = p$.

Давление p , передаваемое на суспензию, в процессе фильтрования перераспределяется между давлением p_s , действующим на частицы материала, и давлением на жидкую фазу суспензии p_f (рис. 1.9, б). Для всех слоев осадка давление p_s одинаковое, а давление жидкости p_f изменяется при переходе от слоя к слою. Из этого следует, что статическое давление жидкости p_f в порах осадка уменьшается до нуля на границе с ФП пропорционально преодолеваемому сопротивлению. Поэтому в процессе фильтрования пористость осадка уменьшается ($\varepsilon_1 > \varepsilon_2$), а его удельное сопротивление потоку жидкости r_o возрастает ($r_{o1} < r_{o2}$).

Полагая, что процесс фильтрования протекает в ламинарной области (вследствие небольшого размера пор осадка и ФП, а также малой скорости движения жидкой фазы), формулу Дарси можно представить в виде [43, 66]:

$$\frac{dV}{Sdt} = \frac{p}{\mu(R_{oc} + R_{фп})}, \quad (1.3)$$



a) – фильтрование суспензии; *б)* – распределение давления в суспензии

Рисунок 1.9 – Фильтрование суспензии с образованием осадка

где R_{oc} – удельное гидравлическое сопротивление слоя осадка, м^{-1} ; $R_{фп}$ – удельное гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки, м^{-1} .

Сопротивление $R_{oc} = r_o h = r_o x_o (V/S)$ [43], где r_o – удельное объемное сопротивление осадка, м^{-2} ; x_o – отношение объема осадка к объему фильтрата. Для сжимаемых осадков удельное сопротивление r_o и сопротивление ФП $R_{фп}$ являются переменными величинами для разных слоев суспензии. Эти параметры определяются экспериментально и для практических расчетов берутся их средние значения.

Исследованием процесса фильтрования тонкозернистых угольных шламов, суспензий каолина, целлюлозы, диоксида титана и др. суспензий с образованием сжимаемых осадков занимались такие ученые, как: Г. Анлауф, Ю. Томас, Б. Райхман [67, 71]. В своих работах они приводят уравнение, в котором учитывается сжимаемость осадка:

$$\frac{dV}{Sdt} = \frac{\Delta P}{\mu(R_{фп} + \alpha_m(1 - \varepsilon)\rho_s k_0 V)}, \quad (1.4)$$

где α_m – удельное массовое сопротивление осадка, $\text{м}/\text{кг}$; ε – пористость, дол. ед.; ρ_s – плотность твердых частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$; k_0 – коэффициент пропорциональности.

В уравнении (1.4):

$$\alpha_m = \alpha_0 \left(1 + \frac{p_s}{p_0}\right)^{n_\alpha};$$

$$(1 - \varepsilon) = (1 - \varepsilon_0) \left(1 + \frac{p_s}{p_0}\right)^\beta,$$

где α_0 – удельное массовое сопротивление осадка при $p_s = 0$; ε_0 – начальная пористость материала; n_α – показатель степени.

На практике различают несколько условий протекания процесса фильтрования [43]:

1) Фильтрация при постоянном давлении ($p = const$).

Основное уравнение фильтрации для процесса с образованием несжимаемого осадка имеет вид:

$$V^2 + \frac{2SR_{\text{фп}}V}{r_o x_o} = \frac{2S^2 p t}{\mu r_o x_o}.$$

Последнее уравнение также используется для практического расчета параметров процесса фильтрации с образованием сжимаемого осадка, полагая справедливым условие, что $r_o = r_o'' + \alpha' p^{s_k}$, где r_o'' (м^{-2}), α' , s_k – коэффициенты.

2) Фильтрация с постоянной скоростью ($V'_s = const$).

Для данного процесса с образованием сжимаемого осадка при переменных значениях ΔP и r_o основное уравнения фильтрации (1.3) имеет вид:

$$\frac{\Delta P - \Delta P_{\text{фп}}}{\Delta P^{s_k}} = \mu r_o' x_o (V'_s)^2 t,$$

где r_o' и s_k – коэффициенты; $\Delta P_{\text{фп}}$ – перепад давления по обе стороны ФП, Па.

3) Фильтрация при переменной разности давлений и одновременно при переменной скорости процесса.

Для процесса фильтрации с образованием сжимаемых осадков основное уравнение имеет вид:

$$\frac{dp_s}{x_m dq} = \mu (r_m)_x V'_s,$$

где $(r_m)_x$ – удельное локальное сопротивление осадка, соответствующее p_s , м^{-2} ; $x_m dq$ – бесконечно малое приращение твердых частиц в осадке на единице поверхности (соответствующее приращению dp_s); q – объем фильтрата, полученный с единицы площади ФП, м.

Как следует из проведенного анализа, процесс фильтрования тонкодисперсных суспензий, описывается сложными дифференциальными уравнениями, решение которых требуют установления начальных и граничных условий, определяемых свойствами суспензии. На практике, как правило, используют эмпирические зависимости, полученные на основании формулы Дарси. В эти зависимости входит значительное количество постоянных параметров, определяемых опытным путем. Поэтому, исследования процесса фильтрования конкретного типа тонкодисперсной суспензии требует проведения в первую очередь значительного количества экспериментальных исследований.

1.5 Пути повышения производительности фильтровальных машин

Процесс фильтрования илистых суспензий, которые образуют сжимаемые осадки, протекает относительно медленно и требует реализации высоких давлений [74 – 76], что в свою очередь приводит к усложнению конструкций фильтровальных машин. Поэтому на практике при фильтровании мелкодисперсных суспензий осуществляют интенсификацию процесса фильтрования за счет термического, химического, электрического, физико-механического и др. воздействий на суспензию [66, 77].

Обезвоживание илистых суспензий (например, озерных илов) и тонких шламов, часто осуществляется с использованием вспомогательных веществ – коагулянтов [23, 32, 36] (химическое воздействие). Вопросы, связанные с применением коагулянтов при обезвоживании ГВОМО, их влияние на качественные показатели получаемого сырья и возможность дальнейшего применения в различных отраслях экономики в настоящий момент не исследованы.

Практически наиболее перспективными методами интенсификации процесса фильтрования остаются методы физико-механического воздействия, к которым в т.ч. относится метод вибрационного воздействия на суспензию, за счет чего в суспензии реализуется пульсирующее давление. Для реализации этого метода, в отличие от методов химического и термического воздействия (интен-

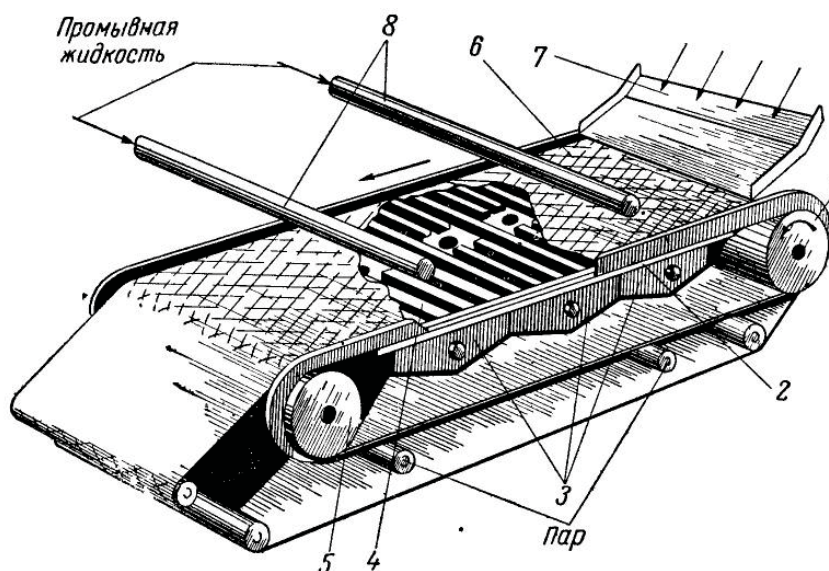
сификация происходит за счет снижения вязкости суспензии при воздействии температуры), требуется разработка новых технических решений конструкций фильтровальных машин.

В настоящее время фильтровальные машины, работающие при пульсирующем давлении, (фильтровально-пульсационные машины) не нашли широкого практического применения из-за сложности их конструкций. Наиболее распространенными в промышленности среди данных машин являются ленточные вакуум-фильтры (рис. 1.10) и вибрационные (ультразвуковые) фильтры (рис. 1.11) [78].

В ленточном вакуум фильтре (рис. 1.10) суспензия поступает на ткань по лотку 7. При движении ленты 4 и полотна 6 фильтрат отсасывается, а осадок образуется на ткани. Осадок промывается водой, поступающей из трубок 8, просушивается в вакууме и сбрасывается на перегибе полотна через барабан 5. При обратном движении ткани под столом 2 она очищается с помощью щеток или паровых форсунок. Данный фильтр снабжен пульсатором, реализующим пульсацию вакуумметрического давления. Снятия липких осадков осуществляется отдувкой сжатым воздухом или смыванием (при помощи форсунок).

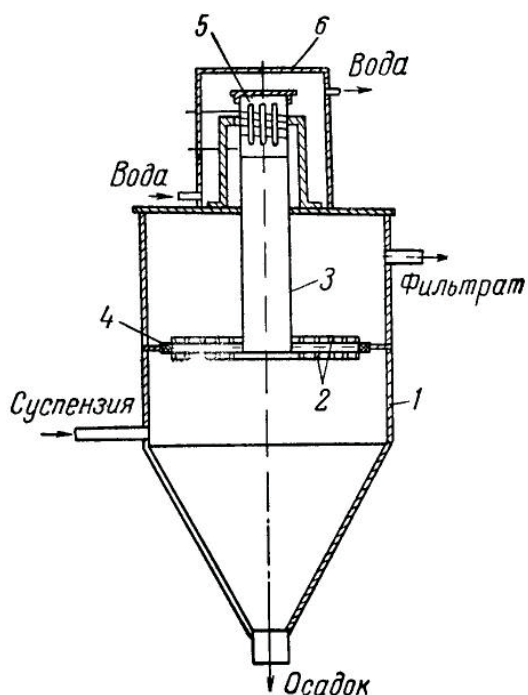
В вибрационном фильтре (рис. 1.11) суспензия подается в нижнюю часть разъемного корпуса 1 и поднимается к фильтровальной перегородке 2, состоящей из двух жестких решеток, между которыми заложена фильтровальная ткань. Перегородка закреплена на резиновой мембране 4. Решетки перегородки 2 жестко соединены посредством стержня 3 с излучателем 5, который заключен в кожух 6. Фильтрат проходит сквозь ФП, которой сообщаются упругие колебания, поступает в верхнюю часть корпуса и отводится через боковой штуцер. Осадок удаляется из конического днища через нижний штуцер.

Использование вышеописанных конструкций фильтровально-пульсационных машин для обезвоживания тонкодисперсной суспензии ГВОМО является затруднительным и нецелесообразным в виду конструктивных особенностей машин и специфики обезвоживаемого материала.



1 – натяжной барабан; 2 – стол; 3 – вакуум-камеры; 4 – бесконечная резиновая лента; 5 – приводной барабан; 6 – фильтровальная ткань; 7 – лоток; 8 – оросительные трубки

Рисунок 1.10 – Принципиальная схема ленточного вакуум-фильтра



1 – корпус; 2 – фильтровальная перегородка; 3 – стержень вибратора; 4 – резиновая мембрана; 5 – излучатель; 6 – кожух излучателя

Рисунок 1.11 – Вибрационный (ультразвуковой) фильтр

Исследованием влияния вибрации на процесс фильтрования тонкодисперсных суспензий, протекающий при избыточном давлении, занимались: С.М. Стоев [66, 79], В.Д. Варсанофьев [80], Ю.Г. Еремин [81] и другие ученые. С.М. Стоев провел большой объем экспериментальных работ по фильтрованию тонкодисперсных пульп в условиях воздействия низко- и высокочастотных колебаний. В.Д. Варсанофьев исследовал уплотнение мелкофракционных материалов на вибрационных прессах разных конструкций. В своих работах авторы показывают, что за счет вибрационного воздействия можно значительно снизить величину статического давления и повысить производительность фильтровальных машин.

В работах А.А. Березняка [82] и Х. Савейна [83] показан эффект интенсификации процесса фильтрования тонкодисперсных суспензий за счет воздействия акустических волн сжатия, возбуждаемых электрогидроимпульсным способом. Кроме того в работе [70] приведены зависимости, указывающие на пульсирующие движение жидкости в пористой среде. Следовательно, за счет использования пульсирующего давления в фильтровальных машинах можно повысить их производительность.

Процесс фильтрования тонкодисперсной суспензии при пульсирующем избыточном давлении является сложным в математическом описании. Согласно работе [84] этот процесс описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial W_s}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_f \frac{\partial W_s}{\partial t} \right) + I(x, t), \quad (1.5)$$

где W_s – влажность суспензии, D_f – коэффициент диффузии; $I(x, t)$ – функция источников влаги внутри слоя обезвоживаемого материала.

Решение дифференциального уравнения (1.5) требует определения начальных (граничных) условий, а также определения параметров D_f и ε .

Для описания процесса обезвоживания суспензии при пульсирующем давлении В.Д. Варсанофьев предлагает использовать зависимость [80]:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{C}{\mu} \frac{G_s}{h} (1 + \lambda), \quad (1.6)$$

где G_s – масса суспензии, кг; λ – интенсивность колебаний, характеризующая амплитуду и частоту пульсации давления.

В зависимости (1.5) и (1.6) входит значительное количество коэффициентов, зависящих от свойств суспензии, определяемых опытным путем. Данные зависимости также не позволяют определить характер влияния статической и динамической составляющих давления на процесс обезвоживания суспензии.

В работе [66] приведены зависимости, описывающие поведение жидкости в вертикальном капилляре пористой структуры при комбинированном статическом и динамическом нагружении. Эти зависимости являются сложными и не используются для практического расчета параметров фильтровальных машин.

Таким образом, исследования процесса фильтрации тонкодисперсной суспензии при пульсирующем избыточном давлении, как правило, носят экспериментальный характер. Получение надежных теоретических методов, описывающих этот процесс, затруднительно ввиду большого количества факторов, влияющих на процесс фильтрации, в том числе, на микроуровне (ионно-катионный состав воды, толщина двойного электрического слоя на поверхности частиц, размеры пор, форма частиц и др.). Особенности поведения жидкой и твердой фазы при воздействии пульсирующего давления для разных материалов носит разрозненный характер, что обусловило широкое разнообразие математических моделей, получаемых исследователями при изучении процесса фильтрации.

Поэтому для оценки эффективности использования пульсирующего давления при фильтрации морских ГВОМО, определения основных факторов, влияющих на процесс их обезвоживания и установления зависимостей параметров фильтровально-пульсационной машины от установленных факторов, что позволит обосновать параметры данной машины, требуется проведение теоретических и экспериментальных исследований.

1.6 Выводы, цель и задачи исследований

Проведенный анализ патентов и источников литературы позволил установить:

1. Среди широко распространенных в промышленности обезвоживающих машин, для ГВОМО перспективным является применение фильтр-прессов, работающих при избыточном давлении.

2. Повышение эффективности работы фильтровальных машин может быть достигнуто за счет использования пульсирующего давления.

3. Зависимости параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО от показателей процесса фильтрации при пульсирующем давлении могут быть установлены на основе теоретических и экспериментальных исследований.

4. **Целью** настоящей работы является повышение удельной производительности фильтровально-пульсационной машины на уровне изобретения для обезвоживания ГВОМО и обоснование ее параметров за счет использования пульсирующего давления и установления зависимостей основных параметров машины от показателей процесса фильтрации, а также разработке методики определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО.

Для достижения поставленной цели должны быть решены **задачи**:

– определить основные параметры фильтровально-пульсационной машины и установить зависимости этих параметров от показателей процесса фильтрации тонкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении;

– определить параметры и разработать экспериментальную установку для физического моделирования работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания тонкодисперсной суспензии;

– провести экспериментальные исследования обезвоживания ГВОМО при статическом и пульсирующем давлении в лабораторных условиях;

- получить математические модели расчета параметров фильтровально-пульсационной машины для процесса фильтрации ГВОМО при пульсирующем и статическом давлении и оценить их адекватность;
- определить рациональные параметры фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО;
- разработать конструкцию и методику расчета параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО.

Методы исследований. Для решения сформулированных задач использовались методы, включающие: теоретические исследования процесса фильтрации мелкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении, которые базируются на фундаментальных положениях механики сплошных сред и основных уравнениях движения вязкой жидкости в пористой среде (Навье-Стокса); методы физического моделирования, используемые при создании лабораторной фильтровальной установки; метод научно обоснованной постановки эксперимента с использованием теории регрессионного анализа и математической статистики; экспериментальные исследования процесса фильтрации ГВОМО в лабораторных условиях.

РАЗДЕЛ 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ФИЛЬТРОВАЛЬНО-ПУЛЬСАЦИОННОЙ МАШИНЫ ПРИ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ДАВЛЕНИИ

2.1 Компоновочная схема и основные параметры фильтровально-пульсационной машины

В качестве базовой конструкции фильтровальной машины принят камерный фильтр-пресс горизонтального исполнения (рис. 2.1), принцип действия которого описан в предыдущем разделе настоящей работы, а также в качестве перспективной конструкции рассмотрена возможность использования фильтр-пресса с двумя коаксиальными цилиндрическими фильтровальными элементами (ЦФЭ) и выгрузкой обезвоженного материала при помощи шнека. Основным прототипом фильтровальной машины со шнековой выгрузкой осадка является фильтр-пресс «Tornado» [24], схема которого представлена на рисунке 2.2.

Принцип действия фильтр-пресса «Tornado» (рис. 2.2) заключается в следующем. Суспензия под давлением подается в кольцевой зазор между наружным и внутренним цилиндрическими фильтрами, где происходит ее фильтрование. Выгрузка осадка осуществляется за счет вращения обоих цилиндрических фильтров относительно неподвижно установленной спирали (шнека). Фильтрат с внешнего и внутреннего фильтров отводится по трубопроводу, а обезвоженный продукт разгружается через желоб, расположенный в верхней части установки. В конструкции также предусмотрено устройство регулирования давления.

В фильтровальных машинах, работающих при статическом давлении, последнее создается насосами, а его величина регулируется при помощи автоматических регулирующих приспособлений. Для реализации пульсации давления в данных машинах требуется применение дополнительных устройств – пульсаторов. Также реализация пульсирующего давления возможна при сообщении гармонических колебаний фильтровальным перегородкам (ФП) машины.

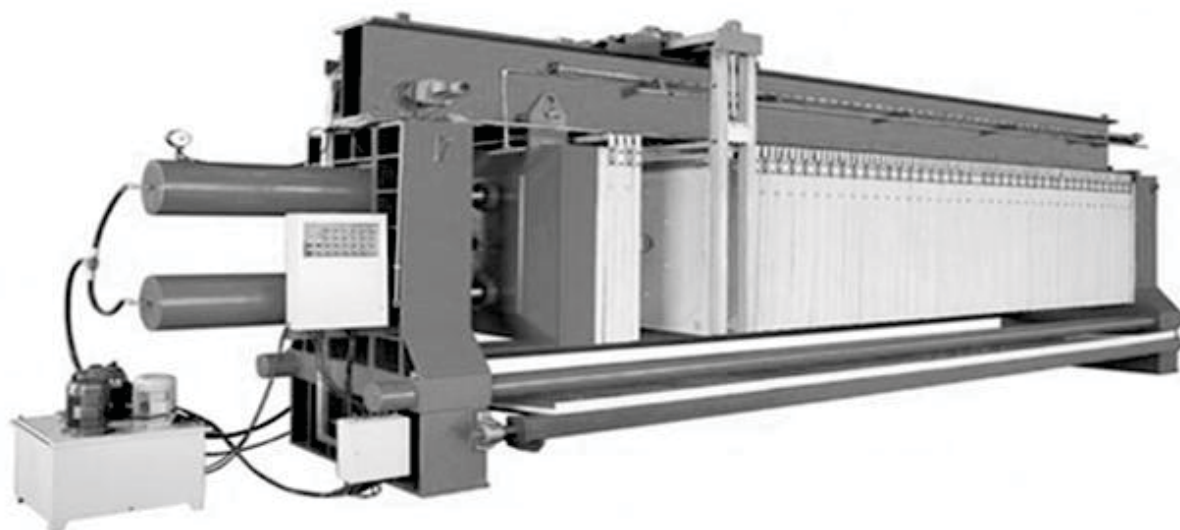
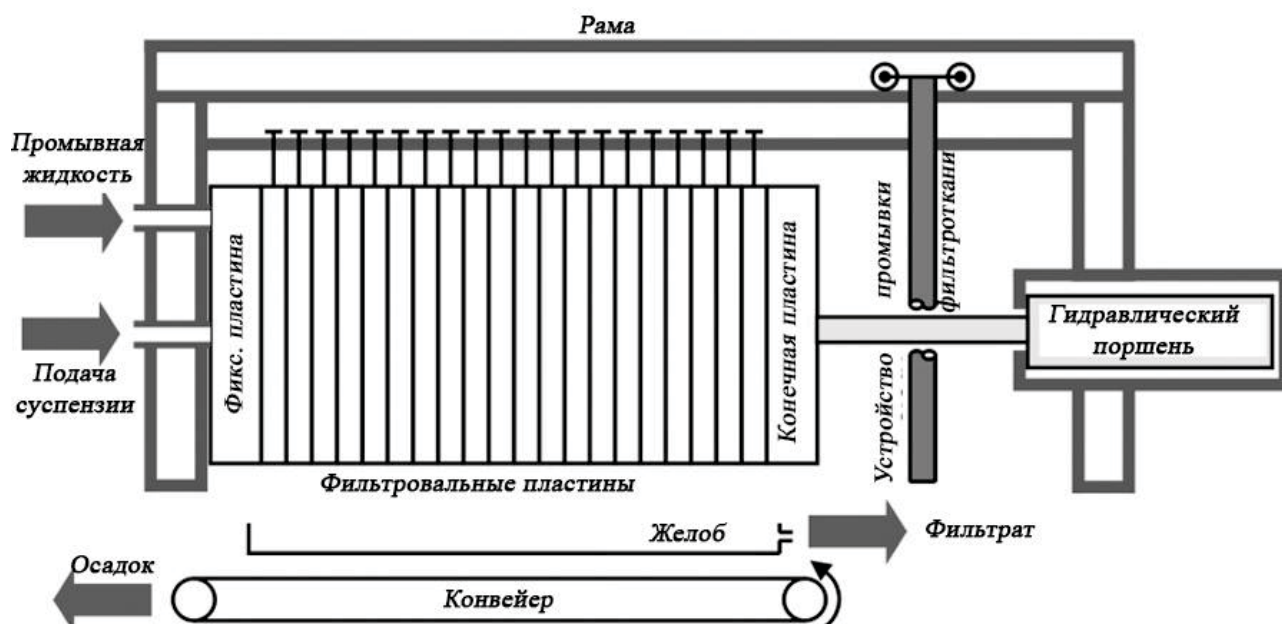


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема и общий вид камерного горизонтального фильтр-пресса

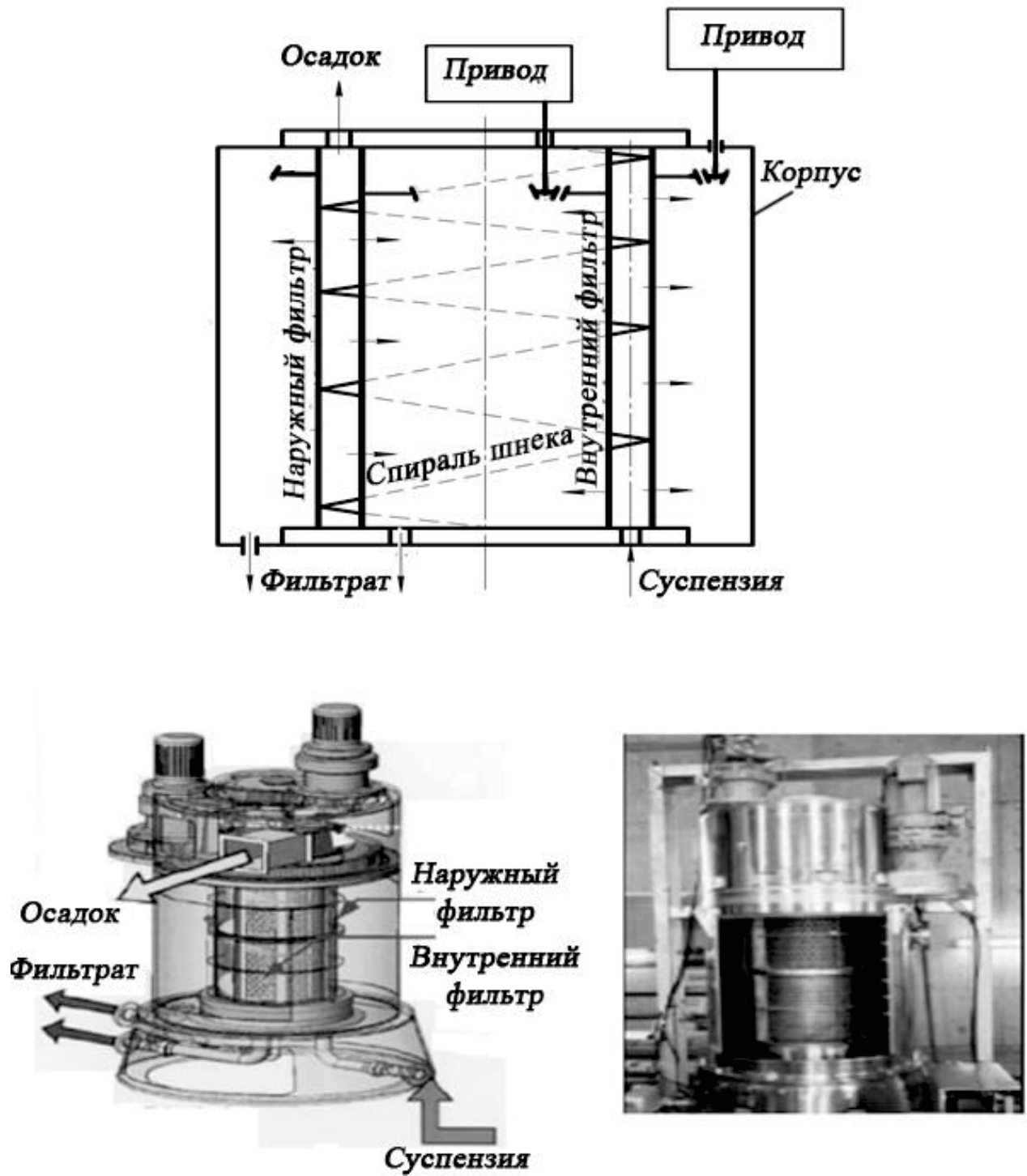


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема и общий вид фильтр-пресса «Tornado»

Схемы реализации пульсирующего давления в фильтровальных машинах представлены на рисунках 2.3 – 2.4.

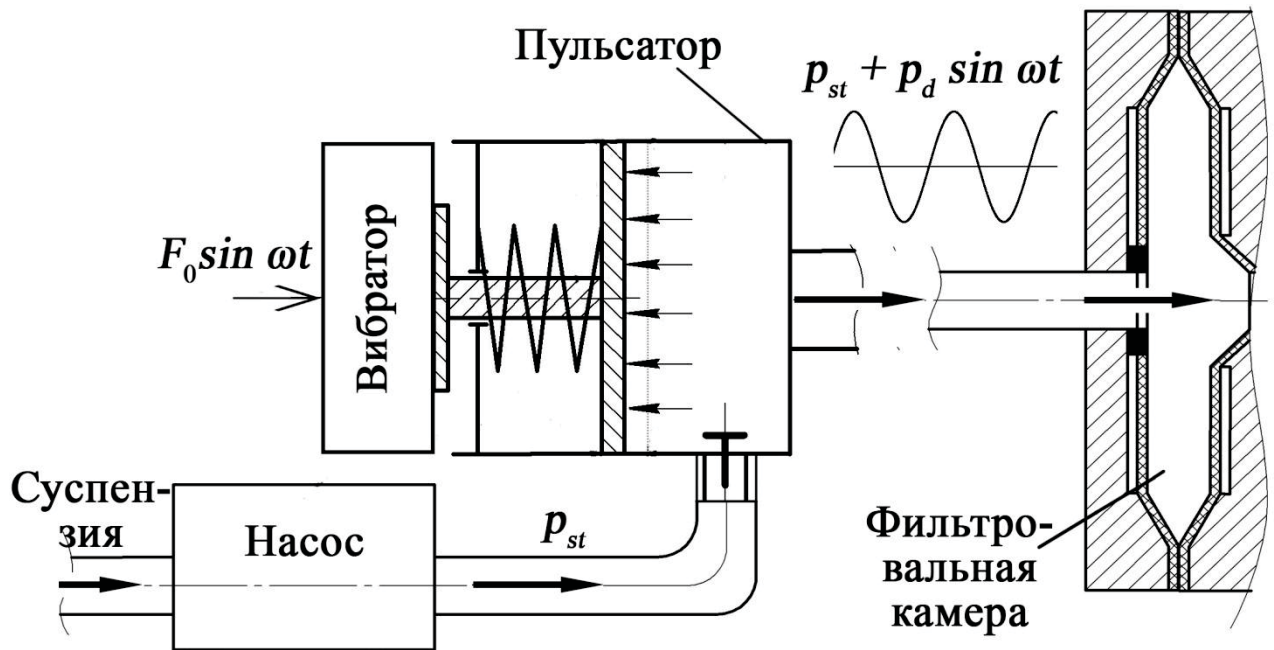
На схеме (рис. 2.3) исходная суспензия под статическим давлением p_{st} , создаваемым насосом 1, поступает в пульсатор 2, где ей сообщаются пульсации с частотой Ω и амплитудой, равной динамической составляющей давления p_d . Динамическая составляющая давления реализуется вынуждающим усилием вибратора F_0 , передающимся на суспензию через мембрану или поршень пульсатора. После чего суспензия подается в фильтровальные камеры фильтр-пресса 3.

На схеме (рис. 2.4) пульсация давления в суспензии реализуется при помощи сообщения колебаний камерам фильтр-пресса. При этом колебания (вибрации) могут создаваться инерционными, магнитными и другими вибровозбудителями.

В настоящей работе для реализации пульсации давления в камерном фильтр-прессе предлагается использовать пульсатор. Таким образом синтезирована новая фильтровально-пульсационная машина, принципиальная схема которой представлена на рисунке 2.5.

В настоящее время в промышленности широко используются пневматические пульсаторы, принцип действия которых основан на сообщении пульсаций суспензии через мембраны при помощи сжатого воздуха [85]. Область использования таких пульсаторов ограничена, так как они работают при давлении менее 1,0 МПа.

Давление фильтрования в камерных фильтр-прессах составляет порядка 0,8 – 10,0 МПа [30]. Для создания пульсации этого давления могут использоваться инерционные пульсаторы с электромагнитными возбудителями колебаний [86, 87], а также гидравлические возбудители колебаний [88], основным недостатком которых является сложность регулирования амплитуды пульсации давления. Поэтому в данной работе предлагается использовать пульсатор с инерционным приводом (рис. 2.6), позволяющим регулировать амплитуду пульсации давления.



p_{st} – статическая составляющая давления; p_d – динамическая составляющая давления; F_0 – вынуждающее усилие вибратора; ω – круговая частота

Рисунок 2.3 – Реализации пульсирующего давления в фильтровальной машине при помощи пульсатора

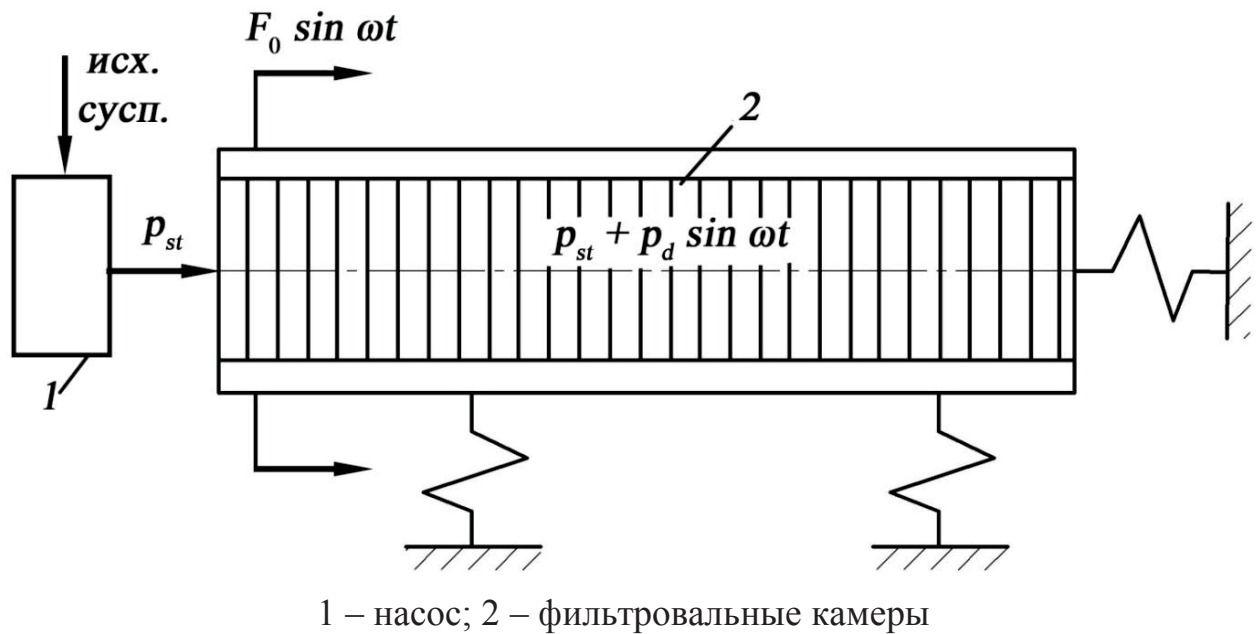
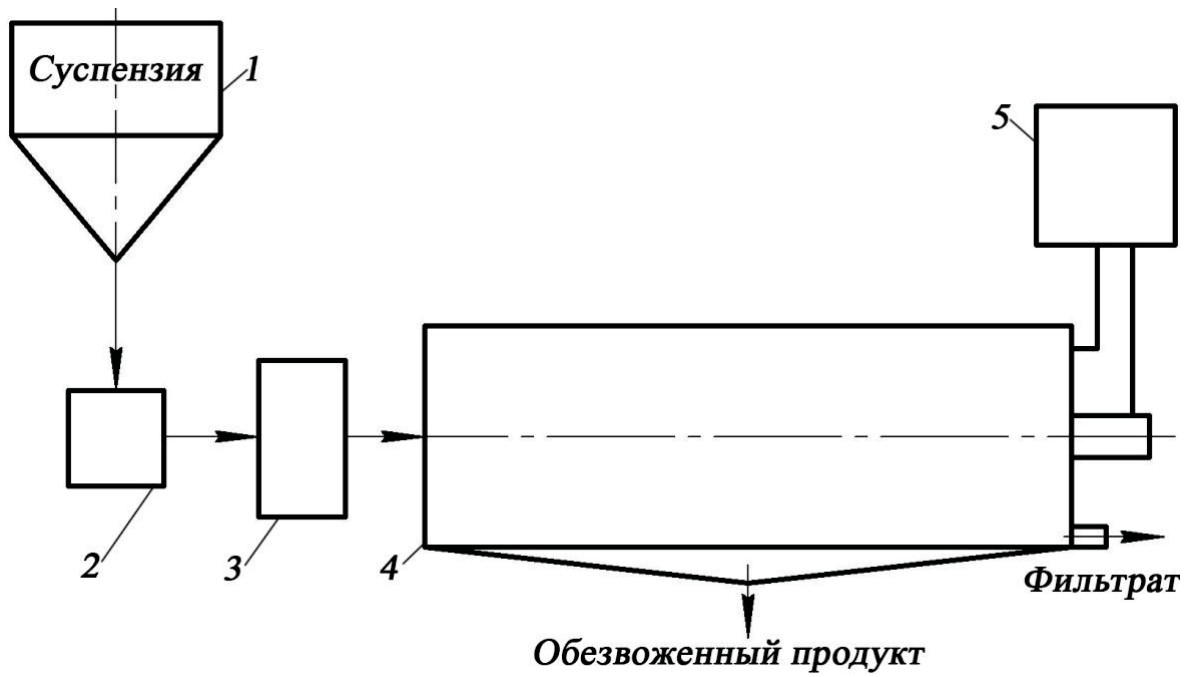
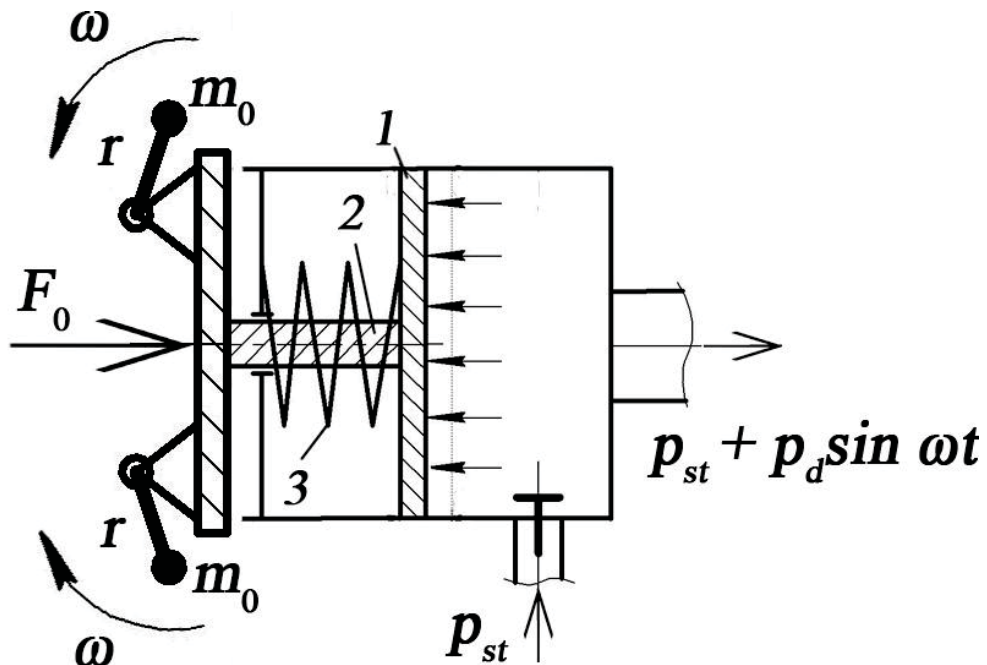


Рисунок 2.4 – Схема реализации пульсирующего давления в фильтр-прессе при наложении вибрации



1 – бункер-питатель; 2 – насос; 3 – инерционный пульсатор; 4 – фильтр-пресс;
5 – блок управления

Рисунок 2.5 – Принципиальная схема фильтровально-пульсационной машины



1 – поршень; 2 – шток; 3 – пружина; r – радиус дебаланса, м; m_0 – масса дебаланса, кг

Рисунок 2.6 – Схема пульсатора с инерционным приводом

Работа пульсатора (рис. 2.6) описывается уравнением:

$$m\ddot{x} + \xi\dot{x} + cx = F_0 \sin \omega t,$$

где m – суммарная масса вибратора с поршнем и его элементами, кг; ξ – суммарный коэффициент сопротивления, зависящий от коэффициента динамичности, статической составляющей давления, площади поршня и свойств суспензии, Н·с/м; c – жесткость пружины пульсатора Н/м; $\ddot{x}$ – ускорение поршня, м/с²; $\dot{x}$ – скорость, м/с; x – перемещение, м; F_0 – усилие вибратора, Н.

Пульсации передаются на суспензию через поршень 1 (рис. 2.6), на штоке 2 которого установлен инерционный вибровозбудитель, обеспечивающий направленные колебания. Уравновешивание статического давления p_{st} , создаваемого насосом, происходит при помощи пружины 3. Частота вибрации может регулироваться при помощи частотного преобразователя тока вибровозбудителя, а амплитуда пульсации давления (или динамическое усилие) регулируется величиной дебалансов m_0 . Преимущества конструкции пульсатора: простота, возможность регулирования частоты и амплитуды пульсации давления.

Исходными данными для расчета параметров фильтровально-пульсационной машины, являются:

- условия работы;
- удельная производительность по исходному сырью;
- начальная и конечная влажность суспензии;
- основные физико-механические свойства материала;
- гранулометрический состав суспензии.

Фильтровально-пульсационная машина будет эксплуатироваться в морских условиях (эксплуатация на судне) в теплое время года. Спецификой условий работы являются: высокое содержание влаги в воздухе, повышенная кислотность воздуха (Ph), высокая солнечная радиация, стесненность рабочего пространства, ограниченные энергоресурсы, а также высокие динамические нагрузки, обусловленные волнением моря и пульсацией давления.

Цикл работы фильтровально-пульсационной машины (фильтр-пресса) состоит из этапов:

- сжатия пакета фильтровальных плит (закрытие устройства);
- подачи суспензии в камеры и осуществление процесса фильтрования;
- раскрытие плит и разгрузка обезвоженного продукта;
- промывка фильтровальных плит под высоким давлением.

Основными параметрами фильтровально-пульсационной машины являются (рис. 2.7): статическая p_{st} (Па) и динамическая p_d (Па) составляющие давления; время фильтрования t (с); частота пульсации давления $\Omega = \omega/2\pi$ (Гц), или круговая частота вибрации ω (рад/с); расстояние между ФП δ_k (м); суммарная площадь фильтровальной поверхности $S_{уд}$ (м²).

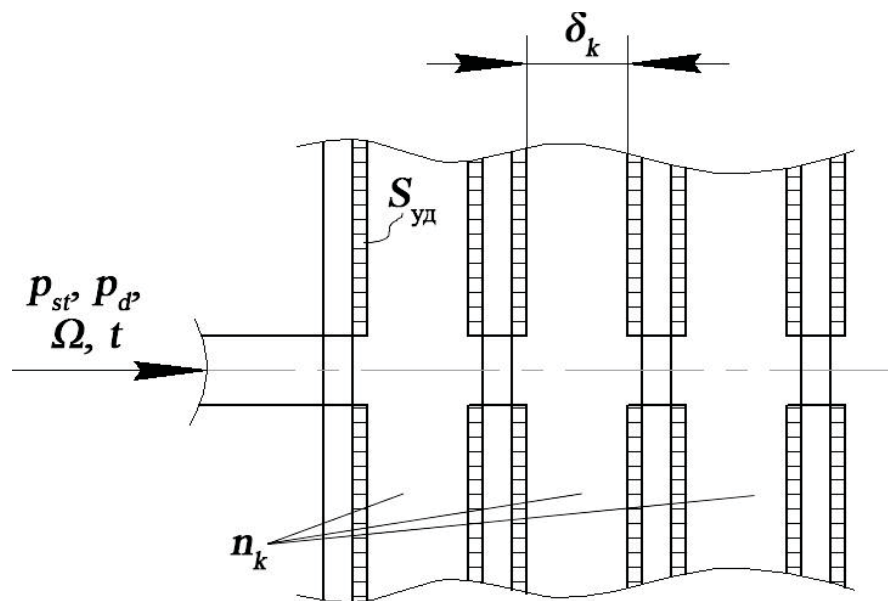


Рисунок 2.7 – Основные параметры фильтровально-пульсационной машины (камерного фильтр-пресса с пульсатором)

Для определения параметров фильтровально-пульсационной машины также необходимо определить основные физико-механические свойства суспензии и гранулометрический состав, определяемые в ходе экспериментальных исследований образцов суспензии.

2.2 Анализ процесса фильтрования тонкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении

Тонкодисперсную суспензию, состоящую из твердой и жидкой фаз, которая обезвоживается в камере фильтр-пресса, можно рассматривать как пористый слой, поры (каналы) которого заполнены жидкостью. При этом поры имеют различную форму и длину.

Рассмотрим движение жидкости в порах суспензии при воздействии пульсирующего давления. Для этого представим пористый слой в виде трубок (рис. 2.8), диаметр которых равен эквивалентному диаметру d_{eq} (идеализированный случай) [65]. Движение жидкости в канале (поре) происходит за счет воздействия пульсирующего давления p_p .

Принятые допущения:

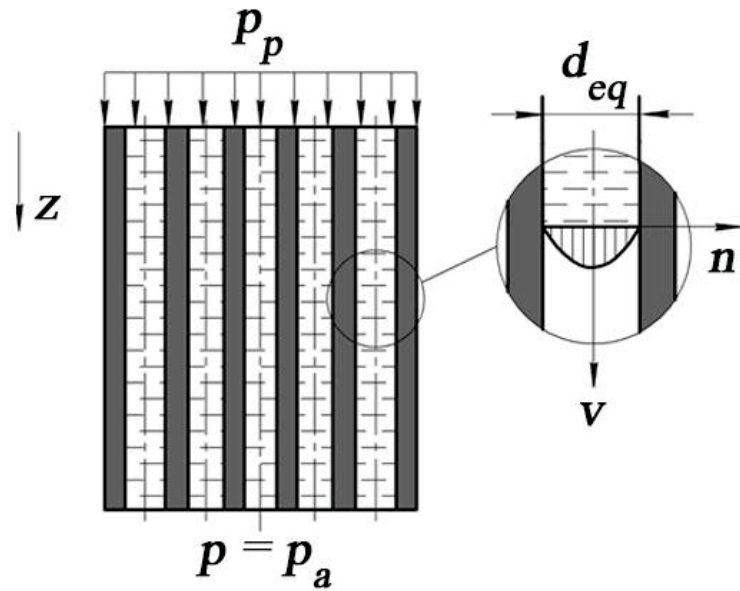
- 1) жидкая фаза суспензии несжимаемая;
- 2) вязкость жидкости постоянная;
- 3) поток жидкости в каналах ламинарный;
- 4) пористый слой (скелет) несжимаемый;
- 5) удельным сопротивлением фильтровальной перегородки пренебрегаем.

Рассмотрим идеализированный случай однонаправленного движения несжимаемой вязкой жидкости, в котором все скорости имеют одинаковые направления. Выделим в потоке жидкости,двигающейся параллельно оси z , элементарный параллелепипед, грани которого ориентированы по осям координат (рис. 2.9). Определим проекции на ось z внешних сил, действующих на элементарный объём.

Приращение статической и динамической составляющих давления соответственно равны:

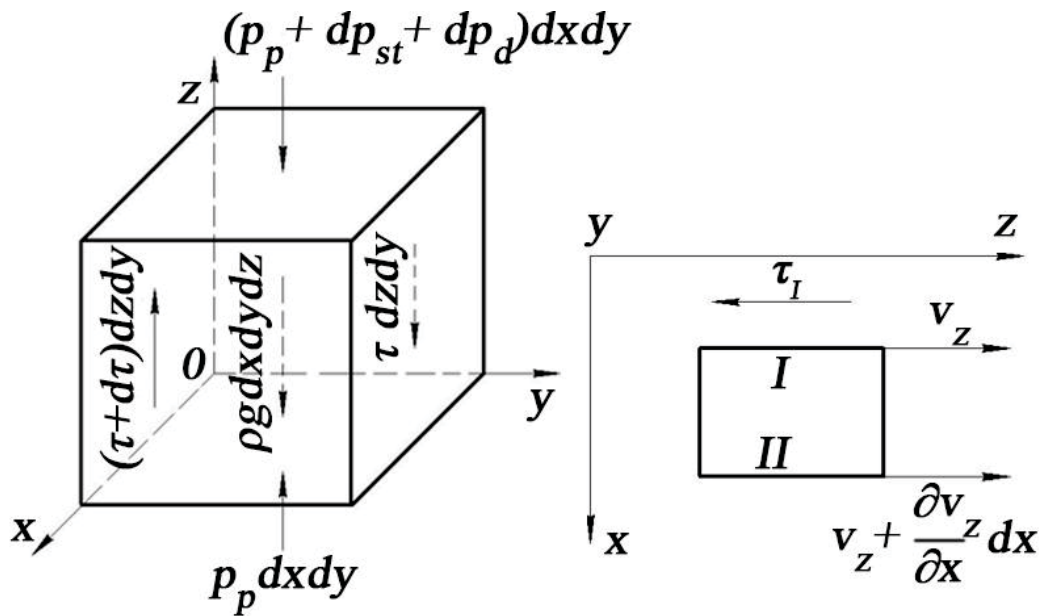
$$dp_{st} = \frac{\partial p_{st}}{\partial z} dz;$$

$$dp_d = \frac{\partial p_d}{\partial z} dz.$$



p_p – суммарное пульсирующее давление; p_a – атмосферное давление;
 $\vec{v}$ – скорость движения жидкости; n – нормаль; z – ось координат; d_{eq} – эквивалентный диаметр пор

Рисунок 2.8 – Схема движения жидкости в идеализированной пористой среде



p_{st} – статическая составляющая давления; p_d – динамическая составляющая давления; τ – касательные напряжения; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения

Рисунок 2.9 – Силы, действующие на элементарный объем жидкости

Суммарное пульсирующее давление: $p_p = p_{st} + p_d$.

Определим проекции внешних сил на ось z , действующих на элементарный объём.

Сила давления равна:

$$p_p dxdy - \left(p_p + \frac{\partial p_{st}}{\partial z} dz + \frac{\partial p_d}{\partial z} dz \right) dxdy = \left(-\frac{\partial p_{st}}{\partial z} - \frac{\partial p_d}{\partial z} \right) dxdydz.$$

Сила тяжести элементарного объема (см. рис. 2.9) равна: $-(\rho g)dxdydz$.

Для определения силы трения примем допущения, что жидкость движется только в направлении оси z и скорость движения слоев изменяется только в направлении оси x , возрастая с увеличением x . Поскольку изменений силы вдоль оси координат y нет, представим выделенный элемент в плоскости xOz (рис. 2.9). Силы трения действуют на поверхности I и II . По закону Ньютона о силе трения [89]:

$$\begin{aligned}\tau_I &= -\mu \frac{\partial v_z}{\partial x} dzdy; \\ \tau_{II} &= \mu \frac{\partial v_z}{\partial x} dzdy + \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} dxdzdy.\end{aligned}$$

Результирующая действия сил трения равна:

$$\tau_I + \tau_{II} = -\mu \frac{\partial v_z}{\partial x} dzdy + \mu \frac{\partial v_z}{\partial x} dzdy + \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} dxdzdy = \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} dxdzdy.$$

Если скорость изменяется по всем осям координат, то результирующая силы трения равна:

$$\mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) dxdzdy.$$

Сумма проекций сил, действующих на ось z , будет равна произведению массы выделенного элементарного объема на ускорение:

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} dxdydz = \left(-\frac{\partial p_{st}}{\partial z} - \frac{\partial p_d}{\partial z} \right) dxdydz - \rho g dxdydz + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} \right) dzdxdy,$$

где $\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} dxdydz$ – сила инерции элементарного объема жидкости.

Сократив последнее выражение на величину элементарного объёма ($dxdydz$), получим уравнение баланса сил, отнесённых к единице объёма:

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = -\frac{\partial p_{st}}{\partial z} - \frac{\partial p_d}{\partial z} - \rho g + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} \right).$$

В общем случае, когда вектор скорости направлен произвольно, уравнения движения (баланса сил) несжимаемой вязкой ньютоновской жидкости в проекциях на оси координат, имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{ось } z: \quad & \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = -\frac{\partial p_{st}}{\partial z} - \frac{\partial p_d}{\partial z} - \rho g + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \\ \text{ось } x: \quad & \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{\partial p_{st}}{\partial x} - \frac{\partial p_d}{\partial x} - \rho g + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \text{ось } y: \quad & \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = -\frac{\partial p_{st}}{\partial y} - \frac{\partial p_d}{\partial y} - \rho g + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Уравнения (2.1) представляют собой систему уравнений Навье-Стокса, описывающие движение жидкости в поре при пульсирующем давлении p_p . Пренебрегая массовыми силами (приравняв $\rho g = 0$) в виду их незначительного влияния в сравнении с силами внешнего воздействия (силами давления) и силами инерции, для одномерного потока жидкости уравнение (2.1) запишется в виде:

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} - \left(\frac{\partial p_{st}}{\partial z} + \frac{\partial p_d}{\partial z} \right). \quad (2.2)$$

Уравнение (2.2) описывает одномерное движение потока жидкости в пористой несжимаемой среде при действии пульсирующего давления. Аналогичное уравнение движения при статическом давлении (без пульсации), имеет вид [44]:

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} - \frac{\partial p_{st}}{\partial z}.$$

Решение уравнения (2.2) затруднительно, в связи с отсутствием информации по выбору граничных условий. Поэтому, применив методы подобия, из уравнения (2.2) получим критериальное уравнение [44].

Разделив все члены уравнения (2.2) на $\rho(\partial v_z / \partial t)$ получим:

$$1 = \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \frac{\partial t}{\rho \partial v_z} - \frac{\partial t}{\rho \partial v_z} \left(\frac{\partial p_{st}}{\partial z} + \frac{\partial p_d}{\partial z} \right). \quad (2.3)$$

Слагаемые в правой части уравнения (2.3) безразмерны.

Из первого члена, заменив z на l (где l – длина канала (поры)) и вычеркнув символы дифференцирования и направления, получена величина, обратная критерию Рейнольдса:

$$\frac{\mu v t}{l^2 \rho v} = \frac{\mu}{\rho v l} = \frac{1}{Re}. \quad (2.4)$$

Из второго члена получен критерий Эйлера, характеризующий отношение сил давления к инерционным силам:

$$\frac{p}{l} \frac{t}{\rho v} = \frac{p_p}{\rho v^2} = Eu. \quad (2.5)$$

Для характеристики геометрических особенностей рассматриваемой системы в критериальное уравнение введен параметрический критерий $\Gamma = l/d_{eq}$, характеризующий отношение длины поры к ее диаметру.

Согласно [44], эквивалентный диаметр каналов определяется как:

$$d_{eq} = \frac{\Phi d_p \varepsilon}{1 - \varepsilon}, \quad (2.6)$$

где Φ – фактор формы частиц; d_p – эквивалентный диаметр частиц, м.

Критериальное уравнение, описывающее движение потока жидкости через пористый слой, запишем в виде [89]:

$$Eu = A Re^{-m} \Gamma^n, \quad (2.7)$$

где A – коэффициент; n и m – показатели степеней.

Для малых диаметров каналов (трубок) принято допущение о ламинарном режиме движения жидкости. Для ламинарного режима при $Re < 50$ зависимость (2.7) запишется в виде [65]:

$$Eu = \frac{A}{Re} \frac{l}{d_{eq}}. \quad (2.8)$$

Заменив скорость движения жидкости в поре v на скорость v_f , отнесенную к общей площади фильтра, определяемую соотношением $v_f = v\varepsilon$, критерий Рейнольдса для данного случая определится равенством $Re = v d_{eq} \rho / \mu$ [44]. Учитывая это и используя выражение (2.6), зависимость (2.8) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{p_p \varepsilon^2}{\rho v_f^2} &= \frac{A \mu \varepsilon}{\rho d_{eq} v_f} \frac{l}{d_{eq}}, \text{ или} \\ v_f &= \frac{p \varepsilon^3 \Phi^2 d_p^2}{A \mu l (1 - \varepsilon)^2}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

С другой стороны, скорость фильтрования равна:

$$v_f = \frac{dV}{Sdt}. \quad (2.10)$$

Сопоставив зависимости (2.9) и (2.10), получим:

$$\frac{dV}{Sdt} = \frac{p_p}{\mu r_o l}, \quad (2.11)$$

где $r_o = \frac{A(1 - \varepsilon)^2}{\Phi^2 d_p^2 \varepsilon^3}$.

Зависимость (2.11) представляет собой основное уравнение фильтрования или закон Дарси, описывающее движение жидкости через пористый слой высотой l при воздействии пульсирующего давления.

Пульсирующее давление в суспензии изменяется по гармоническому закону (рис. 2.10), следовательно:

$$p_p = p_{st} + p_d \sin \omega t = f(p_{st}, p_d, \omega), \quad (2.12)$$

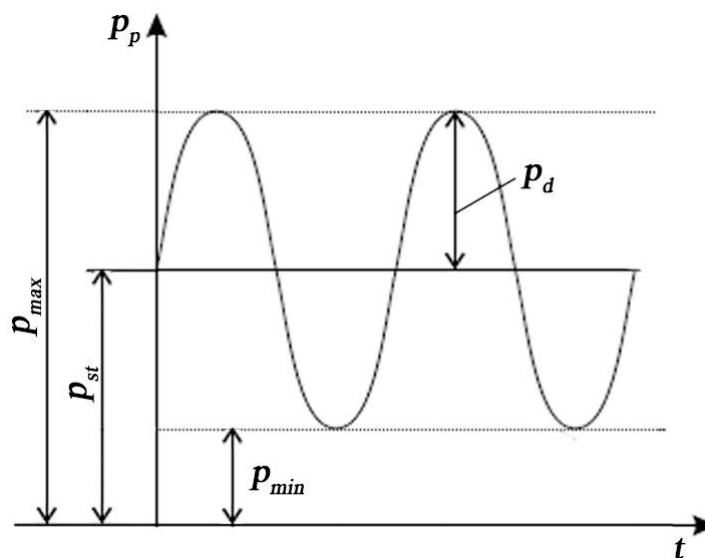


Рисунок 2.10 – Схема пульсации давления в суспензии

Определяющим показателем процесса фильтрования тонкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении является удельное сопротивление осадка r_o , характеризующее сопротивление среды потоку жидкости. Этот параметр является постоянным во времени [43] и зависит от давления фильтрования. Поскольку пульсирующее давление характеризуется статической и динамической составляющими давления и частотой (2.12): $r_o = f(p_p) = f(p_{st}, p_d, \omega)$.

Представим зависимость (2.11) в следующем виде:

$$\frac{dV}{Sdt} = \frac{p_p}{r_o(V/S)x_o}. \quad (2.13)$$

Согласно [43] для установившегося процесса фильтрования с образованием сжимаемого осадка, параметр r_o определяется как:

$$r_o = 2r_{np}/\mu x_o, \quad (2.14)$$

где r_{np} – приведенное удельное сопротивление осадка, определяемое экспериментально, с/м^2 . Так как $r_o = f(p_p)$, при постоянной вязкости жидкой фазы суспензии ($\mu = \text{const}$), параметр $r_{np} = f(p_p)$.

Подставив зависимость (2.14) в уравнение (2.13), после проведения соответствующих преобразований, получим:

$$\frac{dV}{Sdt} = \frac{x_o}{2h \cdot r_{np}(p_p)}.$$

С другой стороны $h = \frac{V_H - V}{S}$, а $x_o = \frac{V_H}{V} - 1$ (где V_H – начальный объем суспензии). Учитывая это, последняя зависимость запишется в виде:

$$dt = \frac{2r_{np}(p_p) \cdot (V_H - V)}{S^2(V_H/V - 1)} dV. \quad (2.15)$$

Проинтегрировав левую часть дифференциального уравнения (2.15) в пределах от 0 до t , а правую – от 0 до V , получим зависимость:

$$V = S \sqrt{\frac{t}{r_{\text{пр}}(p_p)}}. \quad (2.16)$$

Зависимость (2.16) определяет объем фильтрата, образованный с площади фильтровальной поверхности S за время t при фильтровании тонкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении.

Одним из основных параметров обезвоживания суспензии, влияющим на параметры фильтровально-пульсационной машины, является средняя конечная влажность осадка W_k , зависящая от исходной влажности суспензии W_0 , суммарного пульсирующего давления фильтрования и свойств материала. В процессе обезвоживания тонкодисперсной суспензии фильтрованием материал уплотняется, а его влажность изменяется по высоте слоя в направлении движения фильтрата пропорционально изменению его объема.

Учитывая изменение влажности суспензии в процессе ее обезвоживания, получим зависимость времени (продолжительности) фильтрования от средней конечной влажности осадка W_k , свойств суспензии, величины пульсирующего давления и начальной высоты слоя суспензии.

Рассмотрим уплотнение слоя суспензии с начальной высотой H и исходной абсолютной влажностью W_0 (рис. 2.11), соответствующей коэффициенту пористости e_0 , при ее обезвоживании под воздействием пульсирующего давления p_p . В процессе обезвоживания суспензия уплотняется, ее высота изменяется до значения h , а влажность до W_k (и соответственно изменяется коэффициент пористости до e), и при этом образуется фильтрат объемом V .

Коэффициент пористости материала e определяется [21]:

$$e = e_0 - \frac{H - h}{H} \cdot (1 + e_0), \text{ или} \quad (2.17)$$

$$e = W' \cdot \frac{\rho_s}{\rho}, \quad (2.18)$$

где e_0 – начальный коэффициент пористости, дол. ед.; H – начальная высота слоя суспензии, м; W' – массовая влажность суспензии [90]; ρ_s – плотность твердых частиц суспензии, кг/м³.

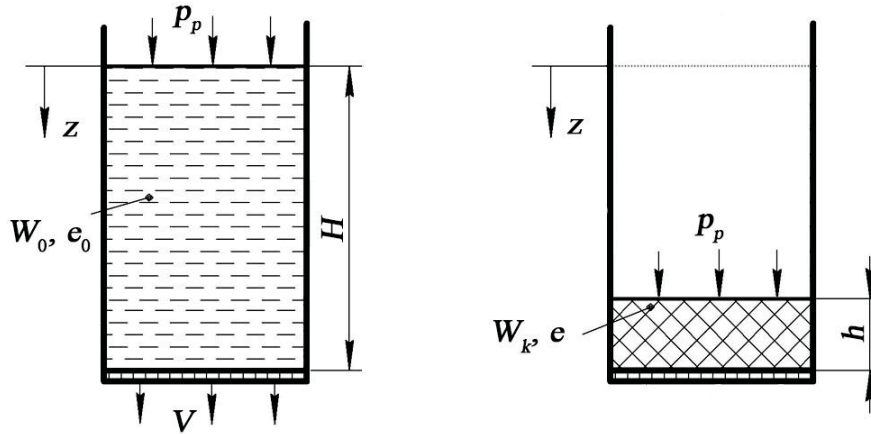


Рисунок 2.11 – Схема уплотнения суспензии при ее фильтровании

Используя зависимость (2.18) в выражении (2.17), после соответствующих преобразований получим:

$$h = \frac{H(\rho + W'_k \cdot \rho_s)}{\rho + W'_0 \cdot \rho_s}, \quad (2.19)$$

где W'_0 и W'_k – массовая начальная и конечная влажность суспензии соответственно.

Зависимость между абсолютной и массовой влажностью имеет вид:

$$W = \frac{W'}{1 + W''}, \quad (2.20)$$

где W – абсолютная (общая) влажность, дол. ед.

Применив зависимость (2.20) в выражении (2.19) и выполнив соответствующие преобразования, получим:

$$h = \frac{H(W_0 - 1)(\rho - W_k\rho + W_k\rho_s)}{(W_k - 1)(\rho - W_0\rho + W_0\rho_s)}. \quad (2.21)$$

Согласно зависимости (2.21) можно определить высоту осадка h с абсолютной средней влажностью W_k при обезвоживании слоя суспензии с начальной высотой H и исходной влажностью W_0 .

Разделив зависимость (2.21) на H получим:

$$i_h = \frac{(W_k - 1) \cdot (\rho + W_0\rho_s - W_0\rho)}{(W_0 - 1) \cdot (\rho + W_k\rho_s - W_k\rho)}, \quad (2.22)$$

где i_h – степень уплотнения суспензии (отношение объема материала в начале процесса фильтрования к объему обезвоженного продукта).

Из выражения (2.22), выполнив соответствующие преобразования, определим среднюю плотность обезвоженного материала ρ_w с влажностью W_k :

$$\rho_w = \frac{\rho\rho_s}{\rho - W_k\rho + W_k\rho_s}. \quad (2.23)$$

Объем фильтрата V , который образуется при обезвоживании суспензии до получения осадка h , определяется:

$$V = S(Hn_0 - hn_s), \quad (2.24)$$

где n_0 и n_s – удельный объем пор в исходном образце суспензии и обезвоженном материале соответственно.

Удельный объем пор $n_{уд}$ равен [21]:

$$n_{\text{уд}} = \frac{e}{1 + e}. \quad (2.25)$$

Используя выражения (2.22), (2.24) и (2.25) после соответствующих преобразований получим:

$$V = \frac{HS\rho_s(W_0 - W_k)}{(W_k - 1) \cdot (W_0\rho - \rho - W_0\rho_s)}. \quad (2.26)$$

Зависимость (2.26) определяет объем фильтрата, который образуется при обезвоживании суспензии с исходной влажностью W_0 и начальной высоте слоя H до конечной влажности осадка W_k .

Приравняв правые части зависимостей (2.26) и (2.16) после соответствующих преобразований получим:

$$t = \frac{r_{\text{пр}}(p_p) \cdot H^2 \rho_s^2 (W_0 - W_k)^2}{(W_k - 1)^2 (\rho - W_0\rho + W_0\rho_s)^2}, \quad (2.27)$$

Зависимость (2.27) определяет время фильтрования слоя суспензии, высотой H и начальной влажностью W_0 , до получения осадка с конечной влажностью W_k .

Обозначив

$$W_{\Delta} = \frac{\rho_s(W_0 - W_k)}{(W_k - 1)(\rho - W_0\rho + W_0\rho_s)},$$

где W_{Δ} – параметр, характеризующий изменение влажности суспензии и зависящий от свойств материала (безразмерная величина), получим:

$$t = r_{\text{пр}}(p_p) \cdot H^2 \cdot W_{\Delta}^2. \quad (2.28)$$

Таким образом, на основании проведенного анализа установлено, что на процесс фильтрования тонкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении оказывают влияние: вязкость жидкой фазы суспензии, эквивалентный диаметр частиц, фактор формы частиц, пористость суспензии, динамическая составляющая давления, статическая составляющая давления, частота пульсации давления, начальная высота слоя суспензии, время фильтрования, а также факторы, зависящие от свойств суспензии. Ввиду большого количества влияющих на процесс фильтрования факторов и трудностей исследования влияния каждого фактора в отдельности, рационально использовать комплексы, характеризующие совокупное влияние нескольких факторов на процесс фильтрования суспензии. Одним из таких комплексов является приведенное удельное сопротивление осадка.

2.3 Критериальное моделирование процесса обезвоживания тонкодисперсной суспензии

Для моделирования процесса обезвоживания суспензии в фильтровально-пульсационной машине рассмотрим колонку суспензии, высотой δ_k и площадью S , вырезанную из фильтровальной камеры машины (рис. 2.12).

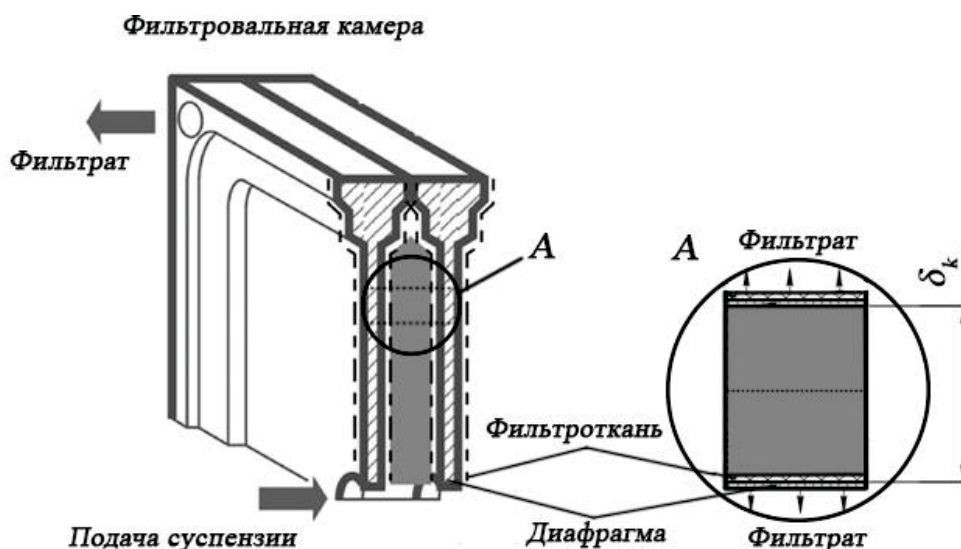


Рисунок 2.12 – Обезвоживание суспензии в камере фильтр-пресса

Пульсация давления в суспензии реализуется при помощи пульсатора, сообщающего колебания последней с круговой частотой ω . Длина распространения волны в суспензии при этом определяется [91], м:

$$\lambda = \frac{c_\lambda \cdot 2\pi}{\omega},$$

где c_λ – скорость распространения волны в материале, м/с.

Значение параметра c_λ для водонасыщенных глинистых грунтов (наиболее близких по свойствам к ГВМО) находится в пределах от 1000 до 1600 м/с [92]. Для частоты пульсации давления 60 Гц (максимальной из запланированного диапазона исследований) длина волны составит порядка 16 м. На этом основании принято допущение, что при фильтровании тонкодисперсной суспензии ГВМО затухания пульсации давления в фильтр-прессе будут сравнительно небольшими и не учитываются в данной работе.

Подобие процессов фильтрования суспензии в лабораторных условиях с использованием уменьшенных физических моделей фильтров и на машине реальных масштабов соблюдается при равенстве соответствующих критериев подобия [93, 94].

Процесс фильтрования суспензии в камере фильтр-пресса, протекающий при пульсирующем давлении, представим в виде зависимости:

$$f(r_o, p_{st}, p_d, \Omega, H, S, t, \mu, V) = 0,$$

Число критериев подобия для количества параметров $k = 9$ и основных параметров $r = 3$ равно $k - r = 9 - 3 = 6$ [93]. Обозначив критерии подобия через $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_6$ можно записать:

$$\Pi_i = r_o^{Z_1} \cdot p_{st}^{Z_2} \cdot p_d^{Z_3} \cdot \Omega^{Z_4} \cdot H^{Z_5} \cdot S^{Z_6} \cdot t^{Z_7} \cdot \mu^{Z_8} \cdot V^{Z_9}, \quad (2.29)$$

где $Z_1, Z_2, \dots, Z_9$ – показатели степени.

Вместо параметров $r_o, p_{st}, \dots, V$ в формулу (2.29) подставляются их размерности, выраженные через первичные единицы измерений [93]:

$$[P_i] = [L']^{\alpha_i} \cdot [M']^{\beta_i} \cdot [T']^{\gamma_i},$$

где P_i – любой из 9 параметров; L', M', T' – базисные единицы измерения длины, массы и времени соответственно; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – показатели степени.

Размерности параметров приведены в таблице 2.1.

Значения показателей степени Z_i определяются из решения системы:

$$\begin{cases} \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2 + \alpha_3 Z_3 + \alpha_4 Z_4 + \alpha_5 Z_5 + \alpha_6 Z_6 + \alpha_7 Z_7 + \alpha_8 Z_8 + \alpha_9 Z_9 = 0 \\ \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2 + \beta_3 Z_3 + \beta_4 Z_4 + \beta_5 Z_5 + \beta_6 Z_6 + \beta_7 Z_7 + \beta_8 Z_8 + \beta_9 Z_9 = 0 \\ \gamma_1 Z_1 + \gamma_2 Z_2 + \gamma_3 Z_3 + \gamma_4 Z_4 + \gamma_5 Z_5 + \gamma_6 Z_6 + \gamma_7 Z_7 + \gamma_8 Z_8 + \gamma_9 Z_9 = 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

Подставляя соответствующие размерности параметров в систему уравнений (2.30) получим:

$$\begin{cases} -2Z_1 - Z_2 - Z_3 + Z_5 + 2Z_6 - Z_8 + 3Z_9 = 0 \\ Z_2 + Z_3 + Z_8 = 0 \\ -2Z_2 - 2Z_3 - Z_4 + Z_7 - Z_8 = 0 \end{cases} \quad (2.31)$$

Система уравнений (2.31) имеет 6 линейно независимых решений. Для ее решения задаем значения параметров $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6$ и находим другие оставшиеся неизвестные Z_7, Z_8, Z_9 (табл. 2.2). Подставляя полученные значения в зависимость (2.29) получим шесть критериев подобия:

$$\Pi_1 = \frac{p_{st} H St}{\mu V}; \quad \Pi_2 = \frac{r_o p_{st} St}{\mu}; \quad \Pi_3 = \frac{r_o p_d H^2}{p_{st}}; \quad \Pi_4 = \Omega t; \quad \Pi_5 = \frac{H \mu}{r_o p_{st} t V}; \quad \Pi_6 = \frac{r_o H V}{S}.$$

Определяем индикаторы подобия [93], которые согласно первой теореме подобия для подобных систем равны единице.

Таблица 2.1 – Размерности физических величин

Параметры	Показатели степеней		
	$[L]$	$[M]$	$[T]$
r_o	$\alpha_1 = -2$	$\beta_1 = 0$	$\gamma_1 = 0$
p_{st}	$\alpha_2 = -1$	$\beta_2 = 1$	$\gamma_2 = -2$
p_d	$\alpha_3 = -1$	$\beta_3 = 1$	$\gamma_3 = -2$
Ω	$\alpha_4 = 0$	$\beta_4 = 0$	$\gamma_4 = -1$
H	$\alpha_5 = 1$	$\beta_5 = 0$	$\gamma_5 = 0$
S	$\alpha_6 = 2$	$\beta_6 = 0$	$\gamma_6 = 0$
t	$\alpha_7 = 0$	$\beta_7 = 0$	$\gamma_7 = 1$
μ	$\alpha_8 = -1$	$\beta_8 = 1$	$\gamma_8 = -1$
V	$\alpha_9 = 3$	$\beta_9 = 0$	$\gamma_9 = 0$

Таблица 2.2 – Таблица показателей степени Z_i

Заданные значения						Найденные значения		
Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9
0	1	0	0	1	1	1	-1	-1
1	1	0	0	0	1	1	-1	0
1	-1	1	0	2	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	1	0	0
-1	-1	0	0	1	0	-1	1	-1
1	0	0	0	1	-1	0	0	1

$$I_1 = \frac{k_{pst} k_H k_S k_t}{k_\mu k_V} = 1; I_2 = \frac{k_{r_o} k_{pst} k_S k_t}{k_\mu} = 1; I_3 = \frac{k_{r_o} k_{pd} k_H^2}{k_{pst}} = 1;$$

$$I_4 = k_\Omega k_t; I_5 = \frac{k_H k_\mu}{k_{r_o} k_{pst} k_t k_V}; I_6 = \frac{k_{r_o} k_H k_V}{k_S}.$$

В вышеприведенных выражениях k_{P_i} – отношение соответствующего параметра P_i оригинала и модели (масштаб подобия).

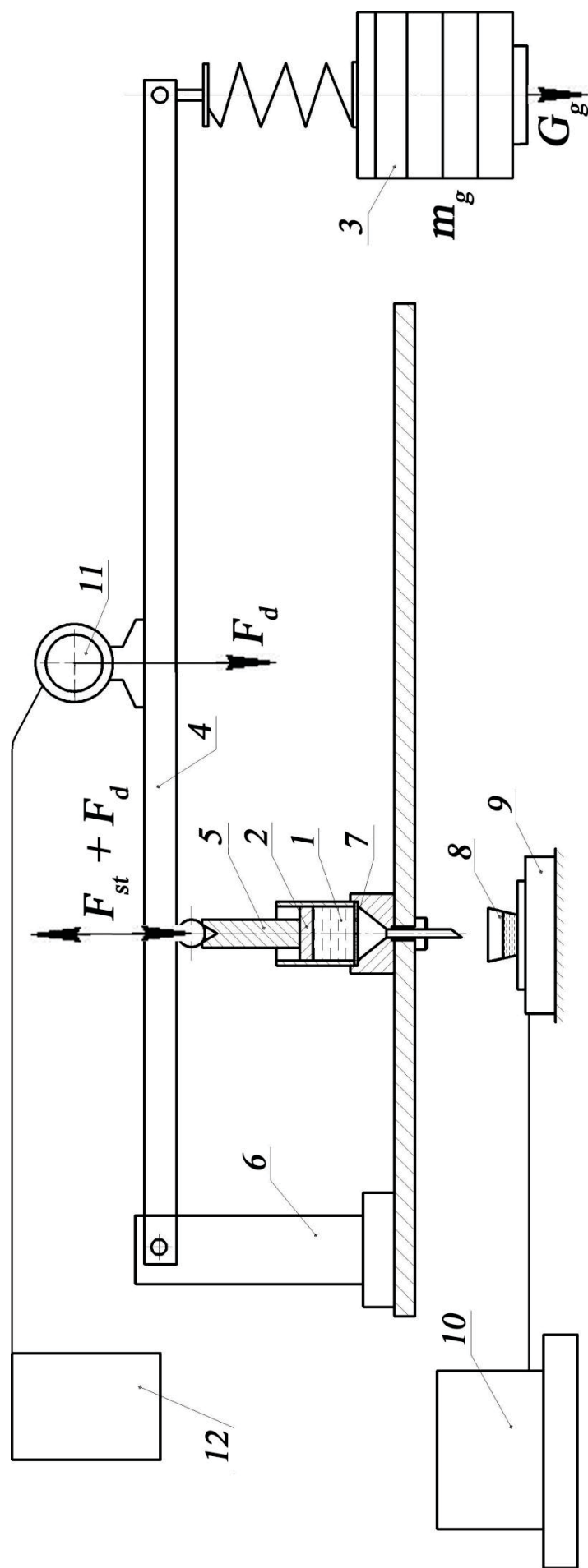
Так как экспериментальные исследования будут проводиться на натуральных образцах суспензии, масштабы моделирования k_{r_o} и k_μ равны 1. При создании лабораторной фильтровальной установки для проведения экспериментальных исследований процесса фильтрования суспензии при пульсирующем давлении следующие масштабы моделирования приняты равными единице (т.е. параметры установки соответствуют параметрам реальной машины): k_Ω , k_{pst} и k_H . Следовательно, остальные масштабы подобия k_t , k_S , k_V и k_{pd} равны 1.

Таким образом, результаты исследований процесса фильтрования натуральных образцов суспензии, проведенных на лабораторной фильтровальной установке, обеспечивающей установленные масштабы подобия, могут быть непосредственно использованы для обоснования параметров реальной фильтровальной машины.

2.4 Определение параметров экспериментальной установки

Для проведения экспериментальных исследований процесса обезвоживания суспензии фильтрованием при пульсирующем давлении разработана схема экспериментальной установки, представлена на рисунке 2.13.

Принцип действия установки (рис. 2.13) состоит в следующем. Давление в рабочей камере 1 создается поршнем 2, нагружаемым набором грузов 3 посредством коромысла 4 и штока 5. Второй край коромысла шарнирно закреплен в опоре 6. Под действием давления твердые частицы суспензии задерживаются на фильтровальной перегородке 7, а жидкость (фильтрат) поступает в сосуд 8,



1 – рабочая камера; 2 – поршень; 3 – набор грузов; 4 – коромысло; 5 – шток; 6 – опора; 7 – ФП; 8 – сосуд для сбора фильтрата; 9 – лабораторные электронные весы; 10 – компьютер, 11 – дебалансный вибратор; 12 – преобразователь частоты переменного тока

Рисунок 2.13 – Схема лабораторной установки для исследования процесса фильтрации суспензии при пульсирующем давлении

установленный на электронных лабораторных весах 9. Значения массы образовавшегося фильтрата записываются через каждый установленный промежуток времени на подключенный к весам персональный компьютер 10. На коромысле 4 установлен дебалансный вибратор 11, который создает динамическое усилие F_d , передающееся на шток поршня. Дебалансный вибратор подключен к преобразователю частоты переменного тока 12, при помощи которого регулируется частота вибрации. Положение вибровозбудителя на коромысле установки может изменяться в зависимости от задаваемых характеристик процесса фильтрации.

Основные конструктивные и режимные параметры лабораторной вибрационной фильтровальной установки:

1) Расстояние от поры до штока поршня $l_x = 0,12$ м; длина коромысла $l_g = 1,2$ м;

2) в качестве балки использовался швеллер 8П (по ГОСТ 8240-89) с характеристиками: $J_x = 89,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$; $W_x = 22,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ (момент сопротивления).

3) Дебалансный вибратор типа ЭВ-320 со статическим моментом K_i :

– при положении дебалансов 1: $K_1 = 5,07 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}$;

– при положении дебалансов 2: $K_2 = 10,13 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}$.

4) Вес балки $G_b = 82 \text{ Н}$, вес вибровозбудителя: $G_v = 40 \text{ Н}$.

5) Жесткость пружины, на которой подвешены груза, $c_2 = 5000 \text{ Н/м}$.

На основании вышеприведенных данных выполнен динамический расчет лабораторной установки, который приведен в приложении А.

При проведении экспериментальных исследований на лабораторной установке принимались следующие частоты вращения ротора двигателя: 1200; 1800; 2400; 3000; 3600 об/мин, которые соответствуют частоте вибрации от 20 до 60 Гц соответственно. Диапазон указанных частот выбирался в зависимости от технических характеристик вибратора. В таблице 2.3 приведены значения возмущающего усилия вибратора F_v в зависимости от положения дебалансов и частоты вибрации. Также определены частоты собственных колебаний балки лабораторной установки в зависимости от места расположения вибратора.

Таблица 2.3 – Значение возмущающего усилия F_v вибратора

Полож. де- балансов	Частота Гц / (об/мин)	20/1200	30/1800	40/2400	50/3000	60/3600
I	Возмущ.	80	180	320	500	720
II	сила F_v , Н	160	360	640	1000	1440

На рисунке 2.14 приведены зависимости частот собственных колебаний балки ω_0 и вынужденных ω от места расположения вибратора на балке l_v . Данные зависимости характеризуют режимы работы лабораторной установки. При соотношении $\omega_0/\omega < 1$ наблюдается дорезонансный режим работы, при $\omega_0/\omega > 1$ – зарезонансный режим работы установки и при $\omega_0/\omega = 1$ – резонансный режим работы.

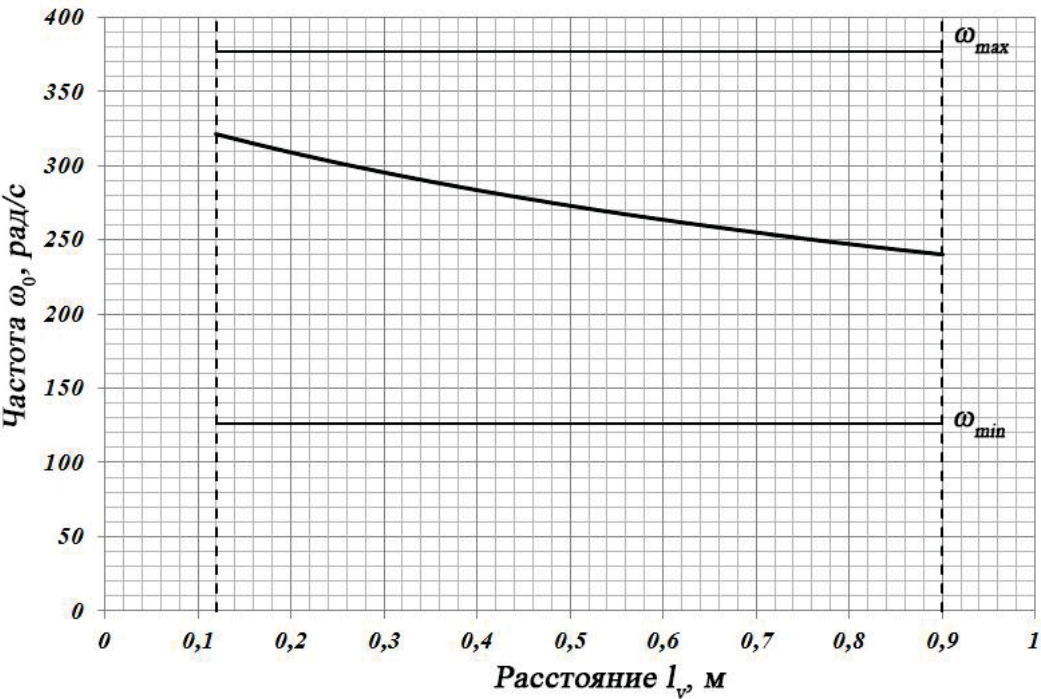


Рисунок 2.14 – Характеристика режимов работы лабораторной фильтровальной установки

Как видно из графика (рис. 2.14) при частотах вынужденных колебаний до 251,2 рад/с лабораторная установка работает в основном в дорезонансном режиме. В диапазоне частот 251,2 – 314 рад/с возможны все режимы работы.

Зарезонансный режим работы наблюдается для диапазона частот 314 – 376,8 рад/с. Поэтому основным режимом работы установки является дорезонансный режим.

Выводы по разделу

В результате проведенного анализа выбрана базовая компоновочная схема фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания тонкодисперсной суспензии, которая включает камерный фильтр-пресс горизонтального исполнения с инерционным пульсатором, позволяющая повысить эффективность процесса обезвоживания суспензии. А также определены основные параметры фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания тонкодисперсной суспензии: статическая и динамическая составляющие давления; время фильтрования; частота пульсации давления; расстояние между фильтровальными перегородками; площадь фильтровальной поверхности.

В результате проведенных теоретических исследований установлено, что:

1. Основными показателями процесса фильтрования суспензии при пульсирующем давлении являются: вязкость жидкой фазы суспензии, эквивалентный диаметр твердых частиц, фактор формы частиц, пористость, статическая и динамическая составляющие давления, частота пульсации давления, а также факторы, зависящие от свойств суспензии [95].

2. Определяющим фактором процесса фильтрования тонкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении является приведенное удельное сопротивление, зависящее от свойств суспензии, статической и динамической составляющих давления и частоты.

3. При фильтровании тонкодисперсной суспензии в фильтровально-пульсационной машине время фильтрования прямо пропорционально произведению приведенного удельного сопротивления осадка (зависящего от свойств суспензии, пульсирующего давления и частоты) на высоту фильтруемого слоя и комплексный параметр, характеризующий изменение влажности суспензии.

4. Определены масштабы подобия процессов фильтрации суспензии при пульсирующем давлении, протекающего в лабораторной фильтровальной установке, и фильтровально-пульсационной машине, которые равны единице.

5. Разработана схема и определены параметры экспериментальной установки для проведения лабораторных исследований процесса фильтрации суспензии в фильтровально-пульсационной машине, позволяющая управлять следующими параметрами: частотой пульсации давления, статической и динамической составляющими давления, высотой фильтруемого слоя суспензии, а также изменять тип фильтровальной перегородки.

РАЗДЕЛ 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ФИЛЬТРОВАЛЬНО-ПУЛЬСАЦИОННОЙ МАШИНЫ

3.1 Выбор методов проведения экспериментальных исследований

Исследования влияния режимных и конструктивных параметров фильтровально-пульсационной машины на показатели процесса фильтрования тонкодисперсной суспензии может проводиться:

- в эксплуатационных условиях работы фильтровальной машины при переработке сырья;
- в лабораторных условиях с использованием конструкции оборудования, допускающей активное влияние на его работу (с использованием методов активного проведения экспериментов).

Проведение экспериментальных исследований работы фильтровальной машины в эксплуатационных условиях требует длительного времени и значительных средств. Такой метод исследований является наиболее точным, однако при таком методе объект является лишь частично управляемым из-за конструктивных особенностей фильтровальной машины. Поэтому этот метод оправдывает себя лишь в случае определения точных параметров и характеристик работы машины.

Для обоснования конструктивных и режимных параметров фильтровально-пульсационной машины целесообразно проводить исследования на лабораторных установках, позволяющих изменять и контролировать параметры процесса фильтрования (методы активного регулирования параметров).

В качестве объекта исследования выбран процесс фильтрования суспензии, протекающий при пульсирующем давлении, осуществляемый на лабораторной фильтровальной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.13 (см. раздел 2).

Конструкция лабораторной фильтровальной установки позволяет влиять на процесс фильтрования, протекающий в ней, путем изменения конструктив-

ных и режимных параметров: изменять высоту слоя фильтруемой суспензии; величину статической и динамической составляющих давления; площадь фильтрования; тип фильтровальной перегородки; частоту пульсации давления.

Применяя математическую теорию активного эксперимента [96], структурно модель процесса фильтрования при пульсирующем давлении можно представить в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 3.1.

Как видно из структурной схемы, отклики (выходные параметры) V , W_k , h зависят от большого числа факторов, т.е.

$$y_i = f(p_{st}, p_d, \omega, t, \mu, \rho, \varepsilon, S, H, d_p, \Phi, \rho_s, W_0).$$

Исследование влияния всех параметров на процесс фильтрования суспензии при пульсирующем давлении в наше время остается сложной и нерешенной задачей. Поэтому из общего числа факторов необходимо отобрать те, изучение влияния которых даст наиболее информативную картину протекания процесса.

3.2 Выбор факторов и интервалов варьирования

Варьируемые в процессе исследований параметры (факторы) должны соответствовать следующим требованиям [97]:

- 1) Параметры должны быть управляемыми, т.е. установленное значение параметра должно поддерживаться постоянным на протяжении всего опыта.
- 2) Точность замера параметра должна быть как можно выше.
- 3) Параметры должны быть однозначными и функционально независимыми друг от друга.
- 4) Параметры должны быть совместимы, т.е. не вызывать аварийных ситуаций в работе исследуемого устройства.

Выше перечисленным требованиям удовлетворяют только 5 из 13 факторов: p_{st} , p_d , ω , S , t .

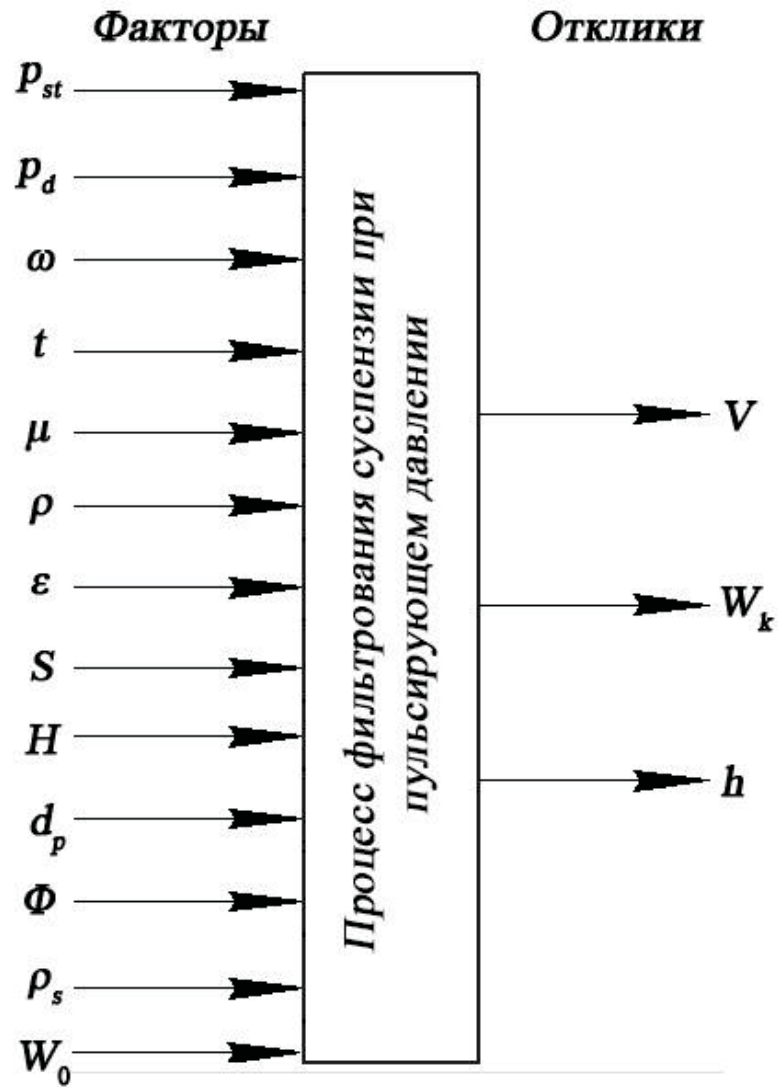


Рисунок 3.1 – Структурная схема входных и выходных параметров процесса фильтрации суспензии при пульсирующем давлении

Так как объем фильтрата V является функцией влажности материала (W_0 и W_k), площади фильтрования S и начальной высоты слоя суспензии H , число выходных параметров (откликов) можно уменьшить до одного.

Площадь фильтрования S для фильтров с плоскими фильтровальными перегородками остается постоянной в течение процесса, следовательно, в качестве отклика целесообразно рассматривать безразмерное соотношение

$$q_L = \frac{V}{HS},$$

характеризующее объем фильтрата, который образуется при фильтровании слоя суспензии высотой H с единицы площади фильтровальной поверхности.

В качестве варьируемого параметра целесообразно использовать статическую составляющую давления p_{st} , отнесенную к атмосферному давлению, т. е.: $p_r = p_{st}/p_a$, где p_a – атмосферное давление.

Использование безразмерного соотношения p_r избавляет от необходимости дополнительных замеров, позволяя ограничиться только измерением статической составляющей давления.

В процессе фильтрования суспензии при пульсирующем давлении величина динамической составляющей давления p_d не должна превышать статическую составляющую давления p_{st} согласно условиям нормальной работы установки. Поэтому при проведении опытов целесообразно использовать безразмерное соотношение, называемое коэффициентом динамичности (характеризующим амплитуду пульсации давления):

$$K_d = \frac{p_d}{p_{st}} < 1.$$

Установлено, что в процессе фильтровании тонкодисперсных суспензий при статическом давлении в течение некоторого начального промежутка времени от 0 до t_0 наблюдается увеличение скорости фильтрования [43], которое

связанное с выравниванием и распределением давления в пористой среде. Исходя из этого, время фильтрования суспензии рационально представить в виде безразмерного соотношения: $T = t/t_0$, где t_0 – время, протекающее от начала процесса фильтрования до его условной стабилизации.

Частоту пульсации давления также представим в виде безразмерного соотношения: $\omega_r = \omega/\omega_{min}$, где ω_{min} – минимальное значение круговой частоты вибрации из исследуемого установленного диапазона частот (рад/с).

Таким образом, получим систему из четырех параметров:

$$q_L = f(p_r, K_d, T, \omega_r).$$

Представим процесс фильтрования суспензии при пульсирующем давлении в виде «черного ящика», на вход которого подаются переменные факторы, а на выходе наблюдаются и регистрируются значения откликов [98] (рис. 3.2).

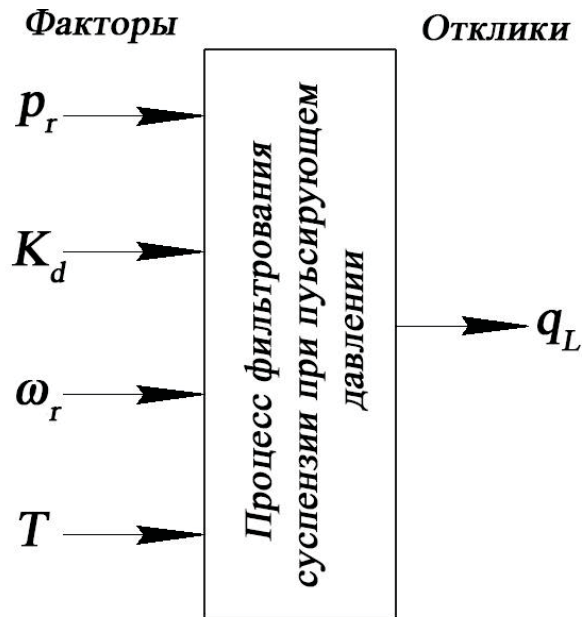


Рисунок 3.2 – Структурная схема параметров, варьируемых при эксперименте

Основным этапом при подготовке активного эксперимента является выбор интервалов варьирования [99].

Область определения факторов при постановке эксперимента ограничена параметрами лабораторной фильтровальной установки и пределами измерений имеющейся измерительной аппаратуры, условиями приведения опытов и другими условиями.

Основной диапазон рабочих давлений, реализуемых в современных фильтровальных машинах и установках для обезвоживания тонкодисперсных суспензий, находится в пределах от 0,5 до $< 4,0$ МПа. Поскольку установлено, что фильтрование илистых суспензий эффективнее протекает при высоких давлениях, интервалом варьирования параметра p_r (при $p_a = 0,1$ МПа) принят диапазон значений: $p_r = 10 \dots 40$.

Для коэффициента динамичности K_d , установлен диапазон варьирования: $K_d = 0,3 \dots 0,9$.

Интервал варьирования параметра T устанавливался на основании предшествующих исследований по фильтрованию тонкодисперсных суспензий. Диапазон варьирования параметра T (при $t_0 = 60$ с): $T = 1 \dots 10$.

Большинство используемых в промышленности инерционных дебалансных вибраторов работают при частоте вибрации 50 Гц (соответствующей частоте вращения ротора двигателя 3000 об/мин). Согласно паспортным техническим характеристикам используемого вибратора не рекомендуется превышать частоту вращения ротора его двигателя более чем на 20%. Учитывая это, для параметра ω_r принят следующий диапазон варьирования ($\omega_{min} = 125,6$ рад/с): $\omega_r = 1 \dots 3$.

При планировании эксперимента варьируемые факторы приводят к кодированным величинам. Значения факторов кодируются путем линейного преобразования координат факторного пространства с переносом начала координат в нулевую точку и выбором масштабов по осям в единицах интервалов варьирования факторов [98]. При этом используют соотношение:

$$X_i^0 = \frac{X_i^s - X_i^n}{c_i}, i = 1, 2 \dots n,$$

где X_i^0 – основной уровень кодируемого i -го фактора; X_i^B и X_i^H – верхний и нижний уровни варьирования того же фактора соответственно; c_i – натуральное значение интервала варьирования фактора. Значения уровней и интервалов варьирования факторов сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Значения уровней и интервалов варьирования факторов

Обозначение факторов	Кодируемое обознач.	Инт-лы варьирования c_i	Уровни факторов		
			нулевой «0»	верхний «+1»	нижний «-1»
p_r	X_1	15	25	40	10
ω_r	X_2	1,0	2,0	3,0	1,0
K_d	X_3	0,3	0,6	0,9	0,3
T	X_4	4,5	5,5	10	1

В новой системе координат (табл. 3.1): “0” – нулевой уровень (начало координат); “+1” – верхний уровень; “-1” – нижний уровень.

3.3 Постановка и проведение экспериментальных исследований

3.3.1 Лабораторные исследования свойств образцов суспензии

В качестве обезвоживаемой суспензии использовались образцы ГВОМО Черного моря. Из проведенного в разделе 1 анализа следует, что свойства морских осадков изменяются в широком диапазоне. Поэтому для проведения экспериментальных исследований по обезвоживанию ГВОМО были подготовлены образцы с усредненными характеристиками. Основные физико-механические свойства и гранулометрический состав используемых образцов ГВОМО определялись лабораторным методом по стандартным методикам.

В ходе 73-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» (2013 г.) были отобраны пробы глубоководных органо-минеральных осадков Черного моря условно ненарушенной и нарушенной структуры (сапропелевые и кокколитовые илы)

для проведения исследований по их обезвоживанию. Исследования физико-механических свойств и гранулометрического состава отобранных образцов были проведены в Государственном ВУЗ «Национальный горный университет» и Техническом университете «Фрайбергская горная академия» (Германия).

Исследования гранулометрического состава кокколитового и сапропелевого илов проводились на лазерном дифракционном анализаторе HELOS (H0735) & QUIXEL, R3: 0,5/0,9...175 μm (рис. 3.3). Результаты исследований представлены на рисунке 3.4 и в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Гранулометрический состав образцов кокколитового и сапропелевого илов

Тип материала	Фракция, мкм						
	0-100	0-51	0-10,5	0-5	0-2,2	0-1,1	< 1
Кокколитовый ил	100%	98,4%	80,7%	59,9%	32,5%	13,6%	9,4%
Сапропелевый ил	100%	98,8%	84,9%	65,6%	35,74%	14,85	10,3%

Из результатов исследований гранулометрического состава ГВОМО видно, что более 80-85% образцов составляют глинистые частицы размером менее 10 мкм. Доля частиц крупностью менее 5 мкм составляет 60-65%, частиц крупностью менее 1,1 мкм – около 10%.

Средняя плотность твердых частиц кокколитового и сапропелевого илов была определена по методике, описанной в DIN 18124:2011-04. Для кокколитового ила плотность твердых частиц составила 2,607 г/см³, для сапропелевого ила – 2,168 г/см³.

Для кокколитового ила массовая a_m и объемная a_o концентрации [66] соответственно составили: 0,291 и 0,139; для сапропелевого ила – 0,347 и 0,2. Согласно схеме разделения материалов по массовой концентрации твердых частиц в суспензии [43] ГВОМО можно отнести к высококонцентрированным тонкодисперсным суспензиям (при $a_m > 0,15$).

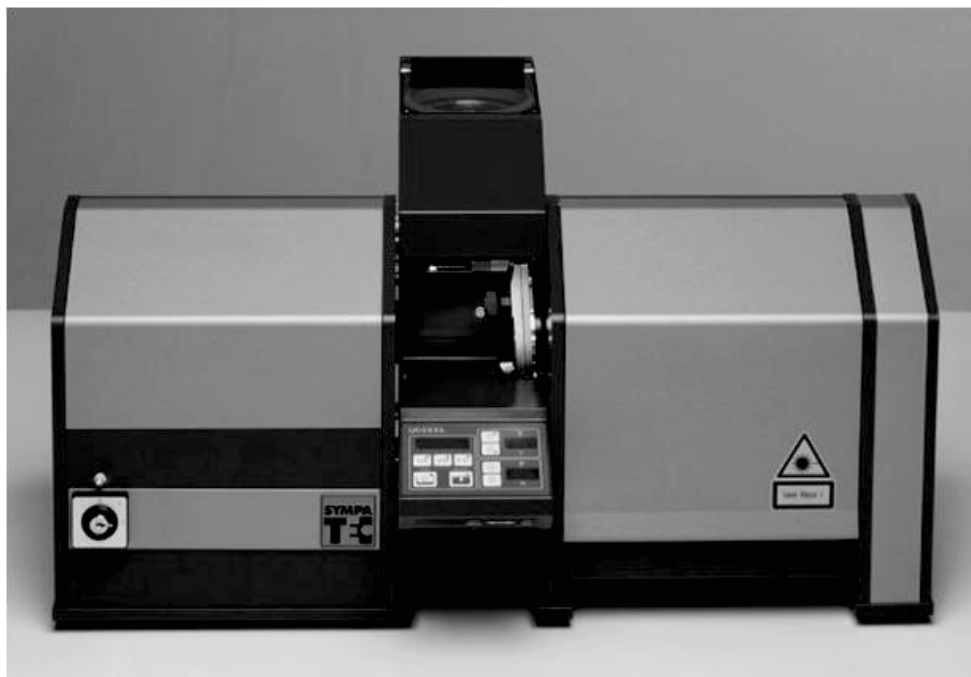


Рисунок 3.3 – Лазерный дифракционный анализатор HELOS (H0735) & QUIXEL, R3: 0,5/0,9...175 μm

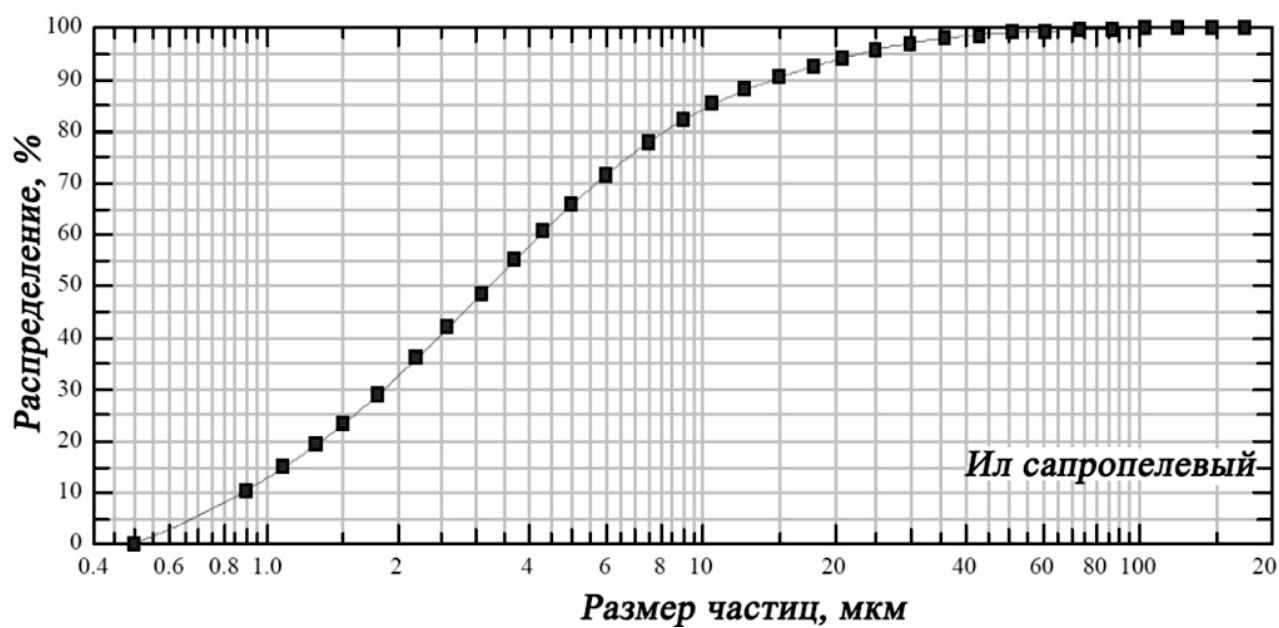
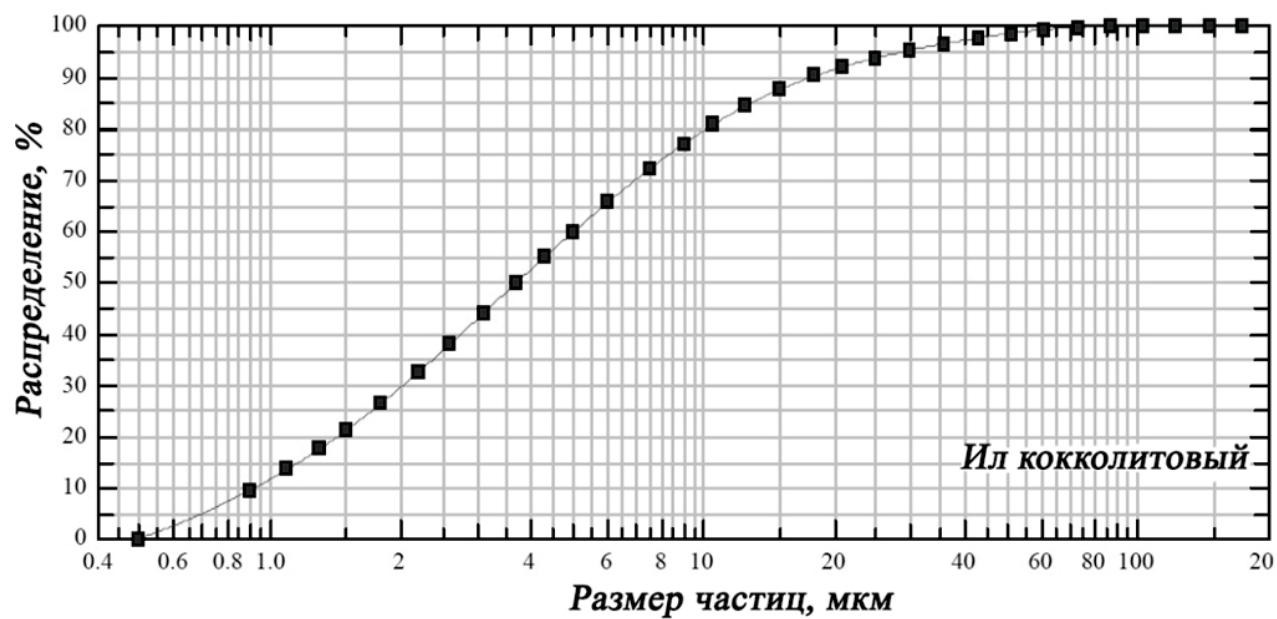


Рисунок 3.4 – Гранулометрический состав образцов ГВОМО

Пористость ε исследуемых образцов ГВОМО определялась согласно зависимости [21]:

$$\varepsilon = \frac{\rho_s W_0}{\rho - \rho W_0 + \rho_s W_0}.$$

Пористость кокколитового и сапропелевого илов, соответствующая начальной влажности, составила 0,820 и 0,877 соответственно.

Согласно принятой технологии добычи ГВОМО (механическая отработка забоя при помощи землечерпательных снарядов), исходный для обезвоживания материал будет представлять собой смесь кокколитового и сапропелевого илов. В соответствии с данными по характеристике отобранных при помощи пробоотборной трубки образцов морских осадков [20], определено среднее соотношение содержания кокколитового и сапропелевого ила в единице объема ковша, которое в среднем составляет 1÷1. Следовательно, в единице объема исходного материала (суспензии) будет содержаться 50% кокколитового и 50% сапропелевого илов.

Принимая во внимание ранее проведенные исследования свойств образцов ГВОМО (см. раздел 1), за исходный фильтруемый материал была принята суспензия со следующими усредненными характеристиками:

- соотношение содержания кокколитового и сапропелевого илов в единице объема материала равно 1:1;
- средняя начальная влажность суспензии $W_0 = 68\%$;
- средняя плотность твердой фазы суспензии $\rho_s = 2387 \text{ кг/м}^3$;
- средняя плотность суспензии $\rho_0 = 1250 \text{ кг/м}^3$.

Определенные в ходе экспериментальных исследований свойства образцов ГВОМО были использованы в качестве основных исходных данных для составления заявки на получения гранда Европейского союза «Горизонт 2020» (номер регистрации 689446 от 21.04.2015). Согласно данной заявке запланированы исследования по добыче и обезвоживанию ГВОМО Черного моря.

3.3.2 Исследование режима работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО при пульсирующем давлении

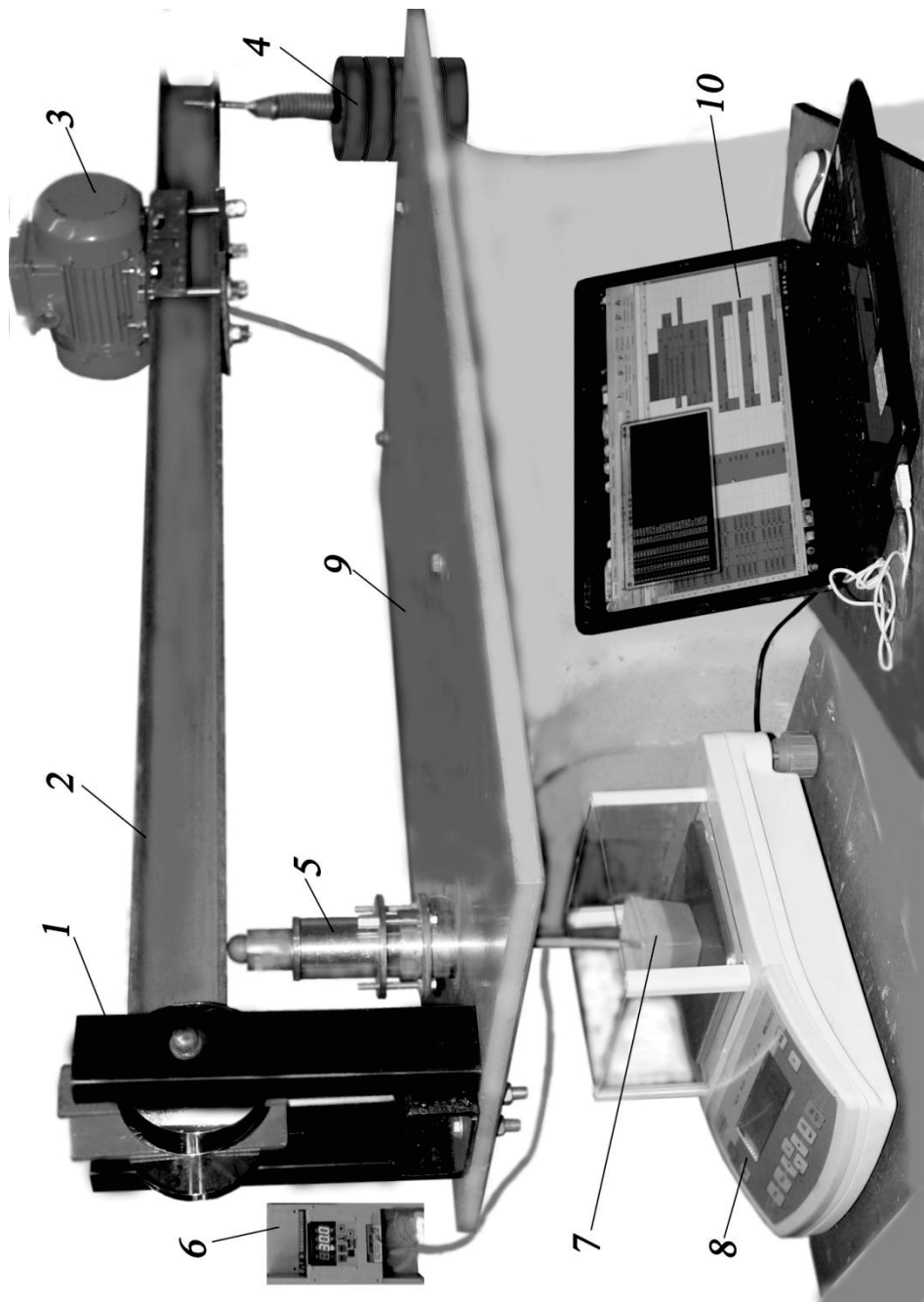
Экспериментальные исследования режимов работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО при пульсирующем и статическом давлении проводились на созданной лабораторной фильтровальной установке, принцип действия которой описан в разделе 2 настоящей работы. Данная установка изображена на рисунке 3.5. На рисунке 3.6 представлена конструкция фильтровальной камеры лабораторной установки. Основные технические характеристики лабораторной установки приведены в таблице 3.3.

При проведении экспериментальных исследований использовалась плоская фильтровальная перегородка (рис. 3.7), состоящая из жесткого перфорированного основания 1, пластиковой сетки 2 с размером ячеек близко 0,74 мм и толщиной 1,0 мм, на которой закреплялась фильтровальная ткань 3 типа 05-1010-SK 006 STN с размером ячеек 0,006 мм и толщиной 0,5 мм. Для исключения забивания пор фильтровальной ткани при проведении каждого опыта использовалась фильтровальная бумага 4.

Значения статического давления p_{st} , передаваемого на шток поршня установки (рис. 3.5) определялись расчетным методом. Поскольку усилие от груза передается на поршень посредством коромысла 2, при опускании поршня в процессе фильтрования усилие, передаваемое на шток, будет изменяться в зависимости от длины коромысла и величины опускания поршня.

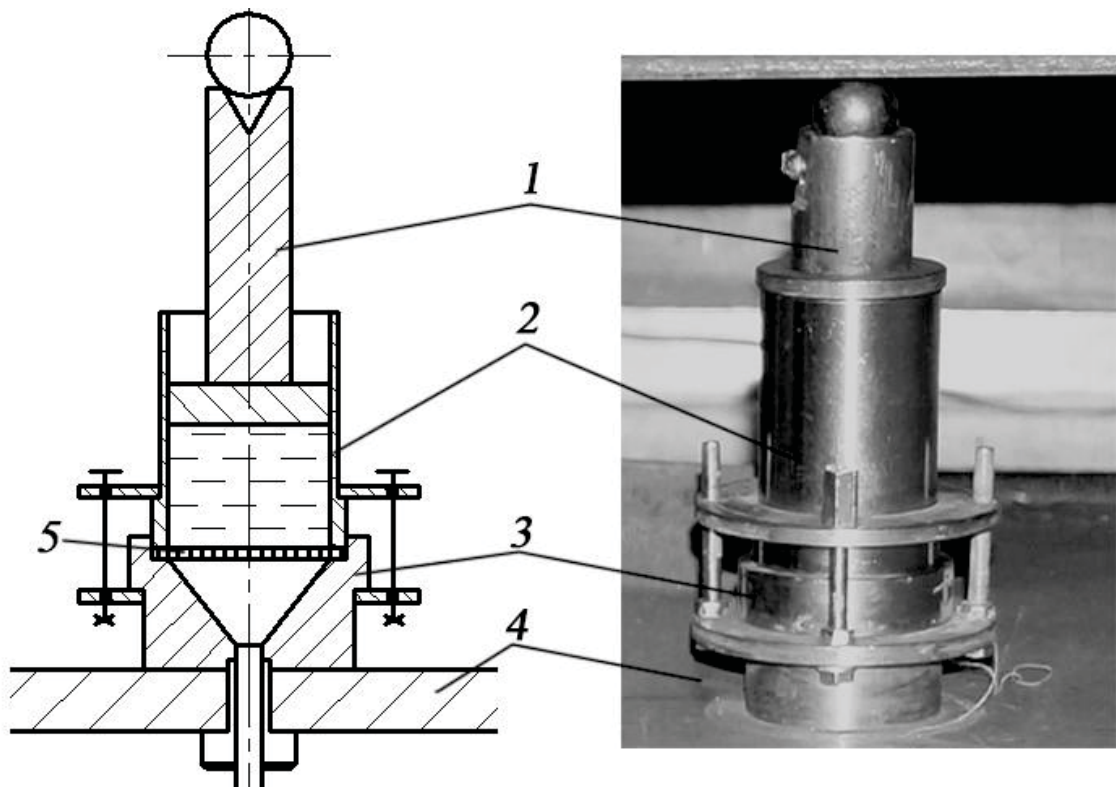
Так как давление p_{st} зависит от массы грузов m_g , подвешиваемых на конце коромысла, было выполнено тарирование давления, в соответствии с которой получена зависимость массы грузов m_g от параметра p_{st} (рис. 3.8). Относительная ошибка измерения давления p_{st} составила порядка 3%.

Значение частоты вынуждающей силы устанавливалось при помощи частотного преобразователя тока с точностью до 0,1 Гц и поддерживалось постоянным в ходе опытов. Значение параметра K_d определялось путем косвенных измерений (согласно расчетам, приведенным в приложении А).



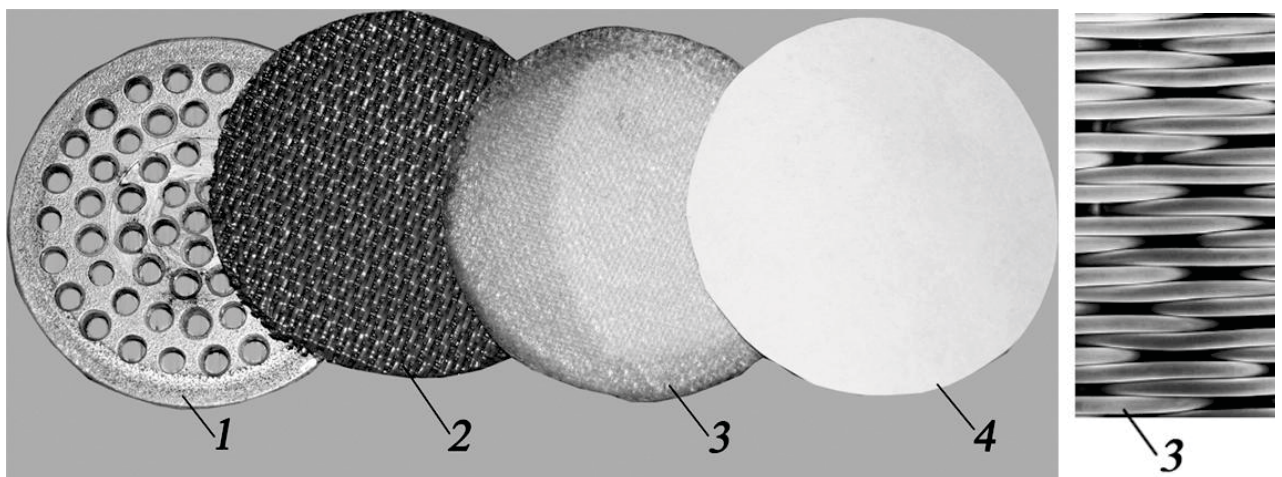
1 – опора; 2 – коромысло; 3 – вибратор; 4 – груза; 5 – фильтровальная камера; 6 – частотный преобразователь;
7 – сосуд для фильтра; 8 – лабораторные электронные весы; 9 – основание; 10 – компьютер

Рисунок 3.5 – Лабораторная фильтровая установка



1 – шток с поршнем; 2 – цилиндрическая стенка; 3 – стакан; 4 – основание;
5 – фильтровальная перегородка

Рисунок 3.6 – Конструкция фильтровальной камеры лабораторной установки



1 – стальное перфорированное основание; 2 – пластиковая сетка; 3 – фильтровальная ткань; 4 – фильтровальная бумага

Рисунок 3.7 – Фильтровальная перегородка

Таблица 3.3 – Техническая характеристика лабораторной фильтровальной установки и измерительная аппаратура

Основные параметры установки	
Внутренний диаметр фильтровального цилиндра, м	0,036
Диапазон рабочих давлений, МПа	0,5-9,0
Максимальный ход поршня, м	0,04
Высота засыпки суспензии, м	0,02
Диапазон частот возмущающей силы вибровозбудителя, Гц	0-70
Площадь фильтрования, м ²	0,001
Измерительная аппаратура	
Лабораторные весы Radwag WPS 210/C/2:	
– дискретность, г	0,001
– наибольший предел взвешивания, г	210
– класс точности II по ГОСТ 24104-2001.	
Манометр 100:	
– диапазон измерений, МПа	0,1...10
– цена деления, МПа	0,1
– класс точности	1,5

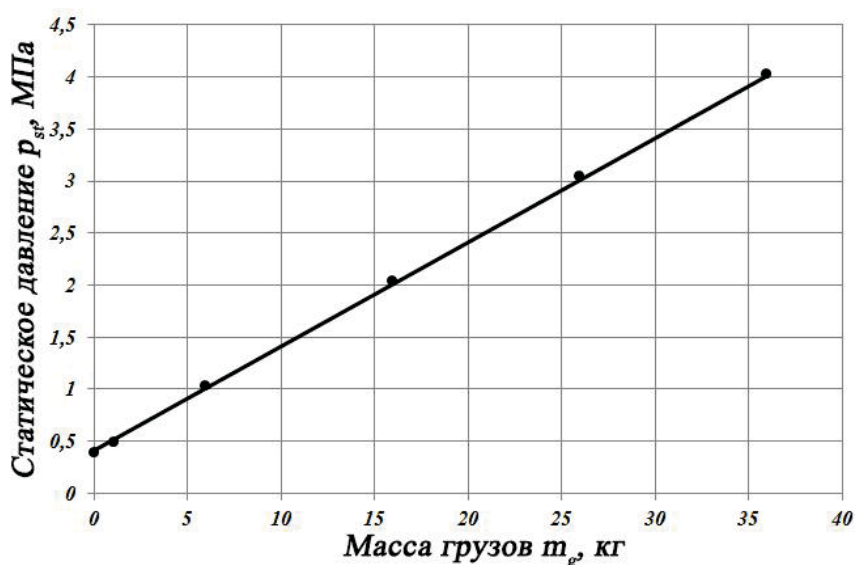
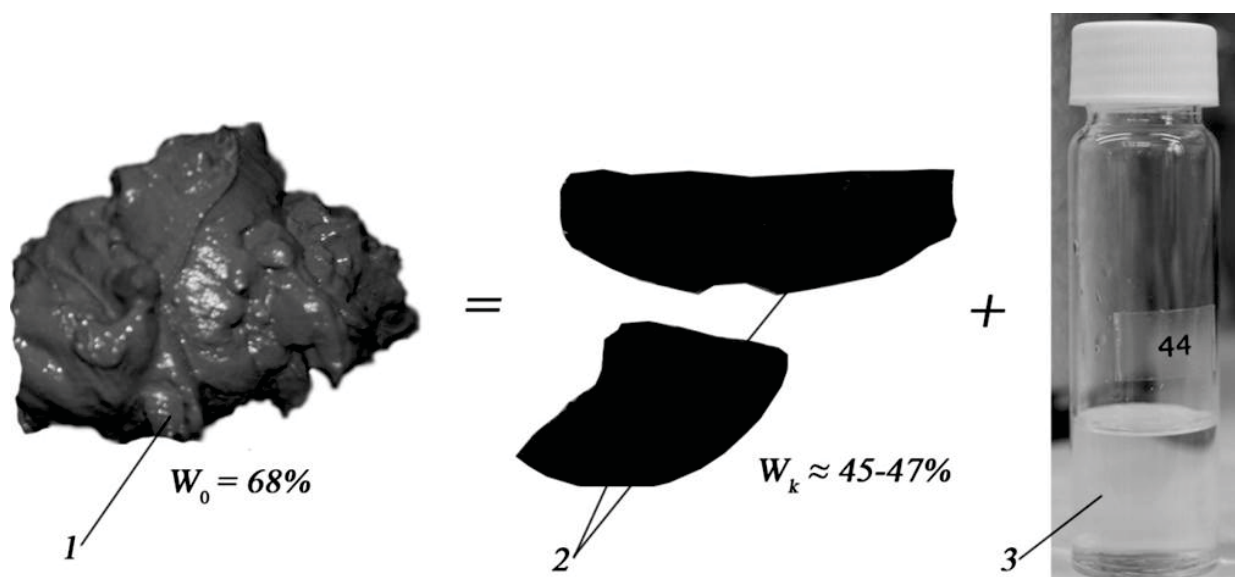


Рисунок 3.8 – Зависимость статического давления в камере лабораторной фильтровальной установки от массы грузов

В процессе проведения опытов снимались показания массы фильтрата m_f , получаемого за установленные промежутки времени Δt , значение которых записывались на компьютер, подключенный к лабораторным электронным весам. После чего выполнялся пересчет массы фильтрата в объем суспензии V по формуле: $V = m_f / \rho$ (где $\rho = 1020 \text{ кг/м}^3$ (плотность морской воды)).

В конце каждого опыта получали обезвоженный материал, средняя влажность которого составила порядка 45-47% и чистый фильтрат (рис. 3.9).



1 – исходная суспензия (ГВОМО); 2 – обезвоженный материал; 3 – фильтрат

Рисунок 3.9 – Результат обезвоживания образцов ГВОМО фильтрованием

Исследование содержания твердых частиц в фильтрате, полученном в процессе фильтрования ГВОМО, на дифракционном анализаторе (рис. 3.3) не выявило их наличие в отфильтрованной жидкости.

В эксперимент входят четыре параметра, влияние которых должно быть исследовано в результате проведения опытов. Цель эксперимента заключается в определении влияния этих параметров на процесс образования фильтрата при фильтровании ГВОМО в режиме пульсирующего давления для получения математической модели, описывающей данный процесс.

На основании априорной информации известно, что исследуемый процесс описывается нелинейными зависимостями, поэтому, для его описания принята полиномиальная модель второго порядка, имеющая вид:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < \xi \leq k} b_{i\xi} x_i x_\xi + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2,$$

где y – значение критерия; i – номер опыта; k – число факторов; $b_0, b_i, b_{i\xi}, b_{ii}$ – коэффициенты регрессии; ξ – число значимых коэффициентов.

При постановке эксперимента можно воспользоваться различными планами проведения экспериментов второго порядка, например, полными факторным экспериментом (ПФЭ) 3^k , центральными композиционными планами (ЦКП), или некомпозиционными планами [100].

Для $k = 4$ факторов рационально использовать некомпозиционные планы, поскольку эти планы, в сравнении с другими планами второго порядка, требуют проведения меньшего количества опытов [100]. Например, для 4-факторного некомпозиционного плана число опытов равно 27, а для соответствующего ЦКП второго порядка число опытов составляет 31. Некомпозиционные планы представляют собой выборку из строк ПФЭ типа 3^k , и в этих планах каждый фактор x_i варьируется на 3-х уровнях: $-1, 0, +1$, в то время как ЦКП предусматривают использование каждого фактора на 5 уровнях.

В качестве плана проведения эксперимента принят некомпозиционный план [100] для 4 факторов (табл. 3.4). Для исключения грубых системных ошибок выполнена рандомизация принятой план-матрицы [98] при которой, порядок проведения опытов был заменен хаотичной очередностью.

Для определения количества параллельных (повторных) опытов n используем зависимость, приведенную в работе [101]:

$$n = \frac{v^2 t_{\alpha,k}^2}{\Delta_a^2}, \quad (3.1)$$

Таблица 3.4 – Некомпозиционный план-матрица и рандомизированный план-матрица для четырех факторов (выборка из плана эксперимента 3⁴)

№ оп.	Фактор				
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4
1	1	1	1	0	0
2	1	1	-1	0	0
3	1	-1	1	0	0
4	1	-1	-1	0	0
5	1	0	0	1	1
6	1	0	0	1	-1
7	1	0	0	-1	1
8	1	0	0	-1	-1
9	1	0	0	0	0
10	1	1	0	0	1
11	1	1	0	0	-1
12	1	-1	0	0	1
13	1	-1	0	0	-1
14	1	0	1	1	0
15	1	0	1	-1	0
16	1	0	-1	1	0
17	1	0	-1	-1	0
18	1	0	0	0	0
19	1	1	0	1	0
20	1	1	0	-1	0
21	1	-1	0	1	0
22	1	-1	0	-1	0
23	1	0	1	0	1
24	1	0	1	0	-1
25	1	0	-1	0	1
26	1	0	-1	0	-1
27	1	0	0	0	0

№ п/п	№ оп.	Фактор			
		X_0	X_1	X_2	X_3
1	12	-1	0	0	1
2	27	0	0	0	0
3	1	1	1	0	0
4	5	0	0	1	1
5	4	-1	-1	0	0
6	6	0	0	1	-1
7	14	0	1	1	0
8	17	0	-1	-1	0
9	8	0	0	-1	-1
10	10	1	0	0	1
11	22	-1	0	-1	0
12	26	0	-1	0	-1
13	2	1	-1	0	0
14	16	0	-1	1	0
15	3	-1	1	0	0
16	9	0	0	0	0
17	7	0	0	-1	1
18	11	1	0	0	-1
19	15	0	1	-1	0
20	19	1	0	1	0
21	25	0	-1	0	1
22	21	-1	0	1	0
23	13	-1	0	0	-1
24	18	0	0	0	0
25	23	0	1	0	1
26	20	1	0	-1	0
27	24	0	1	0	-1

где ν – выборочный коэффициент вариации; Δ_a – максимальная относительная ошибка (допуск); $t_{\alpha,k}$ – значение квантили статистики t уровня при $P = 1 - \alpha/2$ для числа степеней свободы $k_z = n - 1$ (определяется по таблице).

Априорно зададимся коэффициентом вариации $\nu = 0,1$. Для $\Delta_a = 0,1$ найдем значение квантили. При доверительной вероятности $P = 1 - \alpha/2 = 0,95$ квантиль $t_{\alpha,k} = 1,64$. Подставляя данные в формулу (3.1) определяем требуемое количество измерений: $n = (0,1^2 \cdot 1,64^2) / 0,1^2 = 2,69 \approx 3$.

Для определения коэффициента вариации ν были проведены предварительные экспериментальные исследования. Опыты были проведены с использованием образцов ГВОМО при следующих параметрах фильтрации: $p_{st} = 2,0$ МПа; $K_d = 0,6$; $\omega = 251,2$ рад/с; $t = 300$ с. Количество параллельных опытов $n = 16$. Измеряемая величина: объем фильтрата V . Результаты 16 наблюдений в виде вариационного ряда представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты измерений объема фильтрата

№ оп.	1	2	3	4	5	6	7	8
$V, \text{см}^3$	3,10	3,07	3,21	3,24	3,22	3,17	3,15	3,11
№ оп.	9	10	11	12	13	14	15	16
$V, \text{см}^3$	3,25	3,16	3,09	3,14	3,2	3,2	3,23	3,18

Количество параллельных опытов может быть увеличено в случае превышения коэффициентом вариации измеряемой величины значения 0,1. Используя критерий Пирсона, проверим гипотезу, что распределение случайной величины V не противоречит нормальному закону для $\alpha = 0,1$.

Определим количество классов N' , на которое требуется разбить гistogramмы эмпирического распределения. Для этого используем рекомендации, приведенные в [102], согласно которым границы интервалов рекомендуется выбирать случайно, исходя из условия $p_i = 1/N' = \text{const}$. В этой работе также предложена другая зависимость для определения количества классов: $N' = 1 + 3,32 \lg(n) = 1 + 3,32 \lg(16) \approx 5$.

Для доверительной вероятности 90% и степеней свободы $N' - 3 = 2$ критическое значение критерия Пирсона $\chi^2_{\text{кр}}$ равно 4,61 [103]. Выберем минимальный шаг интервала 0,05. При этом границы распределения равны: 3,03 и 3,28.

Вычислим действительные частоты и распределение теоретической случайной величины, для чего составим расчетную таблицу 3.6. В приведенной таблице 3.6 расчетные параметры определялись по зависимостям [104]:

– выборочная средняя $\bar{x}$:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^* n_i}{n} = 3,174;$$

– выборочное среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\text{в}}$:

$$\sigma_{\text{в}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N n_i (x_i^* - \bar{x})^2}{n - 1}} = 0,06;$$

– значение функции Лапласа:

$$\Phi(z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_i} e^{-\frac{z^2}{2}} dz.$$

Критерий согласия Пирсона определяется:

$$\chi_p^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i} = 0,25.$$

При доверительной вероятности 90 % соблюдается неравенство $\chi_p^2 < \chi^2_{\text{кр}}$ ($0,25 < 4,61$), поэтому нет оснований отвергнуть гипотезу о нормальном распределении генеральной совокупности.

Таблица 3.6 – Расчетные значения параметров распределения случайной величины V

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	3,03	3,08	3,055	1	–	-0,094
2	3,08	3,13	3,105	3	-0,094	-0,044
3	3,13	3,18	3,155	4	-0,044	0,006
4	3,18	3,23	3,205	5	0,006	0,056
5	3,23	3,28	3,255	3	0,056	–
Сумма				16		

Таблица 3.6 (продолжение)

Номер интервала i	Нормированные границы интервалов		Значения функции Лапласа		Вероятн. попадания в интервал	Расч. частота
	$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_{\theta}}$	$z_{i+1} = \frac{x_{i+1} - \bar{x}}{\sigma_{\theta}}$	$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$	$P_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$	$n_i' = n \cdot P_i$
1	$-\infty$	-1,557	-0,5	-0,44	0,06	0,956
2	-1,557	-0,727	-0,44	-0,266	0,174	2,784
3	-0,727	0,104	-0,266	0,041	0,308	4,922
4	0,104	0,934	0,041	0,325	0,284	4,537
5	0,934	∞	0,325	0,5	0,174	2,801
Сумма					1	16

Сравнение статистических и теоретических плотностей распределения параметра V приведены на рис. 3.10.

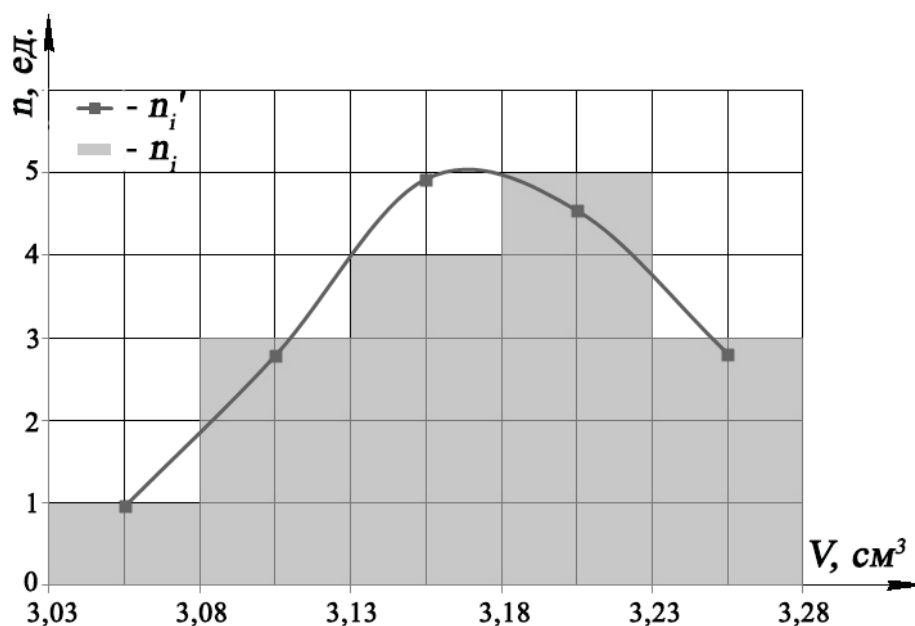


Рисунок 3.10 – Гистограммы распределения параметра V

По оси ординат (рис. 3.10) отложено количество измерений, приходящееся на каждый интервал. Распределение случайных величин n_i показано в виде гистограммы, а теоретическое распределение n_i' – как полигон частот. Коэффициент вариации параметра V составил $\nu = \sigma/\bar{x} = 0,02$ менее 10%, поэтому окончательно принимаем количество параллельных опытов $n = 3$.

3.3.3 Исследование режима работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО при статическом давлении

Целью настоящих исследований является получение математической модели, описывающей режим работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО при статическом давлении.

Согласно требованиям, предъявляемым к варьируемым параметрам (см. п. 3.2), для режима работы фильтровальной машины при статическом давлении (без пульсации) установлены факторы: p_r и t . В качестве выходного па-

раметра (отклика) используем удельный объем фильтрата $q = V/S$ (м). Таким образом, получена система из двух параметров: $q = f(p_r, t)$.

Поскольку исследуется влияние лишь двух параметров, для получения более точной математической модели процесса выбраны диапазоны варьирования несколько шире, чем для процесса при пульсирующем давлении. Диапазоны варьирования факторов приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Диапазоны варьирования факторов p_r и t

Фактор	Шаг варьирования	Уровни варьирования	
		верхний «+1»	нижний «-1»
p_r	5	70	5
t, c	30	1800	60

Исследования проводились на лабораторной фильтровальной установке, представленной на рисунке 3.5 (при выключенном вибраторе). В качестве исходной суспензии взяты пробы ГВОМО, которые использовались при исследовании процесса, протекающего при пульсирующем давлении. Свойства исследуемых образцов описаны в п. 3.3.1 настоящей работы.

Так как имеющееся оборудование позволяет регистрировать и записывать значений массы фильтрата, образованного за установленные промежутки времени (после чего определялся параметр q , соответствующий времени t), количество опытов для установленного интервала варьирования параметра p_r составило $N = 14$. Количество параллельных опытов принято равным трем.

3.4 Обработка результатов эксперимента и построение математической модели режима работы машины при пульсации давления

Для процесса фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении результаты измерений параметра q_L (отклика) для 3-х параллельных опытов приведены в таблице 3.8 (при $H = 0,02$ м).

Таблица 3.8 – Результаты измерений параметра q_L

№ оп.	Повторные опыты			Среднее значение
	1	2	3	
1	0,2165	0,22065	0,21425	0,2172
2	0,1889	0,18805	0,1905	0,1892
3	0,15245	0,15655	0,15375	0,1543
4	0,13145	0,1394	0,13455	0,1351
5	0,26085	0,26505	0,2619	0,2626
6	0,05005	0,05345	0,0481	0,0505
7	0,2480	0,25495	0,25555	0,2528
8	0,0487	0,0481	0,04925	0,0487
9	0,1806	0,1761	0,1797	0,1788
10	0,30405	0,2939	0,2959	0,2980
11	0,06145	0,0589	0,05765	0,0593
12	0,1936	0,2015	0,1995	0,1982
13	0,03935	0,04785	0,04345	0,0436
14	0,1801	0,1806	0,17855	0,1797
15	0,19765	0,191	0,1945	0,1944
16	0,16205	0,1605	0,16405	0,1622
17	0,1675	0,1706	0,1664	0,1682
18	0,1755	0,1781	0,18005	0,1779
19	0,20295	0,1932	0,1997	0,1986
20	0,21925	0,2142	0,22635	0,2199
21	0,14015	0,1482	0,14815	0,1455
22	0,13185	0,1405	0,13745	0,1366
23	0,27145	0,2685	0,2711	0,2704
24	0,0478	0,0486	0,04815	0,0482
25	0,22675	0,2269	0,22655	0,2267
26	0,04675	0,0475	0,0469	0,0471
27	0,17255	0,1749	0,1782	0,1752

Основной задачей обработки результатов экспериментальных исследований является оценка параметров принятой модели и проверка гипотезы об ее адекватности (ее соответствии результатам опытов). Для решения этой задачи необходимо решить ряд подзадач: оценку дисперсий откликов; определение коэффициентов регрессии и их значимости; проверку адекватности модели.

Дисперсии откликов определяются по формуле [104]:

$$s_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2,$$

где y_i – i -тое значение отклика; $\bar{y}_i$ – среднее значение i -того отклика.

Рассчитанные значения дисперсий заносятся в таблицу и используются в дальнейшей обработке данных.

Оценка брака измерений откликов проводится по критерию Стьюдента [105], при этом должно выполняться условие: $t_{\text{расч}} < t_\alpha$, где t_α – табличное значение критерия Стьюдента. Расчетное значение критерия Стьюдента $t_{\text{расч}}$ определяется как:

$$t_{\text{расч}} = \frac{(y_i - \bar{y}_i)}{\sqrt{s_i^2}}.$$

Проверка однородности дисперсий выполняется для определения равнозначности откликов во всех точках (строках) плана [96]. Понятие однородности нескольких оценок дисперсий $s_1^2, s_2^2 \dots s_N^2$ означает, что все s_N^2 величины являются оценками одной и той же дисперсии s_i^2 , которая называется дисперсией воспроизводимости, или дисперсией опытов.

Для проверки однородности оценок s_i^2 применяют критерий Кохрена [102, 105]. Дисперсии считаются однородными, если выполняется условие: $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$, где $G_{\text{расч}}$ и $G_{\text{табл}}$ – расчетное и табличное значения критерия Кохрена соответственно.

Расчетное значение критерия Кохрена определяется:

$$G_{\text{расч}} = \frac{s_{\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^N s_i^2},$$

где s_{max}^2 – максимальное значение дисперсии; N – число опытов.

Табличное значение $G_{\text{табл}}$ определяется в зависимости от числа степеней свободы: $f_1 = n - 1 = 3 - 1 = 2$ и $f_2 = N = 27$ (число строк плана) [102].

Выполнение требования однородности построчных дисперсий S_u^2 позволяет определить дисперсию воспроизводимости опытов:

$$s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i^2.$$

Дисперсия воспроизводимости опытов в центре плана (0-й точке) равна:

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{z_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{z_0 - 1},$$

где y_{0u} – значение функции отклика в u -том опыте; $\bar{y}_0$ – среднее арифметическое значение функции отклика в центре плана; u – номер параллельного опыта в центре плана; z_0 – число опытов в центре плана.

Для установленного плана проведения опытов (табл. 3.4) регрессионная модель запишется в виде квадратичного полинома:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + \\ + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2.$$

Коэффициенты регрессии b_0 , b_i , $b_{i\zeta}$, b_{ii} определяются методом наименьших квадратов (МНК) или используя зависимости, приведенные в [100].

МНК является универсальным методом определения коэффициентов регрессии линейных и нелинейных полиномиальных зависимостей. Суть этого метода заключается в минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от искомых переменных. Таким образом, сущность МНК может быть выражена следующим образом:

$$\sum_i s_i^2 = \sum_i (y_i - f_i(x_i))^2 \rightarrow \min(x).$$

Согласно МНК b -коэффициенты регрессии находятся при решении системы нормальных уравнений:

$$\begin{cases} Nb_0 + b_1 \sum x_1 + b_2 \sum x_2 + b_3 \sum x_3 \dots = \sum y \\ b_0 \sum x_1 + b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2 + b_3 \sum x_1 x_3 \dots = \sum y x_1 \\ b_0 \sum x_2 + b_1 \sum x_1 x_2 + b_2 \sum x_2^2 + b_3 \sum x_2 x_3 \dots = \sum y x_2 \\ \dots \end{cases}$$

При этом b -коэффициенты можно найти по выражению [100]:

$$B = [X(X_p)^T]^{-1} \cdot [\hat{Y}(X_p)^T],$$

где B – матрица-столбец неизвестных b -коэффициентов регрессии; X – матрица значений параметров x_i , полученная в соответствии из планом эксперимента; X_p – расширенная матрица X , включающая взаимодействия факторов и их степени; $\hat{Y}$ – матрица усредненных значений откликов (для n параллельных опытов: $\hat{Y}_i = (y_{i1} + y_{i2} + y_{i3})/n$); X_p^T – транспонированная матрица X_p .

После нахождения b -коэффициентов регрессии выполняют оценку их значимости. При этом для каждого коэффициента определяется доверительный интервал. Если коэффициент регрессии меньше значения доверительного интервала его считают малозначимым и им пренебрегают (приравнивая к «0»).

Для определения доверительных интервалов коэффициентов регрессии при помощи МНК определяются их дисперсии, которые находятся по выражению:

$$D_b = [X(X_p)^T]^{-1} \cdot [D_y(X_p)^T],$$

где D_b – матрица-столбец дисперсий s_{bi}^2 коэффициентов регрессии; D_y – матрица-столбец дисперсии откликов y_i .

Доверительные интервалы для коэффициентов регрессии определяются:

$$\Delta b_i = \pm t_\alpha \sqrt{s_{bi}^2},$$

где t_α – коэффициент Стьюдента для количества параллельных опытов n и доверительной вероятности α (определяется по таблицам).

После определения доверительных интервалов для коэффициентов регрессии выполняется проверка условия: $b_i > \Delta b_i$. Если данное условие выполняется коэффициент регрессии принято считать значимым. Если условие не выполняется коэффициентом регрессии можно пренебречь.

Адекватность полученной модели проверяют по критерию Фишера [105], если выполняется условие $F_{\text{расч}} < F_{\text{т}}$, где $F_{\text{расч}}$ и $F_{\text{т}}$ – соответственно расчетное и табличное значение критерия Фишера. В противном случае гипотеза об адекватности модели отклоняется.

Расчетное значение критерия Фишера определяется: $F_{\text{расч}} = s_{\text{ад}}^2 / s_y^2$ (где $s_{\text{ад}}^2$ – дисперсия адекватности). Дисперсия адекватности при этом равна

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - Y_i)}{N - (k + 1)},$$

где $\bar{y}_i$ – среднее значение параметра оптимизации по n параллельным опытам; Y_i – расчетные значения i -параметров оптимизации (согласно модели).

Рассчитанные согласно полученной математической модели значения параметров $Y_i = (q_L)_i$ будут отличаться от измеренных в ходе проведения опытов значений y_i . Чем меньше это отличие, тем ближе теоретические значения подходят к эмпирическим данным (меньше ошибка аппроксимации).

Для оценки качества модели следует определить среднюю относительную ошибку аппроксимации $\bar{\Delta}$ [106], характеризующую среднее относительное отклонение расчетных Y_i и экспериментальных y_i данных. Для этого воспользуемся формулой:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Y_i - y_i|}{Y_i} \cdot 100\%. \quad (3.2)$$

Другим параметром, характеризующим тесноту связи между аппроксимирующей зависимостью и экспериментальными данными, является корреляционное соотношение r_{kor} , определяемое по формуле [106]:

$$r_{kor} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.3)$$

где $\bar{y}$ – среднее арифметическое экспериментальных значений откликов (всей выборки).

Для варьируемых параметров, которые определялись путем косвенных измерений, максимальная погрешность результирующего измерения ε_p определялась по формуле:

$$\varepsilon_p = \sqrt{\sum \varepsilon_i^2},$$

где ε_i – максимальная относительная погрешность i -тых параметров, через которые определялась расчетная величина.

В результате проведенных расчетов (приложение Б) для режима работы фильтровально-пульсационной машины при пульсации давления применительно к ГВОМО получена регрессионно-статистическая математическая модель:

$$Y = 0,177 + 0,031X_1 + 0,011X_2 + 0,101X_4 + 0,021X_1X_4 + 0,011X_2X_4 - 0,026X_4^2. \quad (3.4)$$

Используя зависимость: $X_i = (x_i - x_{0i})/c_i$, перейдем от кодированных переменных X_i к физическим x_i . Кодированные факторы примут вид:

$$\begin{cases} X_1 = \frac{x_1 - 25}{15} \\ X_2 = \frac{x_2 - 2}{1} \\ X_3 = \frac{x_3 - 0,6}{0,3} \\ X_4 = \frac{x_4 - 5,5}{4,5} \end{cases}$$

Следовательно, математическая модель (3.4) запишется в виде:

$$Y = 0,177 + 0,031 \left(\frac{x_1 - 25}{15} \right) + 0,011(x_2 - 2) + 0,101 \left(\frac{x_4 - 5,5}{4,5} \right) + 0,021 \left(\frac{x_1 - 25}{15} \right) \left(\frac{x_4 - 5,5}{4,5} \right) + 0,011(x_2 - 2) \left(\frac{x_4 - 5,5}{4,5} \right) - 0,026 \left(\frac{x_4 - 5,5}{4,5} \right)^2.$$

Отсюда получим интерполяционную модель в физических переменных:

$$q_L = 11,21 \times 10^{-3} + 0,36 \times 10^{-3}p_r - 2,44 \times 10^{-3}\omega_r + 23,36 \times 10^{-3}T + 0,31 \times 10^{-3}Tp_r + 2,44 \times 10^{-3}T\omega_r - 1,23 \times 10^{-3}T^2. \quad (3.5)$$

Зависимость (3.5) может быть применена при прогнозировании значений приведенного объема фильтрата q_L , полученного с площади $S = 0,001 \text{ м}^2$ при

начальной высоте слоя суспензии $H = 0,02$ м, для любых значений параметров, находящихся между верхними и нижними уровнями варьирования.

Для математической модели (3.5) рассчитанное по формуле (3.2) значение относительной ошибки аппроксимации составило 10,8%. Корреляционное соотношение, определяемое по (3.3), для полученной математической модели (3.5) составило 0,986. Это свидетельствует о хорошем подборе модели к исходным данным. По критерию Фишера модель является адекватной.

3.5 Математическая модель режима работы машины при статическом давлении

После проведения экспериментальных исследований процесса фильтрации ГВОМО при статическом давлении (см. п. 3.4.5) получены значения объема фильтрата V , соответствующие времени t . Экспериментальные данные, полученные в ходе опытов, представлены в приложении В.

Для построения математической модели воспользуемся зависимостью (2.16), которую перепишем в виде:

$$q = \sqrt{t/r_{\text{пр}}(p_{st})}. \quad (3.6)$$

На основании полученных экспериментальных данных, определим зависимость $r_{\text{пр}} = f(p_{st})$. Для этого в координатах $q - t/q$ построены зависимости соответствующие параметрам $p_{st} = \text{const}$ (рис. 3.11). Данные зависимости аппроксимированы прямыми, вида [43]: $t/q = r_{\text{пр}}q + r_{\text{пр}}^{\text{фп}}$ (где $r_{\text{пр}}^{\text{фп}}$ – приведенное удельное сопротивление ФП, с/м^2). Параметры $r_{\text{пр}}$ и $r_{\text{пр}}^{\text{фп}}$ определялись графическим методом [107].

Пренебрегая удельным сопротивлением фильтровальной перегородки, поскольку оно очень мало в сравнении с параметром $r_{\text{пр}}$, получена зависимость $r_{\text{пр}} = f(p_r)$ при $p_a = 0,1$ МПа, представлена на рисунке 3.12.

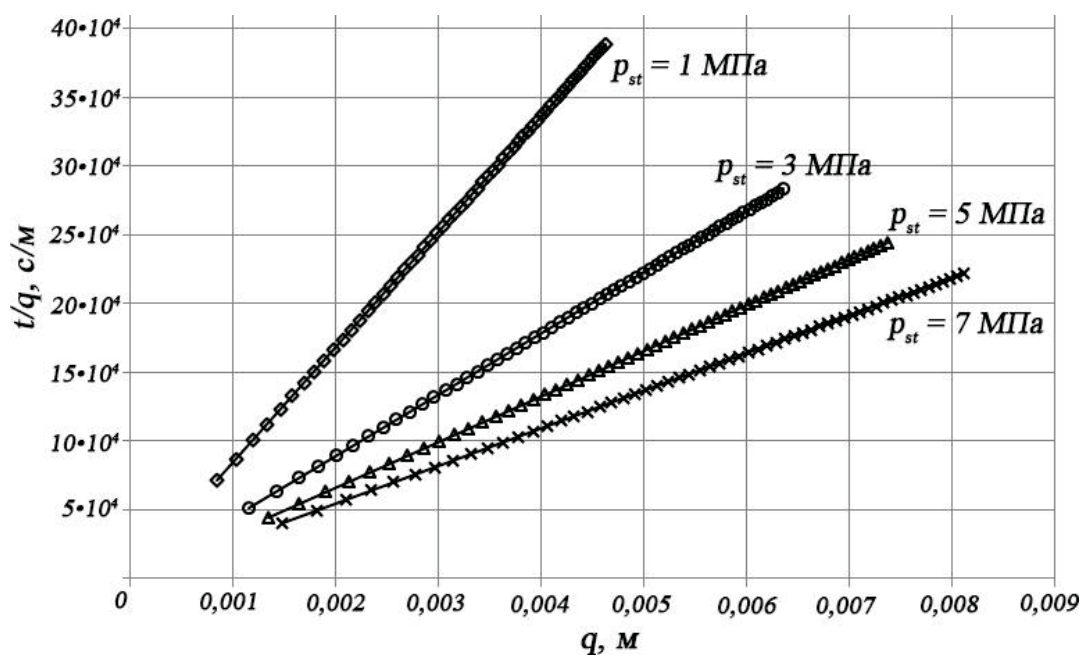


Рисунок 3.11 – Зависимости параметра t/q от удельного объема фильтрата

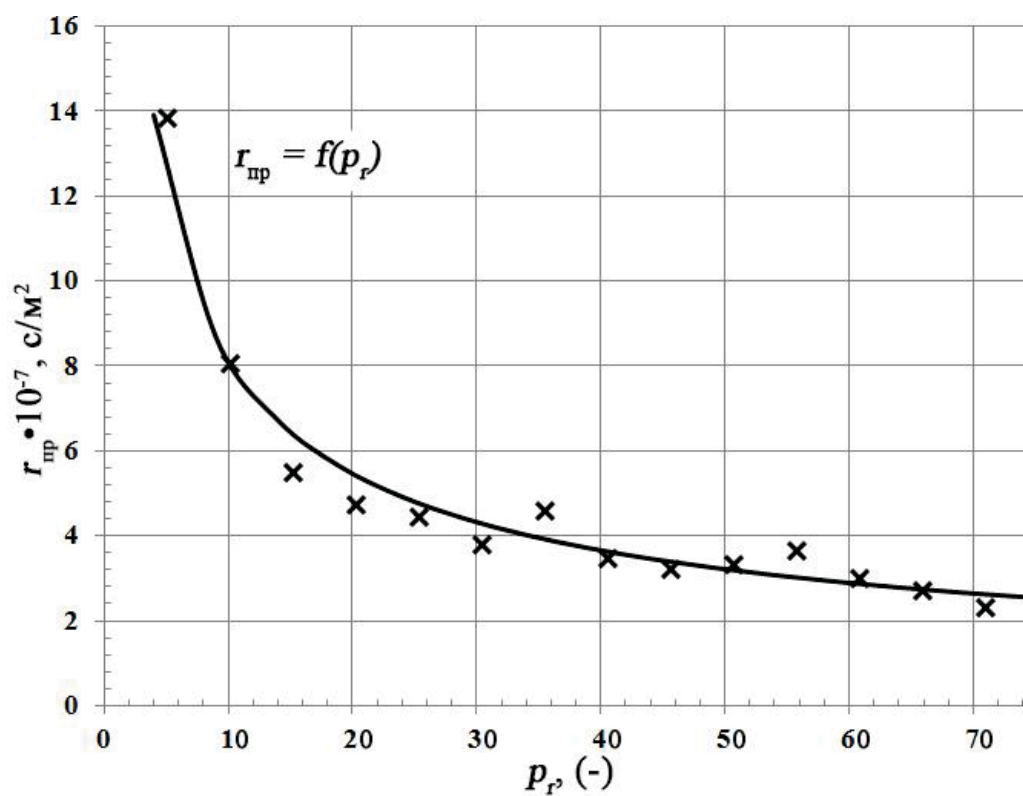


Рисунок 3.12 – Зависимость параметра приведенного удельного сопротивления осадка от давления

Зависимость (рис. 3.12) хорошо аппроксимируется степенной функцией:

$$r_{\text{пр}}(p_r) = a_r \cdot p_r^{-k_1}, \quad (3.7)$$

где $a_r = 3,109 \cdot 10^8 \text{ с/м}^2$; $k_1 = 0,58$.

Подставив зависимость (3.7) в (3.6), после соответствующих преобразований получим:

$$q = \sqrt{\frac{t \cdot p_r^{k_1}}{a_r}}. \quad (3.8)$$

Полученная зависимость (3.8) описывает режим работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО при статическом давлении, изменяющемся в диапазоне 0,5 – 7,0 МПа.

Для математической модели (3.8) выполнен статистический анализ в ходе которого определялись относительные отклонения $\Delta_{\text{отн}}$ расчетных и экспериментальных значений удельного объема фильтрата q для промежутков времени $t = 60 \dots 1800$ (с) при для доверительной вероятности $\alpha_v = 0,9$ (рис. 3.13).

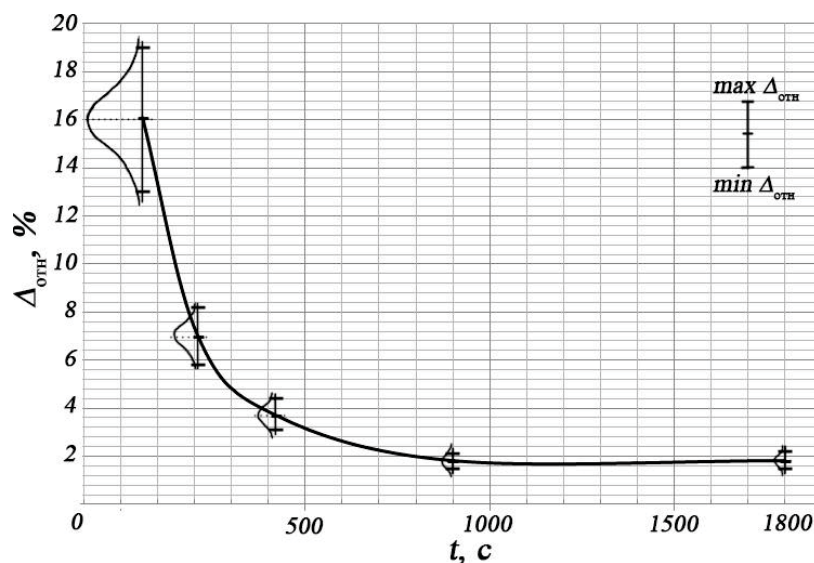
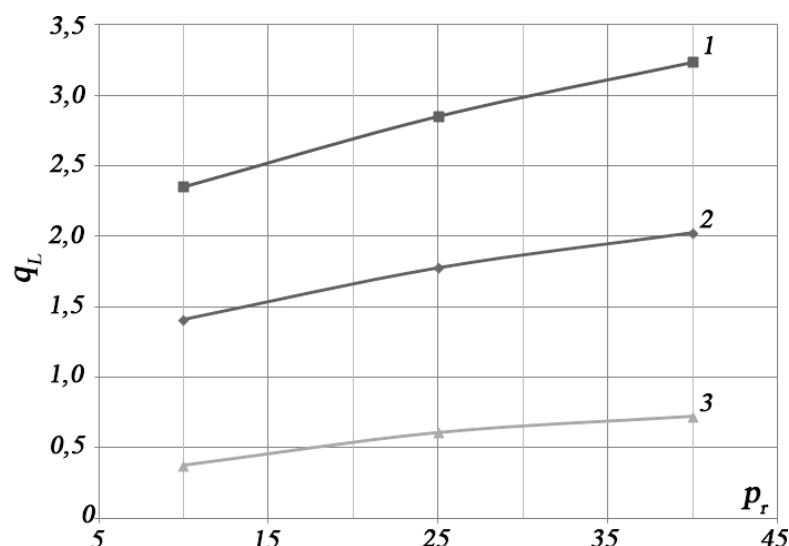


Рисунок 3.13 – Зависимость относительных отклонений от времени

Средняя суммарная относительная ошибка аппроксимации экспериментальных значений параметров q расчетными параметрами, согласно модели (3.8), составила 3%. Для доверительной вероятности 0,9 максимальное относительное отклонение расчетных по (3.8) и экспериментальных значений q составило 19% (для $t = 60$ с). С увеличением времени t относительное отклонение уменьшается: для $t = 210$ (с) максимальная ошибка составляет 8,2%; для $t = 700 \dots 1800$ (с) максимальная ошибка не превышает 3%.

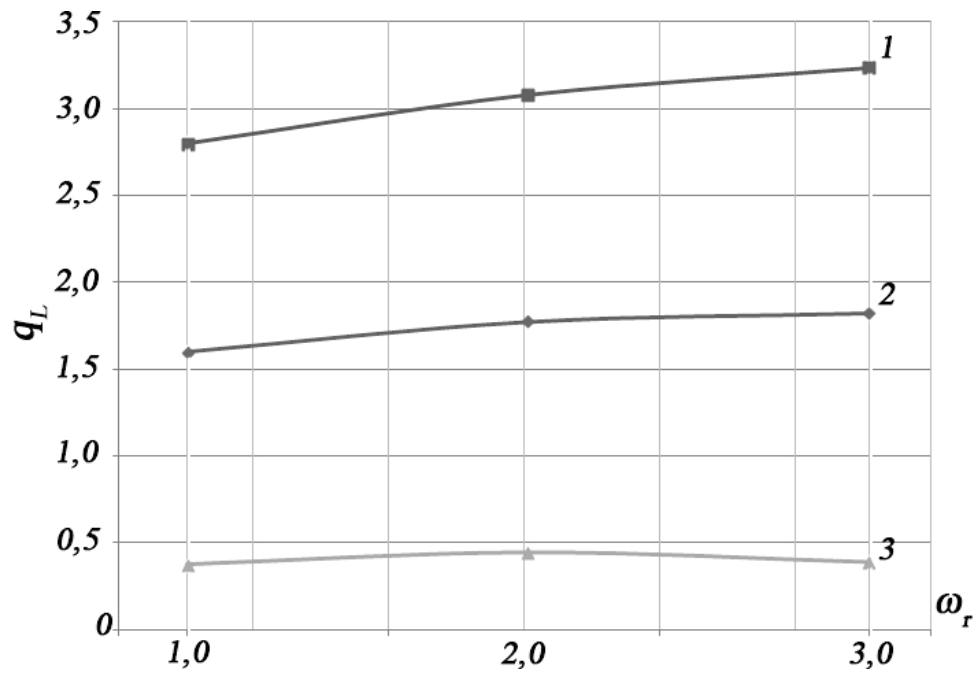
3.6 Анализ влияния параметров фильтровально-пульсационной машины на процесс фильтрации ГВОМО при пульсирующем давлении

Математическая модель (3.4), описывающая режим работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО при пульсирующем давлении позволяет установить степень влияния параметров, входящих в эту модель, на функцию отклика. При этом получены графические изображения влияния переменных x_1, x_2, x_3, x_4 ($x_1 = p_r, x_2 = \omega_r, x_3 = K_d, x_4 = T$) на функцию отклика $Y = q_L$ при различных состояниях системы (рис. 3.14 – 3.20).



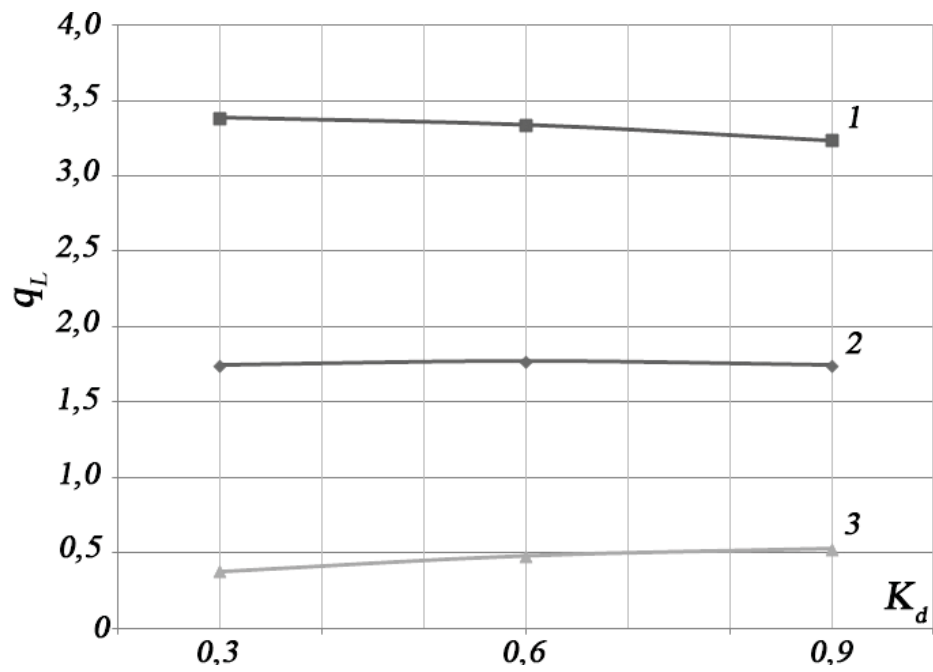
1 – система «+»; 2 – система «0»; 3 – система «-»

Рисунок 3.14 – Влияние давления фильтрации на q_L



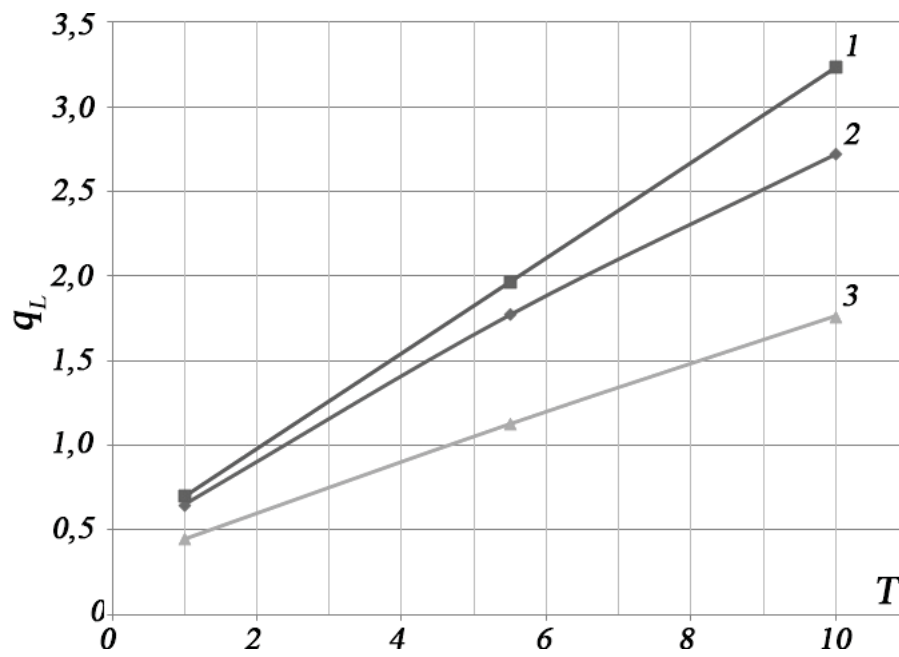
1 – система «+»; 2 – система «0»; 3 – система «-»

Рисунок 3.15 – Влияние частоты пульсации давления на q_L



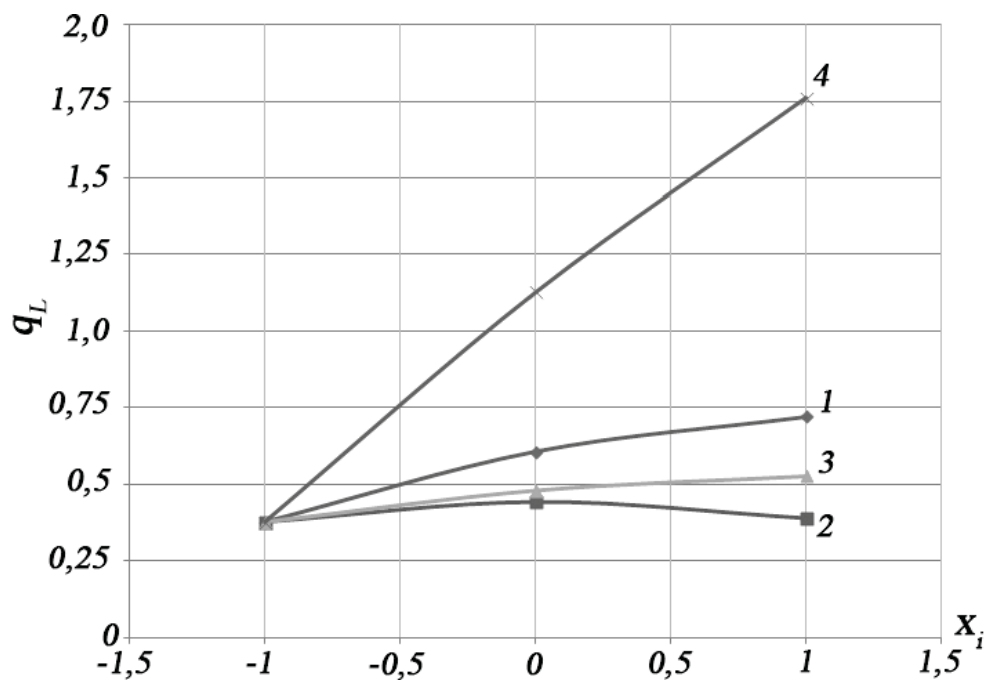
1 – система «+»; 2 – система «0»; 3 – система «-»

Рисунок 3.16 – Влияние коэффициента динамичности на q_L



1 – система «+»; 2 – система «0»; 3 – система «-»

Рисунок 3.17 – График влияния приведенного времени фильтрации на q_L



1 – x_1 ; 2 – x_2 ; 3 – x_3 ; 4 – x_4

Рисунок 3.18 – График изменения x_i для отрицательного положения системы при определении параметра q_L

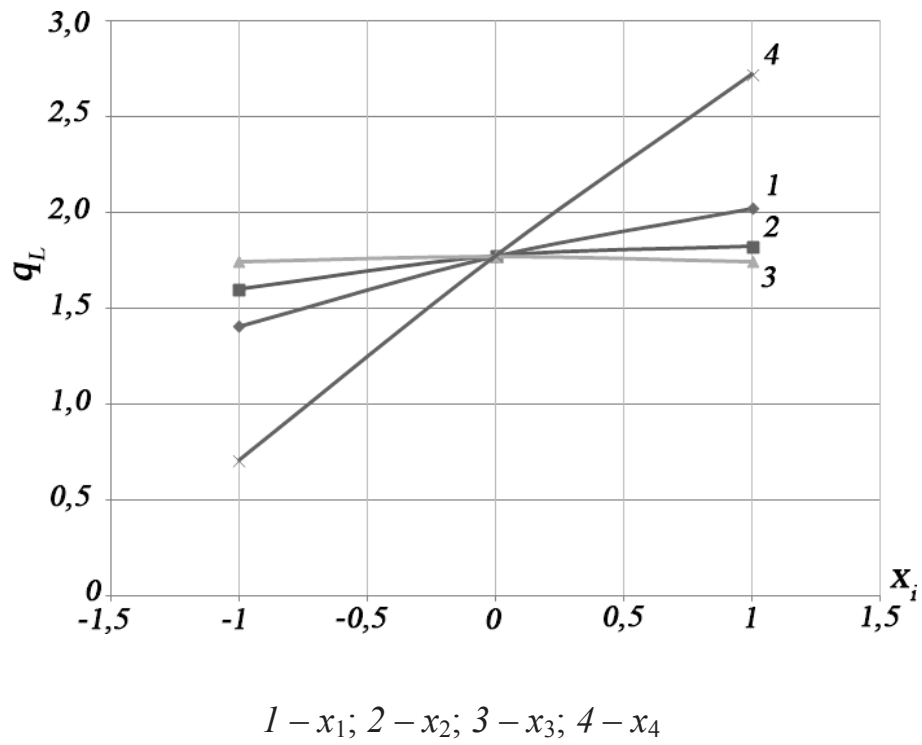


Рисунок 3.19 – График изменения x_i для нулевого положения системы при определении параметра q_L

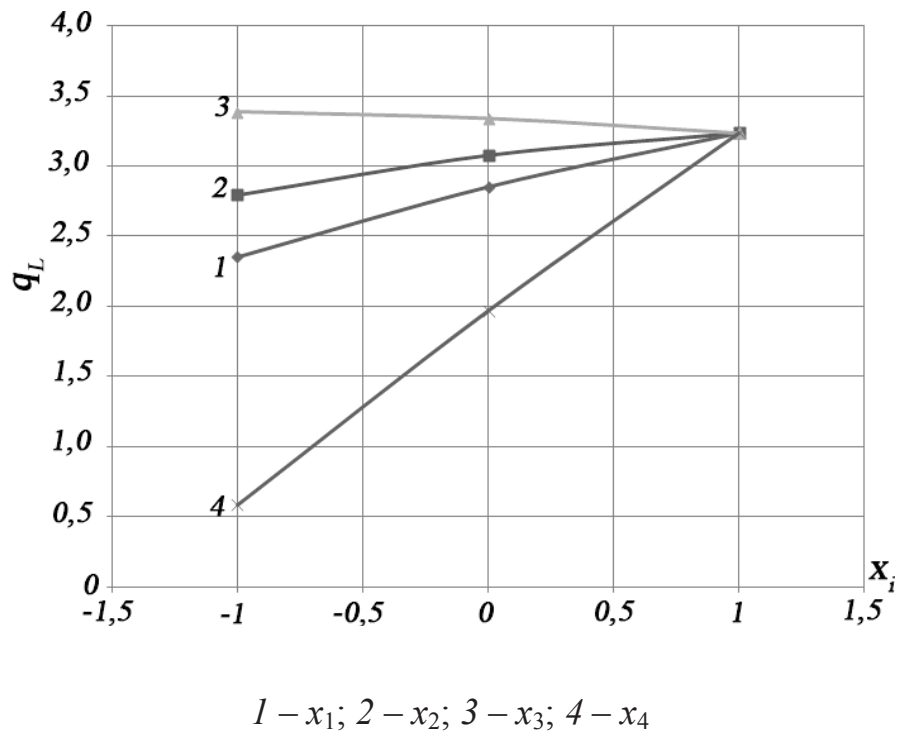


Рисунок 3.20 – График изменения x_i для положительного положения системы при определении параметра q_L

При построении зависимостей (рис. 3.14 – 3.17) параметры, влияющие на процесс фильтрования ГВОМО, фиксировались на разных уровнях системы: нижнем уровне системы «–»; среднем уровне системы «0»; и верхнем уровне системы «+».

Согласно вышеприведенным зависимостям видно, что наибольшее влияние на процесс фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении оказывает время фильтрования t . Вторым по значимости параметром является статическая составляющая давления p_{st} . С повышением уровня системы степень влияния этого параметра увеличивается.

При повышении статической составляющей давления и частоты пульсации давления (в исследуемом диапазоне) для всех уровней системы соответственно наблюдается повышение приведенного объема фильтрата. Однако для положения системы в «–» удельный объем фильтрата практически не изменяется в зависимости от частоты.

Коэффициент динамичности K_d оказывает наименьшее влияние на процесс фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении, а изменение этого параметра в установленном диапазоне варьирования практически не оказывает влияния на исследуемый процесс, – что подтверждают проведенные статистические расчеты [108]. Согласно данным расчетам коэффициенты регрессии при всех параметрах K_d в полученной регрессионно-статистической математической модели (3.5) могут быть исключены, так как их интервалы варьирования меньше соответствующих доверительных интервалов. Следовательно, значение коэффициента динамичности для расчетов можно принимать постоянным и равным минимальному значению из исследуемого диапазона равному $K_d = 0,3$.

Математическую модель (3.4) удобно использовать при оценке степени влияния параметров на процесс фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении. Однако эта модель не позволяет расширить диапазон варьирования основного влияющего параметра – времени фильтрования, а также не учитывает изменение влажности суспензии в процессе обезвоживания ГВОМО и высоту слоя суспензии.

Поэтому на основании экспериментальных данных и проведенного анализа степени влияния параметров на процесс фильтрования ГВОМО получим модель для более широкого диапазона варьирования времени фильтрования, учитывающую влажность суспензии и высоту фильтруемого слоя. Для построения этой модели использовались усредненные значения объема фильтрата V при $K_d = 0,3$, получаемые за время t в ходе проведения экспериментальных исследований (табл. 3.9).

Воспользуемся зависимостью (2.16), которую представим в виде:

$$q = \sqrt{\frac{t}{r'_{\text{пр}}(p_{st}, \omega)}} - K_s, \quad (3.9)$$

где $r'_{\text{пр}}$ – приведенное удельное сопротивление осадка (для режима при пульсирующем давлении), с/м^2 ; K_s – усредненное значение приведенного объема фильтрата, образованного в период нестационарного протекания процесса обезвоживания в период времени от 0 до t_0 , м.

Определим зависимость $r'_{\text{пр}} = f(p_{st}, \omega)$. Так как параметры p_{st} и ω размерные величины, используем безразмерные параметры: $p_r = p_{st}/p_a$ и $\omega_r = \omega/\omega_{\min}$. По методике, описанной в п. 3.5, выполнен расчет параметров $r'_{\text{пр}}$ для соответствующих значений ω_r и p_r . Результаты расчета приведены в виде графиков зависимости параметра $r'_{\text{пр}}$ от p_r и ω_r на рисунке 3.21.

Зависимости (рис. 3.21) хорошо аппроксимируются степенной функцией:

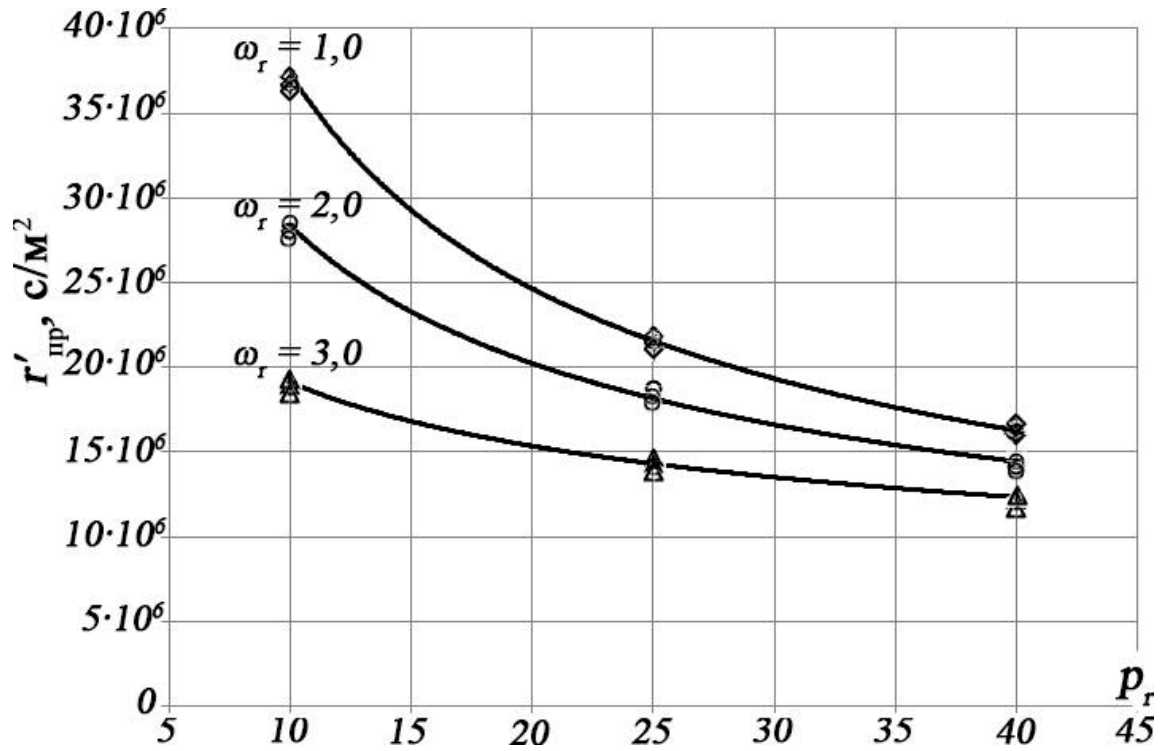
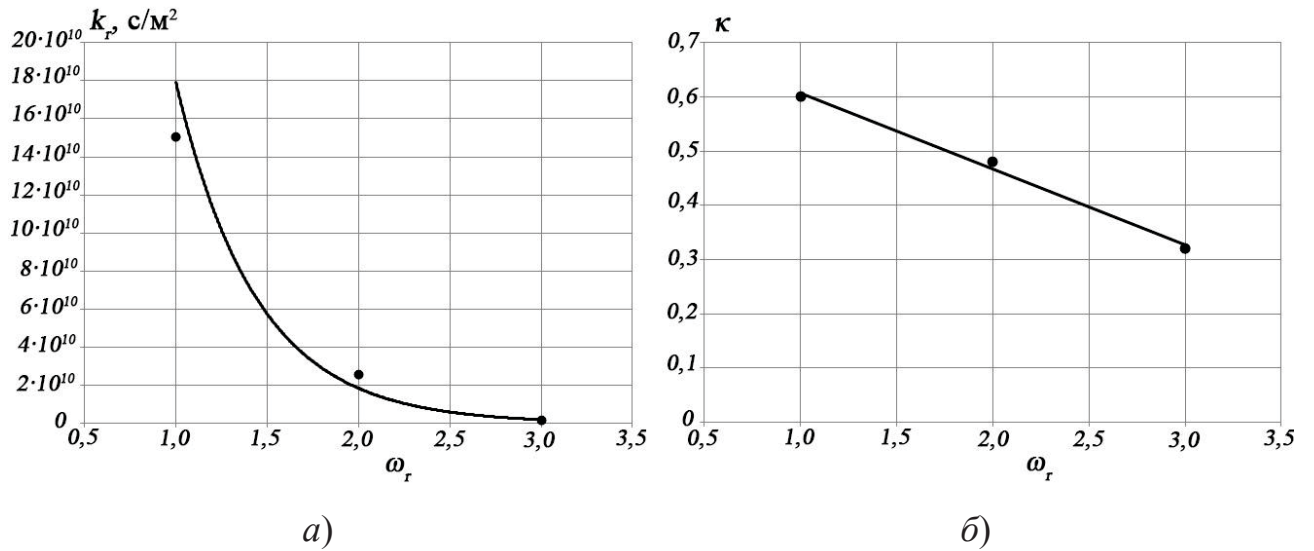
$$r'_{\text{пр}}(p_r) = \frac{k_r}{p_r^{\kappa}}, \quad (3.10)$$

где k_r – параметр, характеризующий приведенное удельное сопротивление осадка с/м^2 ; κ – показатель степени.

При $K_d = \text{const}$ получены зависимости параметров k_r и κ от частоты ω_r . Данные зависимости представлены на рисунке 3.22.

Таблица 3.9 – Усредненные значения объема фильтрата V (см³) для $K_d = \text{const} = 0,3$

$t, \text{с}$	$\omega_r = 1$			$\omega_r = 2$			$\omega_r = 3$		
	p_r			p_r			p_r		
	10	25	40	10	25	40	10	25	40
60	0,664	0,716	0,821	0,775	0,970	1,317	0,633	1,196	1,324
90	0,967	1,116	1,300	1,106	1,423	1,798	1,019	1,712	1,934
120	1,222	1,433	1,662	1,383	1,782	2,187	1,354	2,076	2,390
150	1,452	1,740	2,005	1,652	2,110	2,532	1,619	2,429	2,765
180	1,649	1,980	2,300	1,880	2,398	2,837	1,854	2,734	3,116
210	1,834	2,237	2,567	2,074	2,624	3,126	2,103	3,006	3,412
240	2,005	2,471	2,859	2,272	2,870	3,397	2,337	3,262	3,686
270	2,161	2,674	3,052	2,453	3,097	3,631	2,531	3,494	3,960
300	2,320	2,870	3,296	2,615	3,317	3,866	2,756	3,719	4,215
330	2,444	3,041	3,493	2,779	3,516	4,101	2,908	3,926	4,463
360	2,587	3,206	3,690	2,907	3,719	4,297	3,101	4,114	4,704
390	2,715	3,392	3,889	3,072	3,909	4,495	3,293	4,322	4,934
420	2,823	3,543	4,038	3,182	4,072	4,712	3,449	4,500	5,121
450	2,944	3,694	4,237	3,349	4,233	4,884	3,621	4,680	5,354
480	3,062	3,824	4,386	3,459	4,383	5,028	3,774	4,852	5,529
510	3,175	3,979	4,536	3,570	4,552	5,206	3,910	5,021	5,707
540	3,286	4,116	4,689	3,700	4,742	5,384	4,064	5,187	5,909
570	3,379	4,247	4,840	3,806	4,871	5,564	4,179	5,358	6,076
600	3,481	4,385	4,994	3,904	5,017	5,703	4,353	5,525	6,256

Рисунок 3.21 – Зависимости r'_{np} от p_r и ω_r Рисунок 3.22 – Зависимость параметров k_r (a) и κ (б) от частоты ω_r

Как видно из графика (рис. 3.22, *а*) зависимость параметра k_r от ω_r можно аппроксимировать экспоненциальной функцией вида:

$$k_r = b_r \cdot e^{-k_2 \cdot \omega_r}, \quad (3.11)$$

где $b_r = 3,19 \cdot 10^8$ с/м²; $k_2 = 0,61$.

Зависимость параметра κ от ω_r (рис. 3.22, *б*) хорошо описывается линейной зависимостью:

$$\kappa = 0,752 - 0,138\omega_r. \quad (3.12)$$

Подставив значения зависимостей (3.11) и (3.12) в (3.10) получим:

$$r'_{\text{пр}} = \frac{b_r \cdot e^{-k_2 \omega_r}}{p_r^{0,752 - 0,138\omega_r}}. \quad (3.13)$$

Выражение (3.13) определяет приведенное удельное сопротивление осадка в зависимости от частоты пульсации давления и статической составляющей давления (для установленных интервалов варьирования) при $K_d = 0,3$.

Параметр K_s (3.9) определялся на основании полученных экспериментальных данных при $t_0 = 60$ с: $K_s \approx 5 \cdot 10^{-4}$ м. При этом время t_0 также определялось в ходе опытов.

В промежутке времени от 0 до t_0 протекает неустановившийся процесс фильтрования как для режима с пульсацией давления, так и без пульсации. На рисунке 3.23, для примера, приведены зависимости t/q от q (*а*) и t/q от t (*б*), на которых наглядно представлена область неустановившегося режима.

Практически время t_0 является оптимальным для процесса обезвоживания ГВОМО (рис. 3.23 *б*), поскольку это время соответствует наибольшей удельной производительности установки. Для процесса фильтрования ГВОМО можно принять $t_0 = 60$ с.

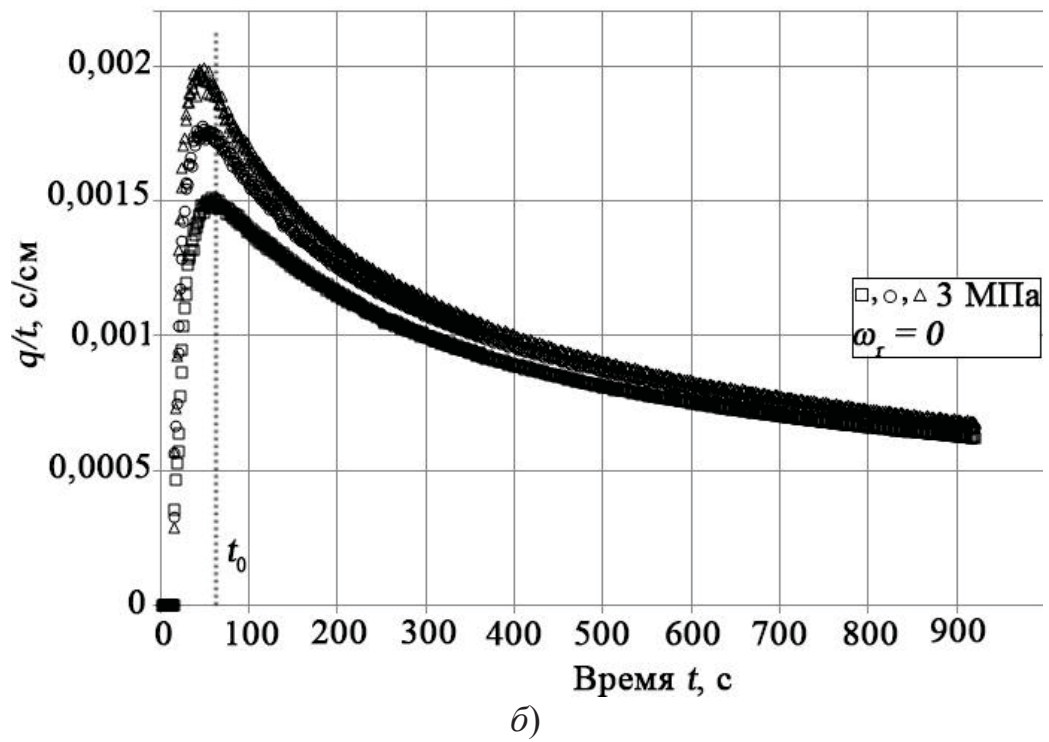
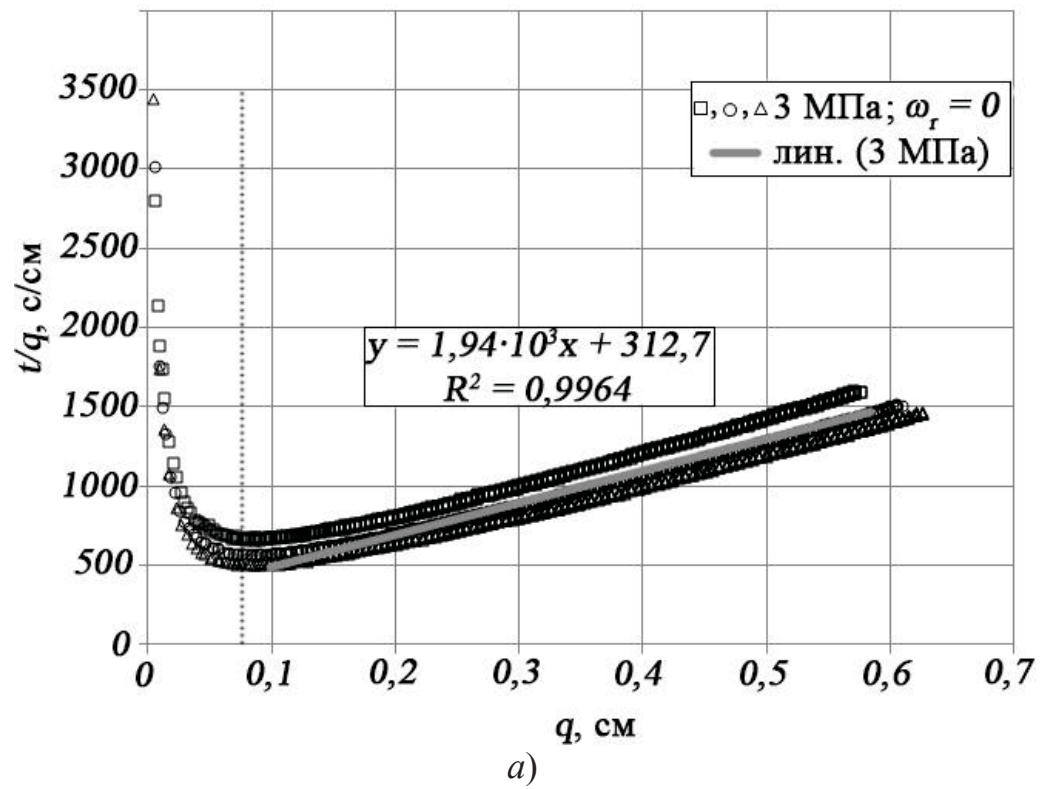


Рисунок 3.23 – Зависимости t/q от q (а) и t/q от t (б) для процесса фильтрации ГВОМО

Неустановившийся режим фильтрования тонкодисперсной суспензии может быть связан с выравниванием давления в фильтруемом слое суспензии, перегруппировкой частиц и другими физическими процессами на микроуровне. Как правило, на практике область неустановившегося режима не рассматривается, так как этот режим длится относительно короткий промежуток времени в сравнении с общей продолжительностью процесса. Также за время $0 - t_0$ образуется тонкий слой обезвоженного осадка ГВОМО (до 1 мм), удаление которого является экономически не целесообразным. Поэтому в данной работе промежуток времени $0 - t_0$ не рассматривается.

После подстановки значений зависимости (3.13) в (3.9) и проведения соответствующих преобразований получим:

$$q = \sqrt{\frac{1}{b_r} t p_r^{0,752-0,138\omega_r} e^{k_2\omega_r} - K_s}. \quad (3.14)$$

Зависимость (3.14) описывает процесс фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении для установленных интервалов варьирования факторов при $K_d = 0,3$.

Выполнив сравнительный анализ расчетных по зависимости (3.14) и экспериментальных значений параметра q , определены их относительные отклонения $\Delta_{\text{отн}}$. На рисунке 3.24 (а) представлена зависимость отклонений $\Delta_{\text{отн}}$ от времени фильтрования ГВОМО. На рисунке 3.24 (б) приведены теоретические зависимости параметров $q_L = q/H$ от времени t , полученные на основе зависимости (3.14), и экспериментальные точки.

В ходе статистического анализа установлено, что максимальное относительное отклонение расчетных и экспериментальных значений для параметра q составило 21% при доверительной вероятности $\alpha_v = 0,9$ для времени фильтрования 60 (с). С увеличением продолжительности фильтрования максимальное и среднее значение относительного отклонения уменьшаются.

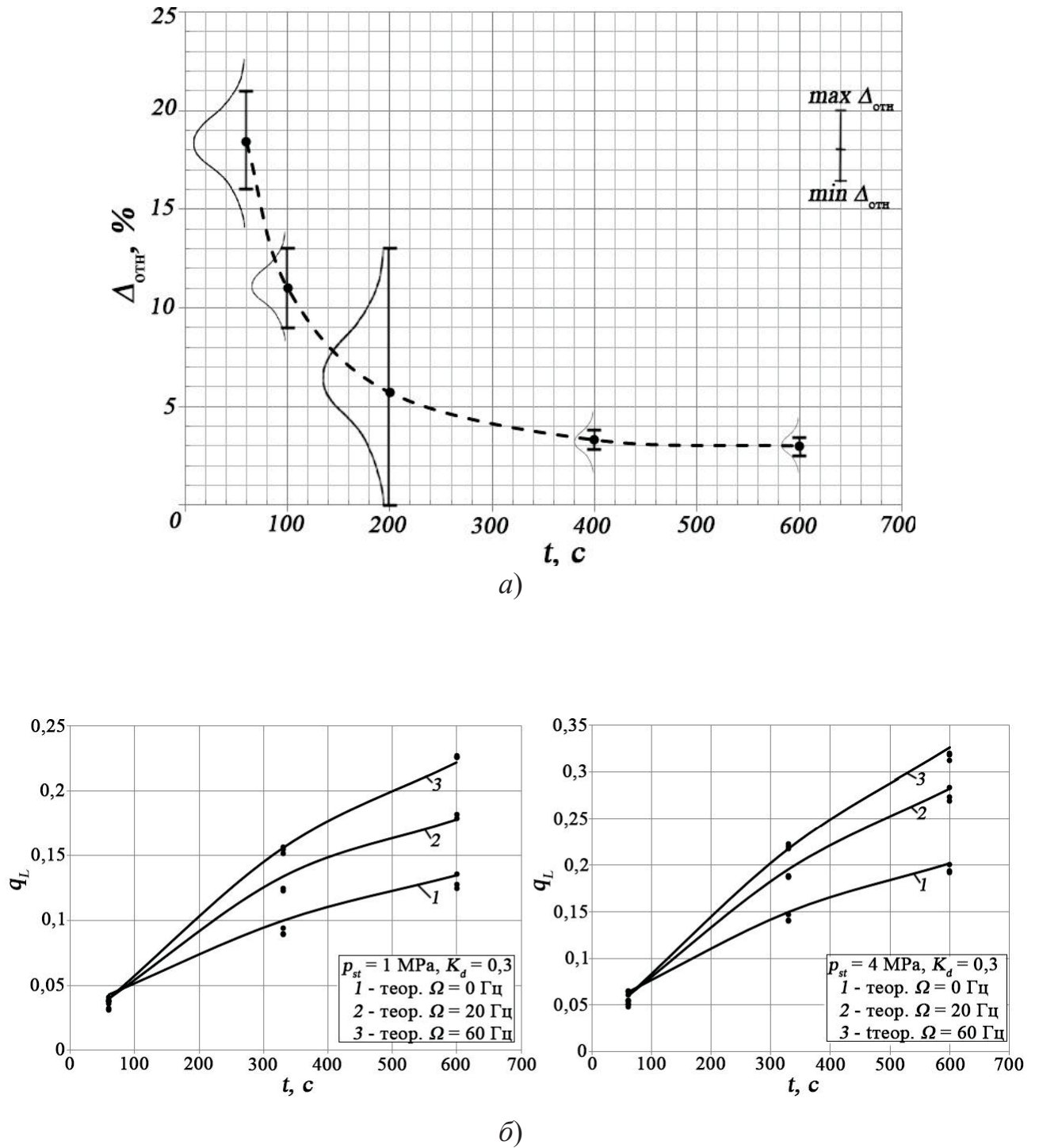


Рисунок 3.24 – Зависимости: относительных отклонений параметра q (а) и параметра q_L (б) от времени фильтрования ГВОМО

Используя зависимости (2.28) и (3.14), после проведения соответствующих преобразований и упрощений, получим зависимость времени фильтрования ГВОМО для режима работы фильтровально-пульсационной машины при пульсации давления от статической составляющей давления, частоты пульсации, влажности суспензии и высоты фильтруемого слоя суспензии с учетом основных физико-механических свойств ГВОМО при $K_d = 0,3$:

$$t = \frac{b_r \cdot e^{-k_2 \omega_r}}{p_r^{0,752-0,138 \omega_r}} (K_s - H \cdot W_\Delta)^2. \quad (3.15)$$

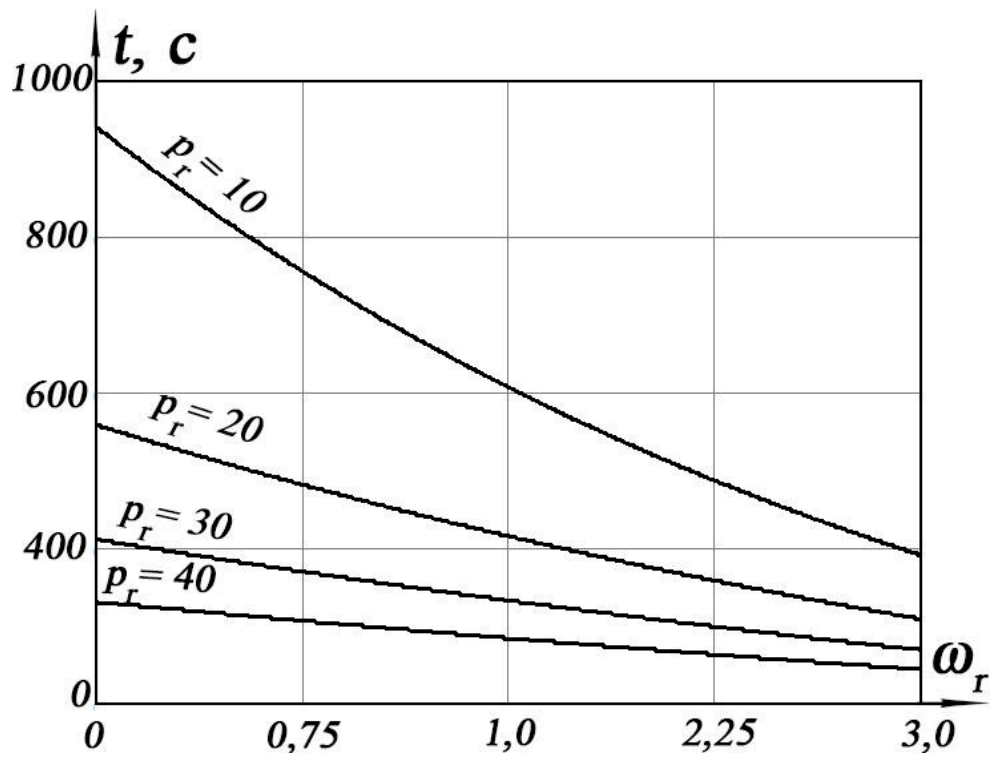
Для режима работы фильтровально-пульсационной машины при статическом давлении зависимость времени фильтрования от давления, высоты слоя суспензии и влажности материала примет вид:

$$t = a_r p_r^{-k_1} H^2 W_\Delta^2. \quad (3.16)$$

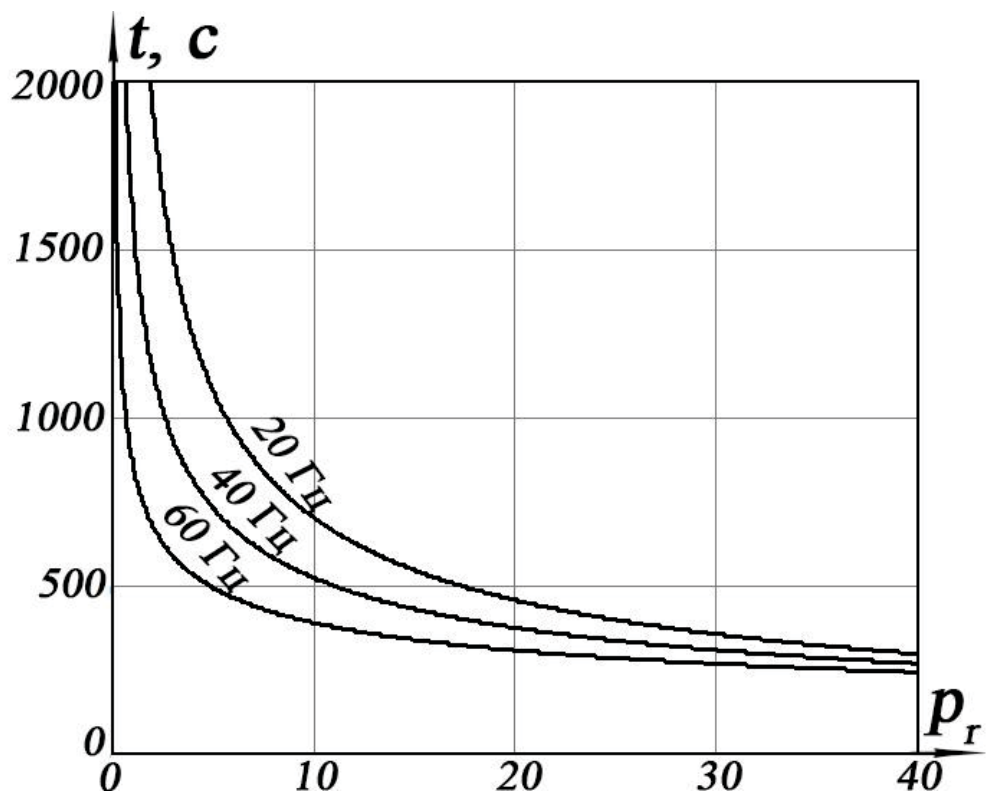
В зависимости (3.15) и (3.16) входит приведенное удельное сопротивление осадка $r_{пр}$ и $r'_{пр}$, определяемое свойствами материала и являющееся постоянным во времени. При этом зависимости приведенного удельного объема фильтрата q – непрерывные функции от времени. Следовательно, полученные математические модели можно использовать для более широких диапазонов времени t (в сравнении с ранее исследуемым диапазоном). Для обоснования этого утверждения были проведены дополнительные экспериментальные исследования, результаты которых приведены в приложении Г.

Согласно результатам проведенных исследований (см. приложение Г) следует, что модели (3.15) и (3.16) можно использовать для более широкого диапазона значений времени фильтрования: $t = 60 \dots 5500$ (с).

Используя зависимость (3.15) и принимая $H = 7,0$ мм, $W_k = 0,45$ построены графики зависимостей времени фильтрования ГВОМО от частоты пульсации давления и статической составляющей давления (рис. 3.25).



a)



б)

Рисунок 3.25 – Зависимости времени фильтрования от частоты пульсации давления (а) и статической составляющей давления (б)

На основании зависимости (3.16) и графиков (рис. 3.25) сформулировано **первое научное положение**: при фильтровании тонкодисперсной суспензии ГВОМО в фильтровально-пульсационной машине время фильтрования находится в экспоненциальной зависимости от частоты пульсации давления и является обратно пропорциональным статической составляющей давления с показателем степени, линейно зависимым от частоты.

Область применения математической модели (3.15): $p_r = 10 \dots 40$; $H = 0,003 \dots 0,024$ м; $W_k = 30 \dots 68\%$; $\rho_s \approx 2387$ кг/м³; $\rho \approx 1020$ кг/м³; $\omega_r = 1 \dots 3$; $K_d = 0,3 \dots 0,9$; $W_0 \approx 0,68$.

Область применения математической модели (3.16): $p_r = 10 \dots 70$; $H = 0,003 \dots 0,024$ м; $W_k = 30 \dots 68\%$; $\rho_s \approx 2387$ кг/м³; $W_0 \approx 0,68$; $\rho \approx 1020$ кг/м³.

3.7 Влияние динамической составляющей давления на процесс обезвоживания ГВОМО

Для оценки влияния динамической составляющей давления p_d на процесс обезвоживания ГВОМО фильтрованием сравним математические модели процессов, протекающих при статическом и пульсирующем давлении.

Уплотнение слоя суспензии прямо пропорционально объему вытесненного фильтрата и равно: $x_\Delta = x_s + x_d$ (где x_s и x_d – суммарное уплотнение слоя суспензии от статической p_{st} и динамической p_d нагрузки соответственно, м).

Тогда зависимости (3.8) и (3.14) соответственно запишутся в виде:

$$x_s = \sqrt{3,216 \cdot 10^{-9} t p_r^{k_1}};$$

$$x_\Delta = \sqrt{3,14 \cdot 10^{-9} t p_r^{0,752 - 0,138 \omega_r} e^{k_2 \omega_r} - K_s}.$$

Уплотнение суспензии от динамической составляющей давления равно:

$$x_d = \sqrt{3,14 \cdot 10^{-9} t p_r^{0,752 - 0,138 \omega_r} e^{k_2 \omega_r} - \sqrt{3,216 \cdot 10^{-9} t p_r^{k_1} - K_s}}.$$

Продифференцировав последнюю зависимость по времени, получим:

$$\dot{x}_d = \frac{2,8 \cdot 10^{-5} p_r^{0,752-0,138\omega_r} e^{k_2\omega_r}}{\sqrt{p_r^{0,752-0,138\omega_r} t e^{k_2\omega_r}}} - \frac{2,84 \cdot 10^{-5} p_r^{k_1}}{\sqrt{p_r^{k_1} t}}, \quad (3.17)$$

где $\dot{x}_d$ – скорость уплотнения суспензии от динамической составляющей давления м/с.

Используя выражение (3.17) получены зависимости скорости уплотнения ГВОМО $\dot{x}_d$ от времени фильтрования, статической составляющей давления и частоты, которые представлены на рисунке 3.26.

Из графиков (3.26) видно, что при частоте пульсации давления, изменяющейся в диапазоне от 20 до 60 Гц, скорость уплотнения ГВОМО $\dot{x}_d$ практически не зависит от статической составляющей давления (изменяющейся от 1 до 4 МПа). Это означает, что для указанных частот с увеличением параметра p_{st} от 1 до 4 МПа приращение объема фильтрата с единицы площади фильтра Δq , вызываемое динамической составляющей давления, будет постоянным и зависеть лишь от времени фильтрования.

Используя экспериментальные данные, определим амплитуду перемещения поршня лабораторной установки (рис. 3.5) или амплитуду сжатия суспензии при воздействии динамической составляющей давления.

Объемный модуль упругости материала (суспензии) можно определить согласно зависимости [109]: $E_y = 1/\beta_p$, где β_p – коэффициент объемного сжатия, Па^{-1} .

Коэффициент объемного сжатия β_p равен:

$$\beta_p = -\frac{dV_c}{V_n} \frac{1}{\Delta P}, \quad (3.18)$$

где dV_c – относительное изменение объема суспензии, м^3 ($dV_c = V_c - V_n$); V_c – объем суспензии, м^3 .

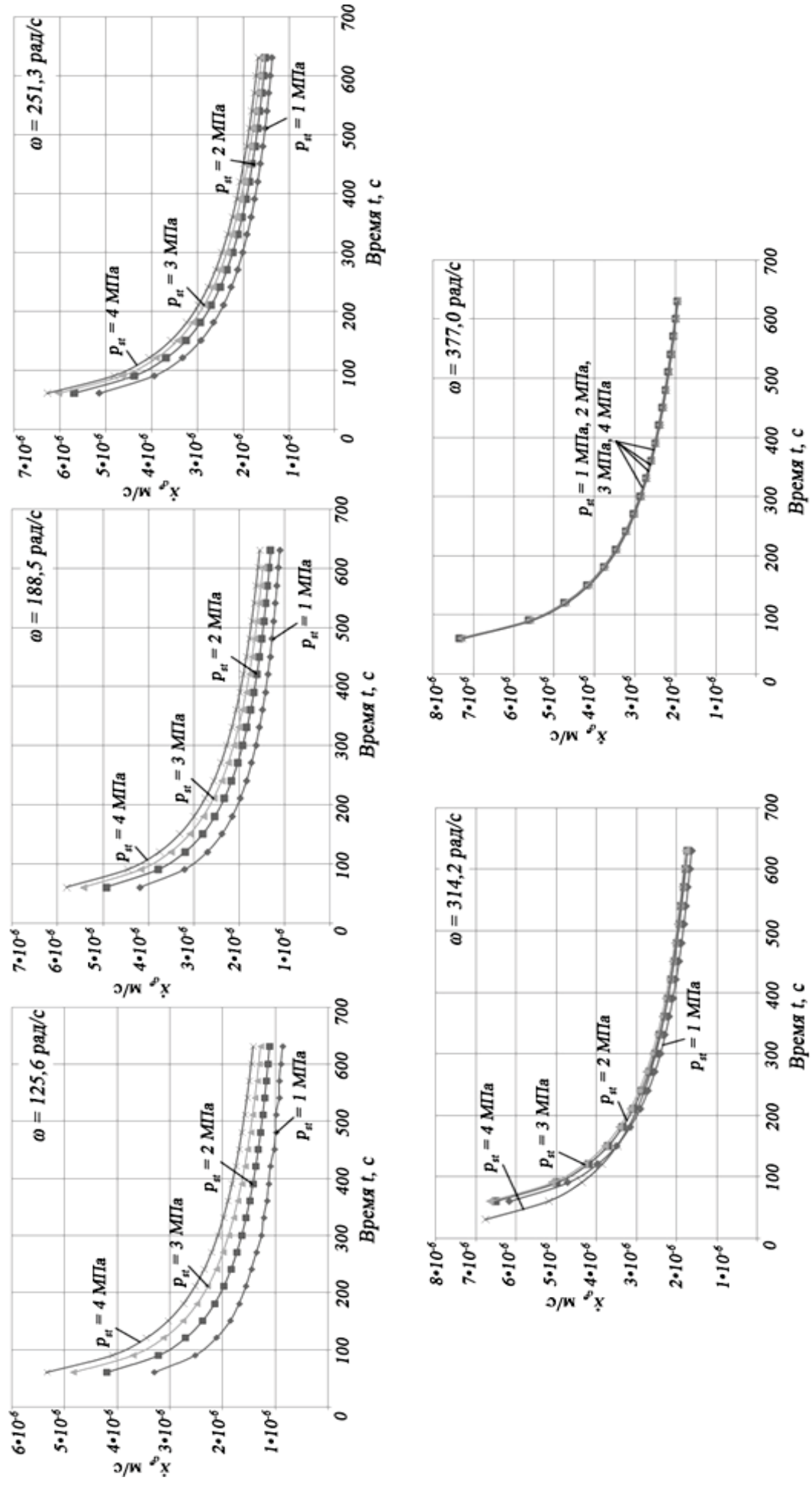


Рисунок 3.26 — Зависимости скорости уплотнения ГВОМО $\dot{x}_d$ при воздействии динамической составляющей давления p_d от времени t , статической составляющей давления p_{st} и частоты ω

Из зависимости (3.18) следует, что

$$V_c = V_n(1 - \Delta P \cdot \beta_p). \quad (3.19)$$

При проведении опытов на разработанной фильтровальной установке начальный объем суспензии равен объему рабочей камеры: $V_n = SH = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ (при $S = 0,001 \text{ м}^2$ и $H = 0,02 \text{ м}$). Согласно Герсеванову [110] для водонасыщенных грунтов (к которым относятся органо-минеральные осадки) модуль упругости можно принять равным $E_y = 2600 \text{ МПа}$. Следовательно, коэффициент объемного сжатия равен: $\beta_p = 3,85 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

Принимая параметр $\Delta P = p_d$ и используя зависимость (3.19), амплитудное значение перемещения поршня фильтровальной установки в процессе фильтрации суспензии при пульсирующем давлении равно, м:

$$h_A = H - \frac{V_n(1 - p_d \beta_p)}{S}. \quad (3.20)$$

Для исследуемого диапазона значений параметра p_d (от 0,3 до 3,6 МПа) расчетное значение амплитуды сжатия суспензии согласно зависимости (3.20) соответственно составило 0,0023 и 0,028 мм.

Выводы по разделу

В ходе проведенных экспериментальных исследований режимов работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО (при статическом и пульсирующем давлении) разработаны:

1. Методика проведения экспериментальных исследований режимов работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО при пульсации давления и без пульсации, включающая: выбор факторов и интервалов их варьирования; выбор плана эксперимента и методику обработки резуль-

татов экспериментальных исследований с учетом статистически обоснованного количества параллельных опытов.

2. Разработана и изготовлена лабораторная фильтровальная установка для проведения экспериментальных исследований влияния режимных и конструктивных параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО на процесс фильтрации суспензии при статическом и пульсирующем давлении, позволяющая изменять: частоту, статическую и динамическую составляющие давления, высоту фильтруемого слоя суспензии, а также тип фильтровальной перегородки.

3. Разработана регрессионно-статистическая математическая модель режима работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО при пульсирующем давлении для установленных интервалов варьирования параметров, которая представляет собой квадратичный полином и определяет взаимосвязь между удельным объемом фильтрата, продолжительностью фильтрации, статической и динамической составляющими давления и частотой пульсации давления.

4. Получена математическая модель, определяющая время фильтрации ГВОМО при пульсирующем давлении, в зависимости от: статической составляющей давления, изменяющейся в пределах от 1 до 4 МПа; конечной влажности материала от 30 до 50%; частоты пульсации давления от 20 до 60 Гц; коэффициента динамичности 0,3; высоты слоя суспензии от 3 до 24 мм. Максимальное отклонение расчетных и экспериментальных значений для удельного объема фильтрата составило 21% при доверительной вероятности 0,9.

5. Получена математическая модель, определяющая время фильтрации ГВОМО при статическом давлении от 1 до 7 МПа, учитывающая изменение влажности суспензии в диапазоне от 68 до 30%. Максимальное отклонение расчетных и экспериментальных значений для удельного объема составило 19% для доверительной вероятности 0,9.

6. Определены основные свойства образцов ГВОМО: начальная влажность 68%, плотность суспензии 1250 кг/м^3 , плотность твердой фазы суспензии

2387 кг/м³, усредненная пористость 85%, а также исследован гранулометрический состав ГВОМО.

На основании проведенного анализа математических моделей, описывающих влияние конструктивных и режимных параметров фильтровально-пульсационной машины на процесс фильтрации ГВОМО, установлено что:

1. Определяющими параметрами фильтровально-пульсационной машины являются: время фильтрации, статическая составляющая давления и частота пульсации, из которых наибольшее влияние на процесс оказывает время.

2. Изменение коэффициента динамичности в пределах от 0,3 до 0,9 оказывает незначительное влияние на процесс фильтрации ГВОМО при пульсирующем давлении. При этом для расчетов можно принимать значение коэффициента динамичности равным 0,3.

3. При фильтрации тонкодисперсной суспензии ГВОМО в фильтровально-пульсационной машине время фильтрации находится в экспоненциальной зависимости от частоты пульсации давления и обратно пропорционально статической составляющей давления с показателем степени, линейно зависящим от частоты.

4. Для частоты пульсации давления от 50 до 60 Гц с увеличением статической составляющей давления от 1 до 4 МПа приращение объема фильтрата с единицы площади фильтра, вызываемое динамической составляющей давления, будет постоянным и зависеть лишь от времени фильтрации.

РАЗДЕЛ 4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Обоснование параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО

Проведенный анализ математических моделей, описывающих режимы работы фильтрации ГВОМО в фильтровально-пульсационной машине, позволяет дать рекомендации по определению основных параметров данной машины: времени фильтрации, давления, частоты пульсации давления и расстояния между фильтровальными перегородками.

Одним из основных параметров фильтровально-пульсационной машины является удельная производительность по фильтрату v_p (м/с), характеризующая объем фильтрата, полученный за время фильтрации t с единицы площади фильтровальной поверхности, которая численно равная скорости фильтрации. Для режима работы машины при пульсирующем давлении удельная производительность по фильтрату определяется дифференцированием зависимости (3.14) по времени:

$$v_p = \frac{1}{S} \frac{dV}{dt} = \frac{2,8 \cdot 10^{-5} p_r^{0,752-0,138\omega_r} e^{k_2\omega_r}}{\sqrt{p_r^{0,752-0,138\omega_r} e^{k_2\omega_r} t}}. \quad (4.1)$$

Аналогично удельная производительность фильтровально-пульсационной машины для режима работы при статическом давлении v_{st} (м/с) применительно к суспензии ГВОМО равна:

$$v_{st} = \frac{1}{S} \frac{dV}{dt} = \frac{1,61 \cdot 10^{-9} p_r^{k_1}}{\sqrt{3,216 \cdot 10^{-9} p_r^{k_1} t}}. \quad (4.2)$$

Зависимости удельной производительности фильтровально-пульсационной машины для режимов работы при пульсирующем и статическом давлении от времени фильтрации соответственно приведены на рисунках 4.1 и 4.2.

Из вышеприведенных графиков (рис. 4.1 – 4.2) видно, что наибольшая производительность фильтровально-пульсационной машины соответствует минимальному времени фильтрации. С увеличением времени фильтрации удельная производительность машины уменьшается по степенной зависимости, следовательно, для обеспечения ее максимального значения время фильтрации должно стремиться к минимуму.

Для режима фильтрации ГВОМО при статическом давлении получены зависимости удельной производительности v_{st} от приведенной статической составляющей давления p_r для разных промежутков времени (рис. 4.3).

Из графиков (рис. 4.3) видно, что при повышении давления p_r удельная производительность машины возрастает по степенной зависимости. С увеличением времени фильтрации относительное приращение производительности, вызываемое увеличением давления, уменьшается: чем больше продолжительность цикла фильтрации ГВОМО, тем меньшее влияние на процесс оказывает увеличение давления p_r .

На основании анализа установлено, что для режима фильтрации ГВОМО при статическом давлении повышение давления свыше 4,0 МПа нецелесообразно из-за относительно невысокого прироста удельной производительности фильтровальной машины. Кроме того, увеличение давления фильтрации приводит к повышению энергоемкости обезвоживания.

Для оценки энергоемкости фильтровальной машины для обезвоживания ГВОМО, работающей при пульсирующем давлении, определим энергию, затрачиваемую в единицу времени на обезвоживание единицы объема ГВОМО.

Работа силы A_F , затрачиваемая на уплотнение слоя суспензии определяется как [91], Н·м:

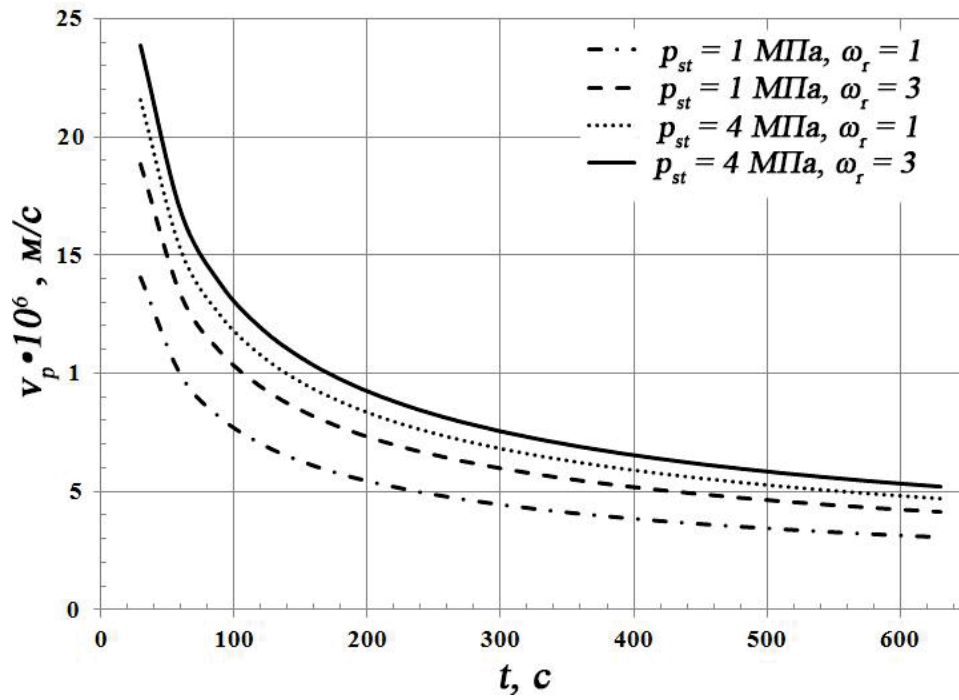


Рисунок 4.1 – Зависимость удельной производительности фильтровально-пульсационной машины от времени для режима с пульсацией давления

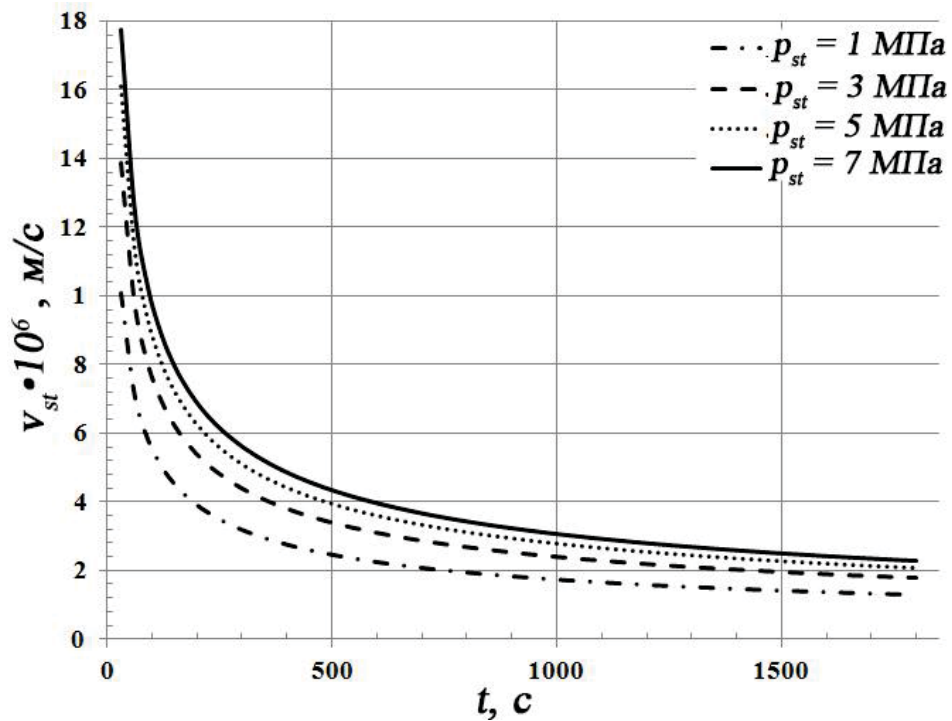


Рисунок 4.2 – Зависимость удельной производительности фильтровально-пульсационной машины от времени для режима без пульсации давления

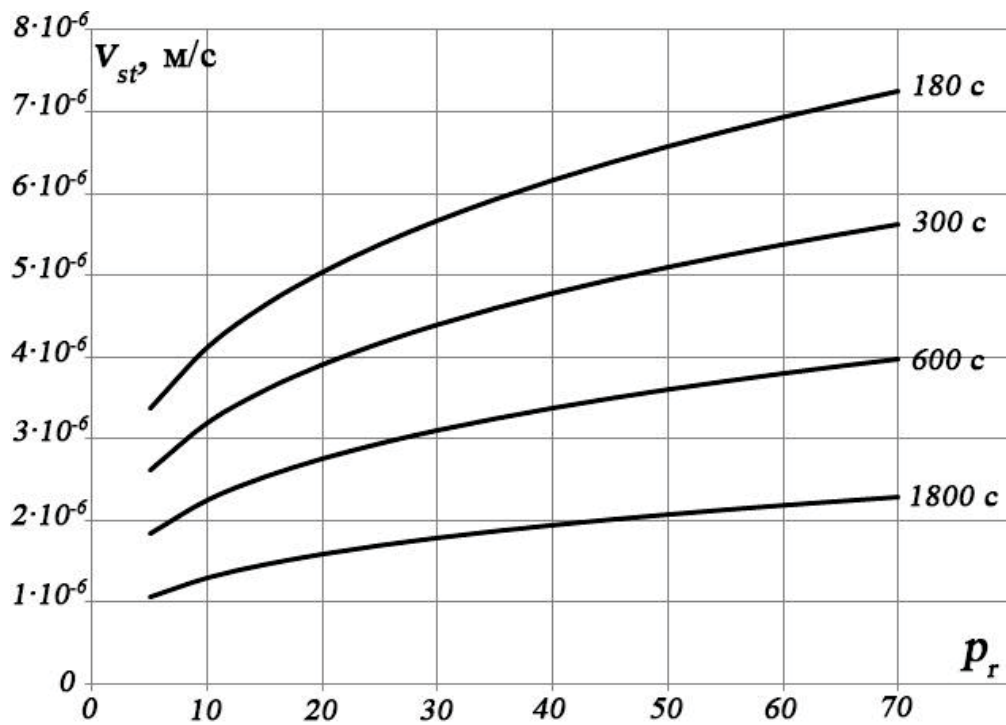


Рисунок 4.3 – Зависимости удельной производительности v_{st} от давления

$$A_F = \int_0^{x_\Delta} F d(x_\Delta),$$

где F – усилие, действующее на суспензию, Н.

Принимая значение усилия F постоянным во времени и равным среднему значению (без учета динамической составляющей), работа запишется как $A_F = F \cdot x_\Delta$. Тогда умножив и разделив второе слагаемое последнего выражения на площадь фильтровальной поверхности S , получим: $A_F = F x_\Delta S / S = p_{st} V$.

Соответственно энергия, затрачиваемая в единицу времени на обезвоживание единицы объема ГВОМО, при обезвоживании которого образуется фильтрат объемом V , определяется как: $W_F = A_F / t = p_{st} V / t$, Вт.

Используя последнее выражение, получены зависимости параметра W_F от скорости фильтрования v_p и статической составляющей давления p_{st} для режима фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении с частотой пульсации 20 и 60 Гц, которые соответственно представлены на рис. 4.4 и рис. 4.5.

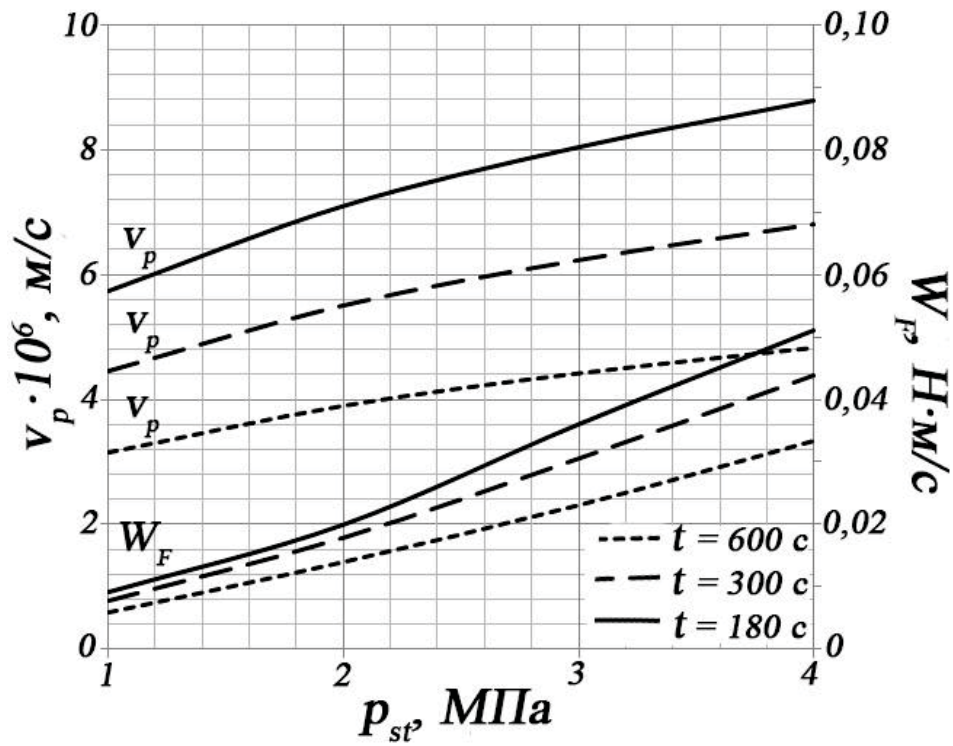


Рисунок 4.4 – Зависимости параметров v_p и W_F от статической составляющей давления p_{st} при $\Omega = 20$ Гц

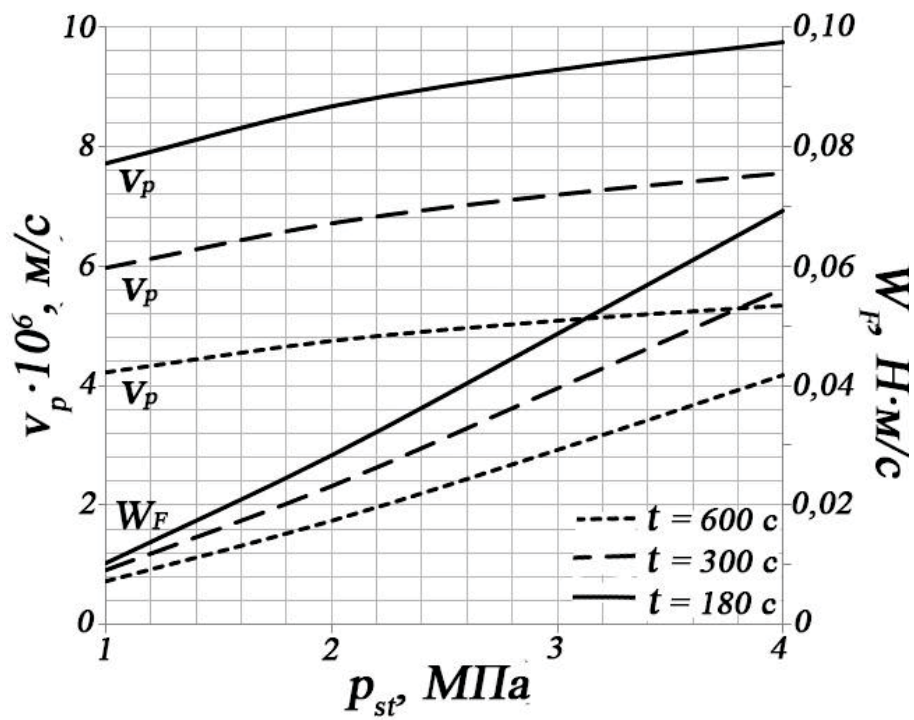


Рисунок 4.5 – Зависимости параметров v_p и W_F от статической составляющей давления p_{st} при $\Omega = 20$ Гц

Из графиков (рис. 4.4 – 4.5) видно, что с увеличением статической составляющей давления удельная производительность фильтровально-пульсационной машины повышается незначительно в сравнении с ростом энергоемкости процесса: при давлении 4 МПа производительность на 32,5% выше, чем при давлении 1 МПа, а энергоемкость процесса при этом больше в 5 раз. Следовательно, для обеспечения минимальной энергоемкости машины, давление фильтрации должно быть минимальным. Поэтому для фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО рекомендуется принимать давление от 1 до 2 МПа.

Влияние частоты пульсации давления на процесс фильтрации ГВОМО повышается с увеличением уровня факторов системы. Для оценки влияния частоты на эффективность процесса фильтрации ГВОМО построены зависимости относительного повышения удельной производительности $\Delta \nu_p$ (относительно режима без пульсации) от статической составляющей давления (рис. 4.6) и удельной производительности ν_p от частоты пульсации давления (рис. 4.7).

Из графика (рис. 4.6) видно, что относительное повышение производительности $\Delta \nu_p$ при частоте пульсации давления 20 – 30 Гц практически не зависит от статической составляющей давления, изменяющейся в пределах 1 – 4 МПа и составляет в среднем 45%. При изменении статической составляющей давления от 1 до 4 МПа для диапазона частот 40 – 60 Гц приращение удельной производительности машины $\Delta \nu_p$ уменьшается от 87% (для частоты 60 Гц) до 50% (для частоты 40 Гц) соответственно.

Из графиков (рис. 4.7) видно, что наибольшая относительная производительность фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО достигается при частоте пульсации давления 50 – 60 Гц. При этом повышение частоты пульсации давления в отмеченном диапазоне, согласно экспериментальным данным (точки на графике), не приводит к значительному повышению удельной производительности машины. Кроме того, наибольшая эффективность использования пульсации давления достигается при минимальном значении статической составляющей давления p_{st} .

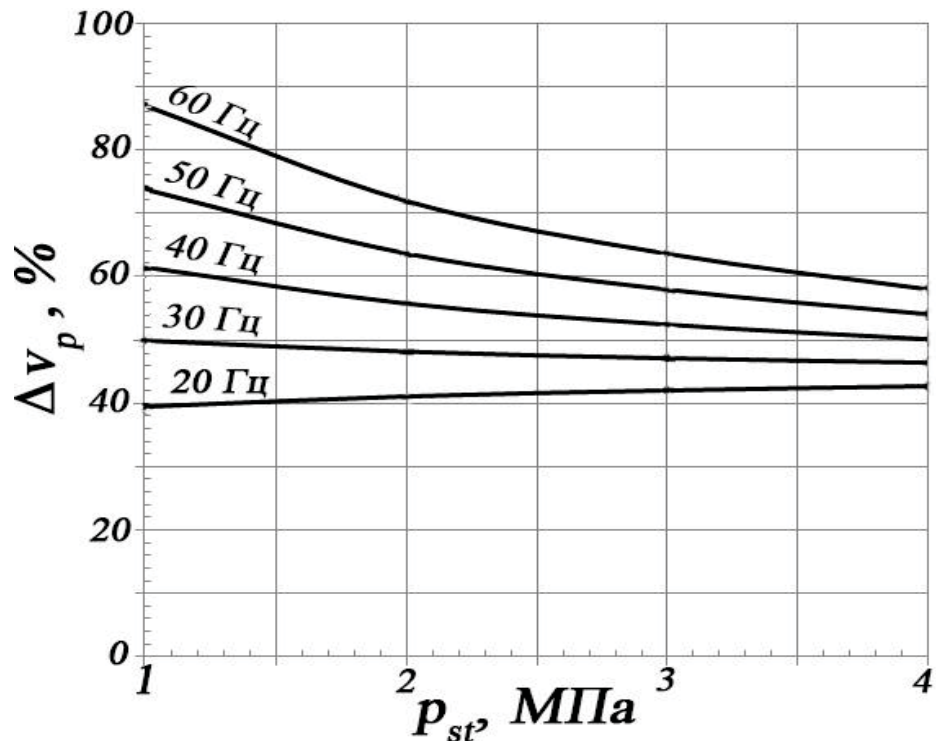


Рисунок 4.6 – Зависимость параметра Δv_p от статической составляющей давления и частоты пульсации давления

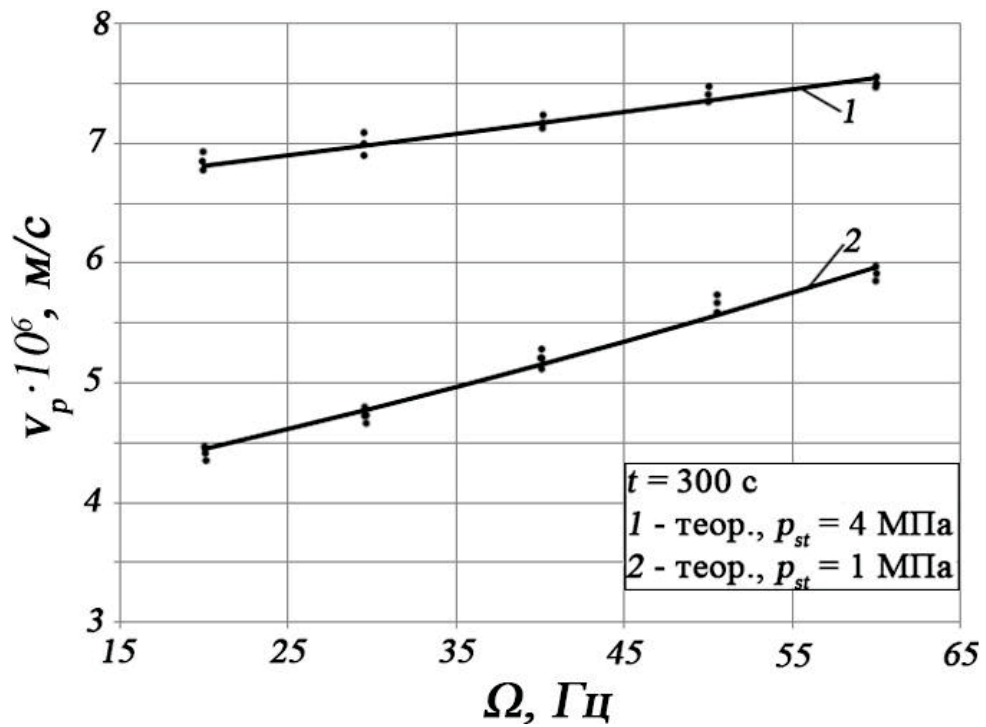


Рисунок 4.7 – Зависимости удельной производительности фильтровально-пульсационной машины от частоты пульсации давления

При использовании пульсатора с инерционным приводом для обеспечения пульсации давления в фильтровальной машине рекомендуется принимать частоту пульсации 50 Гц, что соответствует стандартной частоте вращения ротора двигателя вибратора (3000 об/мин). С повышением частоты пульсации от 50 до 60 Гц удельная производительность машины повышается в среднем на 10%. Однако для реализации частоты свыше 50 Гц требуется применение дополнительных регулирующих устройств, что усложняет конструкцию машины.

Одним из основных параметров фильтровально-пульсационной машины (фильтр-пресса с пульсатором) является расстояние между фильтровальными перегородками $\delta_k = 2H$.

Используя зависимость (3.16), для процесса фильтрования ГВОМО, протекающего в фильтровально-пульсационной машине, при частоте пульсации давления 50 Гц и статической составляющей давления 1 МПа построены графики зависимости продолжительности фильтрования ГВОМО от расстояния между ФП δ_k (рис. 4.8) соответствующие влажности W_k : 50%, 40% и 30%.

Как видно из графиков (рис. 4.8) время фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении прямо пропорционально квадрату расстояния между ФП фильтровальной машины. Для обеспечения 45-50%-ой конечной влажности ГВОМО за минимальное время, а также исходя из конструктивных особенностей фильтровальной машины, расстояние между ФП фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО должно составлять порядка от 8 до 15 мм. При этом также достигается наилучшая степень обезвоживания ГВОМО.

Для определения производительности фильтровально-пульсационной машины по обезвоженному продукту необходимо определить степень уплотнения суспензии i_h , показывающую во сколько раз нужно сжать единицу объема ГВОМО с исходной влажностью W_0 для достижения влажности W_k . Степень уплотнения суспензии зависит от конечной влажности суспензии W_k и ее свойств. Используя зависимость (2.22) для ГВОМО получена зависимость степени уплотнения i_h от конечной влажности продукта W_k (рис. 4.9).

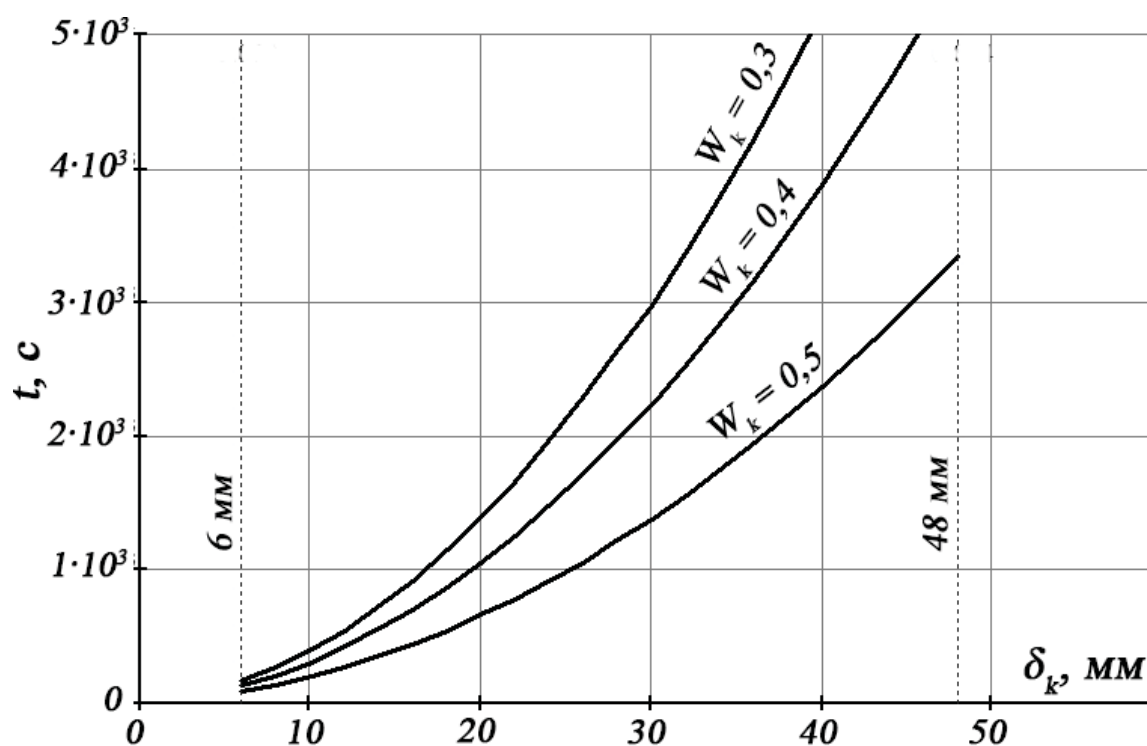


Рисунок 4.8 – Зависимости времени фильтрования ГВОМО от расстояния между ФП

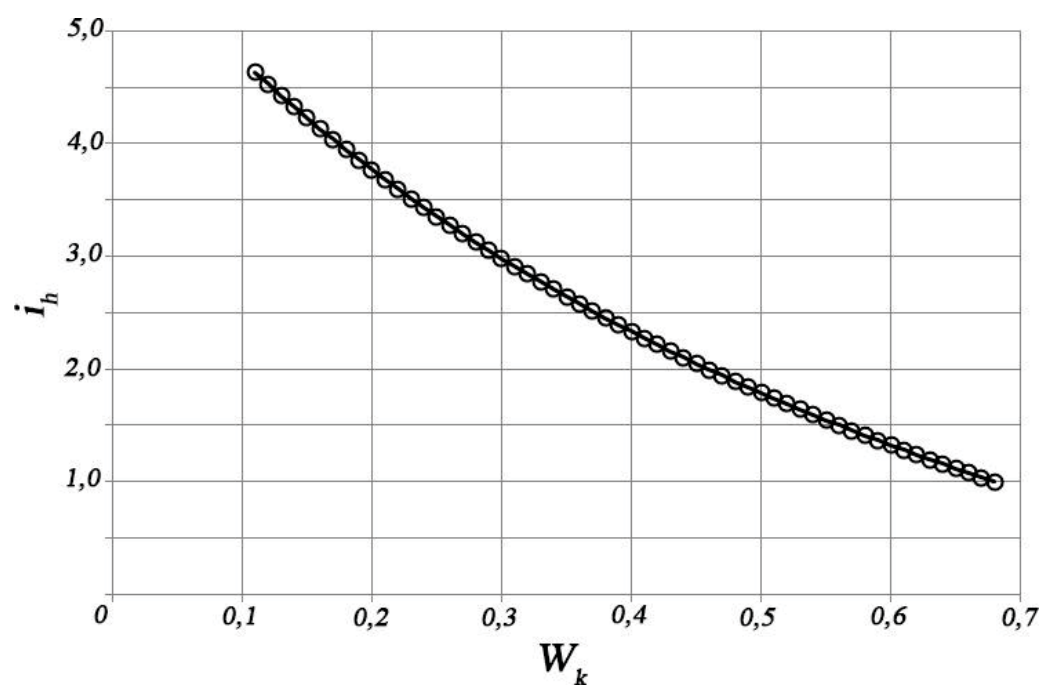


Рисунок 4.9 – Зависимость степени уплотнения ГВОМО от влажности

Опытным путем установлено, что при обезвоживании ГВОМО фильтрованием может быть достигнута минимальная влажность порядка 11% [22], что соответствует максимальному значению степени уплотнения 4,63. Для удобства зависимость степени уплотнения ГВОМО от влажности была аппроксимирована степенной функцией:

$$i_h = 6,47 \cdot e^{-2,63 \cdot W_k}. \quad (4.3)$$

Таким образом, на основании полученных зависимостей основных показателей процесса фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении от конструктивных и режимных параметров фильтровально-пульсационной машины (камерного фильтр-пресса с пульсатором) определены основные ее параметры, которые представлены в таблице 4.1.

В ходе проведенного анализа установлено, что для обеспечения влажности ГВОМО от 45 до 50% при обезвоживании в фильтровально-пульсационной машине рекомендованными параметрами являются: частота пульсации давления от 50 до 60 Гц; величина статической составляющей давления от 1 до 2 МПа; коэффициент динамичности 0,3; расстояние между фильтровальными перегородками от 8 до 15 мм, – **второе научное положение**.

4.2 Методика определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО

На основании полученных зависимостей основных режимных и конструктивных параметров фильтровально-пульсационной машины от показателей процессов фильтрования ГВОМО при статическом и пульсирующем давлении, поставлена **задача**: разработать инженерную методику определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО (камерного фильтр-пресса с пульсатором), принцип действия которого описан в разделе 2 настоящей работы.

Таблица 4.1 – Основные параметры фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО (камерного фильтр-пресса с пульсатором)

Параметры		Диапазон значений	Рац. значение
1. Конструктивные			
Расстояние между фильтровальными перегородками δ_k , мм		6...48	8...15
2. Режимные			
Статические	Количество фильтровальных камер n_k	1...170	–
	Статическая составляющая давления $p_{st} (I^*)$, МПа	1,0...7,0	1,0...4,0
	Статическая составляющая давления $p_{st} (II^*)$, МПа	1,0...4,0	1,0...2,0
	Тип фильтроткани: 05-1010-SK 006 STN, размер ячеек 0,006 мм, толщина 0,5 мм	–	–
Динамические	Время фильтрования t , с	60...5500	–
	Время вспомогательных операций t_{Σ} , с	до 3600	–
	Конечная влажность продукта W_k , %	30...50	45...50
	Частота пульсации давления $\Omega (II^*)$, Гц	20...60	50
	Коэффициент динамичности $K_d (II^*)$, МПа	0,3...0,6	0,3
3. Условия обезвоживания			
Тип суспензии: глубоководные органо-минеральные осадки Черного моря		Значение параметра	
Исходная влажность W_0 , %		68	
Усредненная плотность ρ_0 , кг/м ³		1250	
Плотность частиц ρ_s , кг/м ³		2387	
Плотность жидкой фазы суспензии ρ , кг/м ³		1020	
Содержание фракции менее 10 мкм, %		< 85	

*Режим работы I (основной режим) – работа машины при статическом давлении (при выкл. пульсаторе);

режим работы II – работа машины при пульсирующем давлении.

Алгоритм определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО приведен в виде блок-схемы на рисунке 4.10. Приведенная блок-схема состоит из блоков:

- 1 – исходные данные для расчета параметров фильтровально-пульсационной машины;
- 2 – определение средней плотности обезвоженного продукта и степени уплотнения суспензии;
- 3 – определение статической составляющей давления;
- 4 – определение расстояния между фильтровальными перегородками;
- 5 – определение частоты пульсации давления;
- 6 – расчет времени фильтрования;
- 7 – расчет времени фильтрования для режима работы машины при выключенном пульсаторе;
- 8 – расчет продолжительности цикла фильтрования;
- 9 – расчет геометрических параметров машины и определение количества фильтровальных камер;
- 10 – расчет параметров пульсатора.

1. Исходными данными для расчета являются:

а) свойства ГВОМО: исходная влажность W_0 , %; усредненная плотность ρ_0 , кг/м³; плотность твердой фазы суспензии (плотность частиц) ρ_s , кг/м³; плотность жидкой фазы суспензии ρ , кг/м³;

б) технологические параметры фильтровальной машины: производительность по перерабатываемому сырью $Q_{исх}$, м³/с;

в) параметры обезвоженного продукта: конечная влажность ГВОМО W_k .

Физико-механические свойства ГВОМО и влажность суспензии следует определять в соответствии с требованиями ДСТУ Б В.2.1-17:2009 “Грунты. Методы лабораторного определения физических свойств”.

Производительность фильтровальной машины по перерабатываемому материалу $Q_{исх}$ задается в зависимости от технологических параметров обогатительного комплекса и добычного оборудования.

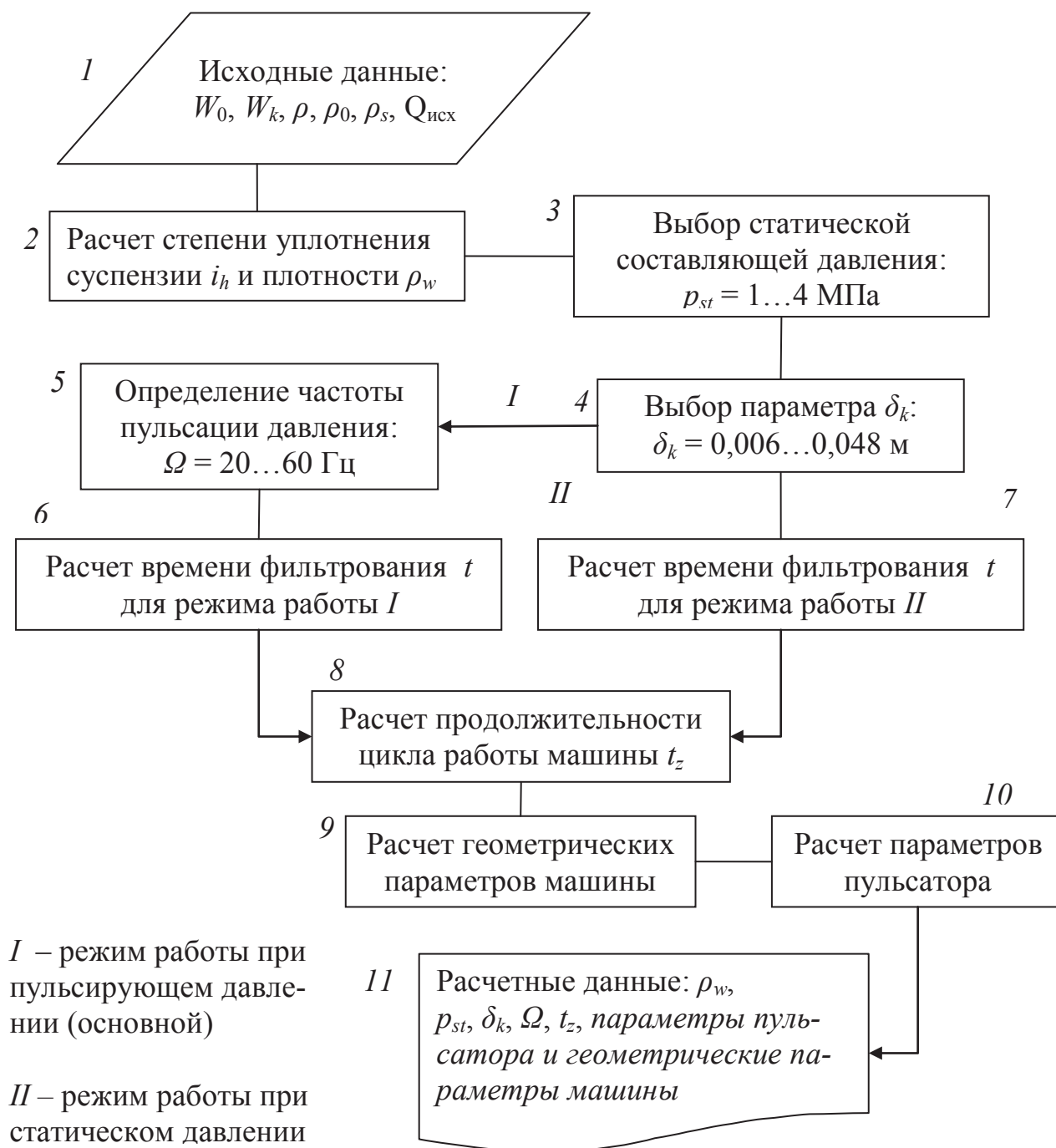


Рисунок 4.10 – Алгоритм определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВМО

Значение конечной влажности обезвоженного продукта W_k можно принимать из диапазона 0,3...0,5. Для ГВОМО рекомендуется принимать значение $W_k = 0,45...0,5$.

2. Степень уплотнения ГВОМО i_h и средняя плотность обезвоженного осадка ρ_w определяется формулам (4.3) и (2.23) соответственно.

3. При определении статической составляющей давления p_{st} следует руководствоваться зависимостями, приведенными на рис. 4.3 – 4.5. Для обезвоживания ГВОМО рекомендуется принимать p_{st} в пределах от 1 до 2 МПа.

4. Расстояние между фильтровальными перегородками δ_k может приниматься из диапазона от 6 до 48 мм. Для фильтр-прессов современных конструкций δ_k лежит в диапазоне от 15 до 33 мм [111]. При выборе параметра δ_k для фильтровально-пульсационной машины (применительно к суспензии ГВОМО) можно руководствоваться зависимостями, приведенными на рис. 4.8. Однако рекомендуется принимать δ_k от 10 до 15 мм.

5. Частоту пульсации давления Ω можно выбирать из диапазона от 20 до 60 Гц при этом можно использовать зависимости, приведенные на рис. 4.6 – 4.7. Согласно проведенным исследованиям установлено, что для фильтровально-пульсационной машины наиболее рационально использовать частоту пульсации давления от 50 до 60 Гц.

6. Для основного I режима работы фильтровально-пульсационной машины (с пульсацией) время фильтрования ГВОМО определяется по формуле:

$$t = \frac{3,19 \cdot 10^8 e^{-0,61\omega_r}}{p_r^{0,752-0,138\omega_r}} \left(5 \cdot 10^{-4} - \frac{1}{2} \delta_k \frac{\rho_s(W_0 - W_k)}{(W_k - 1)(\rho - W_0\rho + W_0\rho_s)} \right)^2.$$

7. Для режима работы фильтровально-пульсационной машины при выключенном пульсаторе (режим II) время фильтрования ГВОМО определяется:

$$t = \frac{3,11 \cdot 10^8 (\delta_k/2 - 0,077\delta_k e^{2,63W_k})^2}{p_r^{0,58}}.$$

8. Суммарная продолжительность цикла работы фильтр-пресса t_z равна:

$$t_z = t + t_{\Sigma},$$

где t_{Σ} – суммарное время вспомогательных операций фильтр-пресса, с.

$$t_{\Sigma} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6,$$

где t_1 – время закрытия фильтровальных плит; t_2 – время заполнения фильтровальных камер; t_3 – время открытия пресса; t_4 – время выгрузки осадка; t_5 – время очистки фильтровальной ткани; t_6 – общее время простоя, т.е. без подачи.

9. Количество фильтровальных камер n_k фильтр-пресса определяется как:

$$n_k = \frac{Q_{исх} \cdot t_z}{S_1 \cdot \delta_k \cdot i_h},$$

где $S_1 = a^2$ – площадь фильтровальной плиты, м². Размеры фильтровальных плит $a \times a$ выбираются из стандартного ряда [111], мм: 250×250; 300×300; 400×400; 470×470; 630×630; 800×800; 1000×1000; 1200×1200; 1500×1500; 2000×2000. Суммарная площадь фильтрования машины равна, м²: $S = 2a^2 \cdot n_k$.

Приблизительная длина фильтровальной машины L^* равна, м:

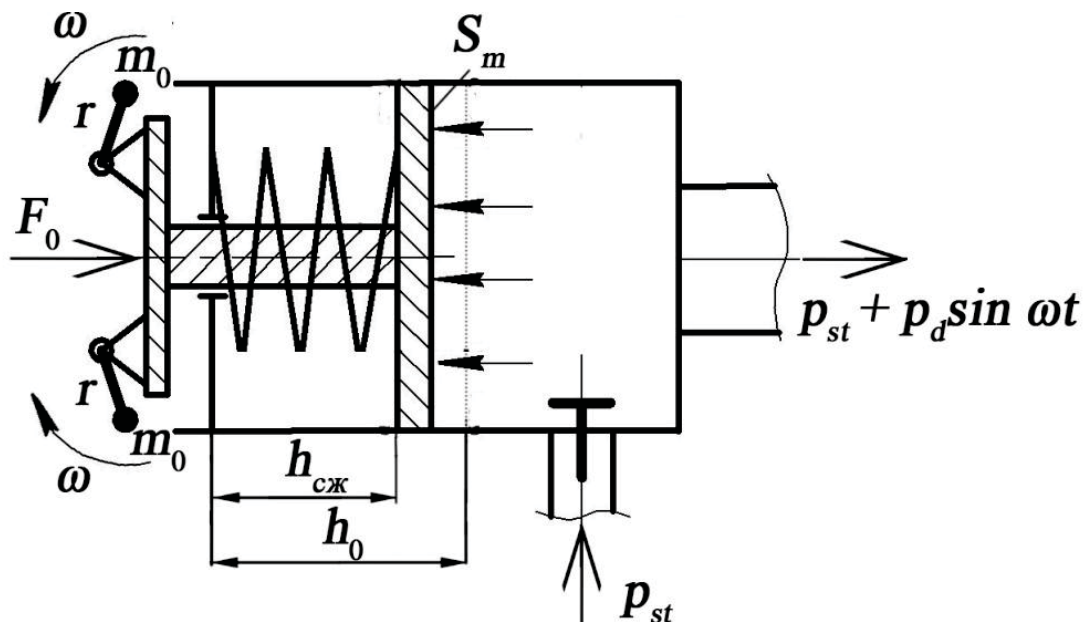
$$L^* \approx (1,3 \dots 1,5) \cdot L_f,$$

где L_f – расстояние между конечными фильтровальными плитами машины при закрытом положении фильтровальных камер, м.

$$L_f = \delta_k \cdot n_k + \delta_{пл}(n_k + 1),$$

где $\delta_{пл}$ – толщина фильтровальной плиты, м.

10. Для определения основных параметров пульсатора составлена расчетная схема, приведенная на рисунке 4.11.



$h_{пр}$ – рабочий ход пружины; h_0 – длина пружины; $h_{сж}$ – длина пружины в сжатом состоянии; S_m – площадь поршня (мембраны); F_0 – усилие вибратора

Рисунок 4.11 – Расчетная схема пульсатора с инерционным приводом

Исходными данными для расчета параметров пульсатора являются: статическая и динамическая составляющие давления и круговая частота вибрации (или частота пульсации давления).

Усилие, создаваемое инерционным вибровозбудителем равно, Н:

$$F_0 = K_d \cdot p_{st} \cdot S_m,$$

где S_m – площадь поршня (или мембраны) пульсатора, м^2 .

С другой стороны для инерционного вибратора $F_0 = m_0 r \omega^2$, где $m_0 r$ – кинетостатический момент вибратора, который равен, $\text{кг} \cdot \text{м}$:

$$m_0 r = K_d \frac{p_{st} \cdot S_m}{\omega^2}.$$

Определив кинетостатический момент вибратора m_0r , подбирается вибро-возбудитель. Коэффициент динамичности K_d для процесса фильтрации ГВОМО при пульсирующем давлении рекомендуется принимать 0,3.

Если известны параметры инерционного вибратора (кинетостатический момент m_0r и частота вращения ротора двигателя n' , об/мин), площадь поршня пульсатора S_m определяется, м²:

$$S_m = \frac{(m_0r)\omega^2}{K_d \cdot p_{st}}, \text{ где } \omega = \frac{\pi n'}{30}.$$

Статическая составляющая усилия $p_{st}S_m$ компенсируется за счет сжатия пружины, жесткость которой равна, Н/мм:

$$C_{пр} = \frac{p_{st}S_m}{h_{пр}} = \frac{p_{st}S_m}{h_0 - h_{сж}}.$$

При расчете геометрических параметров пружины можно руководствоваться справочной литературой [112], а также соответствующими стандартами.

Таким образом, разработаны методики определения параметров фильтровально-пульсационной и вибрационной фильтровальной машин для обезвоживания ГВОМО (Приложения Д и Е), позволяющие определить: статическую составляющую давления; частоту пульсации давления; расстояние между фильтровальными перегородками; суммарную продолжительность цикла работы машины; плотность обезвоженного продукта; основные параметры пульсатора с инерционным приводом и оценить габаритные размеры машины. Разработанные методики приняты к использованию при разработке фильтровальных машин на предприятии ПАО «БМЗ «Прогресс» (г. Бердичев), а также внедрены в институте с проектирования горных предприятий ГВУЗ «НГУ» (г. Днепрпетровск) и филии «ЦЗФ» Павлоградская» ПАО «ДТЕК Павлоградуголь» (г. Павлоград) при проектировании фильтровальных машин. Акты внедрения методик приведены в приложении И.

4.3 Эффективность обезвоживания ГВОМО при пульсирующем давлении и ожидаемый экономический эффект

Проведенный анализ результатов исследований дает возможность выполнить оценку эффективности режимов фильтрования ГВОМО при статическом и пульсирующем давлении.

Наибольшее влияние на удельную производительность камерного фильтр-пресса оказывает время фильтрования, зависящее от расстояния между ФП, давления и др. параметров. Так при уменьшении расстояния между ФП с 15 мм (минимальное расстояние между ФП для стандартных машин) до 10 мм, время фильтрования единицы объема суспензии ГВОМО уменьшится более чем в 2 раза (для 45%-ой конечной влажности продукта). Следовательно, при одинаковой площади фильтровальной поверхности удельная производительность машины повысится в среднем на 35%.

Выполним оценку эффективности фильтрования ГВОМО при воздействии пульсирующего давления. При этом сравним режимы работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО с пульсацией и без пульсации давления. Для этого построены зависимости удельной производительности машины для режима ее работы при пульсирующем давлении с частотой пульсации 20 и 60 Гц и статическом давлении. Данные зависимости приведены на рисунках 4.12 – 4.13.

Как видно из графиков (рис. 4.12 – 4.13), удельная производительность фильтровальной машины, работающей в режиме пульсации, значительно выше, чем производительность для режима без пульсации давления (статическая составляющая давления p_{st} равна для обоих случаев).

При статической составляющей давления 1 МПа и частоте пульсации 20 Гц повышение удельной производительности относительно режима работы машины при статическом давлении составило 39%, а для частоты 60 Гц – 87%. Для давления 4 МПа повышение производительности составило: при частоте 20 Гц – 43%, при частоте 60 Гц – 58%.

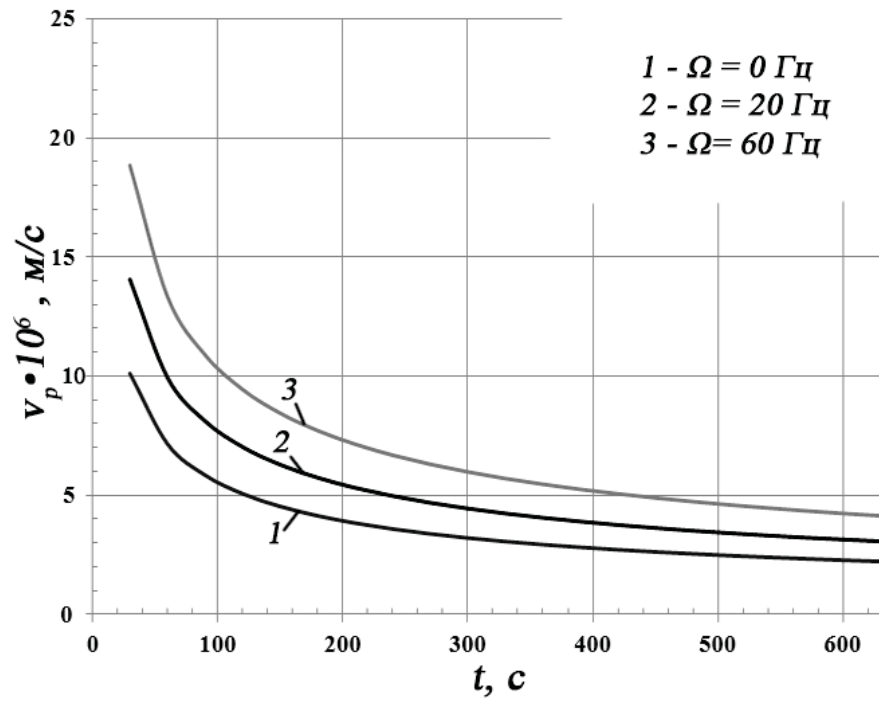


Рисунок 4.12 – Зависимости удельной производительности фильтровально-пульсационной машины от времени при $p_{st} = 1$ МПа

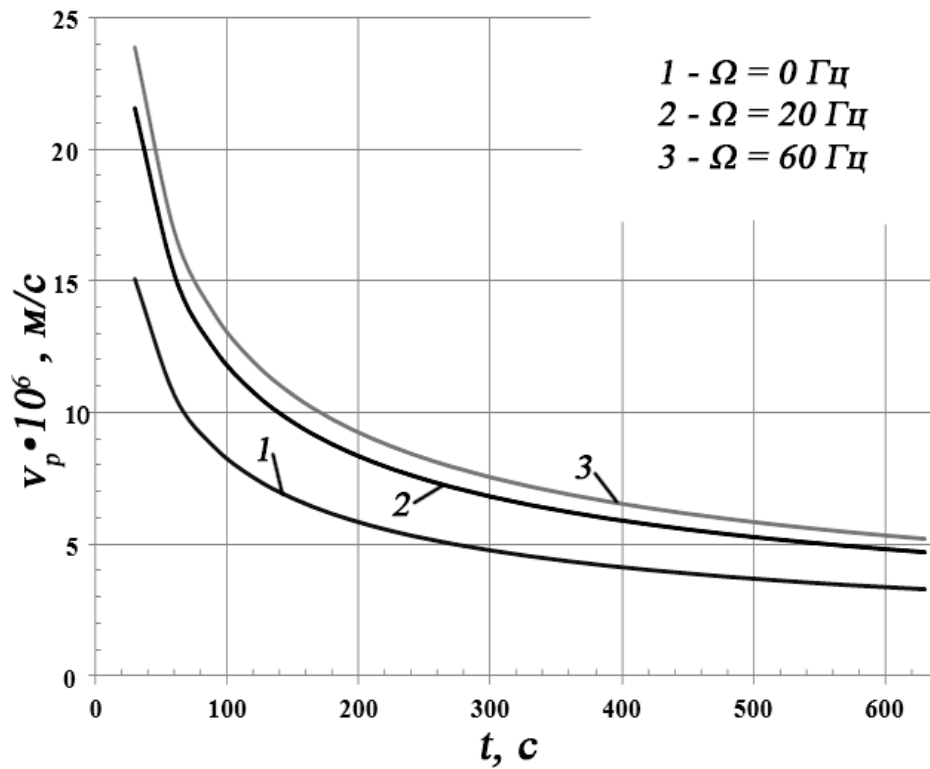


Рисунок 4.13 – Зависимости удельной производительности фильтровально-пульсационной машины от времени при $p_{st} = 4$ МПа

Для фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО с расстоянием между ФП 10 мм, работающей при частоте пульсации давления 50 Гц и обеспечивающей конечную влажность продукта 45%, получена зависимость относительного повышения удельной производительности ΔQ от давления (рис. 4.14). Параметр ΔQ в данной зависимости определялся, %:

$$\Delta Q = \frac{Q_p - Q_{st}}{Q_{st}} \cdot 100\%,$$

где Q_{st} и Q_p – производительность фильтровальной машины для режимов работы при статическом и пульсирующем давлении соответственно, м³/с.

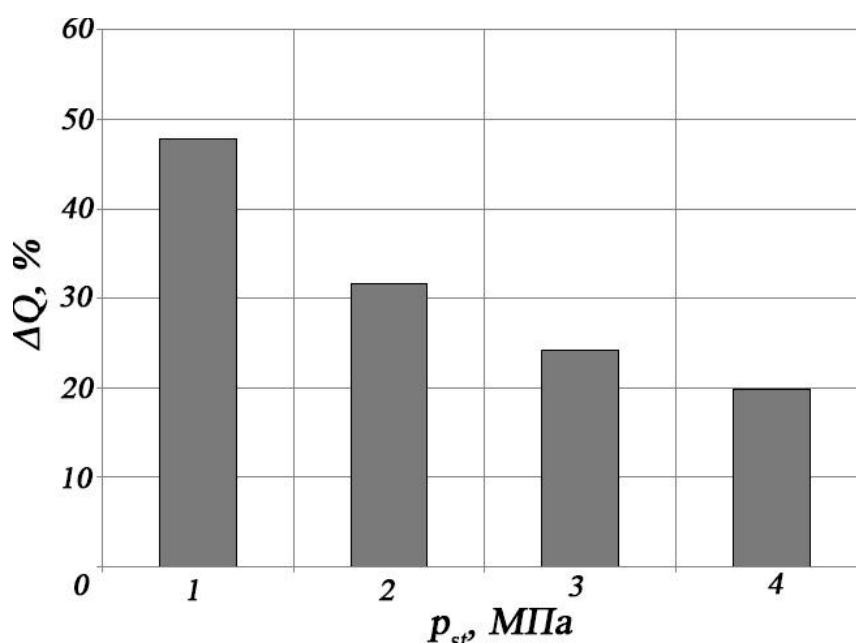


Рисунок 4.14 – Зависимость относительного повышения удельной производительности фильтровальной машины от давления

Из диаграммы (рис. 4.14) видно, что наибольшее увеличение производительности фильтровально-пульсационной машины соответствует ее работе при статическом давлении 1 МПа и составляет порядка 48%. Для диапазона давлений от 3 до 4 МПа повышение удельной производительности составляет в среднем 21%.

Для камерных горизонтальных фильтр-прессов, работающих при статическом давлении, средняя потребляемая энергия составляет порядка 7 кВт·ч. Для инерционного пульсатора максимальная потребляемая мощность составляет порядка 2 кВт.

Так как цикл фильтрования суспензии в фильтр-прессе (без учета вспомогательных операций) в среднем составляет 1/2 от общей продолжительности цикла работы машины, потребляемая пульсатором энергия составит 1 кВт·ч. Следовательно, суммарная потребляемая энергия фильтр-пресса с пульсатором составит порядка 8 кВт·ч.

Часовая производительность камерного фильтр-пресса по обезвоженному продукту $Q_{\text{ч}}$ равна, м³/ч:

$$Q_{\text{ч}} = 3600 \frac{S_1 \cdot n_k \cdot i_h}{t + t_{\Sigma}}.$$

Для режима работы фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО без пульсации давления (при $p_{st} = 1$ МПа и $\delta_k = 10$ мм) часовая производительность по обезвоженному продукту с конечной влажностью 45% составит 0,436 м³/ч; а для режима работы данной машины с включенным пульсатором, обеспечивающим частоту пульсации давления 50 Гц: 0,601 м³/ч. При этом время вспомогательных операций машины принималось $t_{\Sigma} = 450$ с.

Согласно тарифов 2016 года, цена 1 кВт·ч электроэнергии составляет порядка 1,7 грн. Соответственно стоимость электроэнергии, затрачиваемой на получение 1 м³/ч обезвоженных до 45%-ой влажности ГВОМО, для фильтровально-пульсационной машины, работающей в режиме без пульсации, составит 27,28 грн, а для режима работы с пульсацией – 22,65 грн.

Таким образом включение пульсатора в работу фильтр-пресса позволит снизить удельные затраты электроэнергии на единицу объема перерабатываемого сырья в час на 20%. Ожидаемый годовой экономический эффект при этом составит порядка 28 – 30 тыс. грн. на одну машину.

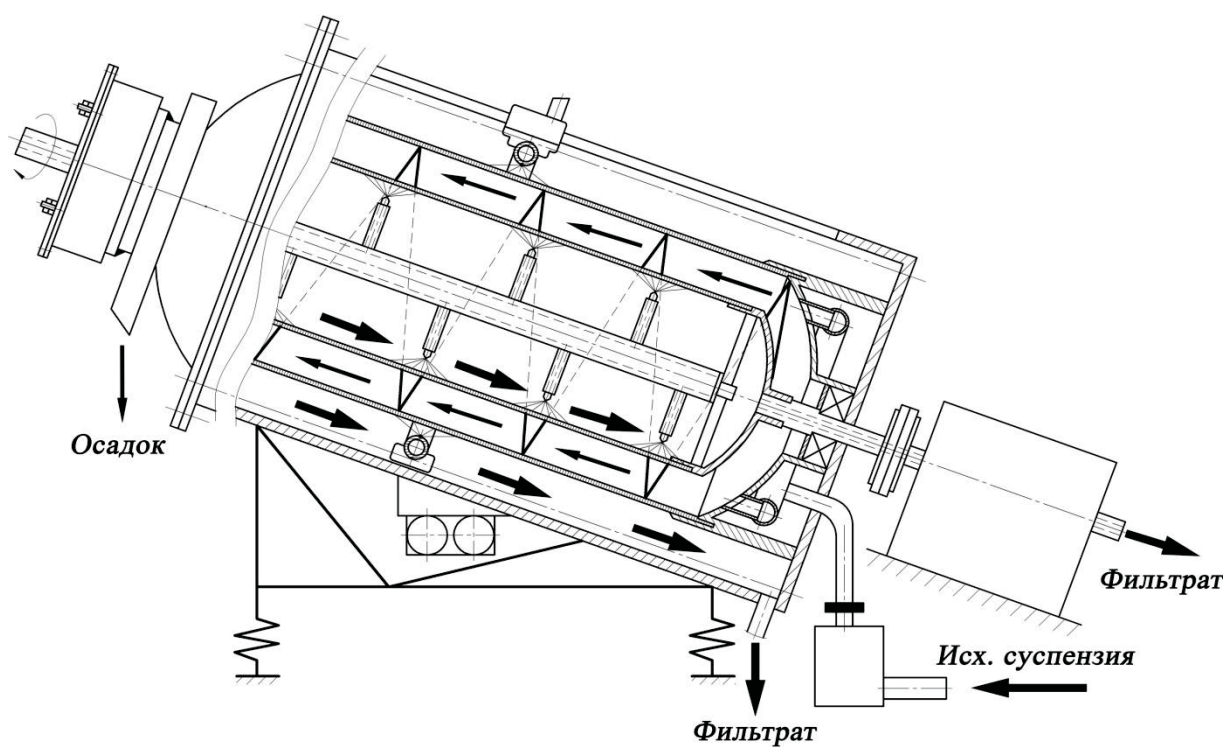
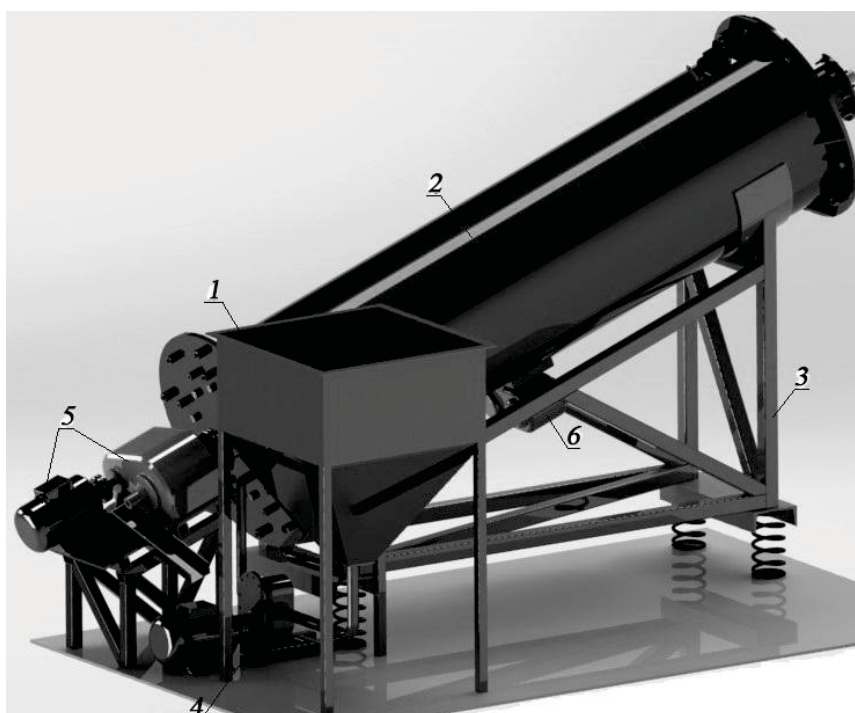
4.4 Перспективы использования результатов исследований

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований была разработана конструкция фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания тонкодисперсных суспензий нового технического уровня (патент №104312), состоящая из двух коаксиально расположенных цилиндрических фильтровальных элементов (ЦФЭ) и шнековой спирали для выгрузки обезвоженного продукта [113, 114]. За базовую конструкцию этой машины была взята конструкция фильтр-пресса «Торнадо», принцип действия которого описан в главе 2 настоящей работы. Схема предложенной конструкции фильтровальной машины и ее принцип действия представлены на рисунке 4.15.

Суспензия из бункера-питателя 1 (рис. 4.15) подается на фильтр 2, установленный на подпружиненной раме 3, при помощи насоса 4. В кольцевом зазоре фильтра создается давление и начинается процесс фильтрования. Отфильтрованная жидкость, поступающая в полость внутреннего фильтра, сливается через полый вал, на котором установлен этот фильтр. Фильтрат, поступающий с наружного фильтра, сливается через сливной патрубок, который расположен внизу корпуса фильтра. Суспензия непрерывно обезвоживается и перемещается по длине фильтра при помощи шнековой спирали, закрепленной на внутреннем фильтре, который посредством муфты соединен с приводом 5. Разгрузка обезвоженного осадка осуществляется через разгрузочное устройство, расположенное на другом конце фильтра.

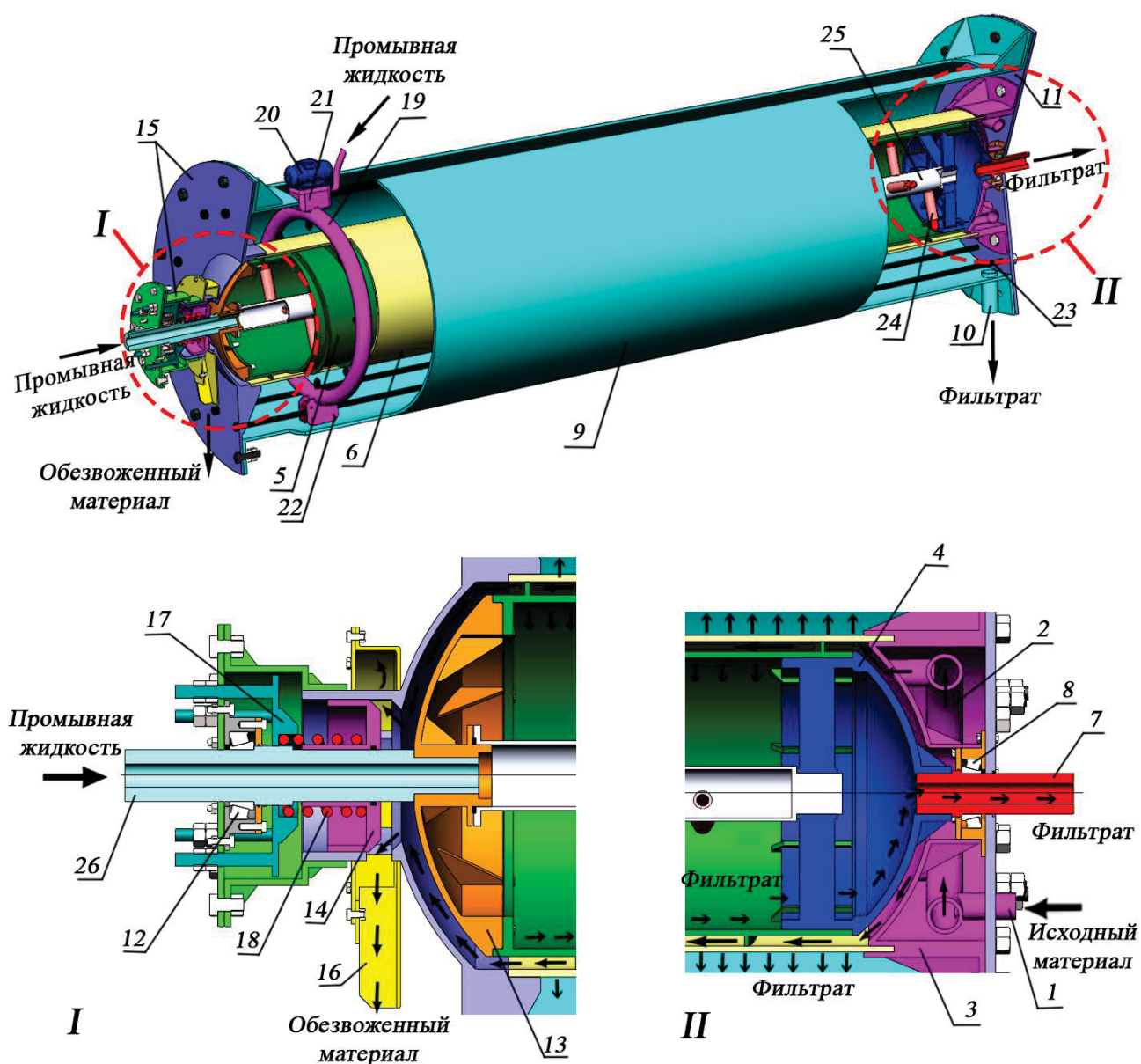
Фильтровально-пульсационная машина работает в вибрационном режиме. Вибрации на суспензию передаются при помощи закрепленного на корпусе вибровозбудителя 6.

Основным элементом фильтровально-пульсационной машины является фильтр, конструкция которого представлена на рисунке 4.16. Фильтр работает следующим образом. Суспензия через входной патрубок 1 (рис. 4.16) подается в распределительное кольцо 2, откуда поступает в зазор между основанием наружного ЦФЭ 3 и стаканом 4 на который опирается внутренний ЦФЭ 5. Далее



1 – бункер-питатель; 2 – фильтр; 3 – рама; 4 – насос; 5 – привод шнека;
6 – вибратор

Рисунок 4.15 – Принципиальная схема и общий вид фильтровально-пульсационной машины с коаксиальными ЦФЭ и шнековой выгрузкой осадка (патент №104312)



1 – входной патрубок; 2 – распределительное кольцо; 3 – основание наружного ЦФЭ; 4 – стакан; 5 – внутренний ЦФЭ; 6 – наружный ЦФЭ; 7 – полый вал (нижний); 8 – подшипниковая опора; 9 – корпус; 10 – сливной патрубок; 11 – основание; 12 – подшипниковая опора; 13 – крышка внутреннего ЦФЭ; 14 – сбрасывающий клапан; 15 – крышка; 16 – разгрузочный желоб; 17 – регулировочное приспособление; 18 – пружина клапана; 19 – система промывки наружного ЦФЭ; 20 – мотор-редуктор; 21 – механизм перемещения; 22 – роликовая опора; 23 – шпилька; 24 – форсунка; 25 – труба; 26 – полый вал (верхний)

Рисунок 4.16 – Конструктивная схема фильтра фильтровально-пульсационной машины и его принцип действия

материал поступает в кольцевой зазор между внутренним 5 и наружным 6 ЦФЭ и заполняет весь кольцевой объем фильтра. В кольцевом зазоре создается давление и начинается процесс обезвоживания. Фильтрат, образовавшийся в полости внутреннего ЦФЭ, собирается в стакане 4 и удаляется через полый вал 7, который установлен в подшипниковой опоре 8. Фильтрат с наружного ЦФЭ собирается в корпусе 9 и удаляется через сливной патрубок 10. Наружный ЦФЭ и подшипниковая опора установлены на основании 11. Внутренний ЦФЭ закреплен в подшипниковых опорах 8 (снизу) и 12 (сверху). Верхняя часть фильтра закрыта крышкой 13. Когда давление фильтрования повышается и его значение превышает максимальное, срабатывает сбрасывающий клапан 14, который закрывает разгрузочную щель. После срабатывания клапана обезвоженный материал через разгрузочные отверстия в крышке 15 поступает в разгрузочный желоб 16 и осуществляется его разгрузка. Осадок, который образуется на фильтровальных поверхностях, непрерывно перемещается при помощи спирали с переменным шагом, жестко закрепленной на внутреннем фильтре.

Максимальное давление, передающееся на клапан 14, можно регулировать при помощи регулировочного приспособления 17. Зажимая или отпуская гайки на регулировочном приспособлении можно увеличить или уменьшить жесткость пружины клапана 18, тем самым регулируя давление.

В процессе работы машины периодически осуществляется регенерация фильтровальных элементов. Промывка наружного ЦФЭ осуществляется непрерывно перемещающейся системой промывки наружного фильтра 19, которая состоит из размещенных по радиусу форсунок. Эта система осуществляет поступательное движение вверх-вниз вдоль фильтра по направляющим.

На одном конце системы промывки наружного ЦФЭ размещен мотор-редуктор 20 и механизм перемещения 21 (червячного типа). Другой конец закреплен в роликовой опоре 22, которая установлена на одной из шпилек 23. Промывка внутреннего фильтра осуществляется при помощи вращающихся вместе с ним форсунок 24, размещенных на трубе 25. Промывная жидкость при этом подается через полый вал 26.

При работе фильтровальной машины с двумя коаксиальными ЦФЭ следует отметить некоторые конструктивные и технологические особенности.

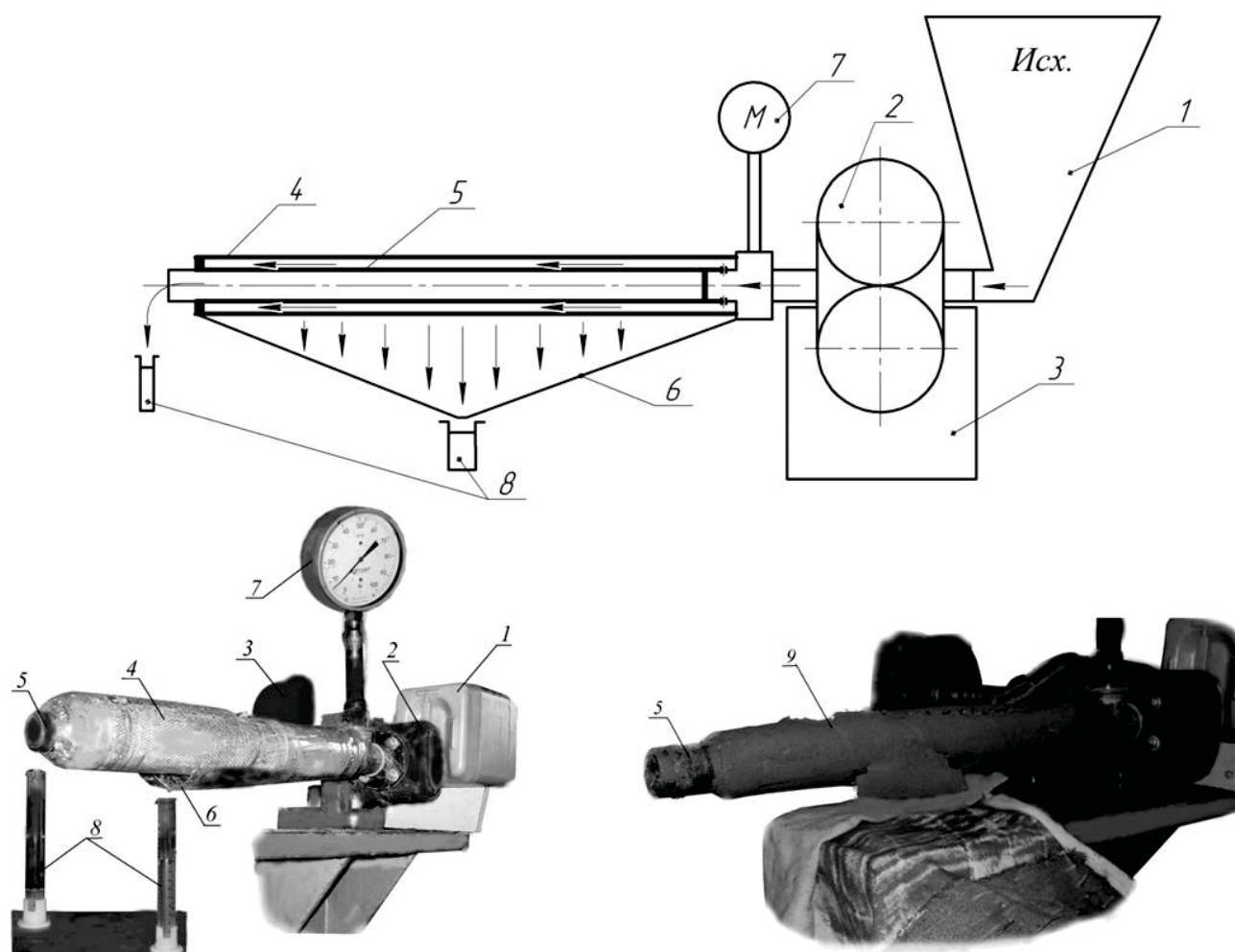
1. Пульсация давления в фильтровально-пульсационной машине со шнековой выгрузкой осадка реализуется при помощи инерционного вибратора, сообщающего колебания фильтру. При этом фильтр устанавливается на амортизаторах. Данное конструктивное решение обосновано тем, что при воздействии вибрации на фильтровальные элементы повысится эффективность их регенерации и за счет уменьшения коэффициента трения материала о витки спирали шнека при вибрационном воздействии улучшится разгрузка материала. Также в ходе исследований процесса фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении установлено, что коэффициент динамичности можно принять минимальным, – это позволит реализовать данную схему машины.

2. Обезвоженный продукт (осадок) и исходный материал при работе машины будут постоянно перемешиваться шнеком. Осадок будет непрерывно удаляться с ФП, освобождая при этом новое поровое пространство для суспензии. Поэтому процесс фильтрования будет протекать эффективнее, чем в фильтр-прессах циклического действия.

Среди других особенностей машины можно также отметить: простоту конструкции разгрузочного клапана, возможность регулирования давления в зоне разгрузки, простоту монтажа-демонтажа фильтров, возможность регенерации фильтровальных элементов, компактность машины и др.

К недостаткам предлагаемой конструкции можно отнести: относительно невысокий ресурс работы фильтра (из-за воздействий вибрации) и сложность изготовления внутреннего фильтровального элемента.

Для проверки возможности реализации конструкции фильтровальной машины с коаксиальными ЦФЭ была создана лабораторная фильтровальная установка, представленная на рисунке 4.17. Основные технические характеристики лабораторной установки приведены в таблице 4.2.



1 – загрузочный желоб; 2 – насос шестеренный; 3 – привод; 4 – наружный ЦФЭ;
5 – внутренний ЦФЭ; 6 – желоб для сбора фильтрата; 7 – манометр;
8 – мерные сосуды; 9 – осадок (обезвоженные ГВОМО)

Рисунок 4.17 – Принципиальная схема и общий вид лабораторной фильтровальной установки с коаксиальными ЦФЭ

Таблица 4.2 – Основные параметры лабораторной фильтровальной установки с двумя коаксиальными ЦФЭ

Длина фильтра, мм	440
Наружный диаметр внутреннего фильтра, мм	44
Размер кольцевого зазора между ЦФЭ, мм	6,0
Максимальное рабочее давление, МПа	2,5

Принцип работы лабораторной установки (рис. 4.17) следующий. Исходная суспензия (ГВОМО) с влажностью W_0 через загрузочный желоб 1 подается в шестеренный насос 2, который приводится в действие приводом 3 с регулируемой частотой вращения выходного вала. Далее материал поступает в зазор между наружным 4 и внутренним 5 ЦФЭ. Противоположный конец фильтра закрыт заглушкой, поэтому материал остается в замкнутом кольцевом объеме.

После того как материал заполнит весь кольцевой объем, давление в камере увеличивается и происходит процесс фильтрования. Фильтрат с наружного ЦФЭ поступает в желоб для сбора фильтрата 6 и собирается в мерных сосудах 8. После обезвоживания суспензии, наружный ЦФЭ снимается и осуществляется удаление образованного в кольцевом зазоре осадка 9. Давление измерялось при помощи манометра 7.

Внутренний ЦФЭ установки представляет собой перфорированную металлическую трубу, на которую в несколько слоев намотана фильтровальная ткань. Наружный ЦФЭ состоит из жесткой металлической сетки, внутри которой закреплена фильтровальная ткань. Сама сетка свернута в цилиндр, который установлен коаксиально внутреннему ЦФЭ.

Так как суспензия ГВОМО представляет собой вязко-пластичный материал в отличие от традиционно фильтруемых (жидких) суспензий, основной целью проведения опытов была проверка возможности использования способа фильтрования ГВОМО в кольцевом зазоре цилиндрических фильтровальных элементов при подаче материала в фильтр шестеренным насосом.

Опыты проводились для подготовленных образцов ГВОМО с исходной влажностью 68% при давлении 1,5 МПа. Продолжительность фильтрования ГВОМО составила 210 с. В конце опытов измерялась конечная влажность материала W_k , среднее значение которой составило 41%. Количество повторных опытов равно трем.

Для времени фильтрования $t = 210$ с, давления $p_{st} = 1,5$ МПа и величины зазора $\delta_k = 6$ мм (соответствующего расстоянию между ЦФЭ) расчетное значение влажности W_k согласно математической модели процесса фильтрования

ГВОМО при статическом давлении составило порядка 40 – 41%. Это также подтверждает адекватность ранее полученной математической модели.

Таким образом, установлено, что предложенная конструкция фильтровальной машины с двумя коаксиально расположенными цилиндрическими ФП является работоспособной.

На основании полученных результатов предварительных исследований обезвоживания ГВОМО на фильтре с ЦФЭ разработана инженерная методика определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО со шнековой выгрузкой осадка, приведенная в приложении Ж. Данная методика принята к использованию на предприятии ООО «Океанмашэнерго» при проектировании фильтров для очистки сточных вод от мелкодисперсных механических примесей.

Результаты исследований настоящей работы могут быть использованы при разработке конструкций фильтровальных и фильтровально-пульсационных машин для обезвоживания тонкодисперсных суспензий (морских осадков, озерных сапропелевых илов, шламов и др.), а также при обосновании технологических и конструктивных параметров данного оборудования.

Разработанные методики проведения экспериментальных исследований обезвоживания тонкодисперсных суспензий в фильтровальных и фильтровально-пульсационных машинах могут быть использованы для исследований процесса фильтрования других мелкодисперсных суспензий. Данные методики позволяют проводить исследования при минимальном количестве опытов, что позволит снизить затраты времени и средств.

Учет изменения влажности суспензии при ее фильтровании дает возможность расширить область применения математических моделей, описывающих исследуемый процесс, полученных на основании формулы Дарси. Это также позволяет обосновать высоту рабочей камеры или расстояние между фильтровальными элементами обезвоживающей установки.

Направления дальнейших исследований. Проведенные в работе исследования показывают эффективность использования пульсации давления, кото-

рая возрастает с уменьшением величины статического давления и высоты слоя суспензии, и повышением частоты. При этом для пульсаторов с инерционным приводом исследован лишь наиболее широко распространенный в промышленности диапазон частот (от 20 до 60 Гц). Расширение области исследования частот (до ультразвукового диапазона) позволит определить оптимальное значение частоты, а также расширить область используемых пульсаторов и других вибрационных устройств.

В дальнейшем также необходимо исследовать процесс затухания пульсации в слое суспензии. Это позволит не только обосновать параметры пульсатора, а также высоту фильтруемого слоя суспензии, количество и конструкцию фильтровальных камер установки (в зависимости от их положения).

Перспективной областью дальнейших исследований также является исследование процесса фильтрования тонкодисперсной суспензии в фильтр-прессах со шнековой выгрузкой осадка, работающих в режиме пульсации давления. В данных установках обезвоженный осадок непрерывно удаляется с фильтровальной перегородки и при этом перемешивается с суспензией, что приводит к дополнительному повышению эффективности обезвоживания.

Выводы по разделу

1. Установлено, что для обеспечения 45-50%-ой влажности ГВОМО при обезвоживании в фильтровально-пульсационной машине рекомендованными параметрами являются: частота пульсации давления 50 Гц; величина статической составляющей давления 1 – 2 МПа; коэффициент динамичности 0,3; расстояние между фильтровальными перегородками 8 – 15 мм.

2. Установлено, что при повышении статической составляющей давления от 1 МПа до 4 МПа энергоемкость процесса фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении увеличивается в 5 раз, а удельная производительность фильтровальной машины при этом повышается на 32%.

3. Разработана конструкция и инженерная методика определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО, которая внедрена на предприятии ПАО «БМЗ «Прогресс», институте с проектирования горных предприятий Государственного ВУЗ «НГУ» и филии «ЦЗФ» Павлоградская» ПАО «ДТЕК Павлоградуголь» при проектировании фильтровальных машин.

4. При частоте пульсации от 50 до 60 Гц и статической составляющей давления 1 МПа повышение удельной производительности фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО за одинаковый промежуток времени составило $> 48\%$ в сравнении с режимом работы машины без пульсации давления. Для диапазона давлений от 3 до 4 МПа повышение удельной производительности составило в среднем 21%.

5. На уровне изобретения разработана конструкция фильтровально-пульсационной машины со шнековой выгрузкой осадка и инженерная методика определения ее параметров применительно к ГВОМО, позволяющая определить основные конструктивные и режимные параметры машины. Методика принята к использованию на предприятии ООО «Океанмашэнерго» при разработке фильтров для очистки сточных вод от механических мелкодисперсных включений.

ВЫВОДЫ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная научная задача, заключающаяся в обосновании основных параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания тонкодисперсной суспензии ГВОМО в виде статической составляющей давления, коэффициента динамичности, частоты пульсации давления, времени фильтрации и расстояния между фильтровальными перегородками, и установлении их зависимостей от показателей процесса фильтрации ГВОМО, что позволило определить время фильтрации суспензии, которое находится в экспоненциальной зависимости от частоты пульсации давления и обратно пропорционально статической составляющей давления с показателем степени, линейно зависящим от частоты; установить количественную оценку параметров машины и разработать инженерную методику определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО.

Основные научно-практические результаты работы.

1. По результатам анализа патентов и литературных источников установлено, что для обезвоживания ГВОМО наиболее перспективным является применение камерных фильтр-прессов, а также фильтр-прессов с цилиндрическими фильтровальными перегородками. Наиболее перспективным направлением повышения производительности фильтровальных машин является использование пульсирующего давления.

2. Установлено, что при фильтрации ГВОМО в камере фильтровально-пульсационной машины время фильтрации прямо пропорционально произведению приведенного удельного сопротивления материала на высоту фильтруемого слоя и комплексный параметр, характеризующий изменение влажности суспензии.

3. Разработана схема и конструкция экспериментальной установки для проведения лабораторных исследований процесса обезвоживания суспензии при статическом и пульсирующем давлении и выполнен расчет ее параметров.

4. Разработана методика и проведены лабораторные исследования процесса обезвоживания ГВОМО в фильтровально-пульсационной машине.

5. Разработана математическая модель, определяющая время фильтрования ГВОМО в фильтровально-пульсационной машине, работающей в режиме пульсации давления, в зависимости от статической составляющей давления от 1 до 4 МПа, коэффициента динамичности равного 0,3, частоты пульсации давления от 20 до 60 Гц и высоты слоя суспензии от 3 до 24 мм, которая учитывает изменение влажности суспензии диапазоне от 30 до 68%. Максимальное относительное отклонение расчетных – согласно полученной математической модели – и экспериментальных значений времени фильтрования составляет 21% при доверительной вероятности 0,9.

6. Установлено, что при фильтровании тонкодисперсной суспензии ГВОМО в фильтровально-пульсационной машине время фильтрования находится в экспоненциальной зависимости от частоты пульсации давления и обратно пропорционально статической составляющей давления с показателем степени, линейно зависящим от частоты.

7. Получена математическая модель, определяющая время фильтрования ГВОМО в фильтровально-пульсационной машине, работающей в режиме статического давления (без пульсации) от 1 до 7 МПа, высоты слоя суспензии от 3 до 24 мм и влажности суспензии от 30 до 68%. Максимальное относительное отклонение расчетных согласно полученной математической модели и экспериментальных значений времени фильтрования составляет 19% при доверительной вероятности 0,9.

8. Определены рациональные конструктивные и режимные параметры фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО до влажности от 45 до 50 %: частота пульсации давления 50 Гц; величина статической составляющей давления от 1 до 2 МПа; коэффициент динамичности 0,3; расстояние между фильтровальными перегородками от 8 до 15 мм.

9. На уровне изобретения разработана конструкция и инженерная методика расчета параметров фильтровально-пульсационной машины для обезво-

живания ГВОМО со шнековой выгрузкой осадка, позволяющая определить основные конструктивные и режимные параметры машины, которая внедрена на предприятии ООО «Океанмашэнерго».

10. Разработана конструкция и инженерная методика определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО, которая используется при проектировании фильтровальных машин на предприятии ПАО «БМЗ «Прогресс», институте с проектирования горных предприятий Государственного ВУЗ «НГУ» и филии «ЦЗФ» Павлоградская» ПАО «ДТЕК Павлоградуголь».

11. Установлено, что при частоте пульсации от 50 до 60 Гц и статической составляющей давления 1 МПа удельная производительность фильтровально-пульсационной машины за одинаковый промежуток времени повысится более чем на 48% в сравнении с режимом работы без пульсации давления. Для диапазона давлений от 3 до 4 МПа повышение удельной производительности составит в среднем 21%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бабинец А.Е. Гидрологические и геохимические особенности глубоководных отложений Черного моря / А.Е. Бабинец, А.Ю. Митропольский, С.П. Олыштынский. – К.: Наук. думка, 1973. – 160 с.
2. Бабинец А.Е. Физико-механические свойства донных осадков Черного моря / А.Е. Бабинец, В.А. Емельянов, А.Ю. Митропольский. – Киев: Наук. думка, 1981. – 204 с.
3. Зиборов А.П. О промышленном освоении месторождений морских сапропелей / А.П. Зиборов // Геологический журнал. – 2003. – С. 50 – 53.
4. 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.
5. Шнюков Е.Ф. Минеральные богатства Черного моря / Е.Ф. Шнюков, А.П. Зиборов. – Киев: «Карбон-ЛТД», 2004. – 290 с.
6. 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.
7. Димитров Д.П. Геология и нетрадиционни ресурси на Черно море / Д.П. Димитров. – Варна: "Онгъл", 2010. – 270 с.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

11. 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.
12. Куковская Т.С. К вопросу о генезисе сапропелевых осадков / Т.С. Куковская // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2006. – №1. – С. 81 – 91.
13. Добрецов В.Б. Мировой океан и континентальные водоемы: минеральные ресурсы, осование, экология / В.Б. Добрецов // СПб.: Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы, 2007. – 796 с.
14. Димитров Д.П. Некоторые результаты применения глубоководных органо-минеральных осадков дна Черного моря для агротехнических целей / Д.П. Димитров, Г.Ц. Георгиев, П.С. Димитров // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2006. – №1. – С. 74 – 80.
15. Некипелова Е.М. Роль гранулометрического состава иловых пелоидных систем при их бальнеологической оценке / Е.М. Некипелова // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия» – т. 23 (62). – №1. – 2010. – С. 188-200.
16. Баклан В.Ю. Исследование морского сапропеля как фильтрующего материала / В.Ю. Баклан, И. П. Колесникова // Экология Черного моря. – 2001. – Электронный ресурс: <http://www.eco-mir.net/show/549/>.
17. Шепель Т.В. Перспективы использования канатно-ковшового оборудования для добычи глубоководных органо-минеральных осадков в Черном море / Т.В. Шепель, А.Е. Шевченко // Форум горняков: материалы межд. конф. 1 – 4 октября 2014. – Днепропетровск: Д. ТОВ «ЛізуновПрес», 2014. – Т.1. – С. 80 – 87. – 266с.
18. Димитров П.С. О создании Международного концорциума для разведки и добычи глубоководных органо-минеральных осадков со дна Черного моря / [П.С. Димитров, Д.П. Димитров, Д.П. Солаков, Геология и др.] // Полезные ископаемые Мирового океана. – 2007. – №1. – С. 52 – 56.

19. Еськов Б.Г. Водно-физические свойства донных отложений Черного моря, водохранилищ и стариц в бассейне Днепра (препринт) / Б.Г. Еськов, А.Ю. Митропольский. – Киев: ИГН АН УССР. – 1978. – 64 с.
20. Проблема сапропелей Черного моря / [гл. ред. Е.Ф. Шнюков]. – К.: ОМГОР, 2010. – 148 с.
21. Цитович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цитович // Издание четвертое перераб. и доп. Гос. изд. литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. – Москва: 1963. – 638 с.
22. Штин С.М. Озерные сапропели и их комплексное освоение [под ред. И.М. Ялтанца.] / С.М. Штин. – М.: Издательство Московского государственного горного университета. – 2005. – 373 с.
23. Франчук В.П. Проблемы создания оборудования для добычи и первичной переработки глубоководных органо-минеральных отложений Черного моря / В.П. Франчук, О.Е. Шевченко, Т.В. Шепель // Вестник Житомирского государственного технологического университета. – 2013. – №4 (67). – С. 139 – 145.
24. Shevchenko O.Ye. Aktueller Stand der Technik für die Mechanische Entwässerung von marinen organisch-mineralischen Sedimenten des Schwarzen Meeres / Shevchenko O.Ye., C. Drebenstedt // 10 Freiberg – St. Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler (BHT 2015). – Scientific Reports on Resource Issues 2015 Volume 1. – TU Bergakademie Freiberg. – p-p. 205-213.
25. Бедрань Н.Г. Машины для обогащения полезных ископаемых: учеб. пособие для вузов / Н.Г. Бедрань. – Киев – Донецк: Вища школа. – 1980. – 416 с.
26. Руденко К.Г. Обезвоживание и пылеулавливание / К.Г. Руденко, М.М. Шемаханов. – М.: Недра. – 1981. – 351 с., ил.
27. Patzold V. Der Nassbau: Erkundung, Gewinnung, Aufbereitung, Bewertung / V. Patzold, G. Grünh, C. Drebenstedt. – Berlin: Almas Schimmel, 2008. – 428 p.
28. Клячин В.В. Технология обогащения каолинов Урала. / В.В. Клячин, Н.Ф. Меринов, Р.А. Габдулхаев // Горный журнал. – 10-11/1996. – С. 100-105.

29. Rushton A. Solid-liquid Filtration and Separation Technology / A. Rushton, A.S. Ward, R.G. Holdig. – Weinheim; New York; Basel; Cambridge: VSH. – 1996. – 529 p.
30. Tarleton E.S. Solid/Liquid Separation - Equipment Selection and Process Design / E.S. Tarleton, R.J. Wakeman. – Elsevier. – 2007. – 448 p.
31. Svarovsky L. Introduction to Solid-liquid Separation (4ed.) / L. Svarovsky. – Elsevier. – 2001. – 548 p.
32. Аджиенко В.Е. Использование геотекстильных контейнеров для обезвоживания и складирования отходов / В.Е. Аджиенко, С.В. Ермолаев, А.А. Ярыгина // Экология производства. – 2010. – №5. – С. 58 – 60.
33. Ярыгина А.А. Очистка водных объектов от донных отложений / А.А. Ярыгина, С.В. Ермолаев, О.В. Орлова // Экология производства. 2010. – №12. – С. 58 – 60.
34. Бабаев Д.Р. Применение технологии обезвоживания в контейнерах Geotube для расчистки озера / Д.Р. Бабаев, О.В. Орлова, А.А. Ярыгина // Экология производства. – 2011. – №12. – С. 77-79.
35. Francois Couturier. Dredging drives innovation / Francois Couturier // Dredging and Port Construction. October 2012. – p.-p. 39-40. Resource: www.snf-dredging.com.
36. Яковлев С.В. Канализация: учебник для вузов. Изд. 5-е, перераб. и доп. / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, А.И. Жуков, С.К. Колобанов. – М.: Стройиздат. – 1975. – 632с.
37. Шкоропад Д.Е. Центрифуги и сепараторы для химических производств / Д.Е. Шкоропад, О.П. Новиков. – М.: Химия. – 1987. – 256 с.
38. Лукьяненко В.М. Промышленные центрифуги / В.М. Лукьяненко, А.В. Таранец. – М.: Химия. – 1974. – 376 с.
39. Фоменко Т.Г. Шламы, их улавливание и обезвоживание / Т.Г. Фоменко, И.С. Благов, и др. – М.: Недра. – 1968. – 203 с.
40. Соколов В.И. Современные промышленные центрифуги / В.И. Соколов. – М.: Машиностроение. – 1967. – 524 с.

41. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования: справочник / А.С. Тимонин // Изд.2-е, перераб. и доп. – МГУИ: Калуга. – 2002. – 1017с.
42. Чуянов Г.Г. Обезвоживание, пылеулавливание и охрана окружающей среды: учебник для вузов / Г.Г. Чуянов. – М.: Недра. – 1987. – 260 с.
43. Жужиков В.А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий/ В.А. Жужиков. – М.: Химия. – 1980. – 398с.
44. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: ГХИ. – 1961. – 832 с.
45. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии, 2 изд. / С.С. Воюцкий. – М.: Химия – 1975. – 481 с.
46. Элиас Г.-Г. Мегамолекулы [Текст] : научное издание / Г.-Г. Элиас ; пер. с англ. – Л.: Химия , 1990. – 272 с.,ил.
47. Reichmann B. Modellierung der Filtrations- und Konsolidierungsdynamik beim Auspressen feindisperser Partikelsysteme: Diss. Dr.-Ing.: 24.06.1999 / Bernd Reichmann. – Magdeburg, Univ. – 1999. –211 S.
48. Геррман Х. Шнековые машины в технологии / Х. Геррман. – Л., «Химия». – Пер. с нем. под ред. Л.М. Фридмана, 1975. – 232 с.
49. Пат. 2431611 RU, МПК C02F011/12, B30B009/12, B01D029/11. Устройство для осушения и уплотнения твердой фазы сточных вод, подлежащих удалению (варианты) / Марчезини В.; патентообладатель – ВАМ С.п.А. (ИТ) – №2009130157/05; заяв. 08.02.2007; опубл. 20.10.2011 бюл. №29.
50. Пат. 2149760 RU, МПК B30B9/12, B30B9/28. Шнековый пресс / Антонов Н.М.; Смирнов В.Л.; Матюшев В.В.; Сорокин В.И.; Кравченко В.Г.; патентообладатель – Красноярский государственный аграрный университет – №99106762/02; заяв. 29.03.1999; опубл. 27.05.2000.
51. Пат. 2397870 RU, МПК B30B9/12, B01D11/04, C11B1/06. Способ и устройство для отжима прессованием / Хоманн Т., Шульц Й., Змушински Р.; патентообладатель – Харбург-Фройденбергер машиненбау GmBH (DE) – № 2006114169/02; заяв. 25.04.2006; опубл. 20.11.2007.

52. Пат. 2232152 RU, МПК C05F007/00, C02F011/12. Комплекс для снижения влагосодержания сапропеля / Тарасов Ю.Д., Прялухин А.Ф., Рыжих А.Б. – Тарасов Юрий Дмитриевич – № 2002118448/12; заяв. 08.07.2002; опубл. 10.07.2004.

53. Пат. 2232152 RU, МПК C05F007/00, C02F011/12. Комплекс для снижения влагосодержания сапропеля / Тарасов Ю.Д., Прялухин А.Ф., Рыжих А.Б. – Тарасов Юрий Дмитриевич – №2002118448/12; заяв. 08.07.2002; опубл. 10.07.2004.

54. Пат. 2276111 RU, МПК C02F11/00, C05F7/00. Машина для обезвоживания сапропеля / Тарасов Ю.Д., Рыжих А.Б., Прялухин А.Ф.; заявитель и патентообладатель Тарасов Ю.Д. – № 2004120437/12; заяв. 02.07.2004; опубл. 10.05.2006.

55. Пат. 2336255 RU, МПК C05F7/00, C02F11/12. Машина для снижения влагосодержания сапропеля / Тарасов Ю.Д.; заявитель Тарасов Ю.Д.; патентообладатель – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова – № 2007109582/12; заяв. 15.03.2007; опубл. 20.10.2008, Бюл. №29.

56. Пат. 2336256 RU, МПК C05F7/00, C02F11/12. Машина для обезвоживания сапропеля / Тарасов Ю.Д.; заявитель Тарасов Ю.Д.; патентообладатель – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова – №2007110467/12; заяв. 21.03.2007; опубл. 20.10.2008, Бюл. №29.

57. Пат. 2365567 RU, МПК C05F7/00. Машина для снижения влагосодержания сапропеля / Тарасов Ю.Д., Кондратенко О.В.; патентообладатель – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова – №2008110211/12; заяв. 17.03.2008; опубл. 27.08.2009.

58. Пат. 2388734 RU, МПК C05F7/00. Машина для снижения влагосодержания сапропеля / Тарасов Ю.Д.; патентообладатель – Государственное образователь-

ное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова – №2008149968/12; заяв. 17.12.2008; опубл. 10.05.2010.

59. Кондратенко О.В. Обоснование рациональных параметров машины для снижения влагосодержания сапропеля энергосберегающим способом: автореферат дисс. к.т.н.: спец. 05.05.06 «Горные машины» / О.В. Кондратенко. – Санкт-Петербург, 2009. – 20 с.

60. Кондратенко О.В. Технология и оборудование для снижения влагосодержания сапропеля / О.В. Кондратенко, Ю.В. Тарасов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – №10. – с.214 – 219.

61. Anlauf H. Fest/Flüssig-Trennung durch Kuchenfiltration /H. Anlauf // Global Guide of the Filtration and Separation Industry 2008-2010. – S. 150 – 156. – 256 S.

62. Пат. 06747106.0 EU, B01D 33/073. Filtering apparatus and filtering method / Takao Dai, Neo Kotaro, Ono Motomi; заявитель и патентообладатель Held, Stephan Meissner, Bolte and Partner GbR Chemie. – EP 1 918 008 B1; дата заявки 02.06.2006; опубл. 07.05.2008.

63. Пат. 08013250.9 EU, B01D 33/11. Filtering apparatus / Neo Kotaro, Sato Masuhiro, Ono Motomi; заявитель и патентообладатель Held, Stephan Meissner, Bolte and Partner GbR Chemie. – EP 2 025 384 B1; дата заявки 02.06.2006; 23.07.2008; опубл. 18.02.2009.

64. Пат. 10/185,581 USA, B01D 35/14. Screw pressing type filtering apparatus/ Takaschi Marusawa, Yoshiyuki Moro, Tetsuhiro Nishikawa; заявитель и патентообладатель Koda and Androlia Suite 3850. – US 20040000509 A1; опубл. 01.01.2004.

65. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации: Учебное пособие / Н.Е. Леонтьев. – М.: Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. – 88 с.

66. Белоглазов, И.Н. Основы расчета фильтрационных процессов / И.Н. Белоглазов, В.О. Голубев. – М.: Издательский дом «Руда и Металлы», Санкт-петербург, 2002. – 210 с., ил.
67. Tomas J. Preßfiltration/ J. Tomas // Praktikum. – Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik, Institut für Verfahrenstechnik, Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik. –2001. – 17 S.
68. Shirato M. Progress in Filtration and Separation Vol. 4 / M. Shirato, T. Murase and A. Iwata, in R.J. Wakeman (Ed.). –Amsterdam: Elsevier. – 1986.
69. Chi Tien. Introduction to Cake Filtration: Analyses, Experiments and Applications / Tien Chi. – Elsevier. – 2006. – 292 S.
70. Березняк А.А. Исследование кинетики фильтрования через осадок дистена крупностью 40-50 мкм / А.А. Березняк, Е.О. Козырь, Е.А. Нестеренко // Обогащение полезных ископаемых (укр.): Наук.-техн. зб. – 2007. – Вып. 27(68)-28(69). – С. 126 – 132.
71. Reichmann, B. and Tomas J. (2001), “Expression behaviour of fine particle suspensions and the consolidated cake strength”, Powder technology 4309, Mechanical Process Engineering, Department of Process Engineering and Systems Engineering, Otto-Xon-Guericke-University Magdeburg, Universitaetsplatz 2, D-39106 Magdeburg, Germany, 8 p.
72. Гарковенко Е.Е. Анализ условий работы ленточного вакуум-фильтра и разработка эффективных режимов обезвоживания продуктов обогащения // Геотехническая механика. Сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. - Днепропетровск. - 1999. - Вып.15. - С. 16-19.
73. Alles C.M. Filtration mit kompressiblen Kuchen: effiziente Konzepte für eine anspruchsvolle Trennaufgabe / C.M. Alles, H. Anlauf // Chemie Ingenieur Technik (75)9. – 2003.
74. Richards T. Filtering of Clay Colloids in Bentonite Detritus Material / T. Richards, I. Neretniekes // Chemical Ing. Techn. (33). – Weinheim. – 2010. – №8. – pp. 1303 – 1310.

75. Holdig R.G. Solid-liquid Separation equipment selection and modelling / R. G. Holdig // Minerals Engineereng. – 2003. – №16. – pp. 75 – 83.
76. Шевченко А.Е. Особенности обезвоживания глубоководных органо-минеральных осадков Черного моря методом фильтрования / А.Е. Шевченко // Геотехническая механика. – Выпуск 120. – 2015. – с 113-124.
77. Saveyn H. In situ determination of solidosity profiles during activated sludge electrodeewatering / H. Saveyn, D. Curvers, L. Pel and other // Water Research (40). – 2006. – pp. 2135 – 2142.
78. Плановский А.Н. Процессы и аппараты химической технологии: 4-е изд. перераб. и доп. / А.Н. Плановский, В.М. Рамм, С.З. Каган. – М.: «Химия», 1967. – 848 с.
79. Стоев С.М. Виброакустична техника при переработка на минеральнике суровини / С.М. Стоев. – София: Техника. – 1979.
80. Варсановфьев В.Д. Вибрационная техника в химической промышленности / В. Д. Фарсановфьев, Э.Э. Кольман-Иванов. – М.: Химия. – 1985. – 240 с., с ил.
81. Еремин Ю.Г. О перспективах использования воздействий вибрационных и акустических колебаний на процесс флотации / Ю.Г. Еремин, Г.А. Денисов, М.Д. Штерн // Обогащение руд. – 1981. – №3.
82. Пилов П.И., Березняк А.А. Колебательный характер движения жидкости через капилляры при фильтровании // Научный симпозиум «Неделя горняка-2010». – М.: МГТУ, 2010. – С. 244-246.
83. Hans Saveyn. In situ determination of solidosity profiles during activated sludge electrodeewatering / Hans Saveyna, Daan Curvers, and other // Water research 40 (2006). – Elsevier. – p.-p. 2135– 2142.
84. Франчук В.П. Использование вибрационного воздействия для повышения эффективности фильтрования глубоководных органо-минеральных осадков Черного моря / В.П. Франчук, А.В. Анциферов, А.Е. Шевченко // Вибрации в технике та технологиях. – №3 (75). – 2014 г. – с. 136-144.
85. Пат. 966334, МПК F15 B21/12. Пневматический пульсатор / В.И. Креймер, М.В. Курленя, В.Н. Опарин; патентообладатель – Институт горного дела Си-

- бирского отделения АН СССР – №3276963/25-06; заяв. 15.04.1981; опубл. 15.10.1982.
86. Пат. 909381, МПК F15 В21/12. Инерционный пульсатор / Н.П. Ряшенцев, А.И. Прокопенко, В.Н. Ряшенцев; патентообладатель – Институт горного дела АН СССР – №2838370/25-06; заяв. 13.11.1979; опубл. 28.02.1982; бюл. №8.
87. Пат. 992855, МПК F15 В21/12. Инерционный пульсатор / Н.П. Ряшенцев, А.И. Прокопенко, О.Г. Шпенкин; патентообладатель – Институт горного дела Сибирского отделения АН СССР – №3332106/25-06; заяв. 03.09.1981; опубл. 30.01.1983; бюл. №4.
88. Пат. 895549, МПК В06 В1/20. Гидравлический возбудитель колебаний / В.И. Жулин, С.П. Рыжаков; №2917809/18-28; заяв. 30.04.1980; опубл. 07.01.1982; бюл. №1.
89. Романков П.Г. Процессы и аппараты химической промышленности: учебник для техникумов / П.Г. Романков, М.И. Курочина, Ю.Я. Мозжерии и др. – Л.: Химия, 1989. – 560 с.
90. Ґрунти. 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).
91. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. 2-е изд. – М.: Мир, 1985. – 520 с., ил.
92. Аникин О.П. Методические рекомендации по применению сейсмоакустических методов для изучения физико-механических свойств связных грунтов / О.П. Аникин // Москва 1976. – эл. ресурс: <http://www.gosthelp.ru/text/Metodicheskie rekomendacii276.html>.
93. Санников Р.Х. Теория подобия и моделирования. Планирование инженерного эксперимента / Р.Х. Санников. – Уфа: УГНТУ, 2010. – 271 с.
94. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: "Наука", 1977. – 440 с.

95. Шевченко А.Е. Моделирование процесса фильтрования тонкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении / С.В. Тынына, А.Е. Шевченко, И.И. Чоботко // Физико-технические проблемы горного производства. – Выпуск 18. – 2016. – с. 50-59 .
96. Тынына С.В. Обоснование параметров способа нормализации температуры воздуха призабойной зоны подготовительных выработок глубоких шахт с применением вихревых кондиционеров: дис. к.т.н. спец. 05.26.01 «Охрана труда» / С.В. Тынына. – Днепропетровск, 2015. – 224 с.
97. Любченко Е.А. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие. Часть 1 / Е.А. Любченко, О.А. Чуднова // Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2010. –156 с.
98. Корольков В.И. Планирование эксперимента: учеб. пособие/ В.И. Корольков, Попов И.С. // Воронеж: ФГБОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. 80 с.
99. Красовский Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов // Мн.: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с., ил.
100. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов // М.: Машиностроение, 1981. – 184 с., ил.
101. Кузнецов Н.Н. К вопросу об определении количества опытов, надежности и точности результатов при изучении физико-механических свойств горных пород / Н.Н. Кузнецов // Вестник МГТУ, том 18. – № 2, 2015 г.– стр. 183-191.
102. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика [для инженеров и научных работников] / А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
103. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. – 1983. – 416 с.
104. Калинина В.Н. Математическая статистика / В.Н. Калинина, В.Ф. Панкин. – М.: Дрофа, 2002. – 366 с.

105. Хамханов К.М. Основы планирования эксперимента. Методическое пособие / К.М. Хамханов // Восточно-Сибирский государственный технологический университет. – Улан-Уде, 2001. – 94 с.
106. Елисеева И.И. Эконометрика: Учебник под ред. И.И. Елисеевой. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 344 с.: ил.
107. Шамолин М.В. Высшая математика (Серия «Учебник для вузов») / М.В. Шамолин. – М.: Издательство «Экзамен», 2008. – 909, с.
108. Франчук В.П. Обезвоживание органо-минеральных осадков Черного моря при комбинированном статическом и динамическом нагружении / В.П. Франчук, А.Е. Шевченко // Вибрации в технике та технологиях. – №4 (80). – 2015 г. – с. 191-199.
109. Вильнер Я.М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. Под ред. Б.Б. Некрасова / Я.М. Вильнер, Я.Т. Ковалев, Б.Б. Некрасов. – Минск, «Вышэйш. школа», 1997. – 416 с. с ил.
110. Герсеванов Н.М. Основы динамики грунтовой массы / Н.М. Герсеванов. – ОНТЯ, 1987. – 242 с.
111. Jochem Grassmuck. DIN-Normen in der Verfahrenstechnik: Ein Leitfaden der technischen Regeln und Vorschriften / Jochem Grassmuck, Karl-Werner Houben, Rudolf M. Zollinger // Springer-Verlag, 2013. – 320 pp.
112. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3. т. Т. 3. – 8-е изд. перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 864 с., ил.
113. Пат. 104312 UA, МПК B01D 33/11, B01D 33/50, B01D 33/06, B01D 36/00. Фильтр / Франчук В.П., Шевченко А.Е.; патентообладатель Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет». – № U201506486; заяв. 01.07.2015; опубл. 25.01.2016 в бюл. № 2.
114. Shevchenko O. Wege zur Weiterentwicklung der Filteranlagen für fest-flüssig-Trennung von Feindispersen Suspensionen / O. Shevchenko, S. Tynyna // 11 Freiberg – St. Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler (BHT 2016). –

Scientific Reports on Resource Issues 2016 Volume 1. – TU Bergakademie Freiberg. – p-p. 264-268.

115. Franchuk V.P. Deep-water organic-mineral sediments of the Black Sea as the object of mining and dewatering / V.P. Franchuk, T.V. Shepel, O.E. Shevchenko // National mining University journal. – 2014. – №44. – pp. 86-91.

116. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов: т. 1 / С.П. Тимошенко. – Москва: Изд-во «Наука», 1965. – 364 с.

117. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. Пер. с англ. Л.Г. Корнейчука; под ред. Э.И. Григолюка / С.П. Тимошенко, Д.Х. Янг, У. Уивер. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.

118. Смолина И.Ю. Сопротивление материалов. Расчет балки на поперечный удар и вынужденные колебания: методические указания / сост. И.Ю. Смолина, Н.А. Фурсова. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010. – 20 с.

119. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры / А.М. Григорьев. – М.: «Машиностроение». – 1972. – 184 с.

120. Рябинин Д.Д. Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей / Д.Д. Рябин, Ю.Е. Лукач. – М.: Машиностроение. – 1965. – 364с.

121. Литвинец Ю.И. Основы материальных расчетов и выбора оборудования для переработки пластических масс экструзией / Литвинец Ю.И. – Уральская государственная лесотехническая академия. – Екатеринбург. – 2001. – 46 с. – (Методическое пособие).

122. Старшов Г.И. Основы проектирования и расчет технологического оборудования пищевых предприятий: [учебное пособие] / Г.И. Старшов, С.Н. Никоноров, А.И. Никитин. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. – 187 с.

123. Царенко О.М. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Підручник / О.М. Царенко, Д.Г. Войтюк, В.М. Швайко та ін.; за ред. С.С. Яцуна. – К.: Мета, 2003. – 448 с.: іл.

124. Ковалев Н.Г. Сельскохозяйственные материалы (виды, состав, свойства) / Н.Г. Ковалев, Г.А. Хайлис, М.М. Ковалев. – М.: ИК «Родник», журнал «Аграр-

ная наука». – 1998. – 208 с., ил. – (Учебники и учеб, пособия для высш. учеб, заведений).

125. Скотников В.А. Практикум по сельскохозяйственным машинам / В.А. Скотников и др. – Минск: Урожай, 1984. – 375 с.

126. Хайлис Г.А. Механико – технологические свойства сельскохозяйственных материалов / Г.А. Хайлис и др. – Луцк. ЛГТУ, 1998. – 268 с.

127. Яблонский А.А. Курс теории колебаний: Учебное пособие. 4-е изд., стер. / А.А. Яблонский, С.С. Норейко. – СПб.: Изд-во «Лань», 2003. – 256 с., ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература).

128. Титъенс О. Гидро- и аэродинамика: по лекциям проф. Л. Прандтль. Т.1. Равновесие. Движение жидкости без трения. Изд. 2-е. Под ред. проф. Л.С. Лейбензона. – Государственное технико-теоретическое изд-во. – Москва. – 1933. – 223 с.

Приложение А

Расчет параметров лабораторной фильтровальной установки

Расчет параметров лабораторной фильтровальной установки

Расчетная схема лабораторной фильтровальной установки приведена на рисунке А.1 (а).

Согласно схеме (рис. А.1, а), реакции в опорах R_A и R_B при статическом нагружении балки определяются согласно условию статического равновесия:

$$\sum M_A = 0 \text{ и } \sum M_B = 0,$$

где M_A и M_B – сумма моментов относительно опоры A и B соответственно.

Тогда

$$\begin{aligned} -R_B l_x + G_b l_b + G_v l_v + G_g l_g &= 0; \\ R_A l_x + G_b (l_b - l_x) + G_v (l_v - l_x) + G_g (l_g - l_x) &= 0. \end{aligned}$$

Соответственно реакции в опорах равны:

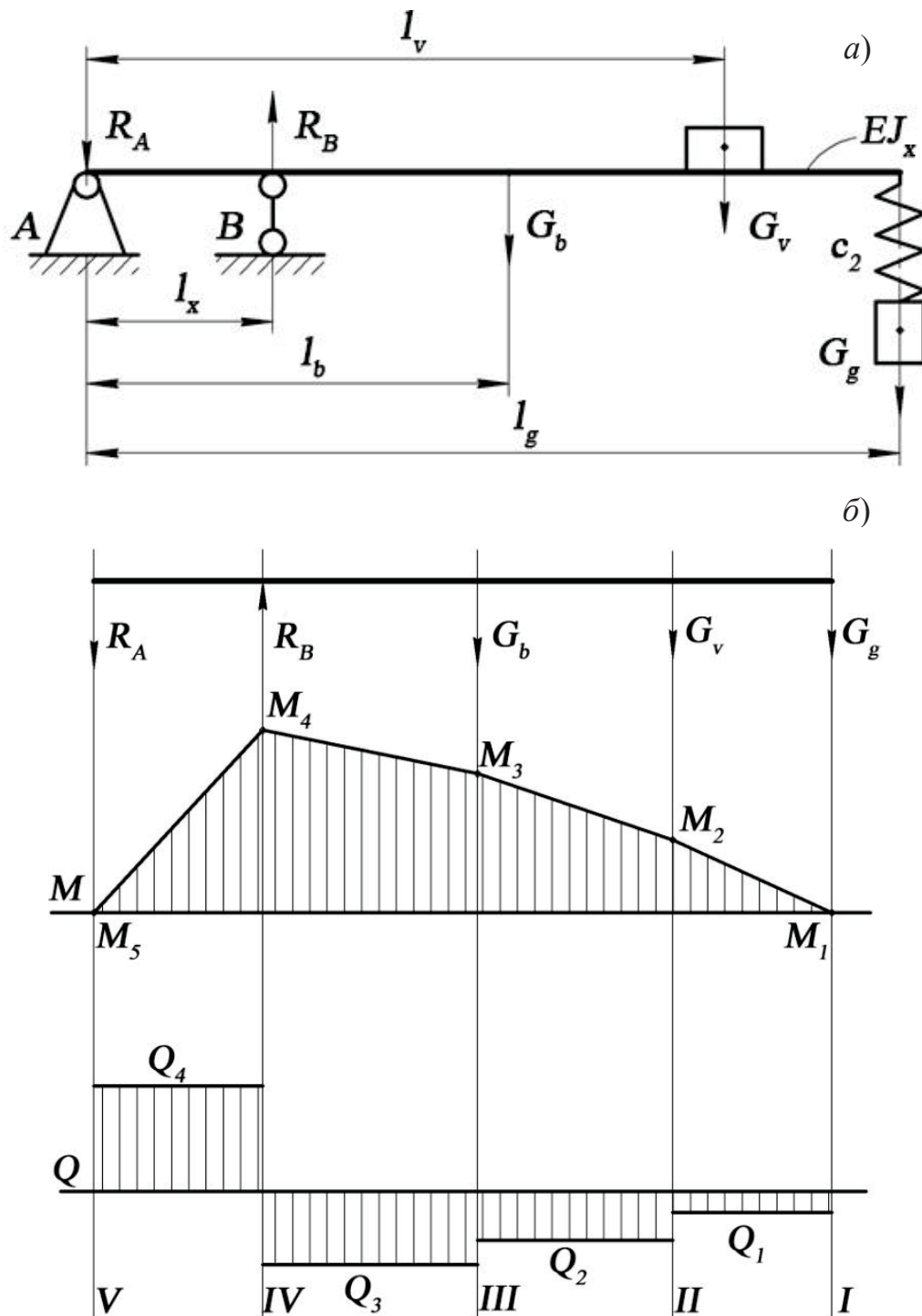
$$\begin{aligned} R_A &= -\frac{G_b (l_b - l_x) + G_v (l_v - l_x) + G_g (l_g - l_x)}{l_x}; \\ R_B &= \frac{G_b l_b + G_v l_v + G_g l_g}{l_x}. \end{aligned}$$

Усилие, передаваемое на поршень, равно сумме усилий от статической нагрузки (G_g) и динамической F_d : $F = F_{st} + F_d \sin \omega t$.

Разобьем балку на 4 участка. Моменты, действующие в сечениях балки, соответственно равны (рис. А.2, б):

$$I-I: M_1 = 0;$$

$$II-II: M_2 = G_g (l_g - l_v);$$



l_x – расстояние от опоры до оси поршня; l_b – расстояние от опоры до центра масс балки; l_v – расстояние от опоры до оси вибратора; l_g – длина балки; G_b – вес балки; G_v – вес вибратора; G_g – вес грузов; m_g – масса грузов; R_B – реакция в опоре B от статического усилия; R_A – реакция в опоре A ; E – модуль упругости; J_x – момент инерции; c_2 – жесткость пружины

Рисунок А.1 – Расчетная схема лабораторной фильтровальной установки (а) и эпюры моментов M_i и усилий Q_i в балке лабораторной установки (б)

$$III-III: M_3 = G_g(l_g - l_b) + G_v(l_v - l_b);$$

$$IV-IV: M_4 = G_g(l_g - l_x) + G_v(l_v - l_x) + G_b(l_b - l_x);$$

$$V-V: M_5 = 0.$$

Максимальное перемещение конца балки (сечение I рис. А.1, б) Δ_1 , определяется по методу Верещагина:

$$\Delta_1 = \frac{M_4 l_g (l_g - l_x)}{3EJ_x}, \text{ или}$$

$$\Delta_1 = \frac{l_g (l_g - l_x) \cdot [G_g(l_g - l_x) + G_v(l_v - l_x) + G_b(l_b - l_x)]}{3EJ_x},$$

где $E = 2 \cdot 10^5$ МПа (модуль упругости стали).

Определим собственную частоту колебаний балки. Так как груз, создающий усилие G_g , подвешен на мягкой пружине, жесткость которой мала в сравнении с жесткостью самой балки, он не будет влиять на колебания балки (можно принять $G_g = 0$). Исходя из этого, круговая частота собственных колебаний балки ω_0 будет равна, рад/с:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{\Delta_1}} = \sqrt{\frac{g \cdot 3EJ_x}{l_g(l_g - l_x) \cdot [G_g(l_g - l_x) + G_v(l_v - l_x) + G_b(l_b - l_x)]}}. \quad (2.32)$$

Динамическая составляющая усилия вибратора F_i равна, Н:

$$F_i = K_i \omega^2,$$

где $K_i = m_0 r_i$ – кинетостатический момент вибратора, Н·м.

Коэффициент нарастания колебаний β_n равен:

$$\beta_n = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}.$$

Закон изменения напряжения σ' в i -том сечении балки во времени от нагрузки Q_i имеет вид:

$$\sigma'_i(t) = \sigma_i \left(1 + \beta_n \frac{F_i \sin \omega t}{Q_i} \right).$$

Закон изменения прогиба Δ' во времени в i -том сечении балки:

$$\Delta'_i(t) = \Delta_i \left(1 + \beta_n \frac{F_i \sin \omega t}{Q_i} \right).$$

Частота изменения напряжения в опоре B равна частоте вибрации, а амплитуда зависит от возмущающего усилия вибратора. Предполагая, что все возмущающее усилие, создаваемое вибровозбудителем, передается на опору B , а также задавая параметры: частоту ω , среднее значение статической составляющей усилия $F_{st} = R_B$ и динамической составляющей усилия $F_d = R_D$, найдем место расположения вибратора на балке l_v и массу грузов $m_g = G_g/g$.

Представим соотношение динамической составляющей усилия F_d к статической F_{st} как $a_p = F_d/F_{st}$. Задавая значения параметра $a_p < 1$ можно определить усилие F_d .

Согласно расчетной схеме (рис. А.1) амплитудное значение динамической составляющей усилия в опоре B равно $F_d = F_i l_v / l_x$. Следовательно, расстояние l_v (рис. А.1) равно, м:

$$l_v = \frac{a_p F_{st} l_x}{F_i}.$$

Масса грузов, требуемых для реализации усилия F_{st} , равна, кг:

$$m_g = \frac{F_{st} l_x - G_b l_b - G_v l_v}{g \cdot l_g}.$$

Приложение Б

Построения математической модели процесса фильтрации ГВОМО при
пульсирующем давлении

Построение математической модели процесса фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении

Статистика откликов параметра V приведена в таблице Б.1.

Максимальное расчетное значение критерия Стьюдента для значений откликов составило $t_{\text{расч}} = 1,134$. Для $n = 3$ повторных опытов и доверительной вероятности $\alpha_v = 0,95$ табличное значение критерия Стьюдента равно $t_\alpha = 4,3$. Поскольку выполняется условие $t_{\text{расч}} < t_\alpha$, брака при измерении откликов не выявлено. Максимальное значение среднеквадратического отклонения по 3-м опытам составило $s_{\text{max}}^2 = 2,891 \cdot 10^{-5}$.

Дисперсия воспроизводимости опытов:

$$s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i^2 = 1,018 \cdot 10^{-5}.$$

Проверка однородности дисперсии по критерию Кохрена. Расчетное значение критерия Кохрена равно:

$$G_{\text{расч}} = \frac{s_{\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^N s_i^2} = 0,137.$$

Табличное значение $G_{\text{табл}}$ определяется в зависимости от числа степеней свободы: $f_1 = n - 1 = 3 - 1 = 2$ и $f_2 = N = 27$ и равно $G_{\text{табл}} = 0,216$. Следовательно, условие $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$ выполняется – дисперсии однородны.

Расчетные значения коэффициентов регрессии и их доверительные интервалы приведены в таблице Б.2.

После сравнения значений коэффициентов регрессии с границами доверительных интервалов видно, что следующие коэффициенты незначимы: b_3 ;

$b_{12}; b_{13}; b_{23}; b_{34}; b_{11}; b_{22}; b_{33}$. Приравняв данные коэффициенты 0, уравнение регрессии примет вид:

$$Y = 0,177 + 0,031X_1 + 0,011X_2 + 0,101X_4 + 0,021X_1X_4 + 0,011X_2X_4 - 0,026X_4^2.$$

Таблица Б.1 – Статистика откликов $Y = q_L$

№ опыта	Дисперсии откликов s_i^2	Коэф. Стьюдента $t_{\text{расч}}$
1	$1,051 \cdot 10^{-5}$	1,079
2	$1,548 \cdot 10^{-6}$	1,085
3	$4,39 \cdot 10^{-6}$	1,097
4	$1,60 \cdot 10^{-5}$	1,064
5	$4,777 \cdot 10^{-6}$	1,120
6	$7,331 \cdot 10^{-6}$	1,077
7	$1,761 \cdot 10^{-5}$	0,647
8	$3,308 \cdot 10^{-7}$	0,985
9	$5,806 \cdot 10^{-6}$	0,753
10	$2,891 \cdot 10^{-5}$	1,134
11	$3,773 \cdot 10^{-6}$	1,098
12	$1,687 \cdot 10^{-5}$	0,803
13	$1,807 \cdot 10^{-6}$	1,011
14	$1,101 \cdot 10^{-6}$	0,778
15	$1,107 \cdot 10^{-5}$	0,982
16	$3,167 \cdot 10^{-6}$	1,039
17	$4,623 \cdot 10^{-6}$	1,116
18	$5,201 \cdot 10^{-6}$	0,957
19	$2,465 \cdot 10^{-5}$	0,872
20	$3,754 \cdot 10^{-5}$	1,049
21	$2,147 \cdot 10^{-5}$	0,582
22	$1,905 \cdot 10^{-5}$	0,885
23	$2,506 \cdot 10^{-6}$	0,684
24	$1,608 \cdot 10^{-7}$	1,038
25	$3,083 \cdot 10^{-8}$	0,949
26	$1,575 \cdot 10^{-7}$	1,133
27	$8,056 \cdot 10^{-6}$	1,051

Таблица Б.2 – Расчетные значения коэффициентов регрессии и их доверительные интервалы

Коэффициенты регрессии	Факторы	Значения b -коэффициентов	Дисперсии s_b^2	Доверительный интервал Δb_i
b_0	X_0	0,177	$6,35 \cdot 10^{-6}$	$\pm 0,011$
b_1	X_1	0,031	$9,18 \cdot 10^{-7}$	$\pm 4,12 \cdot 10^{-3}$
b_2	X_2	0,011	$3,46 \cdot 10^{-7}$	$\pm 2,53 \cdot 10^{-3}$
b_3	X_3	$-1,78 \cdot 10^{-3}$	$2,31 \cdot 10^{-6}$	$\pm 6,54 \cdot 10^{-3}$
b_4	X_4	0,101	$3,41 \cdot 10^{-6}$	$\pm 7,94 \cdot 10^{-3}$
b_{12}	$X_1 * X_2$	$2,22 \cdot 10^{-3}$	$5,16 \cdot 10^{-6}$	$\pm 9,77 \cdot 10^{-3}$
b_{13}	$X_1 * X_3$	$-7,555 \cdot 10^{-3}$	$3,83 \cdot 10^{-6}$	$\pm 8,41 \cdot 10^{-3}$
b_{14}	$X_1 * X_4$	0,021	$6,58 \cdot 10^{-6}$	$\pm 0,011$
b_{23}	$X_2 * X_3$	$-2,175 \cdot 10^{-3}$	$2,13 \cdot 10^{-6}$	$\pm 6,27 \cdot 10^{-3}$
b_{24}	$X_2 * X_4$	0,011	$6,18 \cdot 10^{-7}$	$\pm 3,38 \cdot 10^{-3}$
b_{34}	$X_3 * X_4$	$1,98 \cdot 10^{-3}$	$4,96 \cdot 10^{-6}$	$\pm 9,57 \cdot 10^{-3}$
b_{11}	X_1^2	$-2,011 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,015$
b_{22}	X_2^2	$-2,367 \cdot 10^{-3}$	$6,92 \cdot 10^{-6}$	$\pm 0,011$
b_{33}	X_3^2	$1,039 \cdot 10^{-3}$	$5,26 \cdot 10^{-6}$	$\pm 9,86 \cdot 10^{-3}$
b_{44}	X_4^2	-0,026	$1,27 \cdot 10^{-6}$	$\pm 4,84 \cdot 10^{-3}$

Адекватность полученной модели проверим по критерию Фишера.

$$F_{\text{расч}} = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_y^2} = 3,361.$$

$F_T = 19,0$ для числа степеней свободы $f_1 = f_2 = n - 1 = 3 - 1 = 2$.

$F_{\text{расч}} < F_T$ – условие выполняется, следовательно модель адекватна.

Приложение В

Результаты экспериментальных исследований процесса фильтрования ГВОМО
при статическом давлении

Результаты экспериментальных исследований процесса фильтрования ГВОМО
при статическом давлении

Результаты измерений объема фильтрата V приведены в таблице В.1.

Таблица В.1 (часть 1) – Результаты измерений объема фильтрата во времени для процесса фильтрования ГВОМО при статическом давлении

t, c	$p_{st} = 0,5 \text{ МПа}$			$p_{st} = 0,1 \text{ МПа}$			$p_{st} = 1,5 \text{ МПа}$			$p_{st} = 2,0 \text{ МПа}$		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
60	0,76	0,65	0,78	0,71	0,77	0,83	0,58	0,68	0,73	1,04	0,94	0,78
90	0,87	0,78	0,93	0,87	0,96	0,96	0,82	0,88	0,82	1,21	1,17	1,03
120	1,01	1,07	1,04	1,06	1,09	1,10	1,01	1,05	1,01	1,39	1,33	1,21
150	1,14	1,14	1,18	1,15	1,20	1,20	1,18	1,24	1,19	1,59	1,54	1,40
180	1,23	1,27	1,27	1,26	1,31	1,32	1,30	1,37	1,37	1,70	1,66	1,61
210	1,33	1,36	1,32	1,39	1,37	1,44	1,48	1,48	1,50	1,81	1,85	1,81
240	1,39	1,40	1,38	1,54	1,49	1,57	1,61	1,61	1,63	2,00	1,98	1,93
270	1,49	1,45	1,50	1,61	1,61	1,69	1,73	1,80	1,76	2,15	2,12	2,05
300	1,55	1,56	1,55	1,73	1,67	1,75	1,87	1,86	1,89	2,27	2,25	2,17
330	1,63	1,61	1,61	1,81	1,79	1,88	1,99	1,98	2,01	2,33	2,37	2,30
360	1,74	1,67	1,67	1,95	1,85	1,94	2,12	2,11	2,14	2,45	2,52	2,43
390	1,74	1,74	1,73	2,00	1,97	2,06	2,19	2,18	2,28	2,59	2,65	2,55
420	1,78	1,81	1,79	2,12	2,03	2,11	2,32	2,31	2,35	2,70	2,76	2,68
450	1,84	1,87	1,84	2,19	2,14	2,18	2,39	2,38	2,49	2,77	2,83	2,74
480	1,90	1,93	1,90	2,25	2,20	2,30	2,52	2,50	2,54	2,90	2,96	2,85
510	1,96	1,98	1,97	2,32	2,26	2,37	2,59	2,56	2,68	3,03	3,02	3,00
540	2,02	2,05	2,03	2,47	2,31	2,44	2,72	2,67	2,74	3,10	3,14	3,06
570	2,07	2,11	2,09	2,53	2,37	2,50	2,78	2,74	2,80	3,16	3,25	3,19
600	2,13	2,16	2,14	2,59	2,49	2,57	2,92	2,81	2,84	3,27	3,33	3,25
630	2,20	2,23	2,21	2,66	2,56	2,70	2,99	2,86	2,86	3,34	3,36	3,37
660	2,27	2,29	2,28	2,72	2,62	2,77	3,05	3,00	2,95	3,47	3,42	3,43
690	2,34	2,29	2,34	2,77	2,69	2,83	3,18	3,05	2,99	3,53	3,48	3,49
720	2,34	2,34	2,34	2,83	2,75	2,89	3,23	3,12	3,05	3,59	3,60	3,62
750	2,40	2,40	2,40	2,89	2,81	2,95	3,32	3,18	3,18	3,72	3,68	3,67
780	2,46	2,46	2,45	2,96	2,87	3,00	3,39	3,25	3,26	3,78	3,74	3,74
810	2,53	2,52	2,52	3,03	2,94	3,07	3,52	3,39	3,32	3,84	3,86	3,79
840	2,59	2,52	2,52	3,11	2,99	3,13	3,58	3,44	3,39	3,89	3,94	3,91
870	2,59	2,58	2,58	3,17	3,04	3,19	3,64	3,50	3,52	4,02	3,99	3,98
900	2,65	2,64	2,63	3,22	3,11	3,25	3,70	3,57	3,58	4,08	4,06	4,04
930	2,70	2,64	2,70	3,29	3,17	3,30	3,75	3,63	3,66	4,14	4,18	4,10
960	2,70	2,70	2,70	3,34	3,23	3,37	3,81	3,69	3,71	4,20	4,24	4,16
990	2,77	2,76	2,76	3,40	3,29	3,45	3,86	3,75	3,77	4,26	4,30	4,29

Продолжение таблицы В.1 (часть 1)

t, c	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1020	2,82	2,76	2,82	3,45	3,36	3,45	3,92	3,80	3,83	4,33	4,36	4,35
1050	2,89	2,81	2,82	3,51	3,42	3,50	3,97	3,87	3,90	4,39	4,37	4,42
1080	2,89	2,88	2,87	3,57	3,50	3,55	4,02	3,93	3,97	4,46	4,38	4,49
1110	2,95	2,88	2,95	3,57	3,50	3,61	4,08	4,00	4,05	4,52	4,44	4,55
1140	3,01	2,95	2,95	3,63	3,57	3,67	4,14	4,06	4,11	4,58	4,59	4,61
1170	3,01	3,01	3,01	3,69	3,62	3,73	4,19	4,12	4,17	4,64	4,65	4,66
1200	3,06	3,01	3,06	3,75	3,68	3,79	4,25	4,18	4,23	4,70	4,72	4,72
1230	3,12	3,07	3,06	3,81	3,74	3,79	4,31	4,25	4,29	4,76	4,78	4,80
1260	3,12	3,13	3,12	3,81	3,74	3,84	4,36	4,30	4,35	4,82	4,83	4,87
1290	3,18	3,18	3,18	3,86	3,80	3,90	4,43	4,36	4,41	4,88	4,89	4,93
1320	3,18	3,18	3,18	3,92	3,86	3,96	4,43	4,42	4,47	4,95	4,96	5,00
1350	3,24	3,25	3,25	3,98	3,91	4,02	4,49	4,42	4,54	5,00	5,02	5,05
1380	3,29	3,25	3,25	4,04	3,98	4,02	4,54	4,49	4,60	5,07	5,08	5,11
1410	3,29	3,31	3,32	4,04	3,98	4,08	4,60	4,55	4,67	5,13	5,15	5,18
1440	3,35	3,31	3,38	4,10	4,03	4,14	4,66	4,61	4,74	5,19	5,21	5,24
1470	3,35	3,37	3,38	4,17	4,09	4,19	4,73	4,67	4,81	5,25	5,29	5,31
1500	3,41	3,43	3,44	4,17	4,09	4,19	4,79	4,73	4,85	5,31	5,35	5,36
1530	3,41	3,43	3,44	4,23	4,15	4,25	4,79	4,73	4,91	5,38	5,42	5,42
1560	3,48	3,49	3,49	4,31	4,21	4,31	4,85	4,80	4,91	5,45	5,48	5,49
1590	3,53	3,49	3,49	4,37	4,27	4,39	4,92	4,86	4,97	5,52	5,54	5,56
1620	3,53	3,56	3,55	4,37	4,29	4,39	4,99	4,93	5,03	5,59	5,60	5,62
1650	3,59	3,56	3,61	4,42	4,36	4,45	5,06	4,99	5,09	5,59	5,60	5,62
1680	3,59	3,62	3,61	4,48	4,43	4,51	5,12	5,05	5,15	5,65	5,67	5,68
1710	3,65	3,62	3,68	4,48	4,43	4,51	5,12	5,07	5,22	5,71	5,74	5,73
1740	3,65	3,68	3,68	4,55	4,51	4,57	5,17	5,14	5,22	5,76	5,80	5,79
1770	3,71	3,68	3,75	4,60	4,57	4,63	5,25	5,20	5,28	5,83	5,87	5,86
1800	3,71	3,74	3,75	4,61	4,57	4,63	5,31	5,26	5,34	5,89	5,94	5,91

Продолжение таблицы В.1 (часть 2)

t, c	$p_{st} = 2,5 \text{ МПа}$			$p_{st} = 3,0 \text{ МПа}$			$p_{st} = 3,5 \text{ МПа}$			$p_{st} = 4,0 \text{ МПа}$		
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
60	0,93	0,89	0,86	1,03	0,79	0,79	1,18	1,30	1,27	1,09	0,96	1,02
90	1,19	1,14	1,11	1,27	1,11	1,13	1,49	1,59	1,54	1,39	1,29	1,33
120	1,38	1,33	1,30	1,47	1,42	1,38	1,74	1,81	1,82	1,63	1,58	1,62
150	1,56	1,59	1,47	1,66	1,56	1,55	1,95	1,99	1,98	1,85	1,79	1,89
180	1,77	1,72	1,67	1,85	1,74	1,74	2,13	2,18	2,21	2,04	2,01	2,10
210	1,96	1,89	1,86	2,02	1,93	1,92	2,29	2,36	2,36	2,20	2,19	2,30
240	2,08	2,02	2,07	2,17	2,12	2,05	2,45	2,50	2,51	2,35	2,35	2,47
270	2,22	2,20	2,21	2,28	2,24	2,23	2,58	2,66	2,66	2,51	2,52	2,63
300	2,41	2,34	2,34	2,42	2,34	2,36	2,72	2,76	2,77	2,69	2,67	2,77
330	2,54	2,46	2,49	2,54	2,54	2,49	2,86	2,89	2,90	2,83	2,80	2,95
360	2,68	2,58	2,61	2,68	2,66	2,62	2,96	3,04	3,02	2,97	2,94	3,05
390	2,79	2,70	2,75	2,80	2,77	2,75	3,09	3,16	3,16	3,08	3,09	3,20
420	2,87	2,83	2,88	2,91	2,90	2,87	3,19	3,24	3,26	3,22	3,23	3,35
450	3,00	2,94	2,94	3,03	3,01	2,99	3,32	3,35	3,40	3,30	3,35	3,46
480	3,13	3,02	3,06	3,11	3,08	3,11	3,58	3,46	3,49	3,43	3,50	3,56

Продолжение таблицы В.1 (часть 2)

<i>t, с</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>18</i>	<i>19</i>	<i>20</i>	<i>21</i>	<i>22</i>	<i>23</i>	<i>24</i>
510	3,19	3,15	3,18	3,24	3,22	3,24	3,71	3,55	3,60	3,53	3,60	3,71
540	3,32	3,28	3,25	3,36	3,33	3,34	3,79	3,66	3,70	3,65	3,70	3,80
570	3,45	3,34	3,39	3,42	3,47	3,40	3,87	3,76	3,79	3,76	3,80	3,91
600	3,50	3,47	3,46	3,56	3,53	3,53	4,00	3,85	3,89	3,85	3,89	4,02
630	3,62	3,53	3,58	3,62	3,65	3,59	4,08	3,92	3,99	3,97	4,00	4,13
660	3,68	3,66	3,64	3,73	3,77	3,72	4,17	3,98	4,09	4,07	4,10	4,21
690	3,75	3,70	3,68	3,78	3,83	3,77	4,24	4,09	4,18	4,19	4,21	4,30
720	3,79	3,76	3,71	3,92	3,96	3,91	4,33	4,19	4,26	4,24	4,27	4,40
750	3,83	3,82	3,94	3,99	4,02	3,97	4,39	4,24	4,36	4,34	4,38	4,50
780	3,96	3,88	3,99	4,05	4,08	4,11	4,45	4,33	4,45	4,41	4,50	4,58
810	4,03	4,00	4,06	4,19	4,21	4,18	4,54	4,43	4,50	4,50	4,57	4,69
840	4,09	4,06	4,12	4,25	4,26	4,24	4,62	4,49	4,56	4,60	4,68	4,76
870	4,24	4,12	4,24	4,30	4,30	4,36	4,71	4,58	4,65	4,67	4,75	4,86
900	4,30	4,26	4,31	4,43	4,45	4,43	4,77	4,64	4,76	4,75	4,82	4,94
930	4,35	4,32	4,37	4,48	4,51	4,50	4,88	4,74	4,82	4,85	4,92	5,02
960	4,43	4,39	4,43	4,55	4,57	4,57	4,94	4,80	4,92	4,93	5,00	5,12
990	4,49	4,46	4,56	4,67	4,70	4,72	4,99	4,89	4,97	5,01	5,07	5,18
1020	4,62	4,53	4,62	4,74	4,75	4,77	5,06	4,96	5,04	5,08	5,17	5,25
1050	4,68	4,65	4,69	4,85	4,82	4,83	5,12	5,00	5,12	5,19	5,25	5,31
1080	4,74	4,73	4,75	4,92	4,89	4,89	5,20	5,07	5,19	5,26	5,31	5,42
1110	4,82	4,79	4,82	4,98	4,94	5,02	5,25	5,13	5,25	5,33	5,39	5,48
1140	4,88	4,85	4,88	5,05	5,06	5,08	5,34	5,19	5,31	5,39	5,46	5,56
1170	4,94	4,91	4,94	5,10	5,13	5,13	5,37	5,26	5,38	5,46	5,52	5,64
1200	4,99	4,98	5,01	5,17	5,20	5,20	5,43	5,33	5,43	5,53	5,59	5,71
1230	5,05	5,05	5,07	5,24	5,26	5,25	5,53	5,43	5,49	5,60	5,66	5,77
1260	5,11	5,11	5,13	5,35	5,32	5,32	5,58	5,50	5,59	5,66	5,74	5,84
1290	5,19	5,17	5,24	5,42	5,38	5,38	5,64	5,55	5,66	5,73	5,79	5,91
1320	5,25	5,24	5,32	5,48	5,45	5,44	5,69	5,61	5,72	5,80	5,85	5,97
1350	5,31	5,30	5,38	5,54	5,50	5,56	5,74	5,68	5,80	5,87	5,93	6,04
1380	5,37	5,37	5,44	5,60	5,56	5,63	5,80	5,73	5,83	5,93	6,01	6,12
1410	5,43	5,43	5,50	5,67	5,63	5,71	5,82	5,79	5,89	6,00	6,08	6,19
1440	5,50	5,49	5,57	5,72	5,70	5,76	5,88	5,84	5,96	6,07	6,16	6,22
1470	5,57	5,56	5,63	5,77	5,71	5,82	5,94	5,91	6,01	6,10	6,22	6,27
1500	5,63	5,62	5,70	5,84	5,87	5,88	5,98	5,97	6,04	6,16	6,29	6,34
1530	5,69	5,69	5,76	5,90	5,93	5,95	6,05	6,03	6,11	6,23	6,33	6,42
1560	5,77	5,75	5,81	5,96	5,98	6,01	6,10	6,07	6,17	6,30	6,40	6,49
1590	5,83	5,82	5,87	6,02	6,05	6,07	6,16	6,14	6,24	6,37	6,48	6,53
1620	5,90	5,89	5,94	6,07	6,11	6,13	6,21	6,21	6,28	6,40	6,55	6,58
1650	5,96	5,95	6,01	6,13	6,18	6,20	6,26	6,28	6,32	6,47	6,61	6,66
1680	6,02	6,01	6,06	6,15	6,24	6,25	6,30	6,34	6,39	6,54	6,64	6,72
1710	6,09	6,07	6,13	6,21	6,29	6,31	6,37	6,40	6,45	6,58	6,71	6,75
1740	6,16	6,13	6,19	6,26	6,35	6,36	6,44	6,47	6,52	6,65	6,77	6,81
1770	6,22	6,19	6,25	6,32	6,35	6,42	6,51	6,50	6,54	6,73	6,80	6,89
1800	6,28	6,26	6,32	6,39	6,42	6,48	6,54	6,56	6,62	6,76	6,88	6,92

Продолжение таблицы В.1 (часть 3)

t, c	$p_{st} = 4,5 \text{ МПа}$			$p_{st} = 5,0 \text{ МПа}$			$p_{st} = 5,5 \text{ МПа}$			$p_{st} = 6,0 \text{ МПа}$		
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
60	1,21	1,07	1,26	1,02	1,25	0,98	1,37	1,27	1,37	1,37	1,27	1,31
90	1,49	1,42	1,59	1,34	1,54	1,33	1,68	1,62	1,72	1,68	1,62	1,65
120	1,75	1,56	1,84	1,62	1,80	1,57	2,01	1,90	2,00	1,92	1,91	1,96
150	1,97	1,81	2,07	1,85	1,99	1,82	2,27	2,15	2,25	2,20	2,14	2,27
180	2,21	2,02	2,27	2,06	2,21	2,03	2,46	2,37	2,47	2,37	2,35	2,44
210	2,39	2,17	2,47	2,24	2,40	2,22	2,66	2,58	2,68	2,57	2,59	2,67
240	2,55	2,37	2,66	2,46	2,56	2,41	2,84	2,75	2,85	2,77	2,77	2,82
270	2,74	2,57	2,83	2,62	2,71	2,57	3,01	2,95	3,05	2,93	2,95	2,97
300	2,88	2,71	2,97	2,77	2,86	2,72	3,15	3,18	3,18	3,10	3,10	3,13
330	3,04	2,90	3,13	2,92	3,01	2,88	3,33	3,34	3,34	3,27	3,27	3,29
360	3,21	3,04	3,29	3,03	3,13	2,99	3,46	3,49	3,49	3,42	3,41	3,45
390	3,32	3,18	3,41	3,19	3,29	3,15	3,58	3,73	3,65	3,54	3,55	3,59
420	3,48	3,31	3,58	3,32	3,40	3,25	3,73	3,87	3,79	3,67	3,69	3,69
450	3,58	3,42	3,70	3,45	3,50	3,36	3,82	3,97	3,90	3,80	3,85	3,86
480	3,71	3,52	3,81	3,58	3,61	3,52	3,92	4,11	4,06	3,94	3,94	3,98
510	3,86	3,66	3,94	3,69	3,71	3,63	4,05	4,20	4,14	4,08	4,05	4,11
540	3,97	3,79	4,05	3,82	3,82	3,77	4,15	4,31	4,28	4,18	4,17	4,22
570	4,09	3,91	4,16	3,93	3,90	3,89	4,26	4,41	4,35	4,28	4,29	4,35
600	4,16	4,01	4,24	4,05	4,03	4,00	4,34	4,52	4,47	4,43	4,41	4,46
630	4,26	4,12	4,33	4,12	4,15	4,09	4,47	4,63	4,57	4,49	4,53	4,58
660	4,37	4,22	4,44	4,23	4,23	4,22	4,55	4,70	4,67	4,63	4,65	4,66
690	4,48	4,33	4,55	4,36	4,35	4,30	4,67	4,80	4,78	4,74	4,74	4,77
720	4,55	4,46	4,62	4,43	4,43	4,41	4,77	4,90	4,87	4,84	4,84	4,86
750	4,67	4,55	4,73	4,57	4,57	4,49	4,83	4,98	4,99	4,93	4,95	4,94
780	4,74	4,62	4,79	4,66	4,63	4,62	4,92	5,07	5,09	5,03	5,03	5,05
810	4,85	4,72	4,91	4,79	4,71	4,70	5,02	5,15	5,17	5,13	5,15	5,13
840	4,92	4,83	4,98	4,86	4,82	4,82	5,09	5,26	5,28	5,19	5,27	5,26
870	5,05	4,90	5,10	4,94	4,90	4,89	5,15	5,33	5,37	5,31	5,34	5,32
900	5,11	5,00	5,16	5,06	4,97	5,00	5,26	5,39	5,47	5,39	5,41	5,45
930	5,20	5,10	5,22	5,14	5,06	5,07	5,33	5,51	5,54	5,46	5,53	5,53
960	5,30	5,18	5,29	5,23	5,17	5,14	5,42	5,58	5,61	5,56	5,61	5,61
990	5,38	5,29	5,40	5,30	5,25	5,21	5,50	5,65	5,70	5,67	5,69	5,67
1020	5,45	5,35	5,49	5,37	5,32	5,30	5,58	5,72	5,79	5,75	5,81	5,74
1050	5,53	5,42	5,56	5,50	5,40	5,37	5,64	5,78	5,82	5,82	5,90	5,82
1080	5,59	5,54	5,63	5,57	5,48	5,44	5,76	5,85	5,92	5,88	5,98	5,94
1110	5,66	5,61	5,71	5,64	5,57	5,53	5,84	5,92	5,98	5,99	6,06	6,02
1140	5,74	5,68	5,79	5,72	5,64	5,62	5,90	5,99	6,08	6,07	6,15	6,11
1170	5,80	5,76	5,86	5,81	5,72	5,70	5,99	6,05	6,15	6,13	6,23	6,19
1200	5,92	5,85	5,94	5,89	5,79	5,79	6,05	6,12	6,23	6,19	6,33	6,27
1230	5,95	5,97	6,01	5,93	5,87	5,86	6,10	6,19	6,29	6,28	6,40	6,32
1260	6,03	6,04	6,09	6,00	5,94	5,94	6,17	6,26	6,38	6,35	6,47	6,40
1290	6,10	6,11	6,16	6,08	6,01	6,02	6,24	6,33	6,46	6,42	6,53	6,49
1320	6,18	6,17	6,24	6,16	6,06	6,11	6,33	6,40	6,51	6,49	6,60	6,57
1350	6,25	6,25	6,31	6,24	6,13	6,20	6,39	6,47	6,57	6,56	6,67	6,64
1380	6,33	6,32	6,35	6,31	6,21	6,24	6,47	6,51	6,68	6,63	6,75	6,71
1410	6,40	6,40	6,44	6,39	6,28	6,32	6,50	6,54	6,74	6,69	6,83	6,81
1440	6,47	6,47	6,53	6,42	6,36	6,40	6,59	6,61	6,80	6,76	6,91	6,89

Продолжение таблицы В.1 (часть 3)

<i>t</i> , с	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1470	6,54	6,54	6,61	6,49	6,43	6,49	6,62	6,67	6,87	6,83	6,94	6,94
1500	6,61	6,61	6,67	6,56	6,47	6,53	6,67	6,75	6,94	6,92	7,01	7,01
1530	6,66	6,68	6,71	6,65	6,55	6,61	6,71	6,78	7,01	6,97	7,10	7,09
1560	6,74	6,75	6,77	6,69	6,64	6,68	6,81	6,84	7,09	7,04	7,18	7,14
1590	6,82	6,82	6,81	6,77	6,73	6,76	6,85	6,93	7,15	7,11	7,22	7,22
1620	6,91	6,85	6,88	6,85	6,76	6,79	6,92	6,97	7,23	7,18	7,31	7,29
1650	6,94	6,94	6,92	6,89	6,84	6,87	7,01	7,05	7,28	7,26	7,39	7,37
1680	7,03	7,01	7,01	6,96	6,93	6,95	7,08	7,09	7,33	7,29	7,43	7,41
1710	7,10	7,05	7,09	7,04	6,98	6,99	7,16	7,17	7,38	7,33	7,49	7,50
1740	7,13	7,14	7,12	7,08	7,06	7,06	7,20	7,21	7,44	7,40	7,54	7,54
1770	7,21	7,21	7,20	7,15	7,14	7,10	7,25	7,29	7,47	7,47	7,58	7,62
1800	7,29	7,25	7,28	7,22	7,18	7,17	7,34	7,35	7,54	7,57	7,67	7,66

Продолжение таблицы В.1 (часть 4)

<i>t</i> , с	<i>p_{st}</i> = 6,5 МПа			<i>p_{st}</i> = 7,0 МПа			<i>t</i> , с	<i>p_{st}</i> = 6,5 МПа			<i>p_{st}</i> = 7,0 МПа		
	37	38	39	40	41	42		37	38	39	40	41	42
60	1,55	1,12	1,03	0,96	0,94	1,01	960	5,70	5,76	5,75	5,80	5,91	5,80
90	1,83	1,46	1,42	1,32	1,37	1,35	990	5,76	5,84	5,84	5,89	6,05	5,89
120	1,96	1,75	1,71	1,61	1,68	1,70	1020	5,88	5,92	5,92	5,98	6,14	5,99
150	2,29	2,03	1,98	1,91	2,00	1,94	1050	5,94	6,04	6,01	6,07	6,25	6,09
180	2,53	2,26	2,23	2,13	2,24	2,21	1080	6,02	6,13	6,14	6,16	6,33	6,18
210	2,72	2,50	2,42	2,35	2,47	2,45	1110	6,09	6,21	6,23	6,29	6,43	6,28
240	2,88	2,71	2,68	2,56	2,65	2,58	1140	6,21	6,28	6,29	6,38	6,52	6,37
270	3,08	2,87	2,84	2,77	2,85	2,77	1170	6,27	6,32	6,38	6,47	6,63	6,47
300	3,22	3,07	3,01	2,97	3,09	2,97	1200	6,34	6,43	6,48	6,57	6,71	6,52
330	3,36	3,23	3,17	3,13	3,23	3,15	1230	6,42	6,52	6,56	6,65	6,79	6,62
360	3,51	3,38	3,33	3,28	3,42	3,33	1260	6,48	6,59	6,65	6,73	6,87	6,70
390	3,66	3,56	3,51	3,46	3,56	3,48	1290	6,57	6,67	6,74	6,83	6,96	6,80
420	3,79	3,71	3,64	3,64	3,76	3,64	1320	6,68	6,74	6,79	6,88	7,04	6,90
450	3,91	3,83	3,81	3,76	3,88	3,78	1350	6,75	6,82	6,86	7,00	7,14	6,94
480	4,05	3,98	3,93	3,90	3,99	3,92	1380	6,78	6,90	6,93	7,07	7,23	7,08
510	4,19	4,12	4,06	4,04	4,17	4,08	1410	6,85	6,97	6,97	7,16	7,33	7,12
540	4,28	4,24	4,18	4,18	4,31	4,17	1440	6,93	7,04	7,05	7,25	7,37	7,22
570	4,39	4,36	4,32	4,32	4,45	4,32	1470	7,01	7,09	7,13	7,33	7,47	7,27
600	4,49	4,48	4,45	4,46	4,60	4,45	1500	7,08	7,20	7,20	7,43	7,60	7,36
630	4,64	4,60	4,56	4,59	4,67	4,56	1530	7,15	7,27	7,27	7,47	7,66	7,46
660	4,75	4,73	4,70	4,68	4,82	4,68	1560	7,22	7,34	7,34	7,55	7,71	7,50
690	4,81	4,84	4,81	4,81	4,96	4,78	1590	7,28	7,42	7,42	7,64	7,81	7,60
720	4,95	4,96	4,91	4,94	5,05	4,95	1620	7,36	7,46	7,49	7,73	7,85	7,68
750	5,06	5,04	5,03	5,03	5,19	5,03	1650	7,43	7,53	7,58	7,79	7,93	7,72
780	5,13	5,17	5,18	5,17	5,29	5,18	1680	7,46	7,61	7,63	7,87	8,01	7,82
810	5,24	5,28	5,26	5,25	5,39	5,26	1710	7,55	7,69	7,71	7,95	8,11	7,87
840	5,34	5,36	5,33	5,40	5,52	5,36	1740	7,62	7,76	7,75	8,00	8,17	7,97
870	5,42	5,49	5,48	5,49	5,63	5,46	1770	7,69	7,80	7,82	8,07	8,22	8,06
900	5,51	5,56	5,54	5,58	5,73	5,56	1800	7,72	7,87	7,89	8,13	8,29	8,11
930	5,59	5,65	5,68	5,72	5,82	5,69							

Приложение Г

Экспериментальные исследования процесса уплотнения ГВОМО

Экспериментальные исследования процесса уплотнения ГВОМО

Целью настоящих исследований является определение применимости математической модели процесса фильтрования ГВОМО при статическом давлении (3.8) для более широкого диапазона значений времени фильтрования, а также исследования изменения влажности слоя осадка в зависимости от времени и высоты слоя фильтруемого материала.

Условия проведения опытов. Опыты проводились на лабораторной установке (рис. 3.5) с использованием плоской ФП при статическом давлении 4,5 МПа ($p_r = 45$). Для каждого опыта задавались высота загрузки материала H и требуемая усредненная конечная влажность W_k , уровни варьирования которых, приведены в таблице Г.1.

Таблица Г.1 – Параметры процесса фильтрования ГВОМО

Параметр	Обозначение	Значение
Высота загрузки, мм	H	3; 6; 9; 12; 15; 18; 21; 24
Конечная влажность, %	W_k	30; 40; 45; 50
Исходная влажность, %	W_0	68

Из зависимости (4.3) настоящей работы, высота слоя обезвоженного осадка (для суспензии ГВОМО) определяется, м:

$$h = \frac{H}{6,47 \cdot e^{-2,63 \cdot W_k}}. \quad (\text{Г.1})$$

Из зависимостей (3.8) и (4.3), выполнив соответствующие преобразования, получено:

$$t = \frac{3,11 \cdot 10^8 (H - 0,155 \cdot e^{2,63 \cdot W_k})^2}{p_r^{0,58}}. \quad (\text{Г.2})$$

При проведении исследований зависимость (Г.2) использовалась для определения времени фильтрования t , затрачиваемого на обезвоживание слоя ГВОМО высотой H до влажности W_k . Опыты проводились при заданных параметрах H и W_k (из принятого диапазона) в течение соответствующего расчетного времени t . В конце каждого опыта измерялась влажность W_k^3 и высота слоя h_3 обезвоженного материала. После чего выполнялось сравнение значений данных параметров (W_k^3 и h_3) с соответствующими теоретическими значениями W_k и h . Количество повторных опытов равно трем.

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде зависимостей высоты обезвоженного осадка h от времени обезвоживания t и влажности W_k на рисунке Г.1.

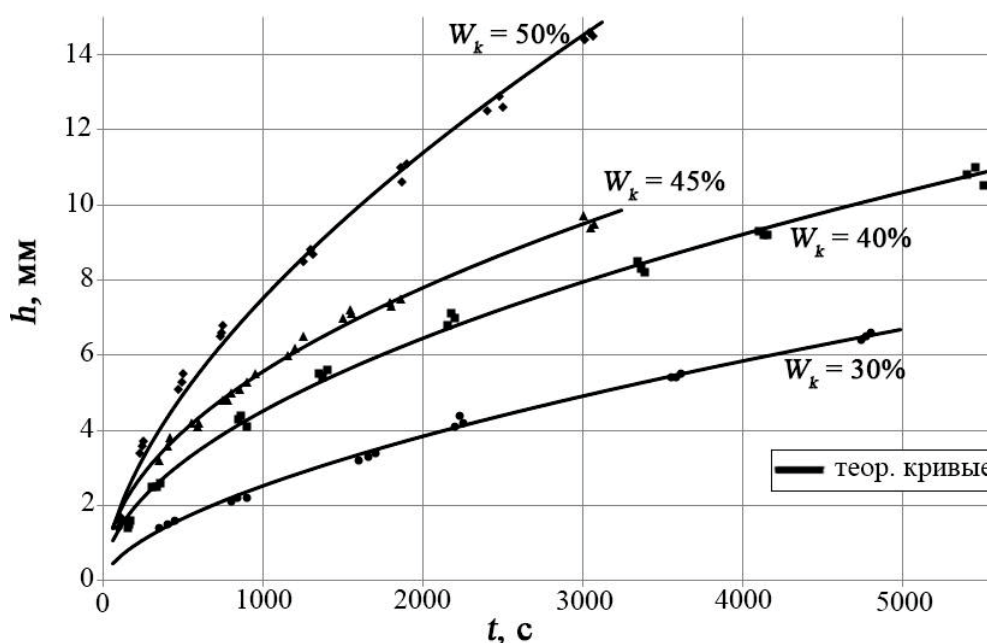


Рисунок Г.1 — Зависимость высоты слоя обезвоженного осадка (ГВОМО) от времени фильтрования и влажности

Выполним статистический анализ отклонений расчетных значений параметров h , определенных по зависимости (Г.1), от экспериментальных h_3 . Для этого были определены относительные отклонения $\Delta_i^{\text{отн}}$, значения которых приведены в таблице Г.2.

Таблица Г.2 – Значения отклонений расчетных значений h от экспериментальных h ,

$W_k = 50\%$		$W_k = 45\%$		$W_k = 40\%$		$W_k = 30\%$	
t, c	$\Delta_i^{отн}, \%$	t, c	$\Delta_i^{отн}, \%$	t, c	$\Delta_i^{отн}, \%$	t, c	$\Delta_i^{отн}, \%$
3100	18,92	420	22,58	5505	9,82	4770	16,07
2575	20,79	600	13,51	4154	6,12	3614	12,24
1870	23,26	780	14,29	3385	7,95	2229	15,789
1400	17,33	900	17,78	2175	0,00	1660	9,09
870	20,34	1200	19,23	1352	1,79	840	8,33
520	17,78	1500	18,64	845	2,27	400	6,25
270	9,09	1800	14,06	354	7,14	—	—
90	10,53	—	—	130	7,14	—	—

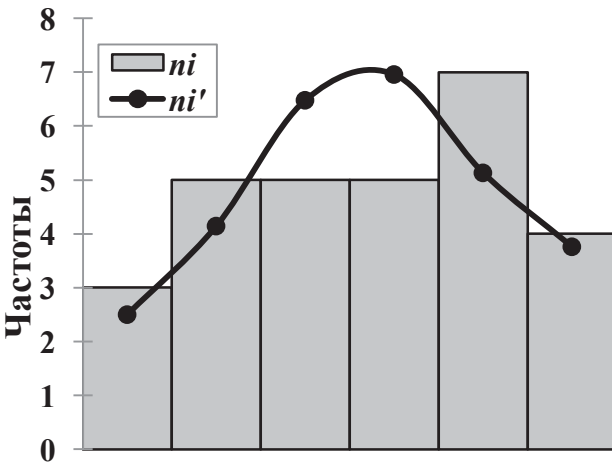
Для выборки $N = 29$ выполним проверку гипотезу о нормальном распределении величины $\Delta_i^{отн}$. Основные параметры выборки и закона ее распределения представлены в табл. Г.3 и табл. Г.4.

Таблица Г.3 – Основные параметры выборки $\Delta_i^{отн}$

Объем выборки N			29			
Количество интервалов N'			6			
№	Границы интервалов		Частота n_i	Теор. частота n'_i	Вероятн. попад. в интервал P_i	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
	x_i	x_{i+1}				
1	0	0,04	3	2,504	0,086	0,098
2	0,04	0,08	5	4,148	0,143	0,175
3	0,08	0,12	5	6,484	0,224	0,340
4	0,12	0,16	5	6,963	0,240	0,553
5	0,16	0,2	7	5,136	0,177	0,676
6	0,2	0,24	4	3,764	0,130	0,015
Сумма					1	1,86

Максимальное относительное отклонение расчетных по зависимости (Г.1) значений параметра h от экспериментальных составило 13% при доверительной вероятности 0,9. Экспериментальные значения влажности $W_k^э$, измеряемые в ходе исследований не более чем на 2% отличались от заданных значений W_k , поэтому статистический анализ для относительных отклонений $W_k^э$ и W_k не проводился.

Таблица Г.4 – Основные параметры закона распределения выборки

Проверяемый закон распределения:		<u>нормальный</u>
Параметр	Значение	Гистограмма наблюдаемой плотности распределения и полигон теор. частот 
Выборочная средняя, $\bar{x}_в$	0,127	
Стандартное отклонение, σ	0,064	
Число степеней свободы, k	3	
Эмпирическое значение критерия $\chi^2_{набл}$	<u>1,86</u>	
Критическое значение критерия $\chi^2_{кр}$	<u>6,25</u>	
Вывод о справедливости выдвинутой гипотезы	<u>ПРИНИМАЕТСЯ</u>	
Параметры распределения		
Математическое ожидание $\bar{x}$		0,127
Абсолютная погрешность при доверительной вероятности 90%		0,02
Доверительный интервал (при $\alpha_v = 0,90$)		0,108;0,148

Таким образом, зависимость (Г.2), полученная на основании зависимости (3.8) может использоваться для более широкого диапазона времени t : от 60 до 5500 с. Значения влажности W_k для нового установленного диапазона времени и значений $H = 3 \dots 24$ мм ограничится диапазоном от 30 до 50 %.

Приложение Д

Методика определения рациональных параметров фильтровальной машины для
обезвоживания морских органо-минеральных осадков

Приложение Д

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

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор
ПАО «БМЗ «Прогресс»



И.В. Щесняк
_____ 2016

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе,
д-р техн. наук, проф.



А.С. Бешта
_____ 04 2016

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ФИЛЬТРОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ МОРСКИХ
ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОСАДКОВ**

Руководитель

д-р техн. наук, проф.

В. П. Франчук

Ответственный исполнитель

А. Е. Шевченко

Зав. кафедры горных машин и инж.

д-р техн. наук, проф.

К. С. Заболотный

Днепропетровск

2016

СОДЕРЖАНИЕ

Основные понятия и определения.....	3
Введение.....	3
1 Описание конструкции фильтровальной машины	4
2 Расчетные параметры фильтровальной машины.....	7
3 Определение параметров фильтровальной машины.....	8
3.1 Исходные данные для расчета.....	8
3.2 Определение основных технологических и геометрических параметров фильтровальной машины.....	11
3.3 Определение параметров пульсатора.....	18
4 Пример определения параметров фильтровальной машины для обезвоживания ГВОМО.....	20
Выводы.....	25
Список использованной литературы.....	25

Приложение Е

Методика определение параметров фильтровально-пульсационной машины для
обезвоживания глубоководных органо-минеральных осадков

Приложение Е

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

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
Государственного ВУЗ «НГУ»,
д-р техн. наук, проф.



А.С. Бешта
А.С. Бешта

«14» 03 2016

МЕТОДИКА

определения параметров фильтровально-пульсационной машины для
обезвоживания глубоководных органо-минеральных осадков

Разработчик методики:

мл. научн. сотр.

А.Е. Шевченко
А.Е. Шевченко

Днепропетровск
2016

СОДЕРЖАНИЕ

Основные понятия и определения.....	3
Введение.....	3
1 Описание конструкции фильтровально-пульсационной машины.....	4
2 Расчетные параметры фильтровально-пульсационной машины.....	7
3 Определение параметров фильтровально-пульсационной машины.....	8
3.1 Исходные данные для расчета.....	8
3.2 Определение основных технологических и геометрических параметров фильтровально-пульсационной машины.....	11
3.3 Определение параметров пульсатора.....	18
4 Пример определения параметров фильтровально-пульсационной машины для обезвоживания ГВОМО.....	19
5 Эффективность фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении...	23
Выводы.....	27
Список использованной литературы.....	28

Приложение Ж

Методика определение параметров вибрационной фильтровальной машины со
шнековой выгрузкой обезвоженного продукта для обезвоживания
глубоководных органо-минеральных осадков

Приложение Ж

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

УТВЕРЖДАЮ:

Директор

ООО «Океанмашэнерго»

В.Ю. Кухарь



2016

МЕТОДИКА

определения параметров вибрационной фильтровальной машины со шнековой
выгрузкой обезвоженного продукта для обезвоживания глубоководных
органо-минеральных осадков

Разработчики методики:

д-р техн. наук, проф.

м.н.с., аспирант

В.П. Франчук

А.Е. Шевченко

Днепропетровск

2016

СОДЕРЖАНИЕ

Основные понятия и определения.....	2
Введение.....	2
1 Описание конструкции фильтровально-пульсационной машины.....	3
2 Определение параметров фильтровально-пульсационной машины	5
2.1 Исходные данные для расчета.....	5
2.2 Определение основных технологических и геометрических параметров фильтровально-пульсационной машины.....	8
2.3 Расчет параметров шнека.....	12
2.4 Расчет механического клапана.....	15
2.5 Динамический расчет вибрационной фильтровальной машины.....	17
2.5.1 Определение центра масс.....	17
2.5.2 Динамический расчет машины при с направленными вертикальными колебаниями.....	18
2.5.3 Динамический расчет машины с круговыми колебаниями.....	20
Вывод.....	22
Список использованной литературы.....	23

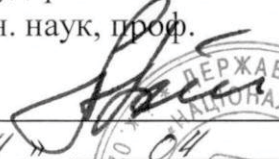
Приложение И

Акты внедрения

Приложение И

СОГЛАСОВАНО:

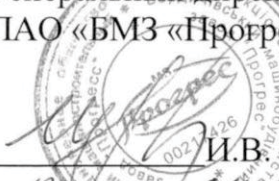
Проректор по научной работе
Государственного ВУЗ «НГУ», д-р
техн. наук, проф.


А.С. Бешта
«24» 04 2016 г



УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор
ПАО «БМЗ «Прогресс»


И.В. Щесняк
«12» 04 2016 г



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

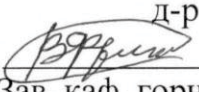
научно-исследовательских работ

Настоящим актом подтверждается, что Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» передало ПАО «БМЗ «Прогресс» для использования при проектировании следующие результаты научно-исследовательских работ: «Методика определения рациональных параметров фильтровальной машины для обезвоживания морских органо-минеральных осадков», утвержденные проректором Государственного ВУЗ «НГУ» 2016 г.

Новизна результатов: разработаны методы определения основных технологических и геометрических параметров фильтровальной машины для обезвоживания морских органо-минеральных осадков, работающей при статическом и пульсирующем давлении, позволяющие определить рациональные параметры фильтровальной машины и оценить различные варианты ее конструкции.

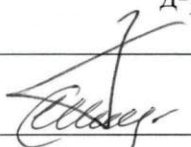
Результаты будут использоваться в проектных работах при разработке новых конструкций фильтровальных машин.

Научный руководитель,
д-р техн. наук, проф.


В.П. Франчук
Зав. каф. горных машин и инж.

д-р техн. наук, проф.

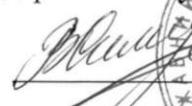
К.С. Заболотный
мл. научн. сотр.


А.Е. Шевченко

Приложение И (продолжение)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор інституту з
проектування гірничих
підприємств ДВНЗ «НГУ»,
д-р техн. наук, проф.


В.І. Симоненко
«03» 03 2016

АКТ

впровадження «Методики визначення параметрів фільтрувально-пульсаційної машини для зневоднення глибоководних органо-мінеральних відкладень»

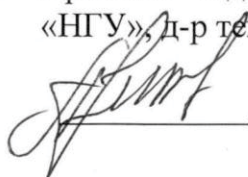
Запропонована методика визначення параметрів фільтрувально-пульсаційної машини для зневоднення глибоководних органо-мінеральних відкладень (ГВОМВ) Чорного моря представляє технічний інтерес при розробці камерних фільтр-пресів для розділення дрібнодисперсних суспензій.

Використання «Методики визначення ...» дозволить здійснювати обґрунтований вибір і призначення конструктивних та режимних параметрів камерних фільтр-пресів, що працюють при пульсуючому тиску, для зневоднення ГВОМВ і інших дрібнодисперсних суспензій, а також дозволить спростити проектування даних машин.

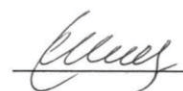
«Методика визначення ...» була використана при розробці проектів нових перспективних конструкцій фільтрувальних машин для розділення дрібнодисперсних суспензій.

Включення пульсатора в роботу фільтр-преса дозволить знизити питомі витрати електроенергії на одиницю об'єму сировини, що зневоднюється за одну годину на 20%. Очікуваний річний економічний ефект при цьому складе близько 28 – 30 тис. грн. на одну машину.

Начальник тех. відділу
інституту з проектування
гірничих підприємств ДВНЗ
«НГУ», д-р техн. наук, доц.

 А.О. Бондаренко

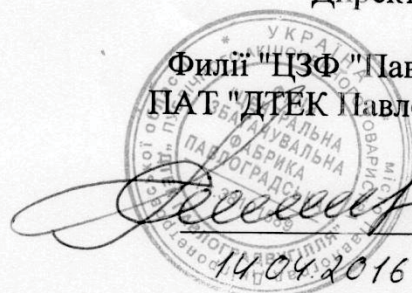
Розробник методики:
мол. наук. співроб.

 О.Є. Шевченко

Приложение И (продолжение)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор

Філії "ЦЗФ" Павлоградська"
ПАТ "ДТЕК Павлоградвугілля"
Д.П.Голик
14.04.2016**АКТ**

впровадження «Методики визначення параметрів фільтрувально-пульсаційної машини для зневоднення глибоководних органо-мінеральних відкладень»

Запропонована конструкція та методика визначення параметрів фільтрувально-пульсаційної машини для зневоднення глибоководних органо-мінеральних відкладень (ГВОМВ) Чорного моря представляє технічний інтерес при розробці камерних фільтрпресів для розділення дрібнодисперсних суспензій.

Використання «Методики визначення ...» дозволить здійснювати обґрунтований вибір і призначення конструктивних та режимних параметрів камерних фільтрпресів для розділення дрібнодисперсних суспензій та спростити проектування даних машин.

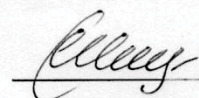
Окремі елементи «Методики визначення ...» були використані при розробці проектів нових перспективних конструкцій фільтрувальних машин для розділення дрібнодисперсних суспензій.

Використання запропонованої конструкції камерного фільтрпреса з пульсатором дозволить підвищити ефективність процесу розділення дрібнодисперсних суспензій та знизити питомі витрати електроенергії на одиницю об'єму сировини, що зневоднюється за одну годину на 20%. Очікуваний річний економічний ефект при цьому складе близько 28 – 30 тис. грн. на одну машину.

Розробник методики:

м.н.с. кафедри ГМІ

Державного ВНЗ «НГУ»

 О.Є. Шевченко

Приложение И (продолжение)

УТВЕРЖДАЮ:

Директор

ООО «Океанмашэнерго»

В.Ю. Кухарь

2016



АКТ

внедрения «Методики определения параметров вибрационной фильтровальной машины со шнековой выгрузкой обезвоженного продукта для обезвоживания глубоководных органо-минеральных осадков»

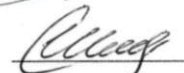
Предложенная конструкция фильтровальной машины нового технического уровня для обезвоживания глубоководных органо-минеральных осадков (ГВМО) Черного моря и методика определения ее параметров представляют технический интерес при разработке конструкций фильтров для разделения тонкодисперсных суспензий.

Использование «Методики определения...» позволит осуществлять обоснованный выбор и назначение конструкторских и технологических параметров вибрационных фильтров, позволит упростить проектирование фильтров для обезвоживания ГВМО. Отдельные элементы предложенной конструкции вибрационной фильтровальной машины и методики ее расчета будут использованы при проектировании фильтров для очистки технической воды от тонкодисперсных механических включений.

Использование предложенной конструкции фильтра позволит ожидать положительный экономический эффект. Предварительная сравнительная оценка эксплуатации фильтра с вибрацией и без вибрации показывает уровень повышения производительности на 30%, что в ценах 2016 года может составить эффект в 70-80 тыс. грн. на одну машину.

Разработчики методики:
д-р техн. наук, проф.

мл. научн. сотр.

 В.П. Франчук
 А.Е. Шевченко