

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Гармаев Оюн Жаргалович



ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШНЕКОВОГО ПРЕССА ДЛЯ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ЭКСКАВИРОВАННОГО
ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ В УСЛОВИЯХ КАРЬЕРА

Специальность 05.05.06 – Горные машины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Михайлов А.В.

Санкт-Петербург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	12
1.1 Анализ процесса добычи торфяного сырья в условиях карьера	12
1.2 Анализ размерно-массовых и физико-механических параметров экскавированного торфяного сырья	15
1.3 Анализ процессов механического обезвоживания органогенных видов сырья	23
1.4 Анализ оборудования, применяемого для механического обезвоживания органогенных видов сырья	40
1.5 Выводы по главе 1	48
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ В ШНЕКОВОМ ПРЕССЕ	51
2.1 Обоснование структуры и параметров шнекового пресса для механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья	51
2.2 Реология торфяного сырья при обезвоживании в шнековом прессе	55
2.3 Анализ процесса механического обезвоживания торфяного сырья в коническом шнеке	61
2.4 Производительность механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья в шнековом прессе	68
2.5. Выводы по главе 2.....	74
ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	76
3.1 Программа проведения экспериментальных исследований	76
3.2 Методика проведения экспериментальных исследований в полевых условиях	77
3.2.1 Нарботка опытных образцов торфяного сырья.....	77
3.2.2 Методика определения плотности верхнего слоя торфяной залежи	79
3.2.3 Определение влажности исходного сырья	80
3.3 Подготовка и методика определения основных параметров смесей двух видов торфяного сырья	81
3.4 Методика исследований на универсальной машине Zwick Z100	87

3.5 Методика экспериментальных исследований на винтовом прессе	89
3.6 Методика экспериментальных исследований на гидравлическом прессе	91
3.7 Методика исследований на лабораторном шнековом прессе	93
3.8 Методика обработки результатов экспериментов	96
3.9 Выводы по главе 3	96
ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	98
4.1 Исследование структуры смесей двух видов торфяного сырья	98
4.2 Результаты определения пористости смесей торфяного сырья	104
4.3 Результаты обезвоживания образцов торфяного сырья.....	105
4.3.1 Результаты экспериментальных исследований на винтовом прессе....	105
4.3.2 Результаты экспериментальных исследований на гидравлическом прессе	111
4.3.3 Результаты экспериментальных исследований на универсальной машине Zwick Z100	113
4.3.4 Результаты экспериментальных исследований на лабораторном шнековом прессе	115
4.4 Перфорированный фильтрующий экран обечайки шнекового пресса ...	118
4.5 Оценка энергоемкости процесса механического обезвоживания.....	120
4.6 Выводы по главе 4.....	121
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	123
5.1 Рекомендации по функционированию оборудования в условиях комплексно-механизированного карьера	123
5.2 Структура и параметры модуля обезвоживания торфяного сырья.....	124
5.3 Выводы по главе 5	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	130
ПРИЛОЖЕНИЕ А Технические характеристики шнековых прессов... 144	
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты механического обезвоживания на лабораторном шнековом прессе.....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ В Патент на полезную модель	150

ПРИЛОЖЕНИЕ Г Сборочный чертеж.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Справка о внедрении результатов работы.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Справка о депонировании рукописи	153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Основной отличительной особенностью торфяных месторождений по сравнению с другими полезными ископаемыми является высокое влагосодержание. В условиях естественного залегания в торфе содержится 86-95 % воды и, следовательно, лишь 5-14 % сухой массы, в состав которой входят органические и минеральные вещества. Повышенное начальное содержание влаги увеличивает расходы энергии при транспортировании, переработке влажного сырья и при его последующей сушке. При обезвоживании торфяного сырья возникают технологические трудности, т.к. такие материалы имеют высокоразвитую поверхность, активно взаимодействующую с водой. Обезвоживание торфяного сырья обычно выполняется путем процесс полевой сушки, которой требует значительных энергетических затрат и является длительным и невыгодным с точки зрения надежности производства.

Поэтому внимание ряда авторов направлено на совершенствование первой стадии обезвоживания – различных механических методов, одним из которых является шнековое обезвоживание, с целью снижения влажности торфяного сырья и затрат на последующую сушку. Торфяное сырье верхового типа малой степени разложения, содержат большое количество слабосвязанной воды, что позволяет вести процесс обезвоживания с высокими скоростями деформации при относительно малых давлениях прессования. Анализ известных технических решений свидетельствует о трудностях создания высокопроизводительных и эффективных машин для механического обезвоживания торфяного сырья в условиях карьера. От их решения во многом зависят перспективы промышленного применения искусственного обезвоживания торфяного сырья для снижения затрат на его транспортирование

Таким образом, поставленная задача поиска интенсификации методов механического обезвоживания торфяного сырья в условиях карьера является актуальной.

Степень разработанности темы исследования.

Значительный вклад в развитие теории шнекового прессования широкого ряда органоматериалов внесли такие отечественные и зарубежные ученые как: Афанасьев В.Н., Гревцев Н.В., Зубкова Т.М., Коротков В.Г., Опейко Ф.А., Полищук В.Ю., Силин В.А., Суворов В.И., Терентьев А.А., Фомин В.К., Цветков В.И., Черняев Н.П., Чистый И.Н., Chen Z., Bouvier Jean-Marie, Lutz D., Zhou X., Li Z., Steffe J. F., Horrobin D.J., Джексон К., Маллок Р.С., Штруб Р.А. и др.

В направлении исследования процессов механического обезвоживания торфяного сырья и созданию средств механизации посвящены работы: Амаряна Л.С., Богатова Б.А., Булышко М.Г., Булычева В.Г., Горячева В.И., Корчунова С.С., Могилевского И.И., Наумовича В.М., Солопова С.Г., Чураева Н.В. и др. Результаты многочисленных исследований показывают, что около 80 % воды, содержащейся в естественном торфяном сырье, можно удалить прессованием при давлении до 2,0 МПа. Однако в современных экономических условиях отсутствуют средства для предварительного механического обезвоживания торфяного сырья в условиях карьера. Поэтому создание оборудования для механического обезвоживания торфяного сырья в условиях комплексно-механизированного карьера требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Содержание диссертации соответствует п. 3 «Обоснование и оптимизация параметров и режимов работы машин и оборудования и их элементов» области исследований паспорта научной специальности 05.05.06 – Горные машины.

Цель исследования.

Установление закономерностей процесса механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья в шнековом прессе мобильного модуля для разработки научно-обоснованного технического решения, обеспечивающего в условиях комплексно-механизированного карьера предварительное механическое обезвоживание для повышения производительности внутрикарьерного транспортирования и последующей сушки торфяного сырья и торфяной продукции.

Идея исследования заключается в оценке возможности механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья в шнековом прессе мобильного модуля с учетом физико-механических параметров сырья, при этом структура модуля, конструктивные, размерно-массовые и функциональные параметры шнекового пресса мобильного модуля выбираются для условий предварительного обезвоживания торфяного сырья в комплексно-механизированном карьере.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы и оценить эффективность применения шнекового оборудования в смежных отраслях.
2. Провести анализ структуры и физико-механических характеристик экскавированного торфяного сырья и обосновать механическую модель процесса его деформирования при обезвоживании в шнековом прессе.
3. Провести параметрический анализ структуры шнекового пресса и обосновать форму шнека для механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья.
4. Установить основные закономерности процесса механического обезвоживания в лабораторных условиях на натуральных образцах экскавированного торфяного сырья.
5. Оценить эффективность механического обезвоживания смеси торфяного сырья с учетом геометрических параметров шнекового пресса с коническим шнеком и перфорированным экраном.
6. Разработать методику экспресс оценки структуры исходного композитного торфяного сырья перед механическим обезвоживанием.
7. Разработать практические рекомендации по результатам исследований.

Научная новизна работы:

1. Структура шнекового пресса мобильного модуля, включающая приемный бункер, шнековый пресс и выходной ленточный конвейер представлена

в виде взаимосвязанных элементов механико-технологической системы обезвоживания экскавированного торфяного сырья.

2. Приведенный метод анализа с учетом постепенного уплотнения торфяного сырья в шнеке с коническим валом при постоянном шаге позволяет проводить оценку влияния параметров шнека на показатели механического обезвоживания и дает возможность прогнозировать процесс предварительного механического обезвоживания в условиях комплексно-механизированного карьера и разрабатывать практические рекомендации по повышению эффективности добычи торфяного сырья.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Теоретически обосновано и экспериментально установлено, что процесс механического обезвоживания усредненного торфяного сырья как упруго-вязко-пластичного капиллярно-пористого тела в шнековом прессе описывается трехзвенной реологической стандартной твердотельной моделью (тело Зинера).

2. Теоретически обосновано и экспериментально установлено, что интенсивность изменения влагосодержания торфяного сырья по длине шнекового пресса зависит от напряжения обезвоживания и определяется скоростью деформации, размерами перфорации экрана основных зон обезвоживания по длине шнека.

3. На основе проведенных исследований предложены технические решения и определены структура и параметры мобильного модуля, включающая приемный бункер, шнековый пресс и выходной ленточный конвейер, представлена в виде взаимосвязанных элементов механико-технологической системы обезвоживания экскавированного торфяного сырья.

4. Материалы по структуре и конструктивному оформлению технологического оборудования для производства торфяной окускованной продукции трубчатого типа заложены ООО «Политорф» в исходные данные «Проекта по созданию предприятия по добыче и последующей переработке торфяного сырья для производства кипованного торфа» в привязке к участку недр

местного значения (торфяное месторождение Рогали, Фировский район Тверской области; кадастровый номер 491).

5. По теме работы получен патент РФ на полезную модель.

Методология и методы исследования. В ходе выполнения работ принят комплексный метод исследований, включающий анализ и обобщение научно-технической и патентной информации, положения теории машин и механизмов, теоретической механики, проведения экспериментальных исследований с помощью оригинального экспериментального оборудования на образцах натурального материала, использования при обработке экспериментальных данных методов математической статистики и регрессионного анализа, выполненных с помощью специального и стандартного программного обеспечения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснована структура шнекового пресса непрерывного действия для предварительного механического обезвоживания торфяного сырья, включающая конический напорный шнек длиной 1,6 м с конусностью 1:12 и постоянным шагом лопастей 0,2 м и переменным размером перфорации фильтрующего экрана вокруг шнека в зонах: уплотнения – 4 мм, фильтрации – 4 мм и отжатия – 3 мм.

2. Определено, что рациональному механическому обезвоживанию торфяного сырья в шнековом прессе соответствует вертикальное уплотнение торфяного сырья в уменьшающемся по высоте межлопастном пространстве по длине конического шнека с коэффициентом уплотнения 3 для снижения влагосодержания торфяного сырья от 9,0 кг/кг до 4,9 кг/кг при объемном соотношении компонентов торфяной смеси низкой и высокой степени разложения 50:50.

Достоверность положений, выносимых на защиту, выводов и результатов подтверждается корректностью постановки задач исследований; непротиворечивостью их фундаментальным законам и зависимостям; применением апробированных научных методов экспериментальных исследований; достаточным объемом экспериментальных данных и стандартными

методами обработки полученных результатов.

Апробация диссертационной работы проведена на научно-практических мероприятиях с докладами:

- Международная научно-практическая конференция «Инновации на транспорте и в машиностроении» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.);
- Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.);
- Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.);
- Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы машиноведения, безопасности и экологии в природопользовании» (г. Тверь, 2018 г.);

Связь темы диссертации с научно-техническими программами.

Диссертационная работа выполнена в рамках реализации задач научной школы «Машины, механизмы и энергообеспечение горного производства» в Санкт-Петербургском горном университете, а также соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники Российской Федерации по п. 6 «Рациональное природопользование» (утв. Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. N 899) и критическим технологиям Российской Федерации «Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи».

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследований, разработке программы и методики лабораторных исследований, определении параметров при проектировании и реализации конструкции шнекового пресса, создании лабораторной установки, организации и проведении лабораторных исследований, в обработке данных и анализе полученных результатов.

Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных

изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и в систему цитирования Scopus. Получен патент на полезную модель.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и 6 приложений с учетом справки о внедрении результатов диссертационной работы в производство. Материалы работы изложены на 153 страницах машинописного текста, включая 29 таблиц, 59 рисунков. Список цитируемой литературы включает 143 источника, из них 75 – на иностранных языках.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ процесса добычи торфяного сырья в условиях карьера

В настоящее время горнодобывающая промышленность сталкивается с постоянным увеличением капитальных и операционных расходов. Существует потребность в сокращении затрат там, где это возможно. Затраты на выемку и транспортировку сырья могут составлять до 50 % всех эксплуатационных расходов добычи.

В горнодобывающей промышленности быстро развиваются системы внутрикарьерной переработки и транспортирования переработанного сырья In-Pit Crushing and Conveying (IPCC) [97]. Экономическая эффективность и высокая надежность систем IPCC, по сравнению с традиционными системами экскаватор-самосвал, делают их более привлекательными для использования в современных технологиях добычи полезных ископаемых. Данные системы позволяют проводить первичную переработку, отделить отходы производства и сократить объемы внутрикарьерных перевозок и транспортные расходы [105].

Под операциями внутрикарьерной переработки материалов подразумеваются все единичные операции по выемке, погрузке, первичному дроблению, обезвоживанию, внутримассивному транспортированию и компактированию.

При производстве торфяной продукции, применяемой в агропромышленном и природоохранном направлениях, на стадии освоения месторождений возникает одна из основных проблем – высокое влагосодержание. Которая требует значительных затрат на сушку экскавированного торфяного сырья [107].

При обоснованном выборе рационального комплекса технологического оборудования, основных схемных, конструктивных и эксплуатационных параметров оборудования, для обеспечения заданного качества продукции в условиях карьерной добычи особое внимание уделяется интенсификации

процессов и в первую очередь наиболее продолжительному – сушке окускованного торфяного сырья [55, 62].

Основой современных технологий является создание условий для эффективного снижения влаги экскавированного сырья в условиях карьера до значения 65 %, при котором оно сохраняет все свои полезные свойства (влагопоглощение, обменная емкость и др.). Соответственно, добыча торфяного сырья и его прямое непосредственное использование в практических целях связано с методами обезвоживания: сушкой или механическими – предварительной переработкой экскавированного торфяного сырья с его механическим обезвоживанием в пределах карьера с возвратом отжатой воды в карьер. Предварительно обезвоженное торфяное сырье транспортируется на специально подготовленные и осушенные площадки, которые примыкают к разрабатываемым карьерам. На них производится компактирование торфяного сырья в крупные фигуры – компакты для повышения эффективности досушки материала в естественных условиях. Крупноразмерные компакты – являются полуфабрикатом, которые сохнет до уборочной влажности на специально отведенном поле для сушки, а дальше доставляется к месту хранения или на дальнейшую переработку в зависимости от требований потребителя [108].

Обезвоживанию могут подвергаться не только конечные, но и промежуточные продукты обогащения для снижения затрат на транспортирование продуктов обогащения [45].

Анализ показал, что в технологию добычи торфяного сырья карьерным способом целесообразно включить внутрикарьерное механическое обезвоживание экскавированного торфяного сырья, что позволит снизить влажность экскавированного торфяного сырья на 45 % и расходы на транспортировку на 40 %. Отжатая вода возвращается в карьер (рисунок 1.1). Интенсивность последующей сушки торфяных продуктов растет как в полевых, так и в заводских условиях [40, 41]. Показан энергетический потенциал использования механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья в условиях карьера (рисунок 1.2).



Рисунок 1.1 - Система внутрикарьерного механического обезвоживания и транспортирования при добыче торфяного сырья

При влагосодержании экскавированного торфяного сырья 9,0 кг/кг проведение предварительного механического обезвоживания снижает влагосодержание сырья до 4,88 кг/кг. Затраты энергии на последующую тепловую сушку до влагосодержания 1,66 кг/кг составляют 2,59 МДж/кг [18].

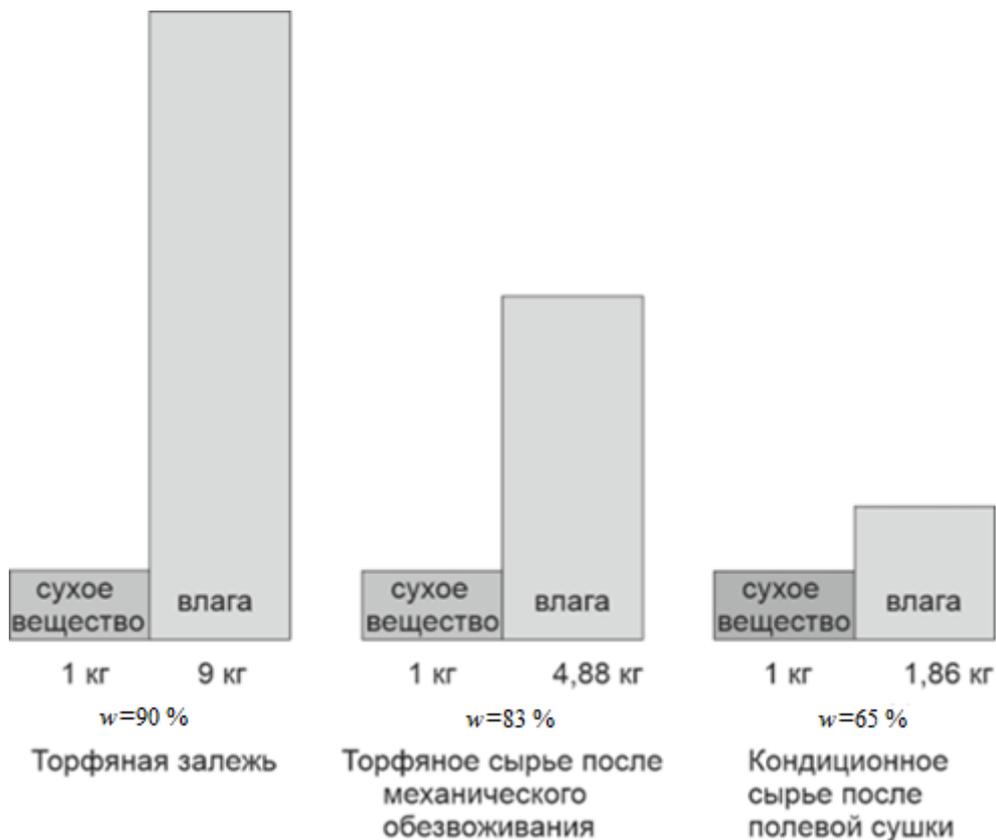


Рисунок 1.2 - Потенциал использования механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья в условиях карьера

Анализ затрат энергии на сушку торфяного сырья проведен для условий нормального атмосферного давления ($0,0234 \cdot 10^5$ Па). Удельная теплота испарения воды при $t = 20$ °С составляет 2,4538 МДж/кг [53].

Без предварительного механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья затраты энергии на последующую тепловую сушку до влагосодержания 1,66 кг/кг составляют 6,51 МДж/кг. Таким образом затраты энергии на последующую тепловую полевую сушку экскавированного торфяного сырья снижаются в 2,5 раза.

Рассматриваемая технология внутрикарьерной переработки и транспортирования экскавированного торфяного сырья имеет следующие преимущества:

- сокращение парка транспортных средств;
- снижение транспортных расходов;
- возможность непрерывной переработки торфяного сырья;
- устранение необходимости строить водоочистные сооружения на заводах для сброса отжатой воды.

1.2 Анализ размерно-массовых и физико-механических параметров экскавированного торфяного сырья

Основные направления использования торфа и торфяных месторождений связаны с удалением влаги [1].

Характерной особенностью торфяных залежей является их неоднородность – существенное различие в физико-технических, водно-физических, структурно-механических и других свойствах торфяных месторождений, обусловленное разным ботаническим составом торфа, его макро- и микроструктурными особенностями. [34].

Текстура торфа как фактор, определяющий его водные свойства, водоудерживающую и фильтрационную способность, играет исключительно важную роль при искусственном обезвоживании торфа. Природные особенности

торфа во многом определяют режим и эффективность его обезвоживания. Торфяное сырье грубой структуры (волокнистая, войлочная, грубозернистая) требует меньших усилий при обезвоживании, чем торф тонкозернистый, пластичный [34].

Тип торфяной залежи, напластование отдельных генетических слоев, их структурные характеристики во многом определяют изменение водно-физических и структурно-механических свойств по глубине. В торфе при определении направления использования следует учитывать наличие макро- и микроструктуры. Древесные, травяные и моховые неразложившиеся остатки образуют легкодеформируемые структуры переплетения, степень развития которых определяется в основном уровнем биохимического распада исходных растений торфообразователей [33].

Основными характеристиками структуры торфяного сырья служат размеры пор, активная пористость и кинетическая удельная поверхность твердых частиц. При механическом обезвоживании в верховом торфе низкой степени разложения средние размеры водопроводящих пор колеблются в пределах 0,9-4,6 мкм, уменьшаясь с увеличением степени разложения. Общая пористость такого торфа в залежи составляет 95-98 %, а активная всего 53-85 %. Такое различие указывает на снижение подвижности значительного количества воды в торфе при его механическом обезвоживании [21, 64, 65].

Вязкость торфяной воды низкая и составляет около 0,0022 Па·с при 24,6 °С, что указывает на отсутствие выраженных различий по сравнению с чистой водой [78].

Торф относится к исключительно гетеропористым (неоднородно-пористым) системам. Фрагменты надмолекулярных структур заполняют ячейки порового пространства макроструктуры, образованной в основном структурами переплетения из остатков растений-торфообразователей. Отсутствие тонкодисперсных частиц и прочная волокнистая структура верхового торфа низкой степени разложения при большом содержании свободной и

рыхлосвязанной воды позволяет осуществлять механическое отжатие в шнековых прессах [33].

Особенности микро- и макроструктуры торфа, от которых зависит формирование основных его свойств, в том числе и физико-механических (прочностных, деформационных, фильтрационных), определяются главным образом соотношением между грубодисперсной частью и продуктами распада [60].

В процессе удаления влаги при влагосодержании более 6,5 кг/кг система двухфазна и имеет коагуляционную структуру [10].

На месторождениях верхового типа преобладают остатки мхов, главным образом сфагновых. Строение сфагнума таково, что среди живых клеток, содержащих протоплазму, расположены пористые клетки значительно большего размера, служащие для проведения воды по растению. Пористые, проводящие воду клетки, которые составляют большую часть сфагновых мхов, могут быть в значительной степени осушены путем прессования, и там, где они остаются неповрежденными в сыром торфе, они образуют каналы в спрессованном кеке, которые помогают вывести воду на поверхность.

Большая трудность удаления воды из торфа механическим путем связана с коллоидным характером содержащегося в нем торфяного гумуса. Коллоидные вещества отличаются чрезвычайно мелким размером частиц, из которых они состоят, и поэтому при контакте с жидкостями имеют исключительно большую поверхность контакта по отношению к своей массе. Коллоидами являются не только содержимое клеток торфообразующих растений, но и бесструктурные вещества, образующиеся в результате гумификации или разложения органического вещества [35].

Вода удерживается в коллоидах таким образом, что ее вытеснение механическим давлением становится физически невозможным, поскольку частицы, из которых они состоят, настолько малы и так сильно притягиваются к молекулам воды, что давление, прикладываемое для вытеснения молекулы воды, также уносит связанные с ними частицы. Таким образом, механическое давление

прямо пропорционально степени разложения торфа и количеству содержащегося в нем коллоидного вещества, что для практических целей означает пропорционально его ценности как сырья для переработки, количество содержащейся воды, которое может быть удалено под давлением уменьшается [30, 31].

На энергетическом принципе основана классификация форм связи влаги с материалом по Ребиндеру [35]:

- химически связанная вода;
- физико-химическая связанная вода;
- вода энтропийной связи (осмотическая);
- вода механического удерживания.

Капиллярная влага – заполняет капиллярные промежутки, образующиеся между частицами, или поры внутри самих частиц и удерживается в них силами капиллярного давления. Капиллярные силы возникают на границе соприкосновения трех фаз – твердой, жидкой и газообразной и создаются поверхностным натяжением на искривленной поверхности (мениске) жидкости в капилляре. Капиллярная влага подвижна в материале и зависит от размеров капилляров и условий смачивания водой их поверхности [17, 33].

Гравитационная влага – это свободная влага, которая заполняет все промежутки между частицами и перемещается под действием силы тяжести. Капиллярная и свободная влага удаляются механическими методами обезвоживания.

Фильтрация воды в торфяном сырье, является основой технологии механического обезвоживания. Водопроницаемость торфа преимущественно зависит от его макроструктуры. Торфяное сырье относится к легкодеформируемым системам. В естественном и не переработанном торфе деформационные явления во многом зависят от степени развития структур переплетения, придающих торфу упругость и высокоэластичность. Для определения сжимаемости торфа пользуются зависимостью между коэффициентом пористости e и нормальным напряжением σ , т.е. компрессионной

зависимостью $e - \sigma$, либо $\lambda - \sigma$, где λ – относительная деформация. Наибольшей сжимаемостью отличается торф малой степени разложения, имеющий высокую пористость до уплотнения ($e \geq 25$). Уже при давлении около 50 кПа наблюдается значительное уплотнение торфа, что в итоге приводит к снижению водопроницаемости. Под давлением $\sigma \approx 100$ кПа коэффициент пористости (e) такого торфа уменьшается почти вдвое. Основными расчетными деформационными характеристиками являются E_0 – начальный модуль сжатия, λ_{\max} и их произведение σ_k [7].

По сжимаемости все виды торфа разделены на три группы [7]:

- сильно сжимаемые – $e_0 > 20$, $E_0 < 30$ кПа и $\lambda_{\max} > 0,9$;
- средне сжимаемые – $e_0 > 12-20$, $E_0 = 30-70$ кПа и $\lambda_{\max} > 0,8-0,9$;
- слабо сжимаемые – $e_0 < 12$, $E_0 > 70$ кПа и $\lambda_{\max} < 0,8$.

При наложении небольших нагрузок происходит уплотнение рыхлой исходной структуры экскавированного торфяного сырья, приводящее к ликвидации наиболее крупных пор, и удаление воды происходит с замедлением по порам с меньшими размерами. Процесс уплотнения торфяного сырья сопровождается сжатием внутриклеточных и внутрисосудистых, а также замкнутых полостей с высвобождением воды из этих объемов, тупиковых пор и рыхлых агрегатов. В фильтрационный поток вовлекается ранее неподвижная иммобилизованная вода [8].

Под функционально-технологическими свойствами торфяного сырья понимают совокупность показателей, характеризующих уровни водосвязывающей, водопоглощающей способностей, структурно-механические свойств.

Структурно-механические (реологические) свойства характеризуют поведение торфяного сырья в условиях напряженного состояния, основными показателями которого при приложении силы являются напряжение, величина и скорость деформации. В зависимости от характера приложения усилий свойства делятся на сдвиговые (касательные напряжения), компрессионные (нормальные напряжения сжатия) и поверхностные на границе раздела с другим материалом

(нормальные и касательные). В реальных условиях шнекового прессования имеет место сочетание всех свойств, в то же время в зависимости от направленности процесса превалирует одно из них.

К основным компрессионным (объемным) свойствам торфяного сырья относятся модуль упругости (E , Па), относительная деформация (ε) [39]. При карьерном способе добычи торфяного сырья происходит его экскавация со всей глубины торфяной залежи. Ковш экскаватора срезает тонкую стружку толщиной 0,1 - 0,2 м с откоса уступа. При этом в ковше экскаватора происходит первоначальное перемешивание высокоразложившегося и слаборазложившегося торфяного сырья и его усреднение.

По утверждению профессора Горячева В.И., основываясь на закономерностях связи воды с сухим веществом и многочисленных данных экспериментальных работ (Л.С. Амарян, М.Г. Булышко, М.П. Воларович, Н.И. Гамаюнов, С.С. Корчунов, И.И. Лиштван, И.И. Могилевский, В.М. Наумович, К.Д. Озол, С.А. Цупров, Н.В. Чураев), процесс механического обезвоживания торфа может быть наиболее эффективно применен к верховому торфу малой степени разложения. Такие виды торфяного сырья, содержат большое количество слабосвязанной воды, что позволяет вести процесс обезвоживания с высокими скоростями деформации при относительно малых давлениях прессования [23].

Анализ физико-механических и размерно-массовых свойств торфяного сырья указывает на возможность применения предварительного механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья в условиях карьера. Так при экскавации торфа на всю глубину залежи происходит его первоначальное перемешивание. Тем самым происходит усреднение между грубодисперсной частью и продуктами распада. Что позволяет достичь эффекта физического кондиционера в усредненной торфяной массе при механическом отжатии сырья, позволяя интенсифицировать процесс влагоотдачи.

Полная влагоемкость торфа определяется также его пористой структурой. В таблице 1.1 приведены общие данные по влагоемкости торфа [33].

Таблица 1.1 – Качественное сравнение процессов обезвоживания

Тип торфа	Степень разложения, %	Полная влагоемкость, %
Верховой	2-55	840-3000
Переходный	5-50	775-1950
Низинный	15-55	640-1810

Волокнистая структура верхового торфа низкой степени разложения действует как скелетообразователь в массе торфяного усредненного сырья, выступая в качестве физического кондиционера (рисунок 1.3) при механическом обезвоживании в шнековых прессах. С инженерной точки зрения, чем прочнее волокна и чем больше их количество, тем более армирован торф [103]. Таким образом, перемешивание слоев торфяной залежи при вертикальной экскавации создают предпосылки для лучших условий обезвоживания в шнековом прессе в полевых условиях.

Основными характеристиками структуры торфяного сырья служат размеры пор, активная пористость и кинетическая удельная поверхность твердых частиц. По данным [21, 65] при сжатии в верховом торфе низкой степени разложения средние размеры водопроводящих пор колеблются в пределах 0,9-4,6 мкм, уменьшаясь с увеличением степени разложения.

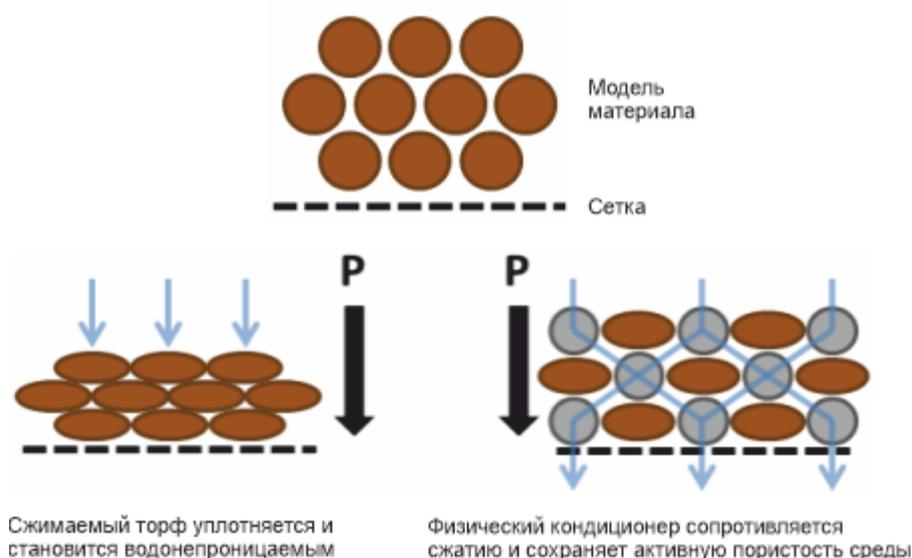


Рисунок 1.3 – Схема физического кондиционера в торфяном сырье

Такое различие указывает на значительно меньшую подвижность значительного количества воды в торфе по сравнению с другими гидрофобными материалами, в которых почти вся влага является подвижной [12, 64].

Общая пористость торфа включает относительно крупные межчастичные поры, способные активно пропускать воду, а также относительно мелкие замкнутые и тупиковые поры, образованные остатками растительных клеток [95, 102]. Общая пористость торфа достигает 0,97 при активной пористости до 0,74 [35]. Сканирующая электронная микроскопия образцов торфа выявляет (I) открытые и сообщающиеся макропоры, (II) закрытые или частично закрытые ячейки и (III) тупиковые или изолированные поровые пространства (рисунок 1.4) [89].

Торф является материалом с высокой сжимаемостью [98, 118, 119]. При давлении 100–200 кПа осадка торфа может составлять 30–50 % первоначальной высоты слоя [37]. Сжатие торфа от начальной толщины 100 мм может составлять 8–48 мм [89].

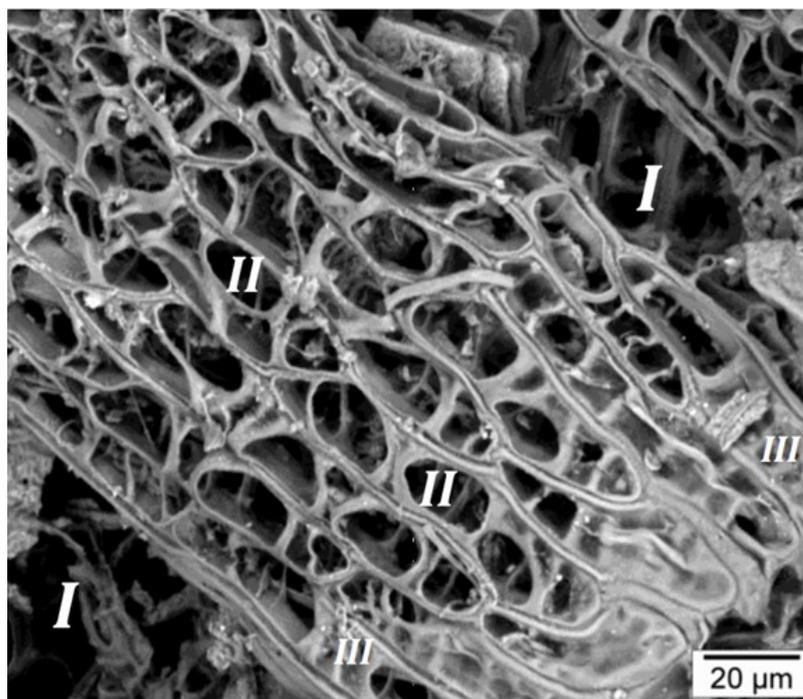


Рисунок 1.4 – Изображения структуры пор в сфагновом торфе: (I) открытые и соединенные макропоры, (II) закрытые или частично закрытые ячейки и (III) тупиковые или изолированные поровые пространства

Торфяная залежь представляет собой как гетерогенные, так и анизотропные пористые среды. Индивидуальные и комбинированные эффекты гетерогенности и анизотропии гидравлической проводимости сильно влияют на движение воды в торфяных грунтах [72].

1.3 Анализ процессов механического обезвоживания органогенных видов сырья

Шнековые прессы успешно применяются в водоподготовке и очистке сточных вод, а также в сельском хозяйстве, бумажной промышленности. Процессы механического обезвоживания применялись как к хвостам, так и к ультратонкому продукту как в угольной, так и в металлургической промышленности [88, 104]. Многие из этих технологий были успешно применены для фильтрации концентратов, добываемых на рудниках, и осадков гидрометаллургических заводов [56].

Механические способы удаления влаги требуют меньшей затраты энергии, чем тепловая сушка. Поэтому при наличии в материале слабосвязанной воды тепловой сушке должно предшествовать механическое обезвоживание. Теоретический анализ по влагоудалению из капиллярно-пористых материалов показал, что менее энергоемким способом является механическое обезвоживание, где большое значение оказывают давление в скелете слоя материала и воды, высота слоя [10].

Осадки сточных вод классически обезвоживаются с помощью центрифуг, фильтр-прессов, ленточных фильтров или шнековых прессов. В любом случае эффективность процесса сильно зависит от свойств шлама и тесно связана с содержанием органики, состоянием воды и реологическими свойствами [122]. Существует ряд процессов механического обезвоживания, которые обеспечивают снижение содержания влаги в кеке, необходимое для выполнения условий, требуемых для сухой укладки сырья в отвал. Эти системы обезвоживания включают в себя фильтрацию под давлением с диафрагменным прессом, центрифуги и фильтрацию в шнековом прессе (таблица 1.2) [47, 141].

Таблица 1.2 – Качественное сравнение процессов обезвоживания [47, 141]

Оборудование	Производительность	Концентрация твердых веществ в продукте, мас./мас. %	Занимаемая площадь	Требования к вспомогательному оборудованию	Потребность в операторе	Капитальные затраты	Операционные расходы
Центрифуга с твердой чашей	низкая	55-65 %	средняя	низкие	средняя	высокие	высокие
Вакуумный ленточный фильтр	средняя	25-35 %	средняя-высокая	высокие	низкая	высокие	средние-высокие
Ленточный пресс-фильтр	очень низкая	55-70 %	очень высокая	очень высокие	очень высокие	высокие	очень высокие
Шнековый пресс	низкая-средняя	75-85 %	средняя	низкие	низкая	средние	средние

Основные характеристики шнекового пресса:

- непрерывный процесс;
- пропускная способность от низкой до средней;
- низкое энергопотребление;
- низкая стоимость обслуживания;
- умеренная влажность кека;
- низкая потребность во вмешательстве оператора.

Процесс механического обезвоживания является частью многоступенчатого процесса. Поэтому его не следует рассматривать в отрыве от остальных процессов выемки, обработки, обезвоживания, транспортирования, укладки в отвал [141, 142]. Если в экскавированном сырье присутствует значительное количество воды, это приводит к значительному увеличению стоимости транспортирования и естественной сушки.

Шнековый пресс представляет собой устройство непрерывного обезвоживания. Шнек окружен перфорированным экраном, прикрепленным к основной раме шнекового пресса. Сырье поступает в шнековый пресс сверху из бункера-накопителя. Фильтрат проходит через перфорированный экран и собирается в поддоне. Шнек может быть оснащен сменным скребком,

очищающим внутреннюю поверхность перфорированного экрана. Моющее устройство, которое включает в себя несколько промывочных форсунок, находится в корпусе для регулярного промывания сетчатого фильтра технической водой. Во время промывки сетки фильтра процесс обезвоживания не прерывается. Обезвоженный материал выгружается в конце шнекового пресса, где находится прижимной конус, который используется для оказания противодействия на разгрузку кека. Схема шнекового пресса представлена на рисунке 1.5.

Перфорированный экран шнекового пресса разделен на три зоны:

- первая зона предназначена для отвода начальной части фильтрата;
- вторая зона, зона фильтрации, имеет меньшие отверстия;
- зона прессования, где происходит выдавливание кека, оборудована еще более мелкими отверстиями.

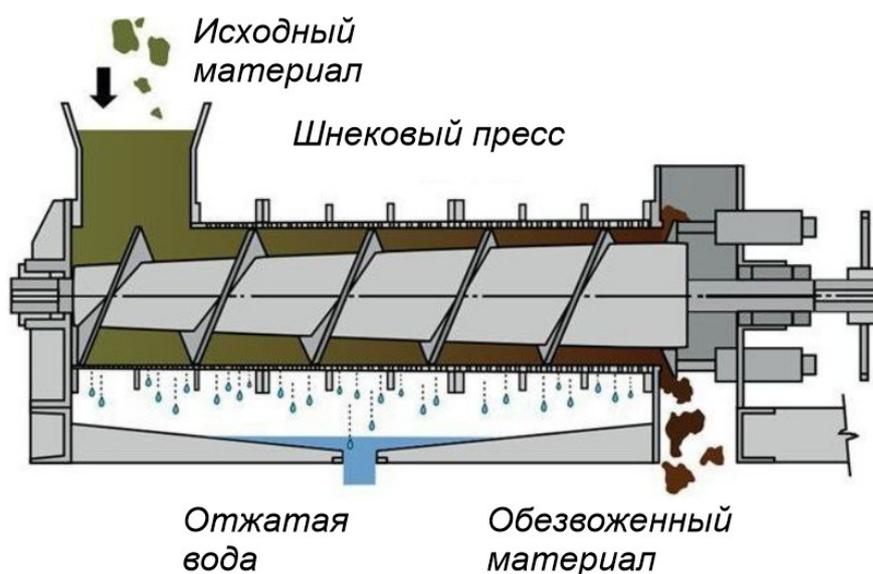


Рисунок 1.5 – Схема шнекового пресса

Наиболее широкие исследования механического обезвоживания торфа проводились на вальцовых, кольцевых и гусеничных (ленточных) прессах. Опыты показали, что выдержка отжимаемого торфа под давлением при постоянном объеме не имеет практического значения [23]. В настоящее время все большее применение находят presses непрерывного действия, к которым относятся шнековые. Давление в шнековом прессе создается за счет геометрической компрессии, т.е. разности объемов, заключенных между соседними витками

шнека. Жидкость непрерывно удаляется через отверстия в кожухе пресса, а обезвоженный материал выходит через кольцевой регулируемый зазор в конце кожуха шнекового пресса. Предельно допустимое давление зависит от многих факторов, характеризующих свойства обезвоживаемого материала, и устанавливается экспериментально. На практике давление обезвоживания составляет 0,2-1,0 МПа.

Структура и конструктивное исполнение шнековых машин соответствуют технологическим задачам. В области процессов разделения материалов в ряде отраслей промышленности (горное дело, пищевая и химическая промышленность, промышленность пластических масс, сельское хозяйство) находят широкое применение отжимные шнековые прессы для отжима жидкостей [19].

В химической промышленности интенсивное применение отжимных шнековых машин отслеживается с 1930 г. Meskat W. теоретически и экспериментально исследовал отдельные фазы рабочего процесса отжима, а также реологические и структурные свойства алкалицеллюлозы на различных стадиях процесса. Был разработан шнековый пресс OZ-200 со шнеком диаметром 400 мм и суточной производительностью 35 т в расчете 30 % целлюлозы из щелочной целлюлозной суспензии при выходе около 10 т сухого клеточного вещества [106]. Самостоятельной областью применения шнековых прессов стал отжим воды из влажного синтетического каучука. При этом влажность каучуковой крошки понижается в зависимости от условий процесса обезвоживания до 8-12 % при исходной влажности сырья 50-80 % [86].

За последние несколько лет технология механического обезвоживания была объектом исследования ученых из Австралии и Германии [73, 80, 88, 130, 137, 140].

Исследование механического обезвоживания дигестата (массы влажностью выше 85 %, остающейся после анаэробного сбраживания биоразлагаемого сырья) позволило получить информацию о динамике изменения влажности и потери его массы в зависимости от приложенного давления в диапазоне 0,58-2,91 МПа. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что эффективный процесс

обезвоживания исследуемого дигестата происходит при рабочем давлении до 1,74 МПа независимо от размеров перфорации экрана. Дальнейшее повышение давления не вызывает значительного снижения влажности органогенного материала [92].

По сравнению с другими типами процессов механического обезвоживания преимуществами и ключевыми характеристиками шнековых прессов являются:

- производительность от средней до высокой, примерно 50 т/ч, величина которой зависит от требуемой концентрации твердых частиц на выходе. При низкой концентрации твердых частиц, можно достичь более высокой производительности;

- низкая скорость вращения – отсутствие динамических нагрузок;
- небольшое количество медленно движущихся частей;
- низкая стоимость установки и обслуживания;
- низкий расход промывочной воды;
- непрерывный процесс;
- низкое энергопотребление (низкий углеродный след);
- стабильность функционирования;
- высокая гидравлическая мощность по сравнению с другими типами фильтрации;
- небольшая занимаемая площадь (размер оборудования).

Технология обезвоживания материалов в шнековом прессе представляет инновационный подход к обогащению материалов и минимизации воздействия отходов на окружающую среду. Принципы технологии были известны в течение значительного промежутка времени в ряде отраслей, таких как очистка осадков сточных вод, в сельском хозяйстве, в пищевой, бумажной и химической промышленности.

При экскаваторном методе разработка залежи торфа ведется в вертикальном направлении, практически на всю его глубину. Снижается пожароопасность и практически сводится к нулю запыленность атмосферного воздуха при добыче торфяного сырья. Кроме того, повышается коэффициент извлечения торфа из

залежи до 0,9 по сравнению с существующим 0,5 для фрезерного способа добычи торфа. Технология сокращает сроки ввода площадей в эксплуатацию, поскольку исключает трудоемкие и длительные сроки предварительного и эксплуатационного осушения, проведение широкого комплекса болотно-подготовительных работ [16].

Практика добычи торфяного сырья в течение многих лет показала, что уменьшение влагосодержания торфа на всех стадиях его добычи и переработки возможно путем фильтрации при осушении месторождения, естественной сушки в полевых условиях, механического обезвоживания и искусственной сушки в специальных установках. Современные технологии производства торфяной продукции связаны главным образом с естественной сушкой в полевых условиях. Вследствие этого добыча торфа носит сезонный характер. Поэтому многими учеными и инженерами приложено немало усилий для создания рентабельного и надежного способа искусственного обезвоживания торфа.

Специфической особенностью торфа является его способность удерживать большое количество влаги. В естественных условиях торфяной залежи верхового типа на каждую часть сухого вещества торфа приходится до двенадцати частей воды ($w = 92 \%$). Поэтому основные технологические процессы всех способов торфяного производства связаны с обезвоживанием торфа различными методами. Наиболее простым методом может быть механический отжим влаги из торфяного сырья при его экскаваторной добыче [61].

В основе всех предложений по искусственному обезвоживанию лежит способ механического отжима влаги из торфа в специальных прессовых установках.

Идея о том, что процесс обезвоживания влажного торфяного сырья можно значительно ускорить путем вытеснения значительной части содержащейся в нем воды под действием механического давления, была широко популярна и привела к многочисленным экспериментальным исследованиям и созданию крупномасштабных заводов, чтобы избежать проблем, связанных с полевой сушкой торфа. Хотя в лабораторных экспериментах были получены, по-

видимому, многообещающие результаты, в коммерческом производстве не было достигнуто успеха.

Были опробованы все виды прессов – валковые, фильтр-прессы, гидравлические поршневые прессы различных типов; и давление применялось разными способами: режим постепенного увеличения давления, прерывистое давление и очень высокое давление в течение коротких или длительных периодов времени.

С целью интенсификации процесса отжима влаги применялись различные способы воздействия на материал и методы изменения его структурных свойств: дренирование, обработка электролитами, мокрое обугливание, замораживание, электроосмос. Но многие из них, ввиду технических трудностей, сложности технологических процессов и большой энергоемкости оказались нерентабельными и не были использованы на практике.

Ряд первых экспериментов в этом направлении был проведен профессором Hinchley [97] в 1922 году на заводе Armstrong Whitworth Co. Используемый пресс был спроектирован после нескольких лет экспериментов как небольшая часть более крупного коммерческого прессы из шести камер для приема шихты 1,5 т за операцию. Используя высокое давление до 5,5 МПа и прессование в самых лучших условиях, процентное содержание воды в торфе, который был подвергнут предварительному прессованию для снижения содержания воды в нем до 80 %, было лишь дополнительно снижено в среднем до около 75 %.

В течение ряда лет в Дюссельдорфе (Германия) проводились сложные эксперименты по отжиманию воды из торфяного сырья [96].

Наиболее заметные усилия в этом направлении в Канаде были предприняты на месторождении Киркфилд в 1900-1901 гг. компанией Trent Valley Peat Fuel [79]. Были использованы гидравлические прессы, которые были специально построены для этой цели и были способны оказывать давление в 28 МПа. Стоимость процесса была совершенно несоизмерима небольшому количеству обработанного торфа и низкой эффективности обезвоживания.

Серия экспериментов по обезвоживанию торфяного сырья под давлением была проведена в Мюнхене в 1920 г. (Ханс Ф. Гросс). Торфяное сырье, использованное в этих экспериментах, было низинного, верхового и хорошо гумифицированного переходного типа. Когда торфяное сырье последнего типа, содержащее 90,7 % воды, подвергли в течение 5 минут давлению 16,55 МПа, содержание воды уменьшилось только до 81 % [94]. Результаты испытаний представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Влажность обезвоженного торфяного сырья после воздействия давления в течение 5 мин.

Тип торфа	Исходная влажность, %	Давление, МПа					
		1,2	2,1	3,1	6,9	10,3	16,6
Верховой	90,8	85,1	83,2	81,8	80,5	78,6	76,0
Верховой	88,6	83,5	81,9	79,2	77,2	75,8	74,9
Верховой	89,3	84,8	83,6	80,8	79,2	77,8	76,8
Низинный	89,5	87,1	85,8	83,5	81,6	80,0	78,0
Низинный	88,7	86,5	85,3	82,8	80,9	79,7	78,6
Переходный	90,7	87,9	87,6	86,6	83,9	82,8	81,0

Многочисленные экспериментальные данные большого количества исследователей показывают, что около 80 % воды, содержащейся в естественном торфяном сырье, можно удалить прессованием при давлениях до 2,0-2,5 МПа при невысоких скоростях деформации и удельных нагрузках фильтра менее 0,02 кПа.

Целенаправленное изучение процесса обезвоживания торфа начале прошлого столетия проводил шведский исследователь Свен Оден, который впервые ввел понятие удельной загрузки фильтра (толщина отжимаемого слоя) и установил ее влияние на процесс механического обезвоживания торфяного сырья. Им было показано, что основное количество воды при отжиге удаляется в первые две минуты. С приложением давлений до 2,0 МПа возможно обезвоживание торфяного сырья от влажности 90 % до 80 % [48, 113].

Значительный объем исследований и опытных работ по обезвоживанию торфа был выполнен при разработке способа «Гидроторф» [20]. По этому способу

обезвоживание торфа производилось от его естественной влажности 90 % путем разбавления водой до влажности 95 % и подачи полученной гидромассы на завод. На заводе гидромасса коагулировалась раствором окиси железа и обезвоживалась сначала на сетчатом элеваторе с удалением до 25 % воды, а затем на вакуумных фильтрах до влажности 86 %. После этого масса измельчалась и опылялась сухим торфяным порошком в количестве 10 % от массы поступившего торфяного сырья. После этого на специальных прессах происходило механическое обезвоживание торфа до влажности 70-75 % с окончательной досушкой в сушилках до требуемой влажности. Сложность и высокая энергоемкость процесса не позволили внедрить его в промышленность.

В начале прошлого века в Шотландии было построено несколько установок искусственного обезвоживания по способу Экенберга (мокрое обугливание). Здесь торфяная гидромасса нагревалась до температуры 190-200 °С, затем торф отжимался в фильтр-прессах до влажности 70 % и после тепловой досушки брикетировался.

Изучением процесса мокрого обугливания торфа работали и многие советские ученые и инженеры. Было установлено, что при термообработке торф претерпевает химические превращения и физические изменения, облегчающие процесс отжима воды. В результате был разработан термомеханический способ обезвоживания торфа, по которому в г. Бокситогорск Ленинградской области длительное время работал завод искусственного обезвоживания торфа. На заводе торфяное сырье влажностью 70-75 % подвергалось термической обработке в автоклавах под давлением 10-12 атмосфер в течение 20-30 минут при температуре 175-185 °С. Затем пропаренный торф обезвоживался в многокамерных гидравлических прессах до влажности примерно 40 % [23].

Процесс механического обезвоживания торфа с присадкой твердых сухих порошков исследовался рядом ученых. Наиболее полное и глубокое исследование этого процесса выполнено профессором В.М. Наумовичем. Наибольший эффект по количеству отжатой воды достигается в случае получения влажных окатышей, покрытых дренирующим сухим порошком [46].

Ряд исследователей изучал обезвоживание торфа методом ступенчатого отжима. В таблице 1.4 приведены данные по обезвоживанию верхового торфа степенью разложения 30 % с начальной влажностью 91 % при продолжительности одного отжима 1 минута, под давлением 2,5 МПа.

Таблица 1.4 – Результаты ступенчатого обезвоживания торфа

Влажность, %	Условия	Количество стадий отжима			
		5	10	15	20
Конечная влажность, %	С промежуточным дроблением	61,0	53,0	50,0	-
	Без дробления	77,2	67,5	61,1	60,0

Наряду с химическими воздействиями на торф для улучшения его водоотдачи, применяли и электрофизические воздействия для интенсификации процесса обезвоживания. Работами Московского торфяного института в 1949 г. было установлено, что при отжиме торфа степенью разложения 30 % с исходной влажностью около 74 % за время прессования в течение 10 минут под давлением 10 МПа в слое с удельной загрузкой 10 кг/м² и под воздействием токов высокой частоты в течение пяти минут удалось достичь влажности торфа 40-45 %. При этом торф нагревался до температуры 200 °С, что также способствовало обезвоживанию торфа за счет термической обработки.

Увеличение нагрузки до 10 МПа и более оказывает слабое влияние на эффективность процесса механического обезвоживания торфа, а при высоких скоростях деформации и удельных нагрузках фильтра свыше 20 кг/м² наблюдается даже отрицательный результат. Только с ростом продолжительности отжима возрастает выход жидкости [11].

Приложение высоких давлений с большими скоростями деформации способствует быстрому образованию у фильтра сухих слоев торфа. Это приводит к защемлению воздуха и воды внутри образца и прекращению фильтрации (рисунок 1.6) [22].

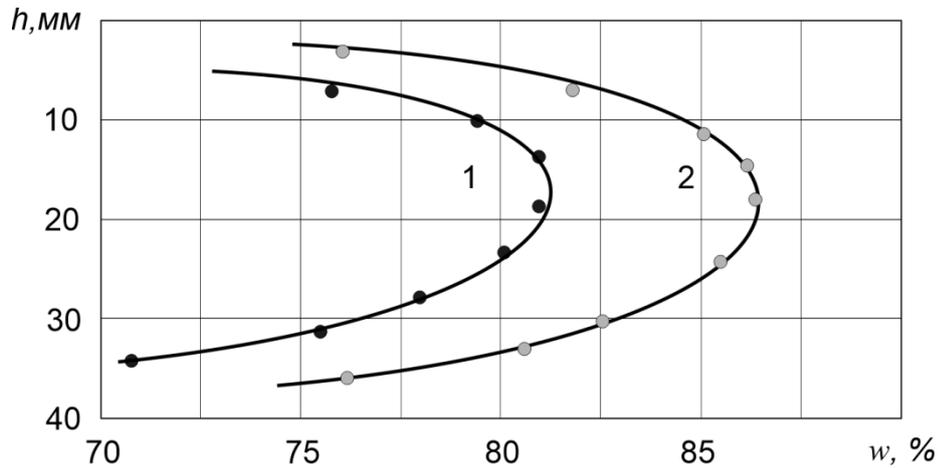


Рисунок 1.6 – Распределение влаги по высоте слоя торфа при отжиме (двухсторонняя фильтрация) $P = 10$ МПа, $T = 120$ минут: 1 – комплексный верховой торф, $R = 15-20$ %, $w_{нач} = 90,5$ %; 2 – магелланикум торф, $R = 25$ %, $w_{нач} = 90,8$ %

В процессе механического обезвоживания торфа в ленточном прессе при увеличении толщины слоя торфа (расстояния между лентами) до $h = 17$ мм удельная загрузка поверхности фильтра (q) составляет $2,02$ кг/м², при $h = 20$ мм, $q = 2,36$ кг/м². При этом отвод воды из торфа уменьшается, потому что слои торфа, непосредственно прилегающие к фильтрующей сетке, уплотняются и резко снижается их фильтрационная способность [10].

Это обусловлено составом многокомпонентной структуры торфяной смеси. Торф малой степени разложения имеет меньшую плотность, от которой зависит модуль упругости и пористость влагопроводящих каналов, а также сжимаемость материала при уплотнении. Степень обезвоживания с течением времени уменьшается и наиболее эффективно происходит в первые 30 с. Далее процесс замедляется из-за значительного уменьшения водоотводящих каналов, поверхности раздела фаз [10].

Кинетика непрерывного обезвоживания в шнековом прессе определяется режимом уплотнения, т.е. толщиной слоя материала, его физико-механическими свойствами и соотношением между твердой и жидкой фазами в торфяном сырье [10].

Давление, возникающее в жидкости, обуславливает ее фильтрацию через материал и уменьшается от максимального значения в начале процесса до нуля в

конце уплотнения. Давление в шнеке нарастает во время отжима и зависит от количества жидкости, находящейся в торфе [10].

Анализ проведенных исследований показывает на возможность механического обезвоживания торфа в тонких слоях (до 30 кг/м²) от влажности 95-98 % до влажности 55-60 % за время 10 с и при создании вакуума 53-93 кПа.

Установлено, что вне зависимости от типа торфа не удастся достичь содержания сухих веществ в продукте (35-40 % масс.) при достаточной мощности без применения химических реагентов [69].

Конечным результатом многолетних усилий было стремление продемонстрировать, что содержание воды в исходном торфяном сырье не может быть экономически снижено за счет приложения одного лишь давления менее чем на 75% и, что приложение давления в любой форме для дальнейшего снижения содержания воды требует длительного времени и высоких энергетических затрат, что процесс не может быть использован в коммерческих целях.

Таким образом, исследования по искусственному обезвоживанию торфа проводились в заводских условиях на стационарных прессовых установках. При организации механического обезвоживания торфяного сырья непосредственно в условиях карьера подобные способы являются неприемлемыми по причинам высокой энергоемкости и материалоемкости процесса.

Анализ известных технических решений свидетельствует о трудностях создания высокопроизводительных и эффективных машин для механического обезвоживания торфяного сырья в условиях карьера. От их решения во многом зависят перспективы промышленного применения искусственного обезвоживания торфяного сырья в крупномасштабных производствах для снижения затрат на транспортирование торфяного сырья.

В этом исследовании были проанализированы методы механического обезвоживания органогенных материалов и рассмотрены различные альтернативы оборудования. Для непрерывной работы механического обезвоживания применение шнекового пресса оценивается как наиболее подходящее решение.

Принцип работы шнекового пресса основан на вращении конического шнекового вала, установленного внутри цилиндрического корпуса. Шнековый вал представляет собой одиночный силовой винт, диаметр вала которого увеличивается от входа к выходу, а внешний диаметр шнека остается постоянным. Торфяное сырье попадает в систему в точке, где высота лопастей шнека максимальна. Затем оно проталкивается вращающимся шнеком и поступает внутрь корпуса.

Отжатая вода выходит из зоны высокого давления и стекает через сетчатый экран, который расположен по всей длине корпуса шнека. Кек продавливается в конец корпуса и вала шнека. Толщина сжимаемого материала регулируется осевым перемещением вала шнека с увеличением давления межвитковом пространстве.

В ходе экспериментов замечено, что на коэффициент отжатия воды влияют четыре основных параметра. Это геометрия межвиткового пространства, угол конусности вала шнека, частота вращения [116]. Предыдущие теоретические и экспериментальные исследования механического обезвоживания органогенных материалов внесли значительный вклад в понимание основ процесса. Математическая модель механического обезвоживания в процессе сжатия требует определенных допущений в зависимости от реальных условий применения.

Ohlson [114] сосредоточился на оптимизации таких параметров, как давление и содержание влаги в материале, чтобы оптимизировать степень извлечения жидкости. Сингх и Баргейл [71] изучали влияние влаги на коэффициент извлечения влаги. Одним из преимуществ высокой исходной влажности является снижение удельного энергопотребления в процессе сжатия.

Омобувайо и др. [115] разработали теорию шнекового прессования, предполагая, что поток сжатого материала ведет себя как жидкость с переменной плотностью в кольцевом пространстве. В этом предположении жидкость принимается как неньютоновская, и к ней применяется модель Оствальда-де Ваале, называемая уравнением степенного закона [75]. Используя предположения и соответствующие уравнения, изучается упрощенная математическая модель

вместо реальной физической системы. Результаты были определены с отклонением от 16 % до 27 % между предсказанными и экспериментальными данными. Отклонения в результатах в основном зависят от упрощений математической модели.

Согласно [101, 112], теория, лежащая в основе математической модели сжатия материала при обезвоживании, зависит от комбинации трех основных теорий:

- уравнение Хагена-Пуазеля для течения жидкости в трубах;
- теория Терцаги для консолидации насыщенных грунтов;
- закон Дарси о течении жидкости через пористую среду для описания потока воды через спрессованный материал.

Они объединили эти уравнения и вывели уравнение давления, записанное через время и высоту, с определенными граничными условиями. Было получено хорошее соответствие между экспериментальными и теоретическими данными с минимальной ошибкой, связанной с эмпирическими данными и условиями окружающей среды. Экспериментальные результаты были ближе к теоретическим результатам при приложении постоянной нагрузки и менее удовлетворительными при приложении линейно возрастающей нагрузки к материалу. Скорость извлечения жидкости зависит от проницаемости среды и свойств уплотнения материала при прочих постоянных условиях [81].

Теоретические уравнения, лежащие в основе проницаемости, зависят от закона Дарси о течении через пористую среду, где скорость потока жидкости пропорциональна площади дренирования, коэффициенту проницаемости и гидравлическому градиенту. Другим определяющим фактором, ограничивающим скорость извлечения жидкости, является консолидация, которая представляет собой приспособление частиц грунта в ответ на сжимающее напряжение, что приводит к снижению активной пористости материала.

Во время уплотнения материала ячейки, содержащие жидкости и газы, деформируются и в конечном итоге разрываются, высвобождая жидкость, которая течет через осадок и, в конечном итоге, через фильтрующую среду. Деформация

этих ячеек, их разрыв и протекание жидкости через материал определяются двумя различными перепадами давления, которые связаны с твердой и жидкой фазами и обозначаются как Δp_s и Δp_f соответственно [76].

Общее падение давления в системе может быть получено путем сложения этих удельных падений давления (1.1):

$$\Delta p_T = \Delta p_s + \Delta p_f. \quad (1.1)$$

Основываясь на разработанной Терцаги [59] концептуальной визуализации уплотнения грунта и потока жидкости во время одноосного сжатия, Schwartzberg [125] объяснил взаимосвязь между этими перепадами давления, создаваемыми приложенной силой универсальной испытательной машины к слою влагонасыщенного твердого вещества. Насыщенное жидкостью твердое тело представлено серией перфорированных пластин, разделенных слоями жидкости (представляющими жидкую фазу), которые содержат параллельные пружины, представляющие твердую фазу материала (рисунок 1.7).

Пластины модели перфорированы небольшими круглыми каналами постоянного диаметра, сообщающимися со слоями жидкости. При приложении силы первоначально они поддерживаются жидкостью, и создается перепад давления Δp_f , заставляющий жидкость течь через каналы в пластинах из слоя.

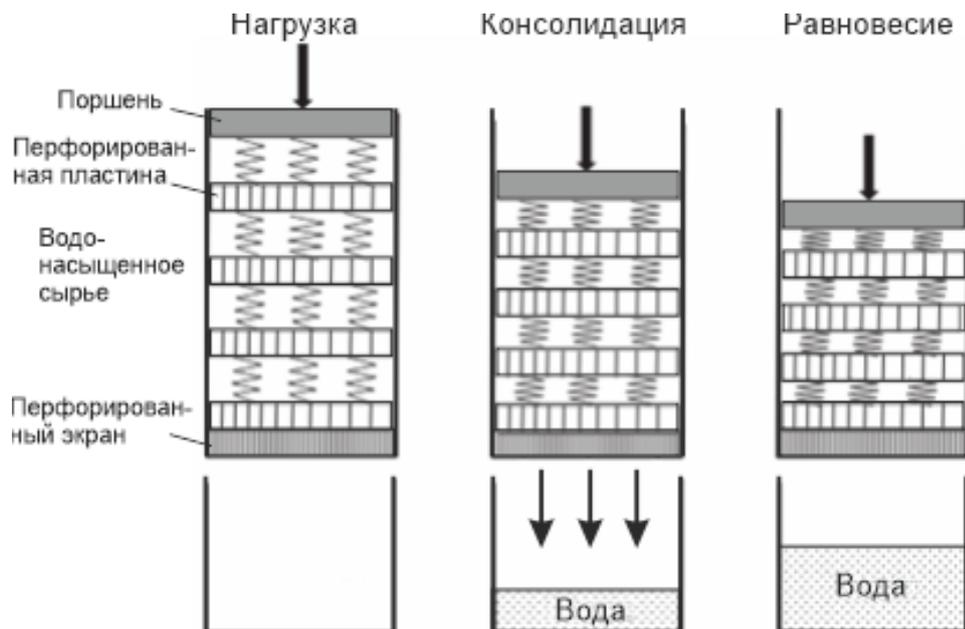


Рисунок 1.7 – Схематическая иллюстрация модели Терцаги-Пека для описания консолидации клеточных материалов [125]

Пока материал насыщен, противодействие, создаваемое пружинами, не меняется $\Delta p_s = 0$ и $\Delta p_T = \Delta p_f$. Объем материала будет уменьшаться за счет сокращения объема пор, занятых водой, также будет уменьшаться коэффициент пористости. Когда часть жидкости покидает пространство между пластинами, дальнейшее увеличение силы сжатия начинает деформировать пружины, создавая перепад давления Δp_s , который уравнивает полное давление, т.е. в любой момент после начала течения жидкости происходит непрерывное увеличение Δp_s и наблюдаются уменьшения Δp_f , которые предсказываются уравнением 1. Когда вся жидкость, содержащаяся в твердом теле, выделена, $\Delta p_f = 0$ полное давление определяется деформацией пружин, таким образом, $\Delta p_T = \Delta p_s$ [76].

Уравнение 1.1 применимо ко всем частям материала, но локальные давления как в твердой p_s , так и в жидкой p_f фазах изменяются во время течения жидкости и уплотнения твердых частиц вследствие приложения внешней нагрузки; и в любой момент $p_T = p_s + p_f$. Важно отметить, что давления в жидкостях изотропны, так локальное p_f в межчастичной жидкости действует равномерно на поверхности частиц. Наоборот, напряжения в твердом теле не изотропны и зависят от направления. В частности, p_s представляет собой осевую составляющую напряжения, действующего на твердые частицы, присутствующие в кеке, с поперечной составляющей $p_h = Bp_s$, где B определяется как аналог коэффициента Пуассона [124]. Так как твердые частицы (1.2) в кеке занимают объем $(1 - \varepsilon')$, то:

$$1 - \varepsilon' = \frac{V_s}{V_{\text{общ}}} \approx \frac{A_s}{A_{\text{общ}}}, \quad (1.2)$$

где V_s – объем твердых частиц материала,

$V_{\text{общ}}$ – общий объем материала.

Осевое давление, скорректированное на площадь твердых частиц A_s , или истинное осевое напряжение (1.3):

$$\frac{p_s A_{\text{общ}}}{A_s} = \frac{p_s}{1 - \varepsilon'} \quad (1.3)$$

где ε' – объем твердого вещества в единице объема [32].

Локальные истинные осевые напряжения действуют локально на частицы, и когда поверхности частиц давят друг на друга, истинное осевое напряжение больше, чем $p_s/(1 - \varepsilon')$. Компонент осевого напряжения p_s изменяется, когда материал сжимается, и его объем уменьшается в соответствии с нелинейной тенденцией, которую можно представить следующим уравнением (1.4) [125]:

$$\ln \frac{p_s}{p_{ref}} = k(V_{ref} - V). \quad (1.4)$$

В отличие от предыдущих исследований, в которых использовались постоянные средние свойства, Bargale и др. [70, 71] разработали математическую модель, используя экспериментально измеренные изменяющиеся во времени свойства материала, такие как коэффициент проницаемости и коэффициент уплотнения.

Проведен анализ исследований по искусственному обезвоживанию, а также методов интенсификации. Все известные работы проводились в заводских условиях на стационарных прессовых установках. И предполагали значительные затраты, по энергоемкости и металлоемкости процесса. Так, для снижения влажности комплексного верхового торфа ($R = 15-20 \%$) с $w_{нач} = 90,5 \%$ до $w_{кон} = 65 \%$, для магелланикум торфа ($R = 25 \%$) с $w_{нач} = 90,8 \%$ до $w_{кон} = 75 \%$ требуется приложить усилия в 10 МПа (P), в течении $T = 120$ мин.

Анализ проведенных исследований показывает на возможность предварительного механического обезвоживания торфа в тонких слоях (до 30 кг/м^2) от исходной влажности экскавированного торфяного сырья 90 % до влажности 83 % в условиях карьера. Для непрерывной работы механического обезвоживания применение шнекового пресса оценивается как наиболее подходящее решение.

Необходимы новые решения для обезвоживания сырья, поскольку важность обезвоживания и обращения с отходами в горнодобывающем секторе значительно возросла. В результате аналитического обзора по вопросам обезвоживания торфяного сырья и проведенных исследований установлено, что основными факторами процесса механического обезвоживания прессованием являются:

удельная загрузка фильтрующей поверхности (высота обезвоживаемого слоя), давление прессования. Исследования и сравнение технологии шнековых прессов с другими технологиями обезвоживания сырья показали, что шнековые прессы могут быть перспективной технологией обезвоживания экскавированного торфяного сырья.

1.4 Анализ оборудования, применяемого для механического обезвоживания органогенных видов сырья

Принцип выбора параметров машин, исходя из физико-механических свойств и характеристик торфяной торфяного сырья, является основным при формировании структуры оборудования для механического обезвоживания. Конструктивные, кинематические и энергетические параметры, а также режимы эксплуатации рабочего органа машины выбираются исходя из размерно-массовых и прочностных характеристик торфяного сырья.

Среди основных направлений применения шнековых прессов следует выделить: отжим масел из семян масличных культур, сушка влажного синтетического каучука или суспензий полимеров, подготовка и обработка взвесей древесных волокон в бумажной промышленности, обезвоживание осадков сточных вод [120, 124]. В этих устройствах материал продавливается через геометрическое сужение, по крайней мере, с одной перфорированной стенкой, через которую вытесняется жидкость, сохраняя при этом большинство твердых компонентов.

Возможности современного шнекового оборудования позволяют перерабатывать сырье с оттоком жидкой фазы, обусловленного непрерывностью технологического процесса, низкими удельными расходами энергии, небольшими капитальными затратами, малыми производственными мощностями, компактностью, универсальностью, высокой степенью механизации и автоматизации. В Японии отмечена устойчивая тенденция роста доли шнековых

прессов среди оборудования для обезвоживания осадков сточных вод (рисунок 1.8, 1.9) при оценке сравнительной эффективности оборудования [132].

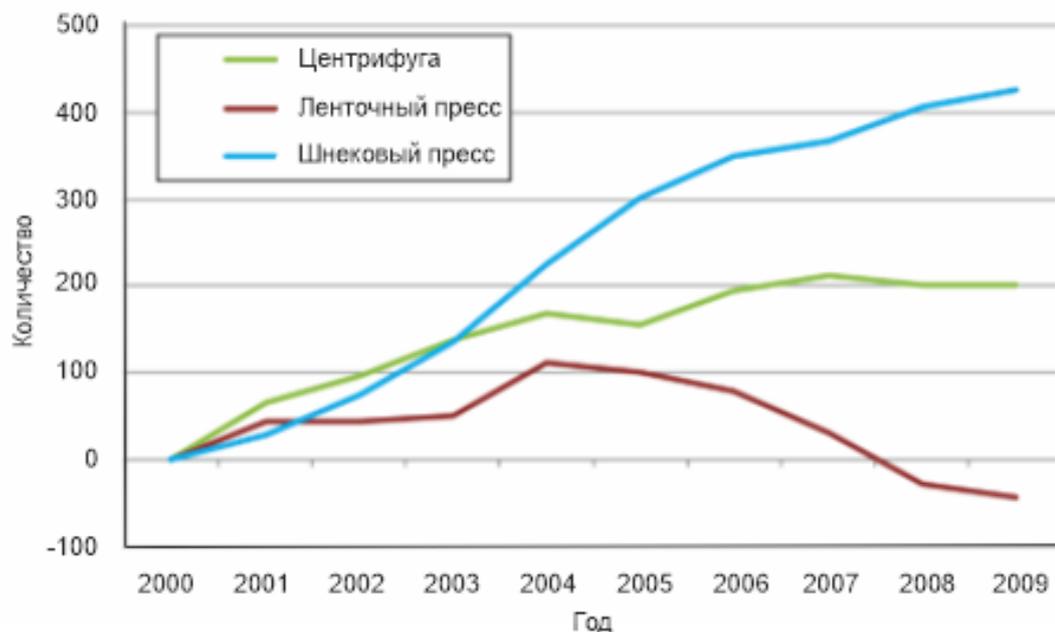


Рисунок 1.8 – Тенденция установки шнековых прессов среди оборудования для обезвоживания осадков сточных вод Японии

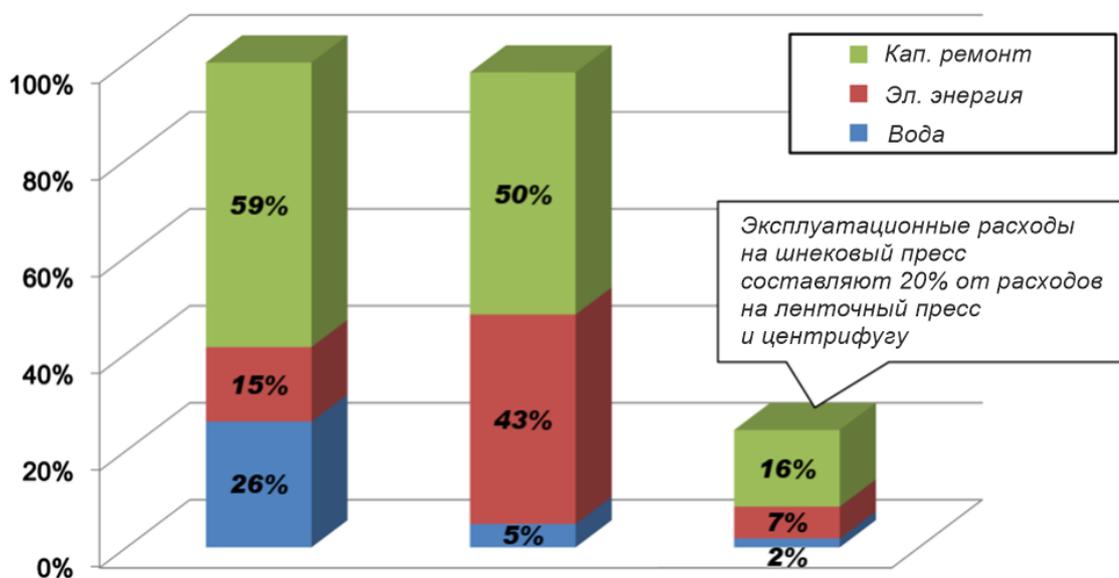


Рисунок 1.9 – Эффективность оборудования для обезвоживания осадков сточных вод Японии (200 000 м³/сут.)

Компания Press Technology & Mfg., Inc. (PT&M) (USA) разработала и установила шнековые прессы для целлюлозно-бумажной, пищевой

промышленности, навоза, муниципального шлама, дробины и других промышленных применений [68].

Пресс имеет кожух с перфорированным экраном и конический шнек (рисунок 1.10). Коническая конструкция шнека позволяет оказывать давление на материал как по оси X, так и по оси Y для эффективного обезвоживания. При прохождении материала через шнек, он становится все более сжатым по мере увеличения диаметра по направлению к выпускному отверстию.

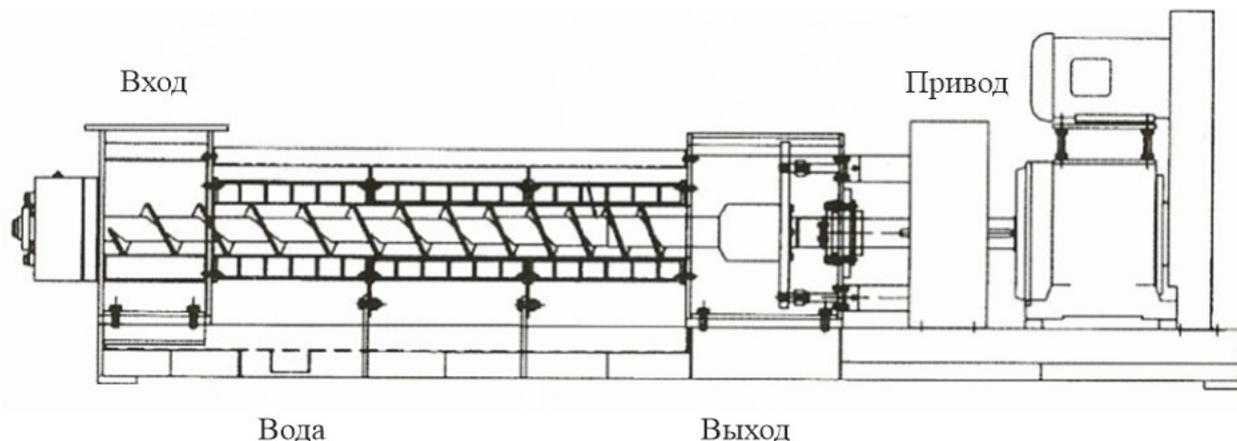


Рисунок 1.10 – Шнековый пресс модели AGRI-PRESS

Шнековые прессы РТ&М изготавливаются с соотношением площади сита к диаметру шнека 9:1. Это дает шнековому прессу РТ&М преимущество перед конкурирующими винтовыми прессами по его гидравлической мощности. Корпус шнекового вала имеет конусообразную форму для постепенного уменьшения объема материала в межлопастном пространстве.

Область применения шнекового пресса: отработанная пивная дробина; стекловолокно; навоз; диатомовая земля (кизельгур); растительные отходы; сахарная свекла; люцерна; разные промышленные отходы. Технические характеристики шнекового пресса AGRI-PRESS приведены в Приложении А.

Шнековый пресс FAN-beltec ВР (рисунок 1.11) поставляется со свободно плавающим шнеком, разделенным на приводную и прессующую секции, соединенным с коробкой передач и электронным приводом. Обезвоженный материал выходит из пресса в горизонтальном направлении, при этом две лопасти противодействия создают нужное усилие, что предотвращает закупорку и

обеспечивает максимальное обезвоживание и уменьшение объема [87]. Технические характеристики шнекового пресса Fan-beltec ВР приведены в Приложении А.



Рисунок 1.11 – Fan-beltec ВР шнековый пресс

Типичные области применения шнекового пресса Fan-beltec ВР:

- обезвоживание мелкого брака при подготовке массы;
- обезвоживание отходов измельчителя грубой очистки;
- обезвоживание волокнистых стоков (первичных) шламов.

Пресс Vincent компании Vincent Corporation [100] применяется для материалов, которые часто считаются непригодными для прессования, допускает переменную скорость подачи и имеет низкие эксплуатационные расходы и расходы на техническое обслуживание.

Шнековые прессы серии КР (рисунок 1.12) чаще всего используются, но не ограничиваются ими, в следующих процессах обезвоживания: переработка пищевых продуктов; кукурузный силос, переработка пластмассы, волокно от влажного помола кукурузы, отработанное пивоваренное зерно, отходы морепродуктов, целлюлозно-бумажная промышленность, навоз и др.



Рисунок 1.12 – Шнековый пресс модели КР компании Vincent Corporation

В прессах серии КР используется редуктор на лапах. Все редукторы рассчитаны на работу с высоким крутящим моментом. Материал подается непосредственно в шнековый пресс. Шнек имеет переменный шаг с прерывистым витком, чтобы максимизировать обезвоживание и предотвратить совместное вращение. Экран изготавливается из армированных перфорированных листов. Влажность материала на выходе регулируется конусом противодействия, приводимым в действие пневмоцилиндром [123].

Эти прессы имеют более длинный шнек и экран, что удобно для материалов, которые сложнее обезвоживать.

Перфорация экрана 2,4 мм является стандартом, используемым в прессах. Он предпочтителен, потому что его толщина делает его устойчивым как к повреждению металлическими предметами, так и к изнашиванию. Перфорация экрана 3,2 мм используется в тяжелых условиях, таких как кукурузный силос, муниципальные отходы и просроченные упакованные материалы.

Ключевым конструктивным параметром конических винтовых валов является расчетное уменьшение площади открытого поперечного сечения на выходе кека по сравнению с первоначальной площадью поперечного сечения во входном бункере. Снижение от 45 % до 72 % доказало свою эффективность в

широком диапазоне применений [82]. Технические характеристики шнекового пресса Vincent Corporation приведены в Приложении А.

Converse и др. [83, 84] определили оптимальные рабочие параметры сепаратора шнекового пресса Vincent в соответствии с конкретными потребностями оператора:

- чтобы максимизировать скорость потока, так как работа пресса осуществляется под давлением с низким содержанием твердых частиц;
- для максимального выхода волокна – эксплуатировать установку с как можно более высокой концентрацией сухого вещества на входе при более низком сопротивлении на выходе;
- для достижения высокого обезвоживания – эксплуатировать установку с наибольшим выходным сопротивлением и высоким содержанием твердых частиц на входе.

Converse и др. [83] провели сравнительную оценку прессов FAN и Vincent для навоза КРС. Шнековый пресс FAN имел среднюю эффективность разделения 23,79 %, в то время как пресс Vincent имел среднюю эффективность разделения 33,41 %, исходя из процента удаления твердых частиц из входящего потока. Эффективность сепарации на основе поступающих твердых частиц, удаляемых в волокнистой части составляла 25,78 и 37,71 % для винтовых прессов FAN и Vincent соответственно. В таблице 1.5 представлены результаты этого исследования [91].

Таблица 1.5 – Результаты исследований по оценке шнековых пресс-сепараторов

Модель пресса	Процент сухого вещества во входящем потоке	Расход, л/мин	Твердое вещество на выходе, %	Эффективность сепарации
FAN	2,64	1456	23,79	25,78
Vincent	4,89	323	33,41	37,71

Сепаратор шнековый EcoPulse Миасского завода промышленного оборудования [54] (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Сепаратор шнековый EcoPulse Миасского завода промышленного оборудования

Шнековый Сепаратор EcoPulse S-3.1 предназначен для разделения навоза КРС и производства подстилки для коров на молочных фермах и фермах КРС, с содержанием сухого вещества после сепарации до 32-35 %. Оснащен усиленным ситом и шнеком, усиленным механизмом створок. Система загрузки: бункер-накопитель из нержавеющей стали для подачи конвейером.

При помощи сепаратора шнекового EcoPulse возможно обезвоживать следующие виды сырья: навоз; пивная дробина/спиртовая барда; отходы: овощей/фруктов; Ооходы: бойни/пищевые/рыбные; торф/древесная щепа/сапрпель; виноградная мезга/свекловичный жом; волокна из сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности; осадки сточных вод [50].

Для загрузки отжимаемого материала применяют бункер-питатель над прессом. Узел выгрузки обезвоженного материала выполняется с регулируемым поперечным сечением, с использованием конуса противодействия, положение которого регулируется в осевом направлении. Технические характеристики сепаратора шнекового EcoPulse приведены в Приложении А.

Анализ работ по прессованию различных видов органоматериалов, показывает, что к основным факторам процесса механического обезвоживания торфяного сырья в шнековом прессе следует относить:

- исходная влажность торфяного сырья;
- степень разложения торфа;
- величина давления прессования, p ;
- толщина отжимаемого слоя;
- диаметр отверстий перфорированного экрана;
- площадь живого сечения перфорированного экрана.

Механический дизайн.

1. Фильтровальная камера винтового пресса представляет собой пространство, образованное наружным цилиндрическим металлическим экраном и внутренним коническим шнеком.

2. Обезвоживание торфяного сырья происходит за счет уменьшения объема межвитковой камеры винтовой лопасти шнека.

3. На заключительном этапе кек сжимается и обезвоживается за счет противодействия, за счет прижима и движущей силы лопасти шнека.

Кроме перечисленных факторов большое влияние на процесс прессования оказывает фильтровальная перегородка и её физико-механические свойства. В качестве фильтра обычно используют различные перфорированные листы. Требования, предъявляемые к фильтрующей перегородке противоречивы: с одной стороны, они должны обладать высокой пропускной способностью имея наименьшее гидравлическое сопротивление, а с другой – задерживать твердые частицы, не допуская их вместе с отжимаемой жидкостью.

Анализ шнековых прессов применяемых для механического обезвоживания органоматериалов подтверждает актуальность их применения при внутрикарьерной переработке и транспортировании экскавированного торфяного сырья.

Возможности современного шнекового оборудования позволяют перерабатывать торфяное сырье с оттоком жидкой фазы, обусловленного

непрерывностью технологического процесса, уменьшением количества технологических операций, низкими удельными расходами энергии, небольшими капитальными затратами, малыми производственными мощностями, компактностью, универсальностью, высокой степенью механизации и автоматизации.

1.5 Выводы по главе 1

Таким образом, исследования по искусственному обезвоживанию торфа проводились в заводских условиях на стационарных прессовых установках. При организации механического обезвоживания торфяного сырья непосредственно в условиях карьера подобные способы являются неприемлемыми по причинам высокой энергоемкости и материалоемкости процесса.

Необходимы новые решения для обезвоживания сырья, поскольку важность обезвоживания и обращения с отходами в горнодобывающем секторе значительно возросла. Это приводит к устойчивому решению, основанному на надежности процесса, универсальности, непрерывности процесса, а также низком углеродном следе в сочетании с низкими затратами на техническое обслуживание и эксплуатацию.

На основе анализа карьерного способа разработки торфяных месторождений и новых систем внутрикарьерной переработки и транспортирования сырья (IPCC) актуальным решением вопроса избыточного влагосодержания исходного торфяного сырья является внедрение в технологию добычи предварительного механического обезвоживание экскавированного сырья, что позволит снизить исходное влагосодержание экскавированного торфяного сырья примерно на 45 %, при этом отжатая вода возвращается в карьер.

Анализ физико-механических и размерно-массовых свойств торфяного сырья указывает на возможность применения предварительного механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья в условиях карьера. Благодаря

предварительному усреднению материала, что позволяет достичь эффекта физического кондиционера в усредненной торфяной массе при механическом отжати сырь, возможно интенсифицировать процесс влагоотдачи.

Исследования и сравнение технологии шнекового прессования с другими технологиями обезвоживания сырь показали, что шнековые прессы могут быть перспективной технологией обезвоживания экскавированного торфяного сырь.

Возможности современного шнекового оборудования позволяют перерабатывать торфяное сырь с оттоком жидкой фазы, обусловленного непрерывностью технологического процесса, уменьшением количества технологических операций, низкими удельными расходами энергии, небольшими капитальными затратами, малыми производственными мощностями, компактностью, универсальностью, высокой степенью механизации и автоматизации.

Цель исследования. Установление закономерностей процесса механического обезвоживания экскавированного торфяного сырь в шнековом прессе мобильного модуля для разработки научно-обоснованного технического решения обеспечивающего в условиях комплексно-механизированного карьера предварительное механическое обезвоживание для повышения производительности внутрикарьерного транспортирования и ускорения процесса последующей сушки торфяного сырь.

Задачи исследования:

1. Провести анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационного исследования и оценить эффективность применения шнекового оборудования в смежных отраслях.
2. Провести анализ структурно-механических характеристик экскавированного торфяного сырья и обосновать механическую модель процесса его деформирования при обезвоживании в шнековом прессе.
3. Провести параметрический анализ структуры шнекового пресса и обосновать форму шнека для механического обезвоживания торфяного сырья.
4. Установить основные закономерности процесса механического обезвоживания в лабораторных условиях на натуральных образцах экскавированного торфяного сырья.
5. Оценить эффективность механического обезвоживания образцов смеси торфяного сырья с учетом геометрических параметров пресса с коническим шнеком и перфорированным экраном.
6. Провести анализ методики оценки структуры исходного торфяного сырья перед механическим обезвоживанием.
7. Разработать практические рекомендации по результатам исследований.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ В ШНЕКОВОМ ПРЕССЕ

2.1 Обоснование структуры и параметров шнекового пресса для механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья

В ходе исследования были рассмотрены различные типы конфигураций шнековых валов пресса для механического обезвоживания.

Шнек с прямым валом. Такой тип конфигурации шнекового вала широко используется в шнековых прессах, поскольку производственный процесс прост (рисунок 2.1а). Шаг и диаметр шнека имеют постоянный размер. Скорость нарастания давления в шнековом прессе этого типа аналогична скорости нарастания давления в гидравлических прессах. В обоих из них давление возрастает линейно при непрерывном потоке материала в шнековом прессе [116].

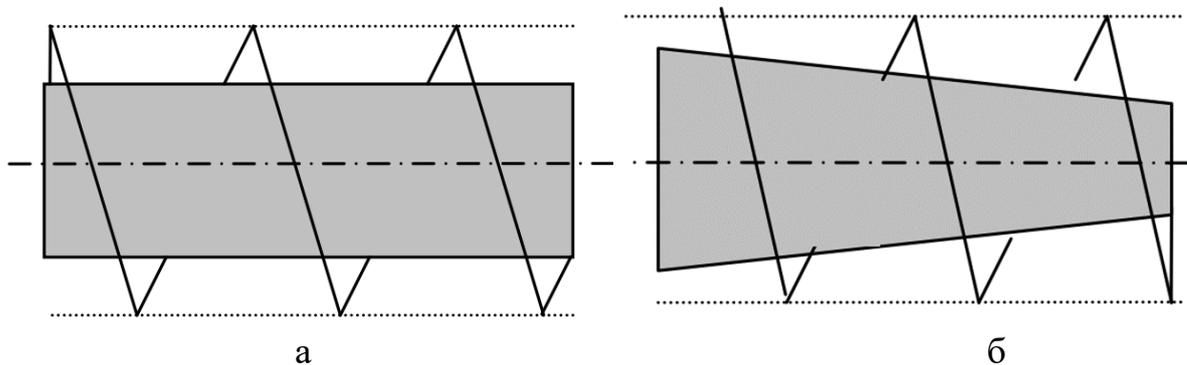


Рисунок 2.1 – Схема шнека с прямым валом (а) с коническим внутренним валом (б)

Шнек с коническим валом. При этом типе шнекового вала (рисунок 2.1б) с постоянным шагом кольцевая площадь уменьшается по длине шнека и принимает минимальное значение на конце шнека. Объем, охватываемый межвитковым пространством за каждый виток, представляет собой произведение площади кольцевого сечения и шагового расстояния. В этом типе шнекового вала скорость увеличения давления выше, чем у прямого шнекового вала. Такой вал сложнее в изготовлении [116].

Шнек с переменным шагом. На рисунке 2.2а показана схема шнека с уменьшающимся шагом и при постоянном диаметре вала. Загрузочная часть

шнека имеет максимальный шаг и позволяет увеличить загрузку пресса материалом. Подобно схеме с коническим валом, в схеме с переменным шагом объем материала уменьшается на определенную величину при каждом обороте шнека. Основное различие между ними заключается в скорости нарастания давления с каждым шагом. В коническом шнеке давление увеличивается линейно через вал винта, тогда как в шнеке с переменным шагом давление постоянно на каждом витке и увеличивается на переходах [133].

Шнек с коническим валом и переменным шагом. Это комбинация типов шнеков с переменным шагом и коническим валом, как показано на рисунке 2.2б. Скорость нарастания давления в этом типе шнека выше по сравнению с другим типом шнеков. То же самое давление может быть достигнуто за более короткое время, поскольку давление достигает своего максимального значения за меньшее количество оборотов по сравнению с типами шнеков того же размера [116].

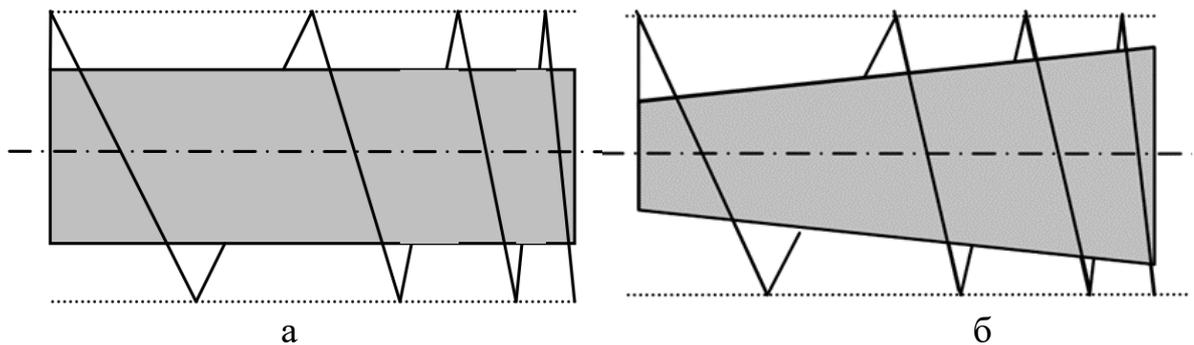


Рисунок 2.2 – Схема шнека с переменным шагом (а) с коническим валом и переменным шагом (б)

По сравнению с прямыми шнековыми валами скорость увеличения давления выше в конфигурациях валов этого типа в зависимости от угла конусности вала. Торфяное сырье в шнеке сжимается в двух направлениях.

За счет непрерывной подачи сырья, поступающего в систему, оно сжимает предыдущие порции сырья. Другое направление сжатия происходит между внутренней поверхностью кожуха и поверхностью конического вала шнека (рисунок 2.3). Поскольку высота лопастей непрерывно уменьшается, расстояние между этими двумя поверхностями также уменьшается. И сырье сжимается в радиальном направлении. По этим причинам этот тип конфигурации вала шнека

оценивается как наиболее рациональный в данном исследовании. При этом типе шнека увеличение давления намного выше по сравнению с прямыми шнеками.

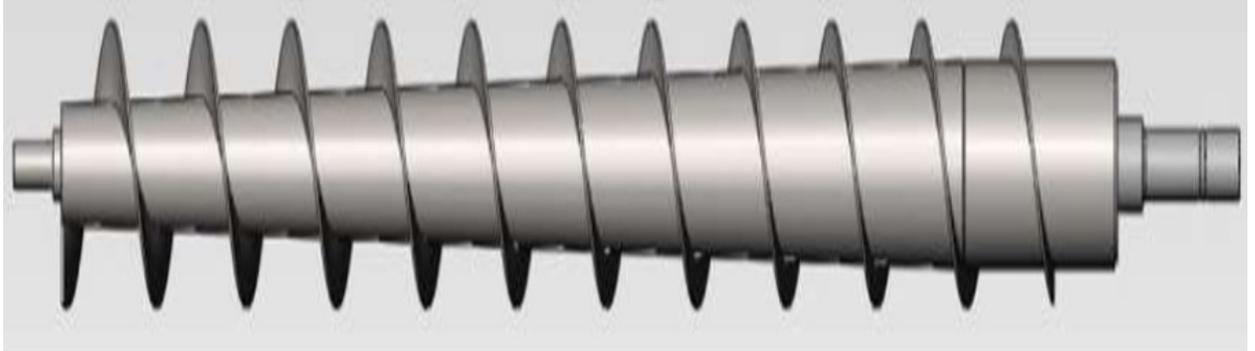


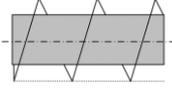
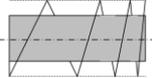
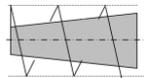
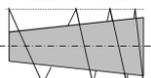
Рисунок 2.3 – Модель конического шнека

Шнековый пресс с коническим внутренним валом имеет вдвое больший срок службы по сравнению с существующими шнековыми прессами. Выбор шнекового пресса с коническим внутренним валом позволяет снизить затраты на техническое обслуживание пресса, увеличить срок службы шнекового пресса и уменьшить частоту проведения технического обслуживания.

В работе [90] показано, что шнек с постоянным шагом как с прямым, так и с коническим валом обеспечивает более высокий общий срок службы по сравнению с двумя другими типами шнеков с переменным шагом.

В таблице 2.1 показаны общие результаты расчетных характеристик четырех различных типов шнековых прессов. Полученные данные свидетельствуют о том, что шнековый пресс с коническим внутренним валом (рисунок 2.3) имеет больший общий срок службы (часы), который составляет 5948 ч по сравнению с шнековыми прессами других конструкций.

Таблица 2.1 – Результаты анализа по каждому типу шнекового пресса [90]

Тип/свойства	Шнек с прямым валом 	Шнек с переменным шагом 	Шнек с коническим валом 	Шнек с коническим валом и переменным шагом 
Коэффициент надежности,	0,0092	0,0014	0,0161	0,0034
Предел выносливости, МПа	1,32	0,20	2,30	0,48
Общий срок службы, ч	3113	731	5948	1281

Разработан концептуальный проект пресса для механического обезвоживания торфяного сырья (рисунок 2.4). В этой конструкции используется конический шнековый пресс и компоненты машины состоят в основном из двух частей: шнека и кожуха.

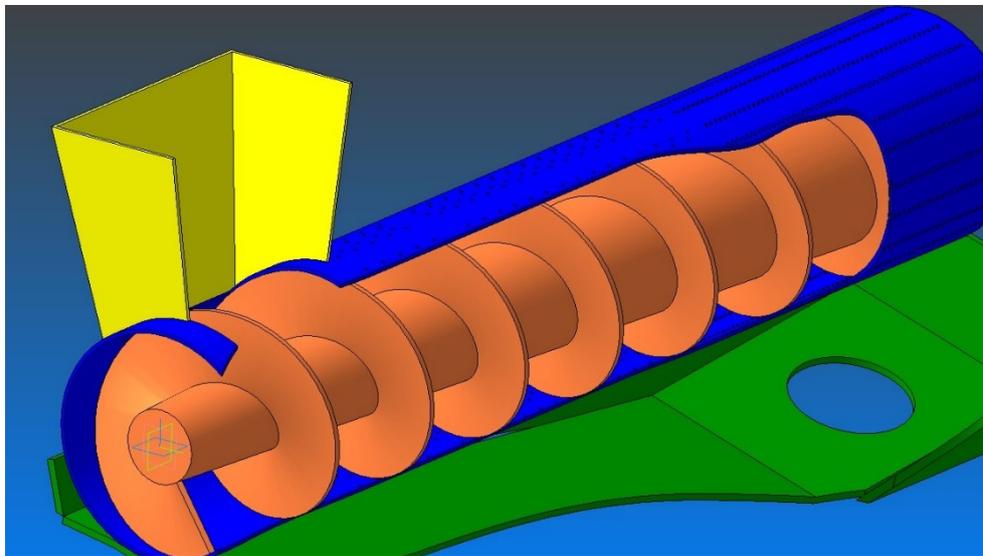


Рисунок 2.4 – Проект пресса для механического обезвоживания торфяного сырья

Материал подается из загрузочного бункера на шнек, где высота лопастей максимальна. Затем торфяное сырье выталкивается вперед и сжимается между внутренней поверхностью кожуха и внутренней поверхностью вала шнека, так как толщина слоя материала уменьшается за счет уменьшения рабочего объема

межлопастного пространства и его обезвоживания. С увеличением давления вода отжимается и стекает через перфорированный экран в поддон. Так как обезвоженный материал не обладает таким свойством текучести, как вода, он продвигается до конца вала шнека и выходит наружу.

Регулируя положение конуса противодействия в продольном направлении, можно уменьшить или увеличить размер зазора. Чем меньше размер зазора, тем меньше остаточное содержание воды в кеке, потому что на материал оказывается более высокое давление.

По сравнению с прямыми шнековыми валами скорость увеличения давления выше в конфигурациях валов этого типа в зависимости от угла конусности вала. Торфяное сырье в шнеке сжимается в двух направлениях.

За счет непрерывной подачи сырья, поступающего в систему, оно сжимает предыдущие порции сырья. Другое направление сжатия происходит между внутренней поверхностью кожуха и поверхностью вала шнека. Поскольку высота лопастей непрерывно уменьшается, расстояние между этими двумя поверхностями также уменьшается. И сырье сжимается в радиальном направлении. По этим причинам этот тип конфигурации вала шнека оценивается как наиболее рациональный в данном исследовании. При этом типе шнека увеличение давления намного выше по сравнению с прямыми шнеками.

2.2 Реология торфяного сырья при обезвоживании в шнековом прессе

Особенности деформирования торфяного сырья зависят от степени развития и прочности пространственных структур. При малых концентрациях сухого вещества ($c < 10\%$) торфяные дисперсии можно отнести к классу жидкообразных структурированных, а при $c \gg 10\%$ – к твердообразным условно-пластичным системам с коагуляционной структурой. Такие структуры образуют обломки структур – переплетения растений-торфообразователей, а также агрегаты (ассоциаты) продуктов распада [35].

После экскавации при влагосодержании около 9 кг/кг торфяное сырье представляет собой двухфазную систему и при деформации представляет собой упруго-вязкопластичное тело.

В процессе отжима при относительной деформации слоя 0,4 - 0,8 происходит уплотнение скелета твердой фазы. Для композитных материалов [9] наряду с упругой (обратимой) и пластической (необратимой) деформацией, также наблюдается обратимая высокоэластическая деформация. Для адекватного описания реологического поведения таких материалов наиболее известной и распространенной является модель Зинера с переменным модулем упругости. Достаточно близкое приближение к опытным данным достигается при допущении линейной зависимости условно обобщенного модуля упругости от деформации слоя материала.

В реологии грунтов определяющий фактор изменения напряженно-деформированного состояния – время, в механике сплошных сред (механическая переработка) – скорость. Закономерности, связывающие поведение грунта под действием нагрузки с его упругостью, пластичностью, вязкостью описываются реологическими моделями с целью получения уравнения деформации твердообразных структурированных дисперсных систем под нагрузкой при возрастающей скорости деформации [27]. Конститутивные модели используются в качестве идеализации механического поведения материалов [15].

Структура органогенных материалов показывает наличие правильных многогранных ячеек с тонкими стенками. Эти ячейки заполнены водой или и плотно упакованы вместе, образуя структуру, напоминающую заполненные жидкостью пенопласты с закрытыми порами. Кривые напряжение-деформация, полученные при испытаниях на сжатие, показали типичное нелинейное поведение, а испытания на сжатие-расслабление показали вязкоупругий характер этих материалов. Результаты, показывающие деформацию (объемную) кека в зависимости от давления на твердое тело в результате внешней приложенной нагрузки, демонстрируют поведение, подобное наблюдаемому в пористых

твердых телах, когда напряжение отображается как функция безразмерного объема кека, определенного как $(V-V_0)/V_0$.

Явление релаксации, наблюдаемое органогенными материалами, связывают с двумя разными механизмами. Одним из них является падение давления внутри материала по мере отжатия жидкости, а другим является выравнивание внутренних напряжений и деформаций в кеке из-за движения материала внутри пресса [125].

Различное поведение релаксации наблюдалось в торфе, в котором процесс обезвоживания мог изменять не только поведение релаксации материала, но и его кривую сжимаемости, наблюдаемую с точки зрения плотности образца как функции приложенного нормального напряжения [121].

Во время испытаний с постоянным напряжением/нагрузкой деформация выдавливаемой и сжимаемого кека проявляет типичное вязкоупругое поведение, известное как ползучесть, которое описано в литературе с использованием различных механических аналогий, таких как пружины (представляющие поведение твердого тела) и демпферы (представляющие поведение жидкости). Тот же подход использовался в классической реологии для изучения механических свойств вязкоупругих материалов. Однако при характеристике материалов, которые будут деформироваться при жидкостном прессовании, необходимо учитывать потерю отжатой жидкости из материала.

Уплотнение торфяного сырья малой степени разложения вызывает значительный отток жидкости из образца. Этот отток жидкости вызывает большее уменьшение или деформацию объема слоя, что необходимо учитывать. Таким образом, для моделирования вязкоупругого поведения клеточных биологических материалов модели пружин и демпферов были объединены с механическими элементами, учитывающими отток жидкости, т.е. с использованием перфорированных пластин [124].

Стандартная линейная твердотельная трехэлементная модель (тело Зинера) является типичной моделью, используемой для анализа экспериментально

измеренных характеристик напряжений для получения соответствующих вязкоупругих свойств материалов [117].

Как показано на рисунке 2.5, стандартная твердотельная модель состоит из последовательно соединенных упругого элемента Гука (пружины) и тела Кельвина-Фойгта (структурная формула Н-s-KV). Стандартная твердотельная модель представляет собой модель с тремя параметрами (E_1 ; E_2 и η) [77] и используется для описания вязкоупругого поведения ряда биологических материалов [66].

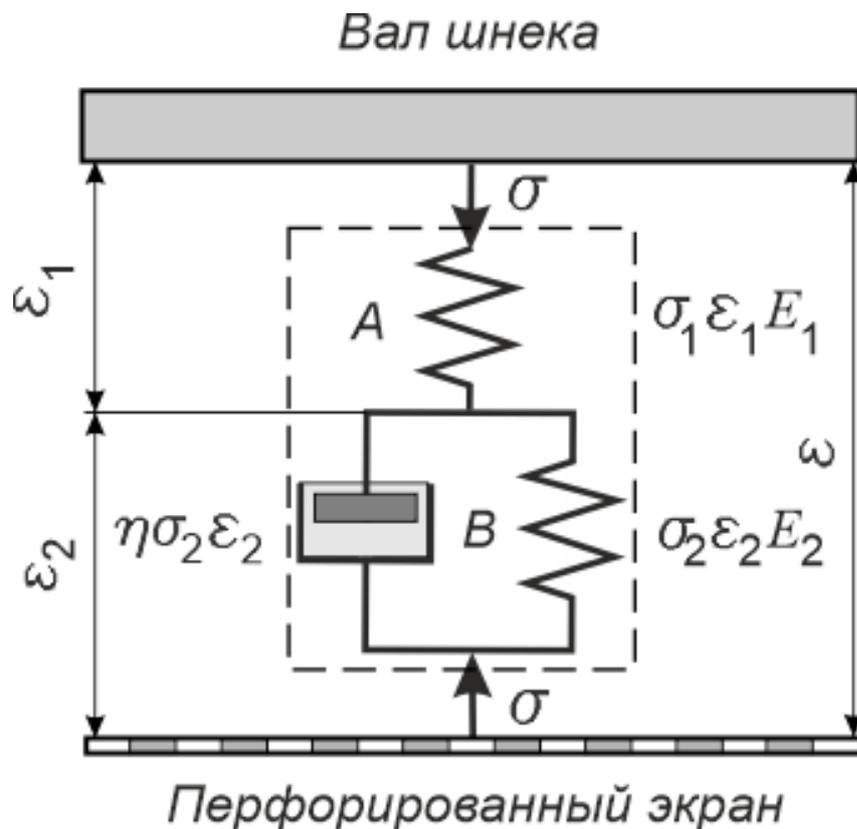


Рисунок 2.5 – Стандартная линейная твердотельная трехэлементная модель.

Перфорированный экран используются для имитации истечения отжатой жидкости

На стадии уплотнения материала в шнеке сопротивление оказывается элементами трехфазной системы. На схеме реологической модели напряжения воспринимаются упругим элементом Гука в соответствии с модулем упругости твердой фазы материала (мгновенная упругая реакция). Происходит взаимное перемещение частиц твердой фазы с уплотнением и выделением воздуха из порового пространства ($\sigma_1, \varepsilon_1, E_1$).

С ростом деформаций начинается движение воды в поровом пространстве с выжиманием жидкой фазы и проявляется вязкое сопротивление, отображаемое вязким элементом Ньютона ($\eta, \sigma_2, \varepsilon_2$). Отмечается медленная упругая деформация за счет узла Кельвина-Фойгта ($\sigma_2, \varepsilon_2, E_2$). При постоянной скорости приложения нагрузки давление, возникающее в жидкости, приводит к фильтрации через материал. С дальнейшим ростом деформаций уменьшается поровое пространство материала и при минимальной толщине фильтруемого слоя в межлопастном пространстве шнека происходит выжимание остатков жидкой фазы.

Под конец давление уплотнения падает до значения, установленного пружиной встречного конуса противодействия на выходе из пресса.

Уравнения для этой модели, как следует из схемы на рисунке 2.5 (выражения 2.1 – 2.5):

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2; \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2; \quad (2.2)$$

$$\sigma = E_1 \varepsilon_1; \quad (2.3)$$

$$\sigma_1 = E_2 \varepsilon_2; \quad (2.4)$$

$$\sigma_2 = \eta \dot{\varepsilon}_2. \quad (2.5)$$

где σ – нагрузка, Н;

E_1 – мгновенный модуль упругости, Па;

E_2 – длительный модуль упругости, Па;

ε – величина деформации, м;

η – вязкость при сдвиге, Па · с;

$\eta \dot{\varepsilon}$ – сопротивление упруговязкой деформации, Па.

Функция материала, связывающая напряжение, деформацию и их скорость для этой модели (2.6):

$$(E_1 + E_2)\sigma + \eta \dot{\sigma} = E_1 E_2 \varepsilon + E_1 \eta \dot{\varepsilon}. \quad (2.6)$$

В уравнении (5) $\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt}$ – скорость напряжения и $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$ – скорость деформации.

Как показано на рисунке 2.5, модель может быть представлена двумя блоками, А и В, соединенными последовательно, так что блок А является упругим телом, а блок В – телом Кельвина-Фойгта. Если σ_A и ε_A представляют напряжение и деформацию в блоке А, а σ_B и ε_B представляют собой напряжение и деформацию в блоке В (2.7, 2.8):

$$\sigma_A = E_1 \varepsilon_A, \quad (2.7)$$

$$\sigma_B = E_2 \varepsilon_B + \eta \frac{d\varepsilon_B}{dt}. \quad (2.8)$$

Так как элементы А и В соединены последовательно, то их сумма (2.9, 2.10):

$$\varepsilon_A + \varepsilon_B = \varepsilon, \quad (2.9)$$

$$\sigma_A = \sigma_B = \sigma. \quad (2.10)$$

Заменим уравнение (2.10) в уравнениях (2.7) и (2.8) и выразив их через деформации ε_A и ε_B получим (2.11, 2.12):

$$\varepsilon_A = \frac{\sigma}{E_1}, \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_B = \frac{\sigma}{E_2 + \eta(d/dt)}. \quad (2.12)$$

Подставив уравнения (2.12) и (2.11) в уравнение (2.9), получим (2.13):

$$\frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2 + \eta(d/dt)} = \varepsilon. \quad (2.13)$$

Используя перекрестное умножение и изменение порядка членов, получим дифференциальное уравнение, соответствующее модели Зинера (2.14) [2, 105]:

$$(E_1 + E_2)\sigma + \eta\dot{\sigma} = E_1 E_2 \varepsilon + E_1 \eta. \quad (2.14)$$

Поведение упруго-вязко-пластичной массы рассмотрено на примере реологической модели стандартного вязкоупругого тела. Модель учитывает подробное двухфазное реологическое поведение спрессованного материала в шнеке. Таким образом, приведенные математические зависимости позволяют описать поведение экскавированного торфяного сырья в условиях деформирования в межлопастном пространстве напорного шнека при приложении нормальных напряжений.

2.3 Анализ процесса механического обезвоживания торфяного сырья в коническом шнеке

Давление часто является основной рабочей переменной, используемой в разделении твердых и жидких веществ, что приводит к механическим или физическим процессам разделения, которые можно в целом разделить на три основные категории [76]:

- 1) осаждение под действием силы тяжести, центробежной силы, воздушной флотации, флотации плотных сред и магнитных свойств;
- 2) фильтрация на экранах силой тяжести и на фильтрах путем применения вакуума, давления и центрифугирования;
- 3) отжим с использованием периодических или непрерывных прессов (винтовых прессов, валков и дисков).

Благодаря высокому давлению, создаваемому в одношнековых прессах, и возможности непрерывных процессов, шнековое прессование было одним из предпочтительных процессов для разделения твердых и жидких веществ.

С экономической точки зрения, шнековое прессование представляется в качестве потенциальной альтернативы для обезвоживания ряда материалов [125]. Например, приблизительно 7 кДж/кг энергии необходимо для вытеснения воды под давлением 6,8 МПа против 2300 кДж/кг при тепловом испарении [124].

Независимо от структуры твердого обезвоженного материала, приложенное давление на твердое вещество должно быть достаточно высоким, чтобы преодолеть три вида сил:

- силы уплотнения, необходимые для уменьшения объема материала;
- силы для преодоления перепада давления, необходимые для вытеснения жидкости из пористой среды;
- сил для преодоления перепада давления, вызванного протеканием жидкости через перфорированный экран на шнековом прессе.

Во время операции прессования и как следствие уплотнения сырья изменяется объем жидкости и объем твердой фазы. Таким образом, удобно

определять переменные на основе объема твердых тел, которые являются постоянными в операции обезвоживания. Коэффициент пористости e , определенный ниже, выражает долю пор в сырье на единицу объема сухого твердого вещества (2.15):

$$e = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}. \quad (2.15)$$

Во многих отношениях операция прессования органогенных материалов аналогична фильтрации легко сжимаемых твердых веществ. В обоих случаях жидкость течет через твердый кека, следуя закономерностям, которые можно описать одними и теми же уравнениями механики жидкости. В процессе фильтрации падение давления, вызванное потоком, вызывает уплотнение кека в направлении потока и увеличение сопротивления фильтрации кека. Как следствие, для преодоления высокого сопротивления кека необходимы большие перепады давления. Аналогичный механизм имеет место при отжиме жидкости, когда требуется большее давление для отжима жидкости из более уплотненного кека [76].

Во время фильтрации жидкости жидкость течет через твердый осадок, и возникает значительное трение, которое считается пропорциональным скорости жидкости относительно твердого тела. Tiller и Cooper [134] разработали модель для оценки переменного потока жидкости через корку во время фильтрации. Однако предполагалось, что твердые частицы в кеке не перемещаются, что часто не так, особенно при операции фильтрации. Shirato и др. [126] расширили эту модель, включив в нее случаи, когда твердое тело также может двигаться во время образования кека и процесса консолидации. Tiller и Shirato [135] связали эти внутренние потоки с перепадом давления в операции фильтрации. Эти модели фильтрации использовались для описания выделения жидкостей из уплотняемых слоев частиц, которые по отдельности несжимаемы, но которые могут приспособливаться во время уплотнения [126, 127].

Хотя фильтрация и выдавливание жидкости имеют некоторые сходства и различия, часто они являются взаимодополняющими единичными операциями,

потому что после того, как фильтрованием получен осадок, жидкость подвергается дальнейшему выдавливанию с помощью механического давления [136].

Процессы уплотнения и текучести при отжиме жидкости изучались путем изучения уплотнения и течения жидкости кека, содержащегося в цилиндре с непроницаемыми боковыми стенками и зажатого между непроницаемым плоским поршнем и плоским фильтрующим материалом, в испытании на одноосное сжатие. На рисунке 2.6 показаны различные стадии сжатия от начальной высоты Z_0 до конечной высоты Z .

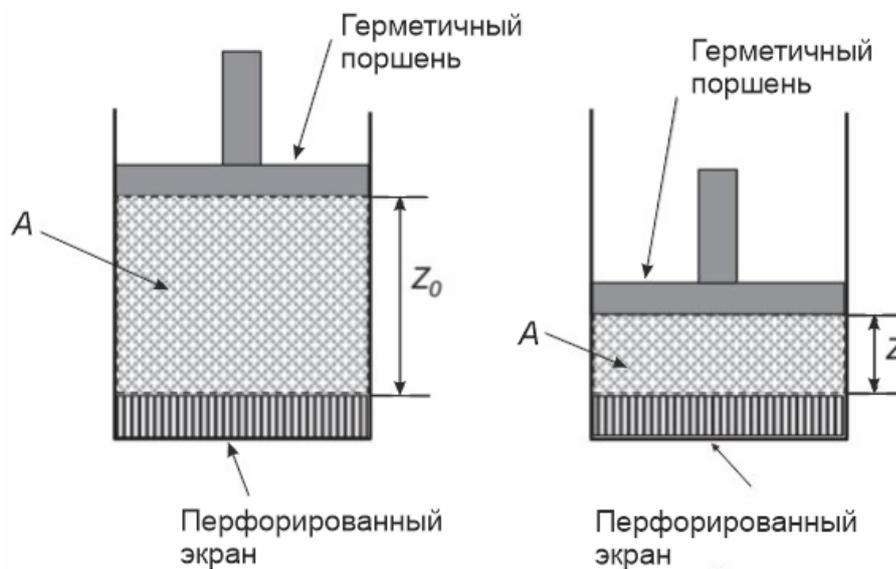


Рисунок 2.6 – Изменение высоты Z при сжатии материала. Связь между координатами Z и A

Объем, и высота кека меняются в процессе сжатия; если предположить, что материал не теряется с отжатой жидкостью, загрузка материала на единицу площади поперечного сечения, обозначаемая A , остается постоянной.

Уравнение, связывающее высоту слоя, можно рассматривать, если использовать удельный объем слоя. Связь между высотой и объемом материала выражается уравнениями, представленными ниже (рисунок 2.6).

Слой материала описывается как (2.16, 2.17):

$$Z_0 = \int_0^A V_0 dA \left(\frac{\text{объем, м}^3}{\text{кг}_{\text{с.в.}}} \cdot \frac{\text{кг}_{\text{с.в.}}}{\text{загрузка, м}^2} = \text{высота слоя, м} \right), \quad (2.16)$$

$$Z = \int_0^A V dA \left(\frac{\text{объем, м}^3}{\text{кг}_{\text{с.в.}}} \cdot \frac{\text{кг}_{\text{с.в.}}}{\text{загрузка, м}^2} = \text{высота слоя, м} \right), \quad (2.17)$$

Средний удельный объем обезвоженного материала \bar{V} :

$$\bar{V} = Z/A. \quad (2.18)$$

Подставляя выражение 2.18 в уравнение 2.17, получим

$$\bar{V} = \frac{1}{A} \int_0^A V dA. \quad (2.19)$$

Диаметры шнеков в коммерческих одношнековых прессах варьируются до 0,75 м с осевыми длинами с точки зрения отношения длины к диаметру (L/D) от 40 до 8 [131]. Схема области шнека показана на рисунке 2.7.

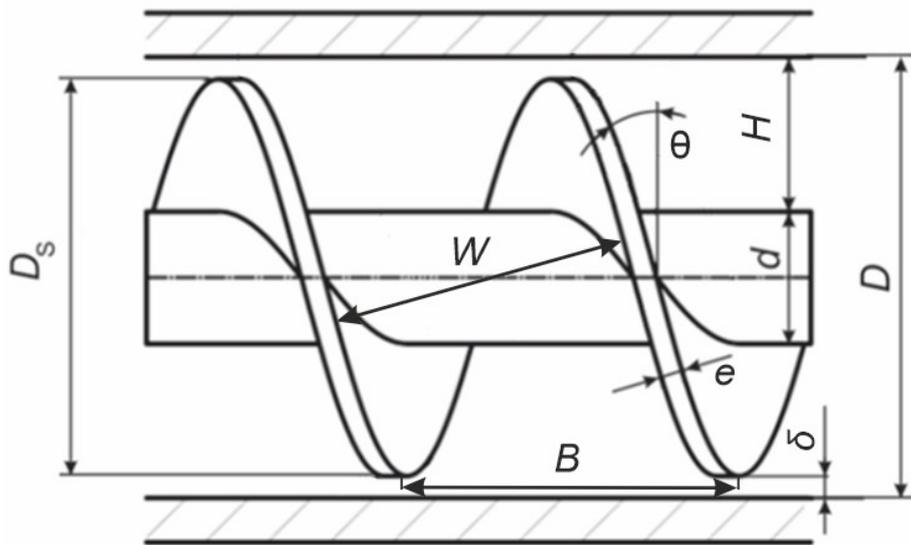


Рисунок 2.7 – Схема канала в одношнековом прессе с обозначением наиболее важных геометрических параметров: D – внутренний диаметр кожуха; d – диаметр вала; B – шаг лопастей; e – ширина лопасти; δ – зазор; D_s – диаметр шнека; H – высота лопасти; $W = B \cos \theta - e$ – ширина канала

Кожух шнека имеет диаметр D , а зазор между лопастью и внутренней частью обечайки определяется толщиной δ , которая составляет порядка 0,1–0,3 % от диаметра кожуха; таким образом, диаметр шнека равен $d = D - 2\delta$, а шаг равен B (рисунок 2.7). Лопасть образует угол θ с вертикальной линией. Конструкция однозаходных шнеков в большинстве случаев такова, что $B = d$. [131].

Стандартный моноблочный одношнековый пресс имеет следующие общие характеристики [76]:

- общая длина шнека L : от $4D$ до $10D$;
- длина секции подачи: от $2D$ до $4D$;
- длина секции сжатия: от $4D$ до $6D$;
- средний угол наклона лопасти шнека: $17,66^\circ$;
- коэффициент глубины канала (глубина канала в подающей секции, деленная на глубину канала в секции сжатия): от 2 до 4;
- рифленый кожух в зоне подачи.

Радиальное расстояние между основанием шнека и внутренней поверхностью цилиндра B (глубина канала) может быть переменной в коническом шнеке для увеличения усилия в зоне уплотнения материала.

Рассматривая гидромеханическую модель, межлопастной канал шнека, можно развернуть для анализа геометрии прямоугольной призмы материала (рисунок 2.8). Хотя реальная геометрия шнека винтовая и имеет некоторую кривизну, малая величина δ , используемая в промышленных шнеках, позволяет предположить незначительное влияние кривизны применить прямоугольные координаты. С этими предположениями, как показано на рисунке 2.7, кожух шнека становится плоской пластиной со скоростью $v_b = \pi ND$, которую можно разложить на z -осевую составляющую $v_{bz} = \pi ND \cos \theta$ и x -поперечную составляющую $v_{bx} = \pi ND \sin \theta$ [76].

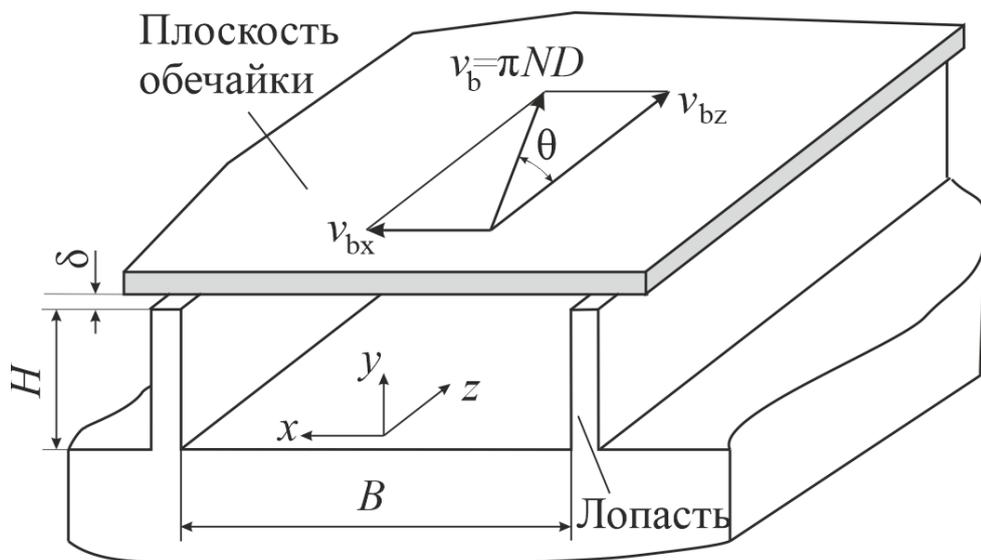


Рисунок 2.8 – Развернутый канал одношнекового пресса с указанием основных геометрических характеристик и составляющих скорости

Это позволяет моделировать конкуренцию между сопротивлением, оказываемым неподвижным кожухом и вращающимся валом, и возрастающим давлением, связанным с конвергентным каналом, с учетом реологии материала [74, 129, 138, 143].

Для полностью развитого 2D-потока производные компонентов скорости по координате z можно отбросить. Развернутая геометрия, показанная на рисунке 19, аналогична геометрии типичного сдвигового течения, в котором материал не движется в направлении, перпендикулярном каналу (направление y), и скорость в этом направлении можно отбросить.

С учетом исследований Tadmor & Gogos [131] чистый объемный расход в шнеке может быть получен без учета коэффициентов формы, связанных с потоками сопротивления и давления (2.20):

$$Q = \frac{v_{bz}BH}{2} + \frac{BH^3}{12\mu} \left(-\frac{\partial p}{\partial z} \right). \quad (2.20)$$

Два главных параметра геометрии шнека, которые затрагивают процесс, являются коэффициент уплотнения и степень сжатия, которые определены следующими уравнениями для шнеков с постоянной длиной:

- коэффициент уплотнения (2.21):

$$k_y = H_1/H_2, \quad (2.21)$$

- степень сжатия (2.22):

$$k_{сж} = \frac{(H_1 - H_2)\sin\alpha}{L}. \quad (2.22)$$

Диаметр вала конического шнека увеличивается линейно, что соответственно приводит к линейному уменьшению высоты канала между лопастями, как показано на рисунке 2.9. Если при $z = 0$; $H(z) = H_1$ и при $z = Z_1$; $H(z) = H_2$ изменение высоты канала с координатой z можно записать как (2.23):

$$H(z) = H_1 - \frac{H_1 - H_2}{Z_1} z. \quad (2.23)$$

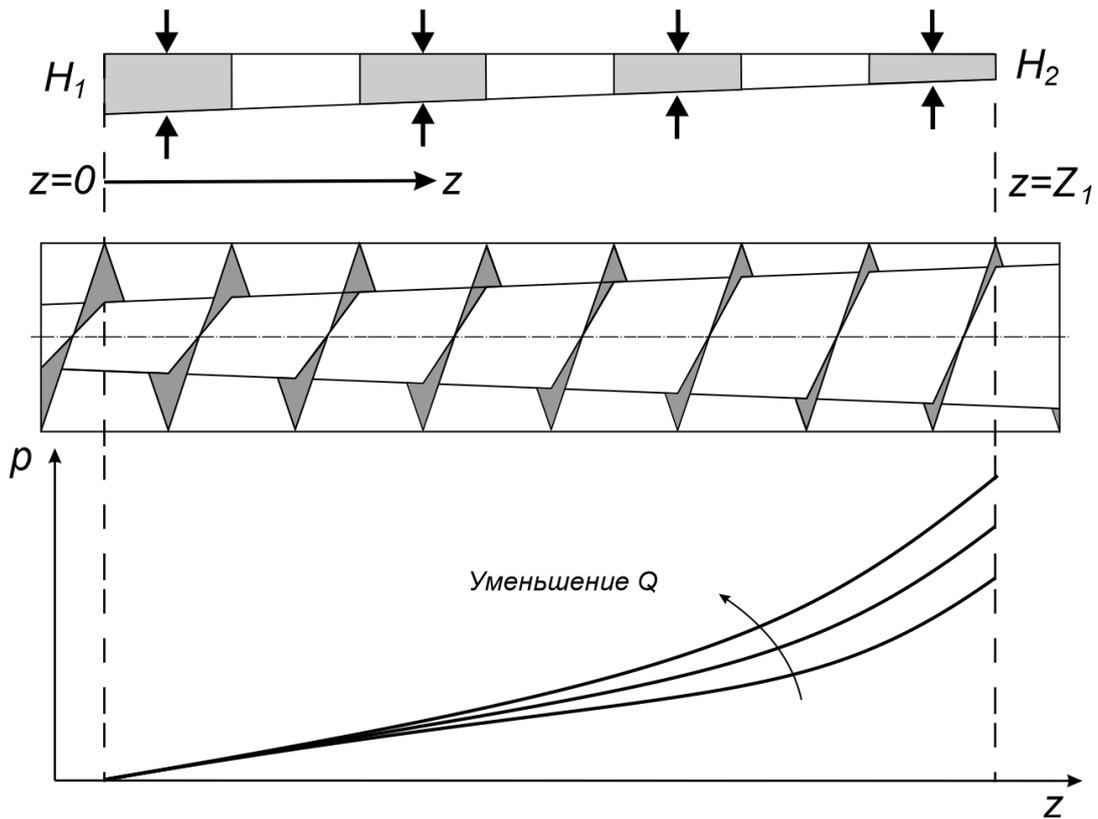


Рисунок 2.9 – Профили давления в межлопастном пространстве одношнекового пресса с коническим каналом. Влияние чистого расхода на профиль давления

Применяя производную по переменной z к приведенному выше уравнению, независимую переменную z можно заменить на переменную $h_{л}$ (2.24):

$$dz = -\frac{Z_1}{H_1 - H_2} dH. \quad (2.24)$$

Из уравнения 2.22 можно получить (2.25):

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{12\mu v_{bz}}{H^2} \left(0,5 - \frac{Q}{BHv_{bz}} \right), \quad (2.25)$$

и путем интегрирования от $z = 0$, $H = H_1$, где давление равно $p = 0$, до $z = Z_1$, $H = H_2$, где давление равно p_1 , получается (2.26):

$$p_1 = \frac{6\mu v_{bz} Z_1}{H_1 H_2} \left(1 - \frac{Q}{BH_2 v_{bz}} \cdot \frac{H_1 + H_2}{H_1} \right). \quad (2.26)$$

Профиль давления в этой конической геометрии канала схематично показан на рисунке 2.9. Наклон профиля давления не является постоянным, а увеличивается с уменьшением $h_{л}$ в соответствии с соотношением $1/H_2$ от $p = 0$ до давления, рассчитанного по уравнению 2.26. Уравнение также показывает, что давление увеличивается, когда чистый расход (Q) уменьшается.

2.4 Производительность механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья в шнековом прессе

Целесообразность механического обезвоживания торфа при малых удельных загрузках теоретически обоснована В.Г. Булычевым [12]. Он рекомендует процесс отжима вести в рационально тонком слое с учетом гидродинамических сил для предотвращения явления кольтматирования пор мелкими частицами торфа, увлекаемыми движущейся водой.

Комплекс исследований по механическому обезвоживанию торфа был проведен С.С. Корчуновым и И.И. Могилевским [31, 44]. Были получены уравнения обезвоживания и выдавливания влажного торфа при его сжатии. При исследовании производительности прессов непрерывного действия использовали принцип, согласно которому для данного влагосодержания давление на торф при отжиме не должно превосходить некоторой определенной величины [23].

Современный комплексный анализ процессов механического обезвоживания торфа приведен в работах профессора Горячева В.И. [23]. В его работах проведено теоретическое обоснование создания эффективных машин для механического обезвоживания торфа, с учетом поведения торфяного материала с аномально вязкими и упруговязкими свойствами. Особо следует подчеркнуть анализ распределения порового давления в воде при обезвоживании торфа. Получены дифференциальные уравнения процесса механического обезвоживания торфа, описывающее изменение пористости материала по высоте слоя в зависимости от продолжительности деформации. Максимальная скорость обезвоживания имеет место в начальном периоде непосредственно после приложения нагрузки. Затем интенсивность процесса падает и скорость обезвоживания стабилизируется на некотором сравнительно невысоком уровне. Это особенно необходимо учитывать при выборе пресса для отжима верхового торфа малой степени разложения, когда его многие технологические свойства в большой степени зависят от влагосодержания.

По результатам экспериментальных исследований, показано, что при статическом действии внешнего давления 1,5 МПа поровое давление в первые 10-15 с достигает своего наибольшего значения и затем, по мере оттока воды из слоя, начинает уменьшаться, что приводит к падению гидравлического напора и сокращению количества отфильтрованной жидкости в единицу времени при прочих равных условиях [23].

На рисунке 2.10 приведены результаты, полученные при обезвоживании волокнистого торфа низкой степени разложения и торфа высокой степени разложения при воздействии на них давления в течение различных периодов времени [97].

Торф в шнековом прессе находится около 1 мин, и как следует из графика, при создании давления в шнековом прессе около 500 кПа можно понизить влажность от 90 % до почти 8 3% на верховом волокнистом торфе. Механическое обезвоживание торфа высокой степени разложение с преобладанием гумуса не дает хороших результатов.

Во время работы обычно задаются давление подачи, скорость вращения вала и давление на выходе (последнее возможно косвенно, задавая положение конуса и, следовательно, размер отверстия на выходе), а поток твердого материала через пресс выходная переменная [128]. В конструкции шнековых прессов для обезвоживания значительные усилия направлены на предотвращение вращения материала вместе с валом во время консолидации, требуя вместо этого проскальзывания материала по валу и лопасти [139].

Во время работы обычно задаются давление подачи, скорость вращения вала и давление на выходе (последнее возможно косвенно, задавая положение конуса и, следовательно, размер отверстия на выходе), а поток твердого материала через пресс выходная переменная [128].

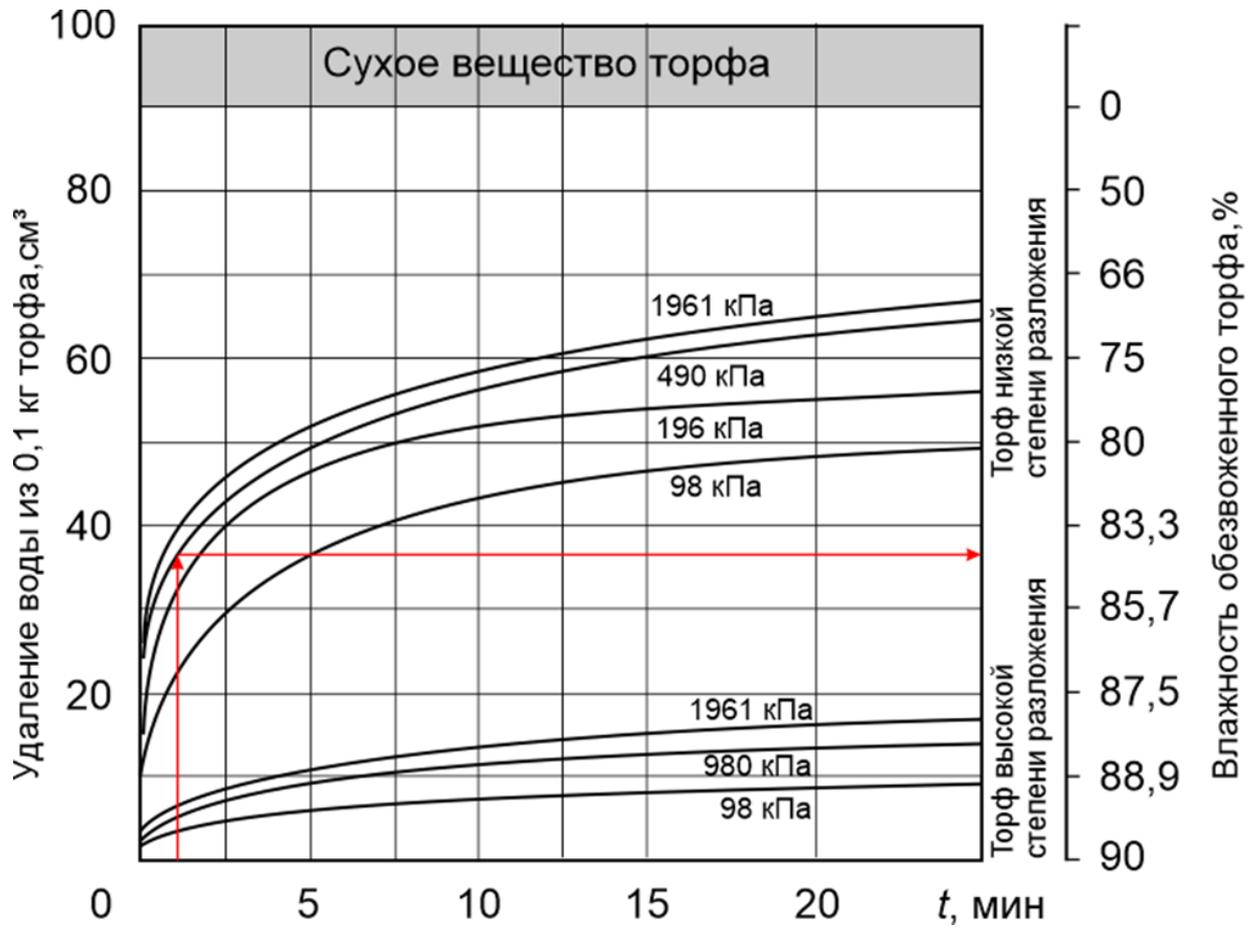


Рисунок 2.10 – Результаты, полученные при обезвоживании волокнистого торфа низкой степени разложения и торфа высокой степени разложения при воздействии на них давления в течение различных периодов времени

В конструкции шнековых прессов для обезвоживания значительные усилия направлены на предотвращение вращения материала вместе с валом во время консолидации, требуя вместо этого проскальзывания материала по валу и лопасти [139].

В большинстве шнековых прессов скорость вращения шнека варьируется от 15 до 90 мин⁻¹ [116].

Перфорированный экран шнекового пресса во многом определяет падение давления в межлопастном пространстве, создаваемое шнеком. Давление в отжимаемом материале, изменяющееся по длине шнекового пресса, можно оценить экспоненциальной зависимостью (2.27) [49]:

$$p_z = p_0 e^{kz}, \quad (2.27)$$

где p_0 – давление в начале шнека, Па;

z – перемещение материала вдоль оси шнека, м;

k – постоянный коэффициент.

Основным критерием эффективности механического обезвоживания является выход отжатой жидкости к количеству массы, загруженной в пресс [57].

На выход жидкой фазы при отжиме влияют ряд факторов:

- давление, при котором происходит отжим влаги;
- качество поступающего на отжим материала (характер его структуры);
- содержание жидкой фазы в подвергаемой отжиму сложной структуре, измеряемое в массовых процентах;
- продолжительность процесса прессования и последовательность изменения давления;
- толщина слоя отжимаемого материала.

Повышенное давление жидкости создает значительный радиальный градиент, который прижимает материал к перфорированному экрану, создавая эффективное напряжение. Поскольку кожух относительно шероховатый, а вал и лопасть гладкие, соответствующие силы сопротивления препятствуют вращению материала вокруг вала, в то время как нормальные силы от оси толкают уплотняемый материал в зону уплотнения [85].

Отжимаемая жидкость должна пройти длинный путь в массе по сложной системе капилляров, сечение которых в процессе отжима уменьшается, что свойственно процессу фильтрации по уравнению Пуазейля для течения жидкости в капиллярах (2.28) [57]:

$$V = \Delta p d_k^2 n F_k (32 \mu l), \quad (2.28)$$

где V – объем жидкости, протекающей за время t , м³;

Δp – перепад давлений на концах капилляра, Па;

d_k – диаметр капилляра, м;

n – число капилляров на единицу площади слоя материала;

F_k – площадь сечения капилляра, м²;

μ – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па · с;

l – длина капилляра, м.

Уравнение Пуазейля применимо в области невысоких давлений, где течение жидкостей ламинарно. Если проводящие жидкость каналы в пористой среде представить в виде трубок определенного радиуса, то уравнение течения Пуазейля можно использовать и для пористой среды с допущением, что серия трубок длиной l составляет сеть каналов, по которым течет жидкость. Если эти трубки соединяются между собой, а не являются отдельными изолированными каналами длиной l , то процесс течения будет несколько отличаться [5].

Уравнение Пуазейля может быть записано в другой, более распространенной форме (2.29):

$$Q = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 \mu l}, \quad (2.29)$$

где Q – объемный расход жидкости, м³/с.

Если материал рассматривать в виде пучка капилляров, в которых течение жидкости можно представить как сумму потоков во всех капиллярах, тогда общий поток составит (2.30):

$$Q_{\text{общ}} = n \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 \mu l}, \quad (2.30)$$

где n – число капилляров.

При попытке использовать уравнение Пуазейля для пористой среды было сделано допущение, что серия капилляров длиной l составляет сеть каналов, по которым течет жидкость, в предположении, что жидкость движется по капилляру в ламинарном режиме.

Как видно, уравнение Пуазейля не учитывает всех вышеперечисленных факторов, влияющих на процесс механического обезвоживания, но его анализ показывает, что количество отделяемой жидкости возрастает, с увеличением разности давлений внутри слоя материала и на его поверхности, а также с увеличением диаметра капилляра и уменьшением его длины. Предельно допустимое давление, приводящее к сжатию капилляров, зависит от ряда факторов, характеризующих свойства материала, и устанавливается

экспериментально. На практике это давление составляет 0,2-1,0 МПа в механических прессах [28].

Для оценки проницаемости горных пород обычно пользуются линейным законом фильтрации Дарси, по которому скорость фильтрации жидкости в пористой среде пропорциональна градиенту давления и обратно пропорциональна динамической вязкости (2.31):

$$v = \frac{Q}{F} = \frac{k\Delta p}{\mu\Delta l}, \quad (2.31)$$

где v – скорость линейной фильтрации, м/с;

Q – объемный расход жидкости в единицу времени, м³/с;

μ – динамическая вязкость жидкости, Па · с;

F – площадь фильтрации, м²;

Δp – перепад давления, Па;

l – длина пористой среды, м;

k – проницаемость отжимаемого сырья.

Коэффициент проницаемости определяет величину площади сечения каналов пористой среды сырья, по которым происходит фильтрация жидкости.

Из анализа уравнения Пуазейля следует, что нерационально увеличивать толщину отжимаемого слоя [57].

Эффект обезвоживания будет определяться конусностью вала шнека. На производительность пресса и коэффициент уплотнения торфяного сырья влияет угол конуса.

Полный коэффициент уплотнения по длине шнека (2.32):

$$k_y = \frac{V_n}{V_1} = \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{V_3}{V_2} \dots \frac{V_n}{V_{n-1}}, \quad (2.32)$$

где V_1, V_2, V_n – объем с 1-го по n -й круг межлопастного пространства, м³.

Объем межлопастного пространства (2.33):

$$V_i = \frac{\pi B}{4} (D^2 - d_i^2). \quad (2.33)$$

Объем каждой шаговой лопасти выражается как (2.34):

$$V_{yi} = eH_i \sqrt{(\pi D_{cBi})^2 + B^2}. \quad (2.34)$$

Таким образом, объем сырья может быть выражен как (2.35 – 2.38):

$$V_i = \frac{\pi B}{4} (D^2 - d_i^2) - e H_i \sqrt{(\pi D_{cBi})^2 + B^2}, \quad (2.35)$$

где

$$D_{cBi} = (D + d_{cBi})/2, \quad (2.36)$$

$$d_{cBi} = (d_i + d_{i+1})/2, \quad (2.37)$$

$$d_{i+1} = d_i + 2H_i \operatorname{tg}(\theta/2). \quad (2.38)$$

Производительность шнекового пресса по поступающему сырью (кг/с) (2.39, 2.40):

$$Q_{ш} = \pi(D_{ш}^2 - d_{ш}^2)4Bn\gamma k_{ш}, \quad (2.39)$$

где $D_{ш}$ – диаметр шнека в зоне загрузки, м;

B – шаг шнека винта в зоне загрузки, м;

n – частота вращения шнека, с^{-1} ;

γ – объемная масса поступающего сырья, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$k_{ш}$ – коэффициент рабочего пространства наполнения шнека, учитывающий заполнение валом и лопастями шнека.

Или:

$$Q_i = V_i n \gamma k_{ш} \mu, \quad (2.40)$$

где μ – входная концентрация.

2.5. Выводы по главе 2

На основе анализа реологических свойств торфяного сырья при его обезвоживании в шнековом прессе разработан концептуальный проект пресса для механического обезвоживания торфяного сырья.

Проанализирована конструкция шнекового вала, основного конструктивного элемента, влияющего на эффективность обезвоживания торфяного сырья. В этой конструкции используется конический шнековый вал и компоненты машины состоят в основном из двух частей: вала шнека и кожуха.

Торфяное сырье подается в шнек в зоне загрузки, где глубина межлопастного пространства максимальна. Затем торфяное сырье выталкивается вперед и сжимается между внутренней поверхностью кожуха и внутренней поверхностью вала шнека, так как толщина слоя материала уменьшается за счет его обезвоживания. При вращении вала шнека сжатый материал проталкивается вперед лопастями шнека.

Высота межлопастного пространства уменьшается линейно, материал сжимается между внутренними стенками кожуха и валом шнека. Отвод воды обеспечивается через сетчатый экран в кожухе.

ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа проведения экспериментальных исследований

В соответствии с поставленной целью и задачами исследования разработана программа экспериментальных исследований, состоящая из ряда этапов:

1. этап отбора и подготовки проб торфяного сырья;
2. этап проведения анализа физико-механических и структурных характеристик сырья;
3. этап подготовки лабораторных стендов для проведения экспериментальных исследований;
4. этап проведения экспериментов;
5. этап обработки полученной информации.

В рамках первого (подготовительного) этапа был проведен выезд на торфяное месторождение и проведен отбор проб торфяного сырья. А также проведена заготовка образцов торфяного сырья для проведения лабораторных экспериментов. В частности, проведена сепарация (разделение) от древесных включений, а также подготовка сырьевых композиций в зависимости от степени разложения торфяного сырья.

Второй этап проведения экспериментальных исследований проводился на базе лабораторий Санкт-Петербургского горного университета. В свою очередь осуществлялась подготовка приборов для определения размерно-массовых, физико-механических, водно-физических и структурных характеристик торфяного сырья для дальнейшего проведения экспериментальных исследований на лабораторных стендах.

Третий этап – этап комплектации оборудованием, который включал разработку и изготовление лабораторной оснастки и установок для проведения экспериментальных исследований по механическому обезвоживанию экскавированного торфяного сырья.

Программа экспериментальных исследований разработана на основе результатов проведенных анализов: физико-механических свойств торфяного сырья, реологии материала при обезвоживании, а также обзорного анализа шнековых прессов, используемых при механическом обезвоживании органогенного сырья.

В рамках проведения комплекса экспериментальных исследований определялись характеристики активной пористости исследуемых сырьевых композиций, параметры их текстуры, а также коэффициенты фильтрации. На лабораторных стендах и установках определялись зависимости степени механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья от состава сырьевых композиций, давления и размеров ячеек сит.

Обработка полученных в ходе экспериментов данных проводилась по общепринятым методикам.

3.2 Методика проведения экспериментальных исследований в полевых условиях

3.2.1 Нарботка опытных образцов торфяного сырья

В качестве сырьевой базы было определено торфяное месторождения «Озерное» Всеволожского района Ленинградской области (кадастровый номер 665). Торфяная залежь месторождения сложена верховым пушицево-сфагновым торфом средней степенью разложения $R=10$ %.

На торфяном месторождении «Озерное» были отобраны пробы сырья, а также заготовлены образцы экскавированного торфяного сырья для проведения экспериментальных работ по механическому обезвоживанию торфяного сырья.

Пробы торфяной залежи проводились способом зондирования по стандартной методике [29]. Зондированием определяют глубину залегания торфа в пределах распространения торфяного месторождения. наличие в залежи пней и крупных древесных остатков и глубина их залегания [38].

Зондирование торфяной залежи проводилось с помощью бура пробоотборочного ТБГ-1 с закрывающимся челноком (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Бур пробоотборочный ТБГ-1: 1 – пробоотборник (челнок); 2 – штанга; 3 – ручка

При зондировании были выбраны несколько пикетных точек на свободных от кочек местах. Далее пробы отбирались вертикальным погружением челнока бура на первоначальную глубину 0,5 м с последующим наращиванием длины штанги с шагом 0,5 м до тех пор, пока не натолкнется на то или иное препятствие.

Зондирование торфяной залежи на каждом пикете проводилось на полную ее глубину – до минерального дна. Содержимое челнока бура извлекается и переносится в пакет с последующей маркировкой точки и глубины зондирования.

Заготовка образцов сырья осуществлялась на неосушенной торфяной залежи. Выемка материала производилась вертикально и послойно, путем экскавации при помощи торфорезной лопаты на глубину до 1,0 м. Упаковка образцов экскавированного торфяного сырья производилась в герметичные полиэтиленовые мешки по степени разложения: сырье низкой степени разложения отдельно от сырья высокой степени разложения. Для определения ботанического состава, степени разложения, зольности и влажности (камеральной обработки) были отобраны пробы торфяного сырья массой около 0,3 кг [25]. Подготовленные образцы торфяного сырья были доставлены на экспериментальную базу Санкт-Петербургского горного университета для проведения дальнейших исследований [62].

3.2.2 Методика определения плотности верхнего слоя торфяной залежи

Плотность – одна из важнейших характеристик торфяной залежи. Плотностью торфа называется масса торфа в единице объема образца (3.1):

$$\rho = m/V, \quad (3.1)$$

где m и V – соответственно масса (кг) и объем (м^3) образца.

Необходимое оборудование:

- кольцо-пробоотборник;
- электронные лабораторные весы ВК (согласно ГОСТ 53228-2008);
- штангенциркуль по ГОСТ 166-89;
- нож.

Плотность торфа в залежи определяется методом режущего кольца. С этой целью цилиндрический пробоотборник (кольцо с заостренными кромками и известным объемом) [29]. Верхнюю зачищенную плоскость грунта выравнивают, срезая излишки грунта ножом, устанавливают на ней режущий край кольца и вдавливают с вращением в торфяную залежь, фиксируя границу образца для испытаний. Затем грунт снаружи кольца обрезают на глубину 5-10 мм ниже режущего края кольца, формируя столбик диаметром на 1-2 мм больше наружного диаметра кольца. После заполнения кольца грунт подрезают на 8-10 мм ниже режущего края кольца и отделяют его.

Грунт, выступающий за края кольца, срезают косыми срезами ножа, зачищают поверхность грунта вровень с краями кольца. Вынутый вместе с кольцом торфяной монолит зачищается острым ножом по торцу пробоотборника, выдавливается из пробоотборника и взвешивается. Масса образца торфа, деленная на объем, дает плотность торфа в залежи. Для получения достоверного результата число измерений должно быть не менее пяти [7]. Результаты отображены в таблице 3.1.

Размеры пробоотборника: $D = 90$ мм; $H = 20$ мм.

Объем пробоотборника: $V = 127234,5 \text{ мм}^3 = 0,0001272345 \text{ м}^3$.

Определить плотность торфа в слоях залежи (кг/м³) (3.2):

$$\rho = m_n/V_n \quad (3.2)$$

Таблица 3.1 – Определение плотности торфяной залежи

Проба	Кол-во монолитов	Средняя масса пробы, г	Объем пробы, м ³	Плотность торфа в залежи, кг/м ³
1	3	0,0676	0,0003817	531,27
2	3	0,0674		600,67
3	3	0,0851		690,50

3.2.3 Определение влажности исходного сырья

Измерение влажности исходных образцов торфяного сырья производилось на анализаторе влажности AND MX-50 (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Анализатор влажности AND MX-50

AND MX-50 анализатор для определения влагосодержания в твердых, жидких и парообразных материалах максимальным весом образца 5 г методом нагрева, что позволяет получить точный результат с помощью 20 автоматических программ измерения с погрешностью до 0,01 % влажности.

3.3 Подготовка и методика определения основных параметров смесей двух видов торфяного сырья

При карьерной добыче торфяного сырья происходит его многокомпонентное смешивание, так как срез тонкого слоя торфяного сырья экскаваторным ковшом производится со всей глубины залежи. При этом в ковше оказывается смесь торфяного сырья как низкой, так и высокой степени разложения. В процессе взаимодействия с рабочими органами торфяная смесь изменяет свои свойства и состав.

Подготовка торфяного сырья для проведения лабораторных исследований проводилась вручную. После сепарации проводилось двухкомпонентное смешивание торфяного сырья: волокнистый шейхцериево-сфагновый малой степени разложения ($R = 5 \%$) и гумифицированный пушицевого-сфагновый ($R = 25 \%$) (рисунок 3.3) в различных соотношениях без механического воздействия (сжатия) (Таблица 3.2).

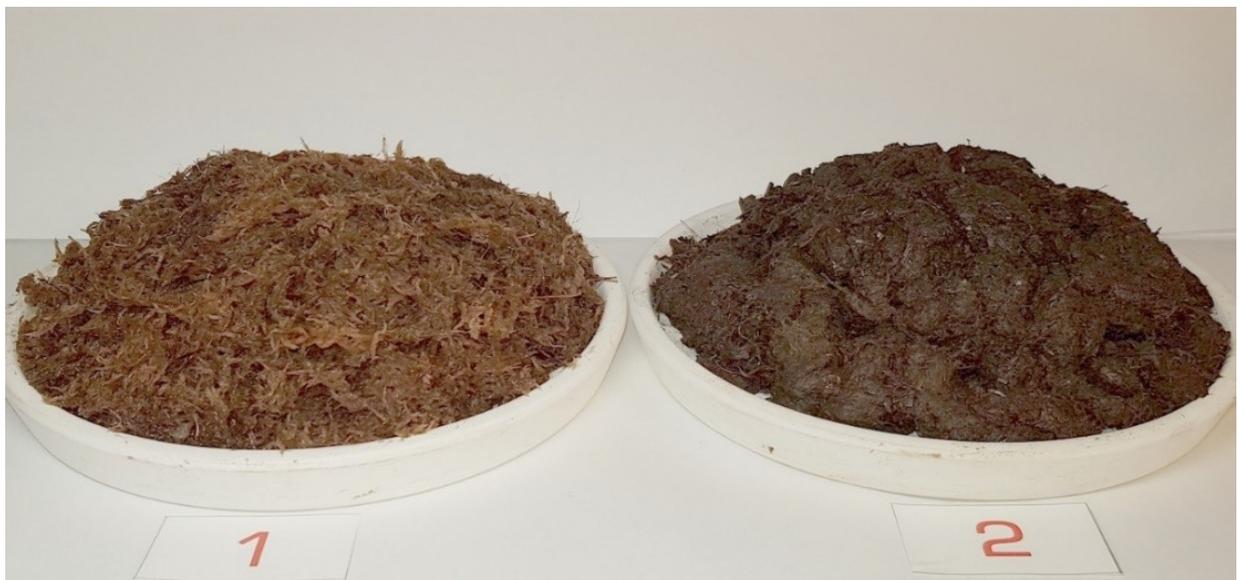


Рисунок 3.3 – Образцы заготовленного торфяного сырья: 1 – высокой степени разложения; 2 – низкой степени разложения

Таблица 3.2 – Состав смесей торфяного сырья

Степень разложения, R , %	Состав смесей, % (по объему)				
	1	2	3	4	5
5	100	75	50	25	0
25	0	25	50	75	100

Торф представляет собой полидисперсную систему, состоящую из трех фаз: твердой (остатки растений с минеральными примесями), жидкой и газообразной. В силу незначительности массы газообразной фазы, ей пренебрегают в общем весовом балансе. Соотношение между твердыми и жидкими компонентами определяется по содержанию воды в торфе [64].

Механические свойства торфяного сырья зависят от их структурных особенностей, определяемых степенью волокнистости, плотности, влажности и состава торфообразователей, косвенно отражаемого величиной зольности торфа.

Дисперсностью торфа называют степень раздробления вещества на частицы. Твердая фаза торфа является конгломератом отдельных агрегатов, связанных между собой силами различной природы. Результаты агрегатного состава выражаются кривой распределения частиц по размерам их суммарной кривой.

Средневзвешенный диаметр частиц (m) (3.3):

$$d_c = \frac{\sum d_i \Delta m_i}{\sum \Delta m_i}, \quad (3.3)$$

где d_i – среднеарифметический диаметр фракций, m ;

Δm_i – масса фракции (или ее процентное содержание по массе), kg [67].

Механическая прочность торфа характеризуется пределом прочности, т.е. условным напряжением, отвечающим наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца.

Порядок величин предела прочности и модуля деформации торфа естественной структуры приведен в таблице 3.3 [4].

Таблица 3.3 – Механические свойства торфов

Торф	Степень разложения, %	Влажность, %	Предел прочности σ_p , кПа	Модуль деформации E , кПа
Магелланикум торф	25	83 – 85	22 – 27	350 - 400
Низинный древесно-осоковый	40	75 – 80	6 – 100	250 – 400
Лесной	50	58	34	460
Пушицево-сфагновый	30	90 – 92	21 – 22	360
То же, нарушенной структуры	30	90 – 92	6	300 – 500
Пушицево-сфагновый	55	82	19	340

Пористость образцов смесей торфяного сырья определялась по почвенному методу с использованием мерного цилиндра объемом 1000 мл по разнице суммы объемов торфа и воды, выраженной в процентах, что составляет величину объема пор смеси торфяного сырья [3, 62].

В мерный цилиндр вместимостью 1000 см³ наливают 500 см³ воды. В другой мерный цилиндр насыпают такой же объем исследуемой суховоздушной почвы и затем пересыпают в первый цилиндр. Содержимое цилиндра взбалтывают и отмечают общий объем почвы и воды.

Пористость определяют по формуле (3.4):

$$x = \frac{(a + b - c) \cdot 100\%}{a}, \quad (3.4)$$

где a – объем взятого грунта, см³;

b – объем воды, см³;

c – объем смеси воды и грунта, см³.

Часто торфяные массивы естественного залегания имеют мощный верхний слой слаборазложившегося торфа.

Практический интерес представляет процесс обогащения торфяного сырья при его выемке торфом более высокой степени разложения. В этом случае выемка торфяного сырья ковшем экскаватора происходит со всей глубины залежи, путем срезания относительно тонкой стружки с откоса карьера. При этом в ковше оказывается смесь торфяного сырья как низкой, так и высокой степени разложения.

Процессы обогащения, перемешивания и диспергирования вызывают определенные, существенные отличия в структуре торфяного сырья, что связано с изменением содержания высокодисперсной составляющей как в обогащенном, так и в диспергированном торфе, а также особенностями распределения элементов таких композиций в смеси.

Изучение особенностей микроструктуры горных пород тесно связано с оценкой представительности рассматриваемых малых участков среды по отношению к представляющему интерес объему среды в целом.

При этом изучение геометрических, топологических и статистических свойств неоднородного порового пространства оправдано тесной связью этих характеристик с физико-механическими процессами, протекающими в поровом пространстве при механической переработке торфяного сырья [62].

Среди задач микроструктурного анализа пористых материалов важную роль играет исследование статистических геометрических свойств поверхности порового пространства [62, 111].

Учитывая сложный и нерегулярный характер геометрии пор горных материалов, естественно, использовать фрактальную геометрию [62, 63].

Понятие фрактальной (дробной) размерности D , известное под названием размерности Хаусдорфа-Безиковича, введено Мандельбротом для измерения объектов, получивших название фрактальных [36, 62].

В связи с этим актуальна задача разработки и применения новых подходов в оценке свойств поверхности торфяного сырья [62].

Одним из возможных направлений поиска таких подходов является использование теории фракталов и разработанного на ее основе фрактального

анализа, а в качестве оценочного количественного параметра – фрактальной размерности D [62].

Фрактальный анализ может быть применен к изображениям природных объектов, демонстрирующим свойства самоподобия в относительно широком диапазоне характерных масштабов (в частности, для описания и распознавания изображений измельчаемых материалов) [52].

Исследования структуры и физико-механических свойств смесей торфяного сырья выполнены на основе шейхцериево-сфагнового ($R = 5 \%$) и пушицевого-сфагнового торфа ($R = 25 \%$). Образование смесей этих компонентов осуществлялось по схеме, приведенной в таблице 3.2 [62].

Для определения коэффициента фильтрационной консолидации торфяных смесей применялся метод компрессионного сжатия в соответствии с ГОСТ Р 54477-2011. Также был определен коэффициент сжимаемости m_0 каждой из смесей [24, 62].

В состав установки для испытания торфяных смесей в условиях компрессионного сжатия входят:

- компрессионный прибор (одометр) (рисунок 3.4), состоящий из рабочего кольца с внутренними размерами, цилиндрической обоймы, перфорированных вкладыша под рабочее кольцо и штампа (пористых пластин) и поддона с емкостью для воды;
- механизм для вертикального нагружения образца грунта;
- устройства для измерения вертикальных деформаций образца грунта.

Компрессионное сжатие является частным случаем одноосного сжатия с дополнительным граничным условием - невозможностью бокового расширения. В процессе компрессионного сжатия происходит уменьшение объема порового пространства и увеличение плотности скелета грунта. В случае заполнения пор только газом данный процесс проходит практически мгновенно, а в водонасыщенных грунтах – требует времени для отжатия свободной воды из пор. Объем твердых частиц при этом считается постоянным.

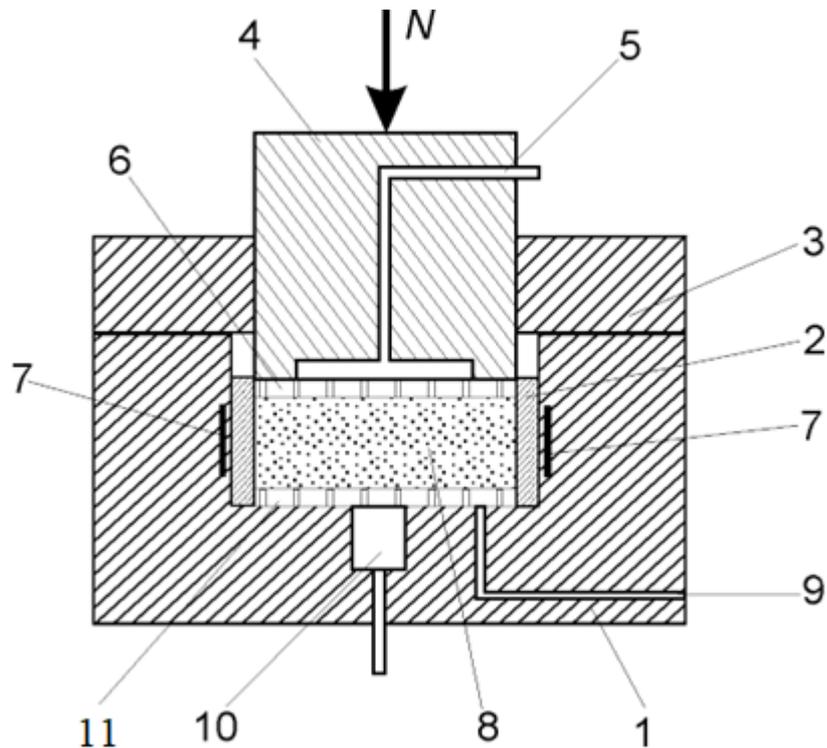


Рисунок 3.4 – Одометр с жесткой боковой границей:

1 – основание; 2 – тензометрическое кольцо; 3 – крышка; 4 – трубопровод обратного давления; 5 – 6, 11 – фильтры; 7 – датчик бокового давления; 8 – образец торфяной смеси; 9 – канал для водонасыщения; 10 – датчик порового давления

Коэффициент сжимаемости m_0 МПа⁻¹, в заданном интервале осевого напряжения $\sigma_{v,i}$ и $\sigma_{v,i+1}$ вычисляют с точностью 0,001 МПа⁻¹ по формуле (3.5):

$$m_0 = \frac{e_i - e_{i+1}}{\sigma_{v,i+1} - \sigma_{v,i}}, \quad (3.5)$$

где e_i и e_{i+1} – коэффициенты пористости, соответствующие напряжениям $\sigma_{v,i}$ и $\sigma_{v,i+1}$.

Коэффициент фильтрационной консолидации, c_v – показатель, характеризующий скорость деформации грунта при постоянном вертикальном давлении и фильтрации воды, см²/год (3.6):

$$c_v = - \frac{h^2 \lg \left(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}} \right)}{2 \Delta \lg \left(1 - \frac{u_b}{\sigma_v} \right)}, \quad (3.6)$$

где σ_{v1} – приложенное вертикальное давление при времени t_1 , Па;

σ_{v2} – приложенное вертикальное давление при времени t_2 , Па;

h – средняя высота образца в интервале времени между t_1 и t_2 , м;

Δt – интервал времени между t_1 и t_2 , с;

u_b – среднее избыточное поровое давление в интервале времени t_1 и t_2 , Па;

σ_v – среднее полное вертикальное давление в интервале времени t_1 и t_2 , Па.

3.4 Методика исследований на универсальной машине Zwick Z100

Экспериментальные исследования на сжатие торфяного сырья проводились на базе напольной универсальной машины Zwick Z100 (рисунок 3.5).

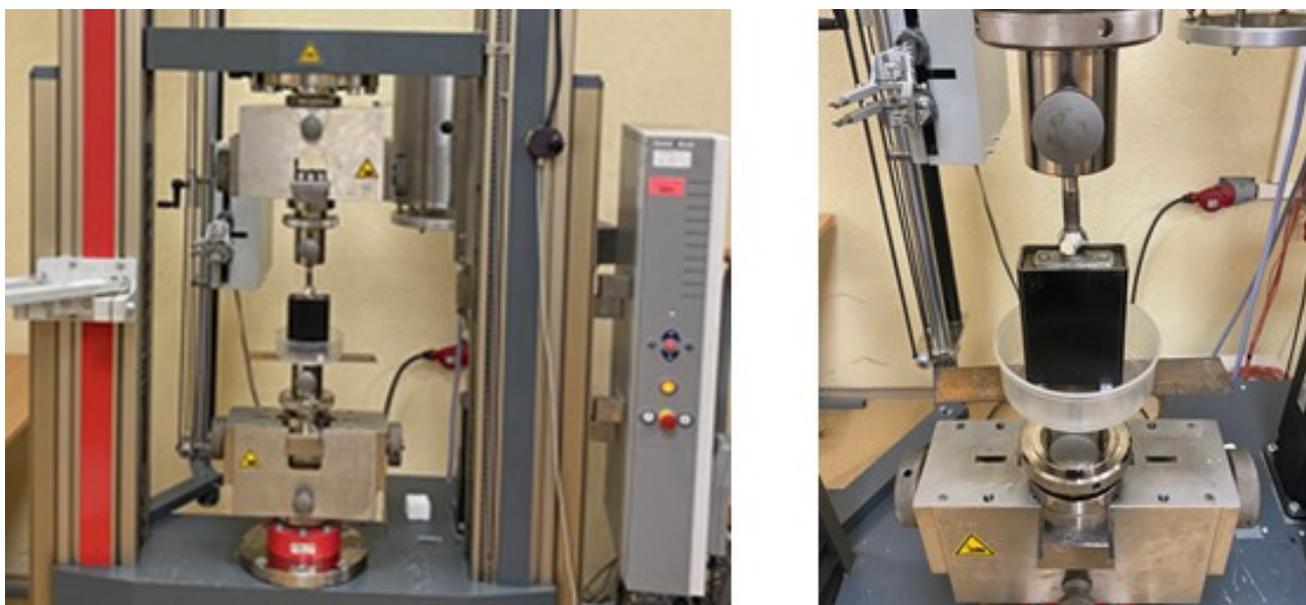


Рисунок 3.5 – Общий вид лабораторной установки Zwick Z100 и рабочая камера с лотком для сбора воды

Технические характеристики Zwick Z100:

- максимальное усилие на сжатие 100 кН;
- скорость перемещения траверсы 0,001-600 мм/мин;
- датчики силы на 1 кН и 100 кН с ценой единицы отсчета 0,0008 Н и 0,008 Н.

Размеры рабочей зоны:

- высота – 2188 мм;

- ширина – 1006 мм;
- глубина – 620 мм.

В качестве рабочей камеры использовалась форма прямоугольного сечения с полыми противоположными гранями (рисунок 3.6). Высота загрузки материала составляет – 100 мм. Площадь загрузки – 2625 мм². Нижняя грань была герметично закрыта, а верхняя накрывалась перфорированной пластиной с диаметром отверстий – 3 мм (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Рабочая камера с пуансоном и сеткой

Исследуемый образец материала помещается в рабочую камеру установки по всему объему высотой 100 мм, где на него осуществляется механическое воздействие пуансоном, который перемещается в осевом направлении и создает необходимое давление. Воздействие на образец осуществляется определенный интервал времени, по истечению которого воздействие прекращается, и образец вынимается и исследуется на содержание влаги.

Экспериментальная установка оборудована датчиками, позволяющими с определенной точностью задавать и контролировать усилие на пуансоне и его перемещение и регистрировать скорость перемещения. По измеренным

параметрам вычисляется давление, эффективная скорость сдвига, затраты энергии. Использование лабораторной установки дает возможность моделировать воздействия, оказываемые на материал в канале шнекового прессы, и исследовать их влияние степень механического обезвоживания.

3.5 Методика экспериментальных исследований на винтовом прессе

Описание лабораторной установки (рисунок 3.7):

- винтовой пресс;
- динамометр;
- электронные лабораторные весы ВК (рисунок 3.8);
- мерные колбы;
- форма для торфяной смеси прямоугольной формы, объемом - $V=0,00026525 \text{ м}^3$;
- перфорированные сетки.



Рисунок 3.7 – Общий вид лабораторной установки с винтовым прессом

На винтовом прессе проводилось отжатие трех образцов торфяного сырья: высокой степени разложения, низкой степени разложения и их смеси в соотношении - 50:50 (таблица 3.4).

Таблица 3.4 - Состав смесей торфяного сырья

Степень разложения торфа, <i>R</i> . %	Состав смеси, % (по объему) по номерам опытов		
	1	2	3
5	100	50	0
25	0	50	100

При проведении эксперимента применялась перфорированная сетка с перфорацией типа R_g , диаметром 3 мм.



Рисунок 3.8 – Электронные лабораторные весы ВК

В эксперименте определялось количество отжатой воды при двух направлениях градиента давления (вниз и вверх) в 4 положениях плунжера:

- $h_1=16$ мм (8 оборотов винтового пресса);
- $h_2=32$ мм (16 оборотов винтового пресса);
- $h_3=48$ мм (24 оборота винтового пресса);
- $h_4=64$ мм (32 оборота винтового пресса).

3.6 Методика экспериментальных исследований на гидравлическом прессе

Описание лабораторной установки:

- цилиндрическая камера с пуансоном (рисунок 3.9);
- сменные донные сетки (рисунок 3.9);
- гидравлический пресс с регулируемой высотой штока (рисунок 3.10);
- мерные стаканы;
- электронные лабораторные весы ВК.

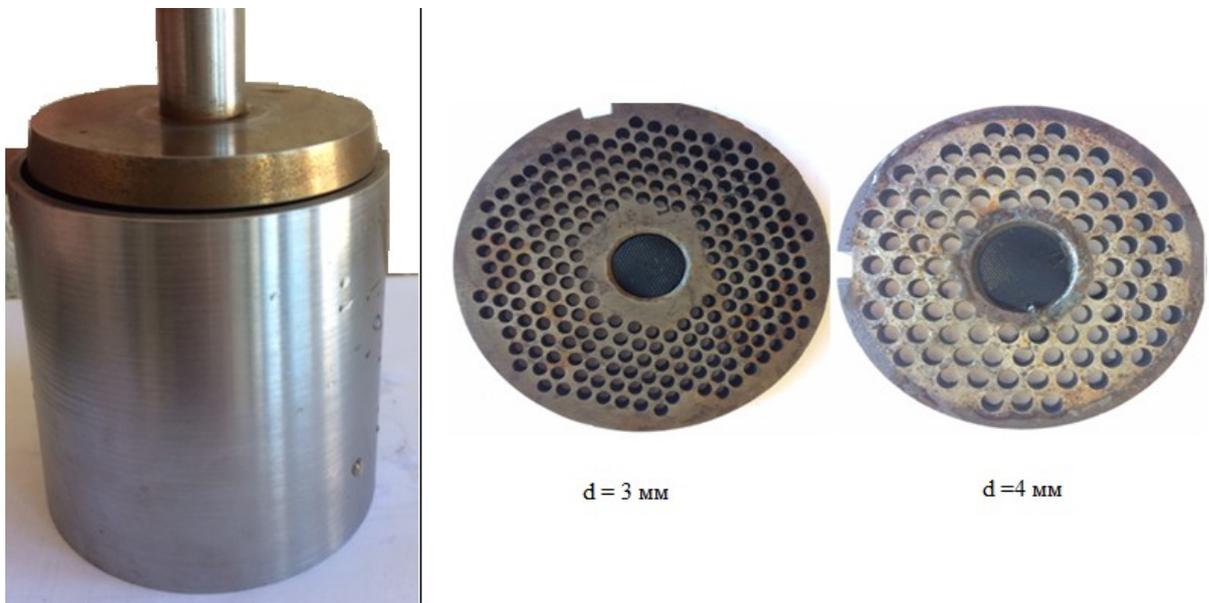


Рисунок 3.9 – Стальной цилиндр с пуансоном и сменные донные сетки

Схема лабораторного образца прессовой камеры представлена на рисунке 3.10. Сборочный чертеж приведен в Приложении Г.

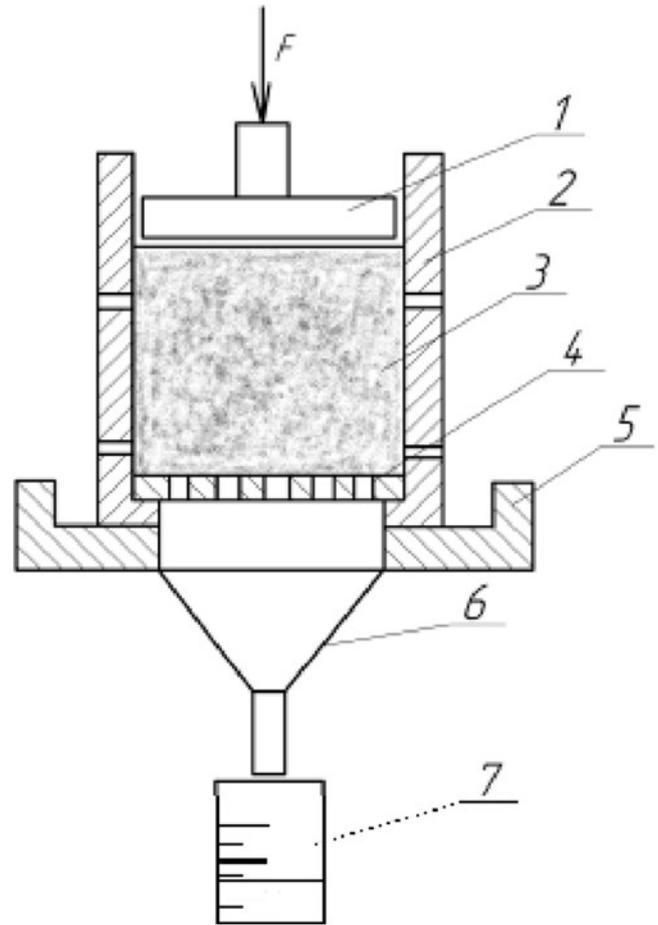


Рисунок 3.10 – Общий вид и схема гидравлического пресса: 1 – пуансон; 2 – корпус камеры с отверстиями; 3 – исследуемый материал; 4 – днище с отверстиями; 5 – поддон; 6 – воронка; 7 – мерный сосуд

Камера состоит из полого стального цилиндра 2. Диаметр применяемых цилиндров $D = 0,082$ м, высота $L = 0,08$ м. Прессование торфяного сырья осуществляется пуансоном 1. Днище 4 прессовой камеры выполнено съемным. Применялись перфорированные сетки с $d = 3$ мм и $d = 4$ мм с типом перфорации R_v .

Для проведения исследований использовались днища с разным количеством и диаметром отверстий. Под камерой устанавливается поддон для сбора отжатой влаги 5 и последующему ее отводу в мерный сосуд 7 через воронку 6. Отверстия внутри камеры и днище регулярно прочищались.

Образец смеси сырого торфяного сырья (таблица 3.4) помещался в стальной цилиндр с перфорированной сеткой на дне без дополнительного уплотнения. На прессе ход штока регулировался вручную и составлял 40 мм. Далее проводилось отжатие торфяной массы, а вода стекала в поддон через перфорированное дно.

В ходе проведения экспериментальных исследований определялись значения коэффициента уплотнения торфяного сырья в камере под действием уплотняющего давления. А также количество отжатой воды. Данные этих экспериментов использовались при определении толщины фильтрующего слоя в шнековом прессе в зависимости от диаметра отверстий перфорированной сетки.

Коэффициент уплотнения k определяется как отношение значения высоты слоя материала перед уплотнением h_0 к значению высоты слоя материала после приложения нагрузки h (3.7):

$$k = \frac{h_0}{h}. \quad (3.7)$$

3.7 Методика исследований на лабораторном шнековом прессе

Механическое обезвоживание торфяного сырья и двухкомпонентных смесей проводилось на лабораторном шнековом прессе М-2 изображенным на рисунке 3.11, с техническими характеристиками указанными в таблице 3.5. Состоящим из: двигателя 1, приемного бункера 2 для подачи торфяного сырья, в шнековый пресс и транспортировки в разработанную насадку 3 на конце которой закреплена крышка 4 с устройством противодействия.

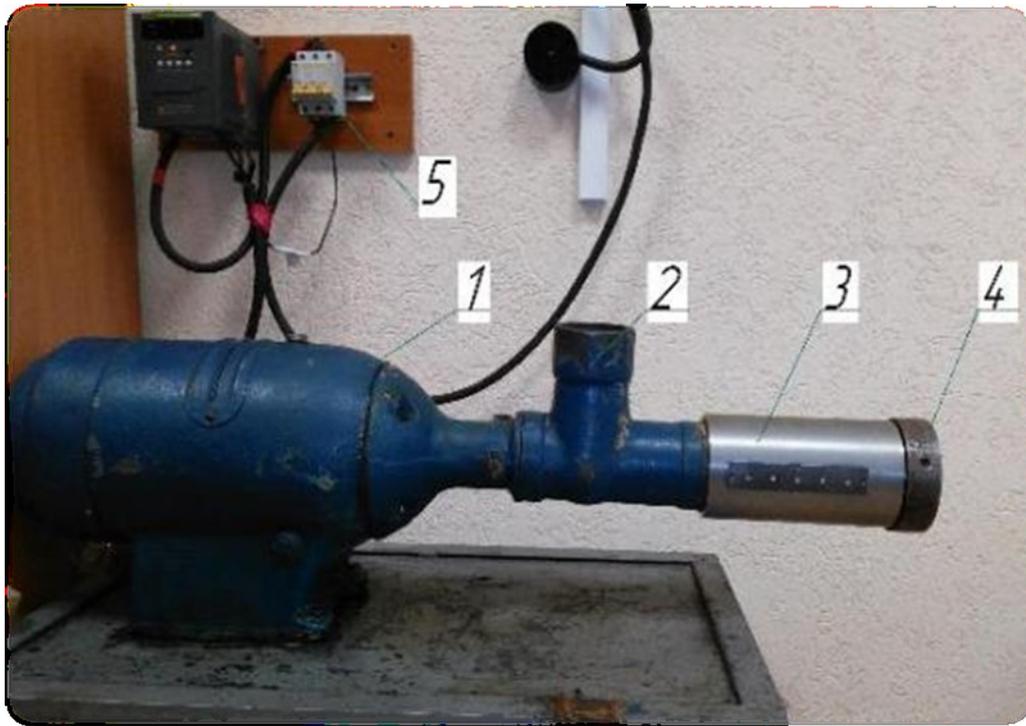


Рисунок 3.11 – Лабораторный шнековый пресс М-2 с насадкой

Таблица 3.5 - Характеристика лабораторного шнекового пресса М-2

Параметр	Значение
Тип электродвигателя	4А80А4У3
Напряжение, В	220/380
Частота вращения ротора, с ⁻¹	23,3
Мощность двигателя, кВт	1,1
Частота вращения шнека, с ⁻¹	2,83
Производительность, кг/ч	180
Размеры, мм	
длина	840
ширина	310
высота	420
Масса, кг	72

Принцип работы экспериментальной установки, следующий: торфяное сырье загружается в приемный бункер и проталкивается в шнек. На конце шнека установки расположена экспериментальная насадка для механического обезвоживания торфяного сырья, состоящая из конического шнека, сетчатого экрана в нижней части кожуха и устройства противодействия. Запуск электродвигателя пресса осуществляется аппаратурой, расположенной на щите, а

регулировка частоты вращения частотным преобразователем. Обезвоженное торфяное сырье эвакуируется шнека и транспортируется в бункер накопитель. Регулирование частоты вращения шнека прессы осуществляется через преобразователь частоты общего назначения Hyundai N100 с векторным управлением (рисунок 3.12), обеспечивающим высокие динамические характеристики приводной системы. Функция бессенсорного управления демонстрирует высокий вращающий момент в размере 200 % на скоростях, близких к 0,5 Гц, во время пуска и функционирования. Преобразователь частоты Hyundai серии N100 мощностью от 0,4 до 3,7 кВт предназначен для управления мощностью асинхронных двигателей (конвейеры, насосы, вентиляторы, деревообрабатывающее оборудование и т.п.).



Рисунок 3.12 – Преобразователь частоты Hyundai серии N100

Варьируемыми параметрами в экспериментах являлись частота вращения шнека, исходная влажность торфяного сырья, размеры ячеек сита, и состав композиций торфяного сырья с разным соотношением микро- и макроструктуры.

В ходе исследований определялись потеря влаги и сухого вещества торфяного сырья при механическом обезвоживании на шнековом прессе.

3.8 Методика обработки результатов экспериментов

При разработке методики проведения экспериментальных исследований по механическому обезвоживанию торфяного сырья применялись методы теории планирования эксперимента [13, 14].

В работе применяется метод подсчета кубов с вычислением фрактальной размерности в компьютерной программе Gwyddion 2.51 на основе изображений поверхности торфяных смесей [93].

Полученные данные были обработаны на персональном компьютере при помощи программного обеспечения Microsoft Excel, Mathcad и др., а также при помощи системы трехмерного проектирования КОМПАС-3D.

3.9 Выводы по главе 3

На основе теоретических предположений, изложенных в первой и второй главах, была разработана программа и методика экспериментальных исследований для их подтверждения на практике, в рамках темы диссертационного исследования. Программа и методика экспериментальных исследований включает в себя полевые и лабораторные исследования.

В соответствии с разработанной программой проведения экспериментальных исследований в полевых условиях было реализовано следующее: проведен анализ торфяных месторождений, составлен план выезда, осуществлен отбор проб и проведены предварительные испытания исходного материала. А также были собраны образцы торфяного сырья для последующих исследований.

По разработанной программе экспериментальных исследований в лабораторных условиях были определены зависимости изменения влагосодержания торфяного сырья от следующих параметров: усилия отжатия, диаметра отверстий перфорированной сетки, толщины фильтрующего слоя.

Подобрана используемая при проведении исследований контрольно-измерительная аппаратура.

На основе теоретических исследований были разработаны и сконструированы лабораторные стенды для проведения экспериментальных исследований.

Обработка экспериментальных данных проведена с применением компьютерной техники и методов математической статистики. Исследования проводились путем определения условий эффективного удаления влаги из материала, анализа и обобщения результатов измерений, проведенных на лабораторной установке.

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Исследование структуры смесей двух видов торфяного сырья

Процессы обогащения, перемешивания и диспергирования вызывают определенные, существенные отличия в структуре торфяного сырья, что связано с изменением содержания высокодисперсной составляющей как в обогащенном, так и в диспергированном торфе, а также особенностями распределения элементов таких композиций в смеси [62].

При механическом обезвоживании для торфяного сырья низкой степени разложения как пористого материала характерны относительно малое гидродинамическое сопротивление и высокая фильтрующая способность. Смесь торфяного сырья из волокнистых и тонкодисперсных частиц изменяет физико-механические свойства смеси. При этом при более полном заполнении пространственного каркаса снижается общий объем пор, что несколько снижает эффективность удаления воды при механическом обезвоживании [58].

Структура торфяного сырья при экскавации формируется в пределах 50:50 процентов соотношения компонентов смеси, если рассматривать в этой композиции торфяное сырье низкой степени разложения (волокна) как наполнитель, а торфяное сырье высокой степени разложения – как матрицу, которая связывает материалы разной консистенции.

Для торфяного сырья как пористого материала характерны значительная диффузионная проницаемость, малое гидродинамическое сопротивление, фильтрующая способность.

Значение пористости исходных образцов торфяного сырья показано в таблице 4.1.

Анализ фотоизображений образцов № 1, 3, 5 показал, что образец с низкой степенью разложения ($R = 5 \%$) имеет сильно развитую пористость и крупные

поровые пространства. Это типичная структура переплетения, в основе которой лежит упругий каркас, сложенный неразложившимися растительными остатками.

Таблица 4.1 – Исходная пористость образцов торфяного сырья

Степень разложения R , %	Масса пробы, кг	Плотность γ , кг/м ³	Пористость, %
5	0,0235	548	64
25	0,0356	829	45

Введение в торфяное сырье тонкодисперсных частиц ($R = 25$ %) при смешивании позволяет изменять физико-механические свойства конечной продукции. При этом снижается объем пор, что способствует более полному заполнению пространственного каркаса [58].

Смесь при соотношении компонентов 50:50 (образец № 3) рассматривается как композиция, где торф низкой степени разложения (волокна) является наполнителем, а торф высокой степени разложения – матрицей, которая связывает разнородные материалы.

Сочетание компонентов в композите позволяет получить ряд свойств, которые ни один из компонентов не проявляет, если существует как отдельная фаза. В композите реализуется комбинация свойств компонентов – принцип сочетательного действия.

Компоненты композита:

- непрерывная фаза – матрица или связующее;
- дискретная фаза – наполнитель (армирующий);
- межфазная граница.

Анализ фрактальной размерности проводился путем обработки изображений поверхности образца № 3 (смесь 50:50).

На рисунках 4.1-4.2 показано фото поверхности образца и изображение поверхности образца (2000x2000 px) в программной среде Gwyddion 2.51.



Рисунок 4.1 - Образец 3 – смесь 50:50

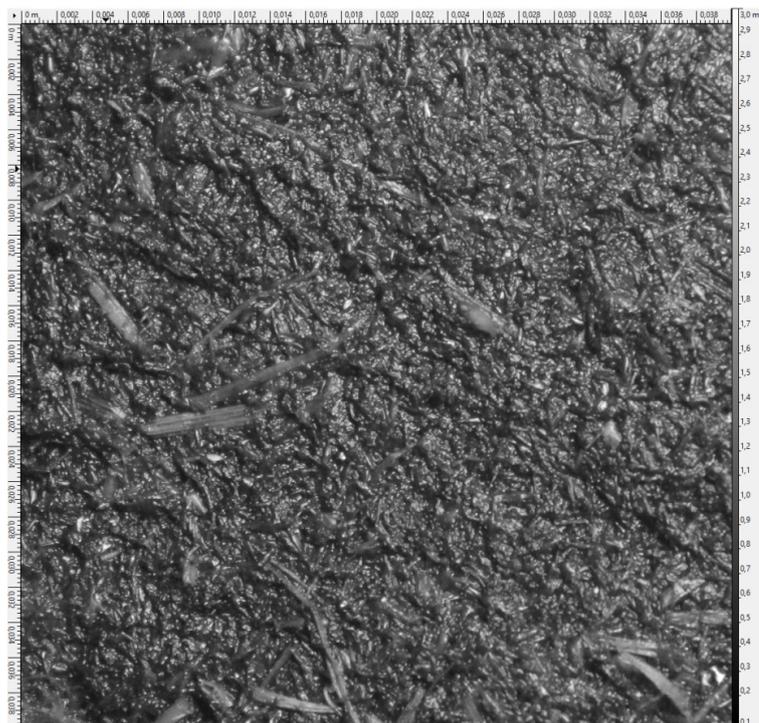


Рисунок 4.2 – Изображение поверхности образца 3 (2000x2000 px)

На рисунках 4.3-4.4 приведен трехмерный вид поверхности образца и статистические величины неровности поверхности образца в программной среде Gwyddion 2.51.

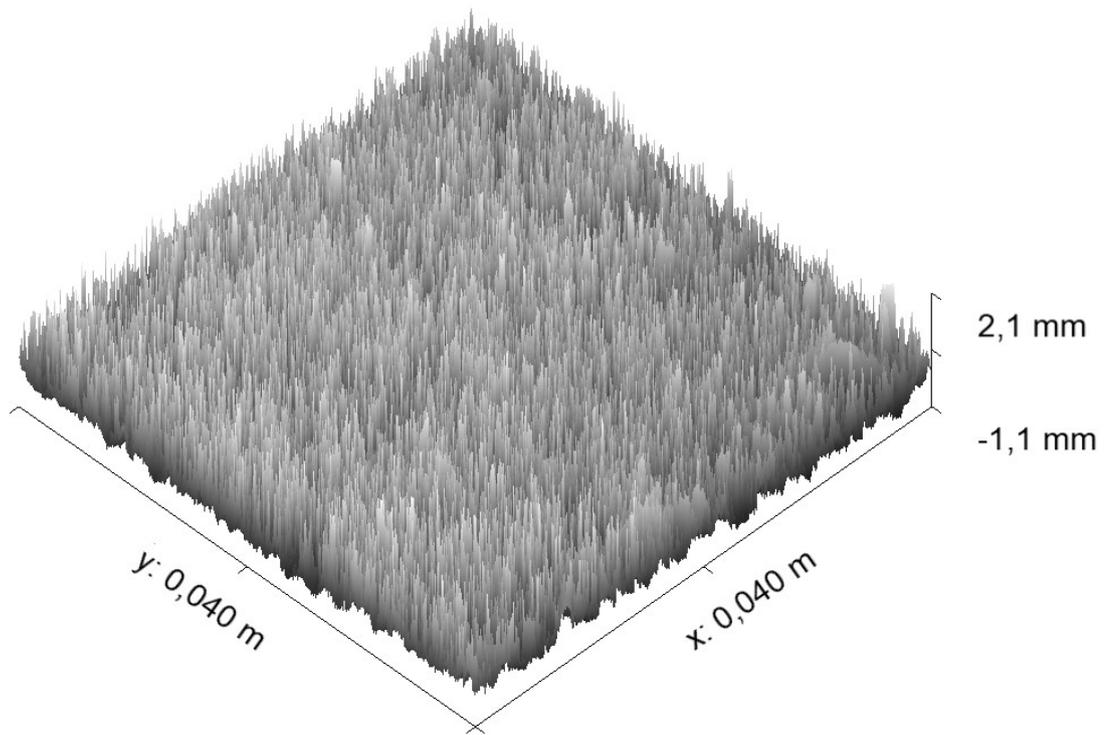


Рисунок 4.3 – Неровности поверхности образца 3 (трехмерный вид)

Основанные на моментах	
Среднее значение:	0,000 mm
Среднеквадратичная шероховатость (Sq):	421,2 μm
Ср. квадр. зёрен:	421,2 μm
Средняя шероховатость (Sa):	331,5 μm
Асимметрия (Ssk):	1,081
Эксцесс:	1,004
Порядковые	
Минимум:	-1,070 mm
Максимум:	2,120 mm
Срединное:	-0,101 mm
Максимальная высота пика (Sp):	2,120 mm
Максимальная глубина впадины (Sv):	1,070 mm
Максимальная высота (Sz):	3,190 mm
Гибридные	
Площадь проекции:	1600 mm ²
Площадь поверхности:	11030 mm ²
Объём:	0,2625 mm ³
Вариация:	11149 mm ²
Наклон θ :	3,42 deg
Наклон ϕ :	176,88 deg
Прочие	
Энтропия:	-6,494
Дефицит энтропии:	0,1404

Рисунок 4.4 - Статистические величины неровности поверхности

На рисунках 4.5-4.6 приведено распределение высоты неровностей поверхности образца и Фрактальная размерность поверхности образца в программной среде Gwyddion 2.51 [62].

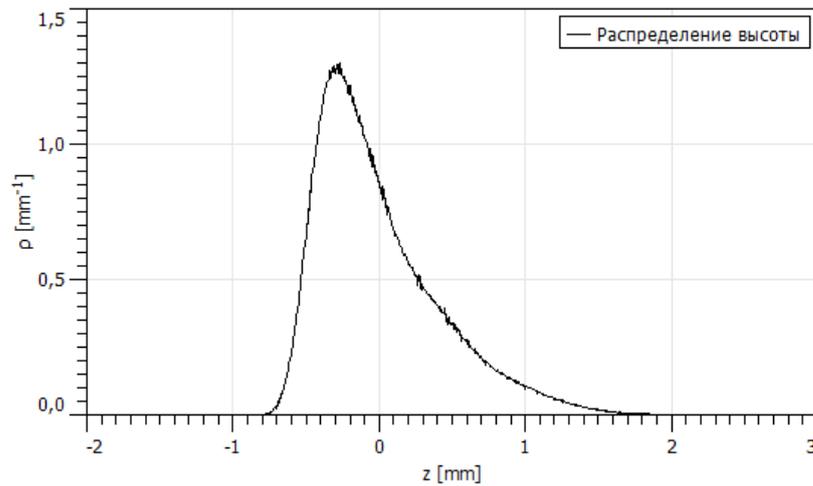


Рисунок 4.5 – Распределение высоты неровностей поверхности образца 3

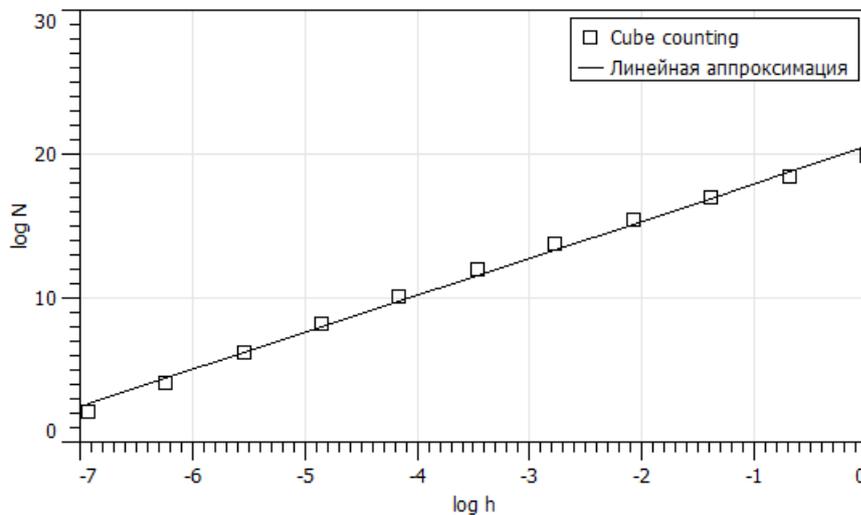


Рисунок 4.6 – Фрактальная размерность поверхности образца 3 ($D=2,579$)

Линейный наклон графика зависимости $\log N$ от $\log h$ свидетельствует о фрактальности процесса. Фрактальная размерность определяется по наклону данного графика. Значение D находится в ожидаемом диапазоне от 2 до 3, при котором $D = 2$ соответствует плоской поверхности [62].

Фрактальный анализ морфологии поверхности торфяной композиции позволил установить, что поверхность имеют фрактальную структуру с мультифрактальной размерностью $D = 2,579$ [62].

Гидравлическая проводимость торфа связана со степенью разложения и уплотнением торфа. В дополнение к размеру и форме пор, гидравлическая проводимость торфа зависит от доли активной пористости, занятой газом [72]. По данным Rezanezhad с соавторами [89], поток воды через ненасыщенный торф

зависит от фрактального характера закономерностей распределения пор, что количественно может быть описано фрактальной размерностью поровой микроструктуры.

Исследования фрактальной морфологии поверхности торфяных смесей в зависимости от пористости выявили асимптотическую тенденцию роста фрактальной размерности по мере уменьшения волокнистой части и снижения пористости смеси до значения $D = 2,597$ (рисунок 4.7) [62].

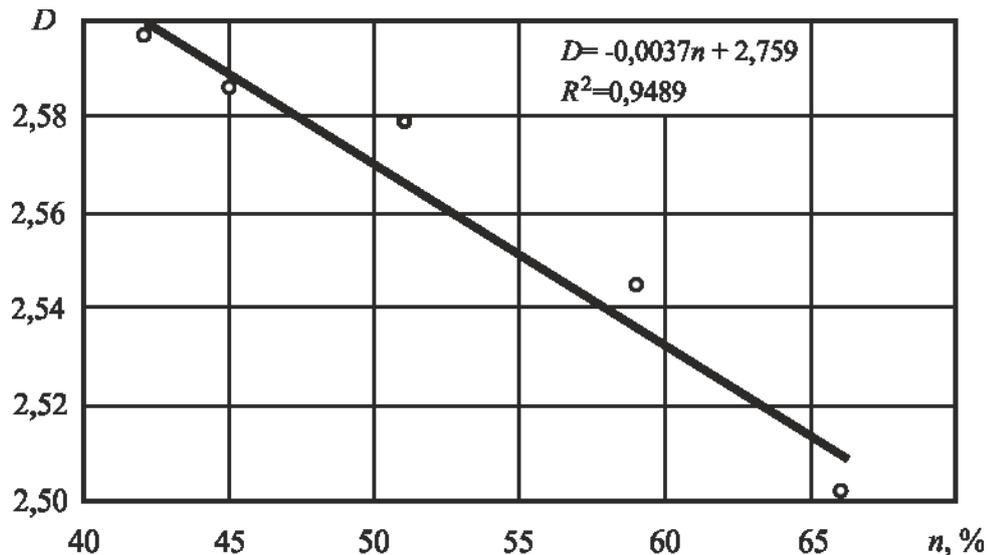


Рисунок 4.7 – Изменение фрактальной размерности поверхности торфяного сырья от пористости смесей из двух видов торфяного сырья

Применение композиций торфяного сырья, получаемых при экскавации с откоса карьера позволяет регулировать физико-механические свойства торфяного сырья за счет изменения соотношения компонентов смеси. Целевой функцией такого регулирования является увеличение коэффициента фильтрации влаги при механическом обезвоживании торфяного сырья за счет армирования композита крупными волокнами малоразложившегося торфяного сырья.

Проведенные эксперименты показали, что поверхность порового пространства образцов смесей торфяного сырья может быть охарактеризована с помощью методов фрактальной геометрии. Фрактальные размерности разных образцов смесей торфяного сырья различны. Между пористостью и фрактальной размерностью поверхности материала существует линейная зависимость с

коэффициентом детерминации $R^2=0,9489$. Фрактальная размерность D выступает численным критерием функциональных свойств (условная удельная поверхность, пористость и др.). Полученные результаты подтверждают перспективность использования предлагаемого подхода для определения фрактальной размерности поровой структуры смесей торфяного сырья [62, 110].

Полученные результаты следует учитывать при теоретических и экспериментальных исследованиях, связанных с физико-механическими процессами на пористых поверхностях торфяного сырья при его механической переработке [62].

4.2 Результаты определения пористости смесей торфяного сырья

С помощью почвенного метода была определена активная пористость образцов смесей торфяного сырья. Использовался мерный цилиндр объемом 1000 мл по разнице суммы объемов торфа и воды, выраженной в процентах, что составляет величину объема пор смеси торфяного сырья (таблица 4.2) [62].

Приведен график зависимости изменения влагосодержания и пористости при отжати (рисунок 4.8).

Таблица 4.2 – Активная пористость образцов торфяного сырья

№ опыта	Состав смеси ($R=5 / R=25$), %	Объем торфа, 10^{-4} м^3	Объем воды, 10^{-4} м^3	Объем смеси, 10^{-4} м^3	Пористость, %
1	100 / 0	6	5	7,0	67
2	50 / 50	6	5	7,9	52
3	0 / 100	6	5	8,8	42

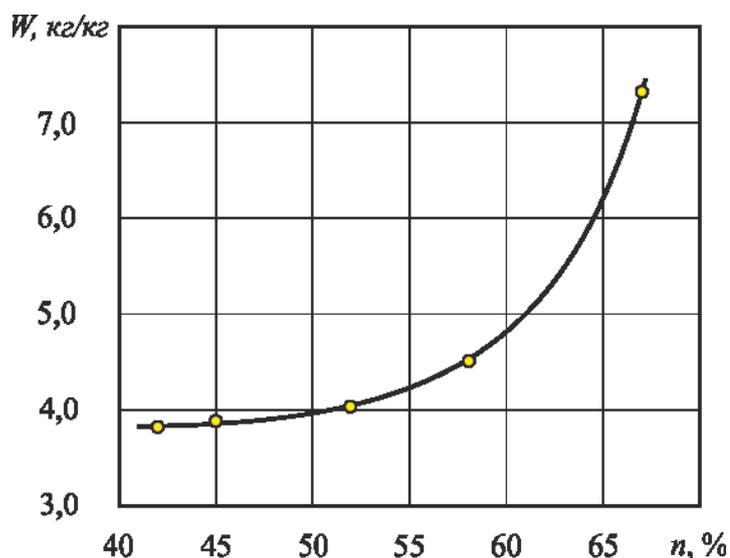


Рисунок 4.8 – График зависимости изменения влагосодержания и пористости (влагосодержание)

4.3 Результаты обезвоживания образцов торфяного сырья

4.3.1 Результаты экспериментальных исследований на винтовом прессе

Исходные данные:

- винтовой пресс (ширина 280 мм; высота 360 мм; глубина 280 мм);
- смесь торфяного сырья в соотношении 50:50, макро и микроструктур;
- $V_{\text{матрицы}} = 0,0002625 \text{ м}^3 = 262500 \text{ мм}^3$;
- $S = 0,002625 \text{ м}^2$;
- 4 положения винта с интервалом в 16 мм с нулевого положения (по 8 оборотов напорного винта).

В таблице 4.3 представлены результаты сушки бюкс с образцами торфяного сырья, где образец № 1 – низкой степени разложения, № 2 – высокой степени разложения, № 3 и № 4 – смеси в соотношении компонентов 50:50 по объему.

В таблицах 4.4, 4.5, 4.6 и 4.7 представлены результаты определения плотности и влажности исходных образцов торфяного сырья.

Таблица 4.3 – Масса бюкс с образцами торфяного сырья после сушки

№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
низкой степени разложения	высокой степени разложения	Смесь 50:50	Смесь 50:50
7,75 г	7,99 г	8,12 г	8,44 г

Таблица 4.4 – Исходные характеристики торфяного сырья низкой степени разложения

Тара № 1		Бюкса № 1	
$m_{\text{общий}}, \text{Г}$	160,86	$m_{\text{общий}}, \text{Г}$	12,73
$m_{\text{тары}}, \text{Г}$	13,22	$m_{\text{тары}}, \text{Г}$	7,36
$m_{\text{материала}}, \text{Г}$	147,64	$m_{\text{материала}}, \text{Г}$	5,37
$V_{\text{тары}}, \text{М}^3$	0,0003	$m_{\text{бюксы с}}, \text{Г}$	7,75
Плотность материала, $\gamma \text{ кг/М}^3$	492,1	$m_{\text{тс}}, \text{Г}$	0,39
Влажность начальная, $w_{\text{н}}, \%$		92,7	

Таблица 4.5 – Исходные характеристики торфяного сырья высокой степени разложения

Тара № 2		Бюкса № 2	
$m_{\text{общий}}, \text{Г}$	201,45	$m_{\text{общий}}, \text{Г}$	12,75
$m_{\text{тары}}, \text{Г}$	12,19	$m_{\text{тары}}, \text{Г}$	7,46
$m_{\text{материала}}, \text{Г}$	189,26	$m_{\text{материала}}, \text{Г}$	5,29
$V_{\text{тары}}, \text{М}^3$	0,0003	$m_{\text{бюксы с}}, \text{Г}$	7,99
Плотность материала, $\gamma \text{ кг/М}^3$	630,86	$m_{\text{тс}}, \text{Г}$	0,53
Влажность начальная, $w_{\text{н}}, \%$		90,0	

Таблица 4.6 – Исходные характеристики смеси № 3 торфяного сырья

Тара № 3		Бюкса № 3	
$m_{\text{общий}}, \text{Г}$	180,38	$m_{\text{общий}}, \text{Г}$	12,36
$m_{\text{тары}}, \text{Г}$	13,22	$m_{\text{тары}}, \text{Г}$	7,35
$m_{\text{материала}}, \text{Г}$	167,16	$m_{\text{материала}}, \text{Г}$	5,01
$V_{\text{тары}}, \text{М}^3$	0,0003	$m_{\text{бюксы с}}, \text{Г}$	8,12
Плотность материала $\gamma, \text{ кг/М}^3$	557,2	$m_{\text{тс}}, \text{Г}$	0,77
Влажность начальная, $w_{\text{н}}, \%$		90,0	

Таблица 4.7 – Исходные характеристики смеси № 4 торфяного сырья

Тара № 4		Бюкса № 4	
$m_{\text{общий}}, \text{Г}$	180,65	$m_{\text{общий}}, \text{Г}$	12,65
$m_{\text{тары}}, \text{Г}$	12,19	$m_{\text{тары}}, \text{Г}$	7,94
$m_{\text{материала}}, \text{Г}$	168,46	$m_{\text{материала}}, \text{Г}$	4,71
$V_{\text{тары}}, \text{М}^3$	0,0003	$m_{\text{бюксы с}}, \text{Г}$	8,44
Плотность материала γ , $\text{кг}/\text{м}^3$	561,5	$m_{\text{тс}}, \text{Г}$	0,5
Влажность начальная, $w_{\text{н}}$, %		91,35	

Отжатие воды из образцов № 3 и № 4 на винтовом прессе производилось через перфорированную сетку с диаметром отверстий $d_{\text{отв}}=3$ мм.

При отжатии воды из образца № 4 перфорированная сетка размещалась сверху, поэтому выход воды происходил через нее. Результаты представлены в таблицах 4.8 и 4.9.

Таблица 4.8 – Результаты отжатия образца № 4

Толщина фильтрующего слоя, мм (обороты винта)	Объём отжатой воды, мл	Усилие отжатия, P , Н
16 (8 оборотов)	0	4
32 (16 оборотов)	2	7
48 (24 оборота)	19	10
64 (32 оборота)	32	>10
Общий объём отжатой воды, мл	53	

Таблица 4.9 – Результаты обезвоживания образца № 4

Исходная влажность, %	91,35
Исходное влагосодержание, $\text{кг}/\text{кг}$	10,56
Влажность после обезвоживания, %	85,8
Влагосодержание после обезвоживания, $\text{кг}/\text{кг}$	6,04

По результатам обезвоживания образца № 4 изменение влагосодержания исходного сырья составляет – 4,52 $\text{кг}/\text{кг}$.

При обезвоживании образца № 3 перфорированная сетка размещалась снизу, поэтому выход воды происходил через нее. Результаты представлены в таблицах 4.10 и 4.11.

Таблица 4.10 – Результаты обезвоживания образца № 3

Толщина фильтрующего слоя, мм (обороты винта)	Объем отжатой воды, мл	Усилие отжатия, <i>P</i> , Н
16 (8 оборотов)	0	4
32 (16 оборотов)	14	7
48 (24 оборота)	30	10
64 (32 оборота)	31	>10
Общий объем отжатой воды, мл	75	

Таблица 4.11 – Результаты обезвоживания образца № 3

Исходная влажность, %	91,35
Исходное влагосодержание, кг/кг	10,56
Влажность после отжатия, %	83,65
Влагосодержание после отжатия, кг/кг	5,12

По результатам обезвоживания образца № 3 изменение влагосодержания исходного торфяного сырья составляет – 5,44 кг/кг.

Количество отжатой воды в каждой точке межвиткового канала винтового пресса и общее количество воды отображены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Результаты обезвоживания на винтовом прессе

Направление обезвоживания	Выход воды, мл при высоте межвиткового канала, мм					Выход воды всего, мл
	100	84	68	52	36	
Вверх	0	0	2	19	32	53
Вниз	0	0	14	30	31	75

На рисунках 4.9 и 4.10 отображены изменение давления в материале от величины уменьшения глубины канала и выход воды.

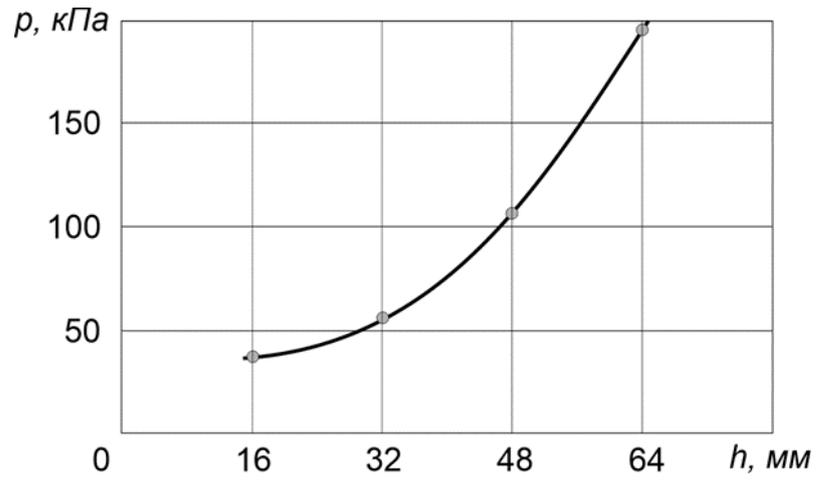
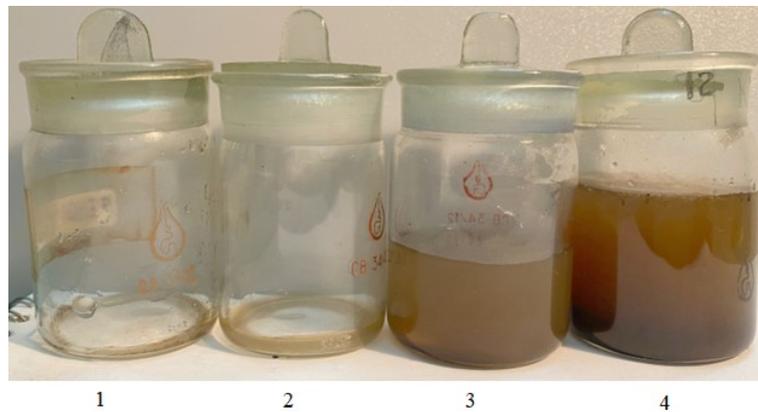


Рисунок 4.9 – Изменение давления в материале от величины уменьшения глубины канала



1 2 3 4

а



1 2 3 4

б

Рисунок 4.10 – Выход воды сверху (а) и снизу (б) при уменьшении высоты межлопастного канала шнека: 1 – 16 мм, 2 – 32 мм, 3 – 48 мм, 4 – 64 мм

В результате проведения эксперимента на винтовом прессе можно сделать вывод, что при уменьшении высоты межлопастного канала шнека увеличивается количество отжатой воды (рисунок 4.9 и 4.10) прямо пропорционально увеличению давления при отжатии.

На рисунке 4.11 показана схема шнекового пресса с оценкой эюры гидростатического давления воды и потенциального выхода воды через перфорированный экран.

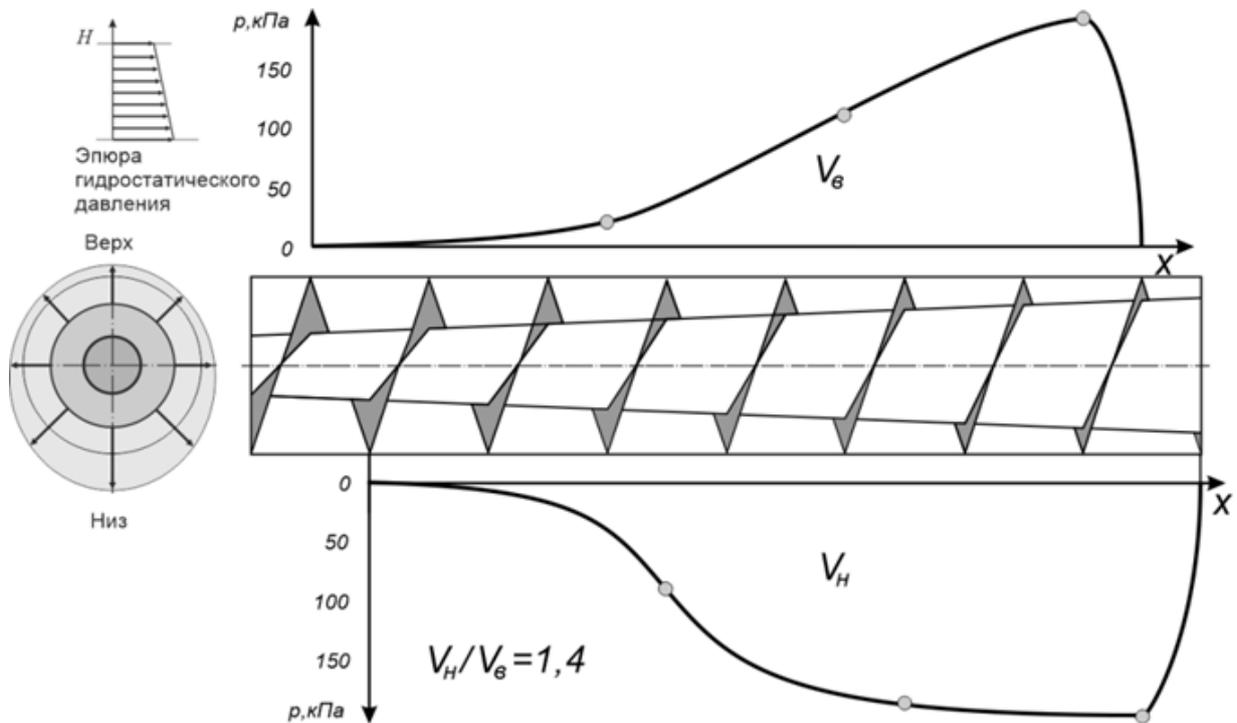


Рисунок 4.11 – Эюра гидростатического давления и выход воды через перфорационный экран шнека

С учетом наличия гидростатического давления выход воды сверху почти в 1,5 раза меньше, чем снизу (таблица 4.12), что следует учитывать при проектировании перфорированного экрана шнекового пресса для механического обезвоживания торфяного сырья. Рациональным решением может быть установка перфорированного экрана шнекового пресса в нижнем секторе кожуха пресса равном 270 град.

4.3.2 Результаты экспериментальных исследований на гидравлическом прессе

При проведении исследований на гидравлическом прессе установлено, что при отжати торфяной смеси с содержанием сырья высокой степени разложения – 100 % отжатие на всю высоту штока пресса невозможно в силу значительной плотности материала. Коэффициент уплотнения материала составил – 1,2 (таблица 4.13). Количество отжатой воды при этом было минимальным (рисунок 4.14).

А при отжати образцов низкой степени разложения и смеси с соотношением компонентов 50:50 коэффициент уплотнения материала составил – 2, в соответствии с методикой проведения экспериментального исследования (таблица 4.14 и 4.15).

Таблица 4.13 – Результаты отжати на гидравлическом прессе образца торфяного сырья низкой степени разложения

Параметры	Величина
Исходная влажность, %, w_0	89,46
Влажность после отжати с сеткой с $d = 4$ мм	88,35
Влажность после отжати с сеткой с $d = 3$ мм	87,26
Коэффициент уплотнения, k	1,2

Таблица 4.14 – Результаты отжати на гидравлическом прессе образца смеси торфяного сырья в соотношении 50-50

Параметры	Величина
Исходная влажность, %, w_0	91,1
Влажность после отжати с сеткой с $d = 4$ мм	82,05
Влажность после отжати с сеткой с $d = 3$ мм	81,31
Коэффициент уплотнения, k	2,0

Таблица 4.15 – Результаты отжати на гидравлическом прессе образца торфяного сырья высокой степени разложения

Параметры	Величина
Исходная влажность, %, w_0	91,7
Влажность после отжати с сеткой с $d = 4$ мм	86,77

Продолжение таблицы 4.15

Влажность после отжатия с сеткой с $d = 3$ мм	86,2
Коэффициент уплотнения, k	2,0

На рисунке 4.12 показано сравнительное количество отжатой воды из образцов торфяного сырья: 1 – образец торфяного сырья низкой степени разложения; 2 – образец смеси с соотношением компонентов 50:50; 3 – образец торфяного сырья высокой степени разложения. Из образцов 2 и 3 вместе с водой выходит и мелкодисперсная гумифицированная часть торфяного сырья.

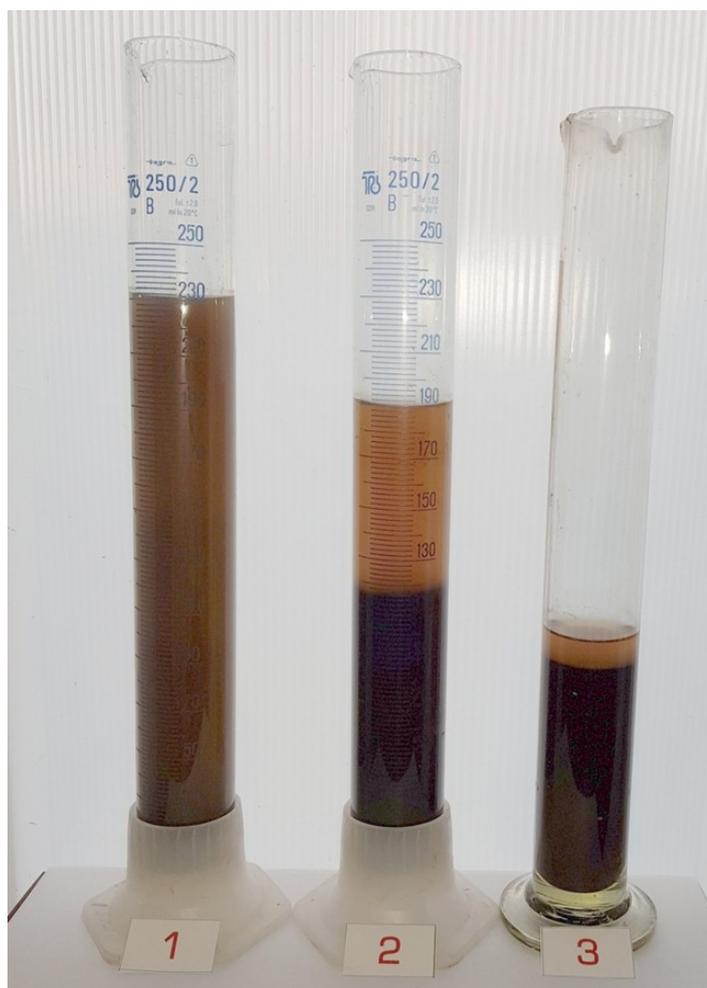


Рисунок 4.12 – Количество отжатой воды из образцов торфяного сырья: 1 – образец торфяного сырья низкой степени разложения; 2 – образец смеси с соотношением компонентов 50:50; 3 – образец торфяного сырья высокой степени разложения

Из образцов 2 и 3 вместе с водой выходит и мелкодисперсная гумифицированная часть торфяного сырья. Образец торфяного сырья высокой

степени разложения трудно обезвоживается с малым количеством выхода воды. Предварительное обезвоживание смеси торфяного сырья низкой и высокой степени разложения, образующейся в ковше экскаватора, показало удовлетворительные для практики результаты.

4.3.3 Результаты экспериментальных исследований на универсальной машине Zwick Z100

Результатом проведения экспериментальных исследований на универсальной машине Zwick Z100 является определение усилия необходимого для сжатия образца смеси торфяного сырья ($V=262500 \text{ мм}^3$) в соотношении компонентов 50:50 при деформации образца в 60 %.

На рисунке 4.13 показано количество отжатой воды из образца торфяного сырья и вид брикета обезвоженного торфяного сырья.



Рисунок 4.13 – Выход воды из образца торфяного сырья (а) при отжатии на универсальной машине Zwick Z100 и вид брикета обезвоженного торфяного сырья (б)

Уплотненная поверхность брикета смеси торфяного сырья при соотношении компонентов 50:50 показывает наличие торфяных волокон в качестве физического кондиционера для повышения эффективности обезвоживания.

На рисунке 4.14 приведен протокол процесса обезвоживания смеси торфяного сырья низкой и высокой степени разложения и график роста силы сжатия материала с увеличением деформации. Экспериментально установлено, что максимальное усилие составляет 305 Н. Следует полагать, что давление, полученное при экспериментальном исследовании равно вертикальному давлению в межлопастном пространстве последнего витка шнека в прессе (4.1):

$$P = \frac{F}{S} = \frac{305 \text{ Н}}{0,002625 \text{ м}^2} = 116190,476 \text{ Па} \approx 116 \text{ кПа.} \quad (4.1)$$

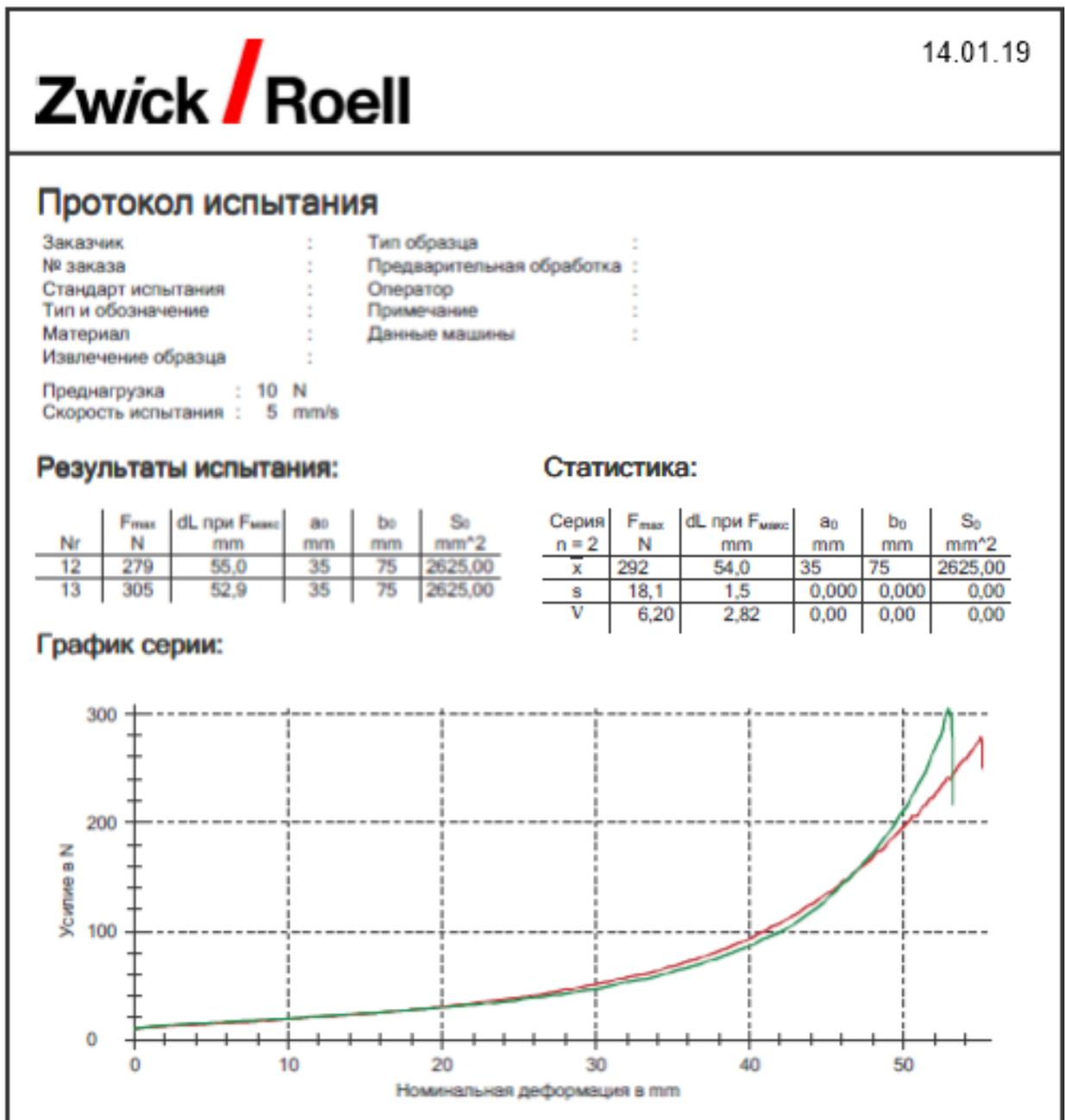


Рисунок 4.14 – Результаты испытаний на универсальной машине Zwick Z100

4.3.4 Результаты экспериментальных исследований на лабораторном шнековом прессе

Обезвоживание на лабораторном шнековом прессе образца торфяного сырья низкой степени разложения с использованием перфорированного экрана диаметром 3 мм сопровождалось выдавливанием через отверстия экрана небольшого количества мелких волокон (рисунок 4.15). На рисунке 4.16 показан общий вид обезвоженного торфяного сырья низкой степени разложения с рыхлой структурой.



Рисунок 4.15 – Волокна торфяного сырья на сетке



Рисунок 4.16 – Отжатое торфяное сырье низкой степени разложения

Обезвоживание образца торфяного сырья высокой степени разложения с использованием перфорированного экрана диаметром 3 мм сопровождалось выдавливанием через отверстия экрана значительного количества гумуса (рисунок 4.17). На рисунке 4.18 показан общий вид торфяного сырья высокой степени разложения после выхода из пресса.



Рисунок 4.17 – Выход значительного количества гумуса при обезвоживании торфяного сырья высокой степени разложения



Рисунок 4.18 – Торфяное сырье высокой степени разложения после обезвоживания

Обезвоживание смеси торфяного сырья с использованием перфорированного экрана диаметром 3 мм сопровождалось выдавливанием через отверстия экрана воды и некоторого количества гумуса (рисунок 4.19). На рисунке 4.20 показан общий вид смеси торфяного сырья после выхода из пресса.



Рисунок 4.19 – Процесс обезвоживания смеси торфяного сырья



Рисунок 4.20 – Смесь торфяного сырья после обезвоживания

Результаты механического обезвоживания образцов торфяного сырья на лабораторном шнековом прессе представлены в Приложении Б.

Механическое отжатие торфяного сырья низкой степени разложения достаточно хорошо изучено. При проведении экспериментального исследования не возникало никаких сложностей. Отжатие происходило согласно методике проведения экспериментального исследования. Потери при отжатии были минимальны (рисунок 4.15).

При отжатии торфяного сырья высокой степени разложения возникли сложности. Главным образом, они были связаны со значительными потерями сырья через отверстия фильтрующего экрана (рисунок 4.17). А также низкой степенью обезвоживания сырья.

Образец смеси торфяного сырья с соотношением компонентов - 50:50 при отжатии на лабораторном шнеке показал положительные результаты. Потери сырья при отжатии были незначительны – порядка 8 % (рисунок 4.19), что не является критическим в полевых условиях при предварительном обезвоживании. Обезвоженные образцы представлены на рисунке 4.20. Материал получился достаточно плотным, но в то же время рыхлым, благодаря присутствию физического кондиционера волокнистой структуры.

4.4 Перфорированный фильтрующий экран обечайки шнекового пресса

При проведении экспериментальных исследований по механическому обезвоживанию торфяного сырья применялись два типа перфорации: круглая перфорация со смещенными рядами отверстий (тип R_v) (рисунок 4.21) и круглая с параллельными рядами отверстий (тип R_g). В силу несущественной разницы уменьшения влажности торфяного сырья при обезвоживании был выбран тип перфорации R_v . Так как он имеет большую полезную площадь чем перфорация типа R_g . Несущественно влияет на уменьшение влажности торфяного сырья изменение размеров сетки [10].

Согласно ГОСТ 58602-2019 и каталога серийных производств перфорированных листов выбран типоразмер перфорации R_v 3,0 – 5,0 и R_v 4,0 – 6,0 [26].

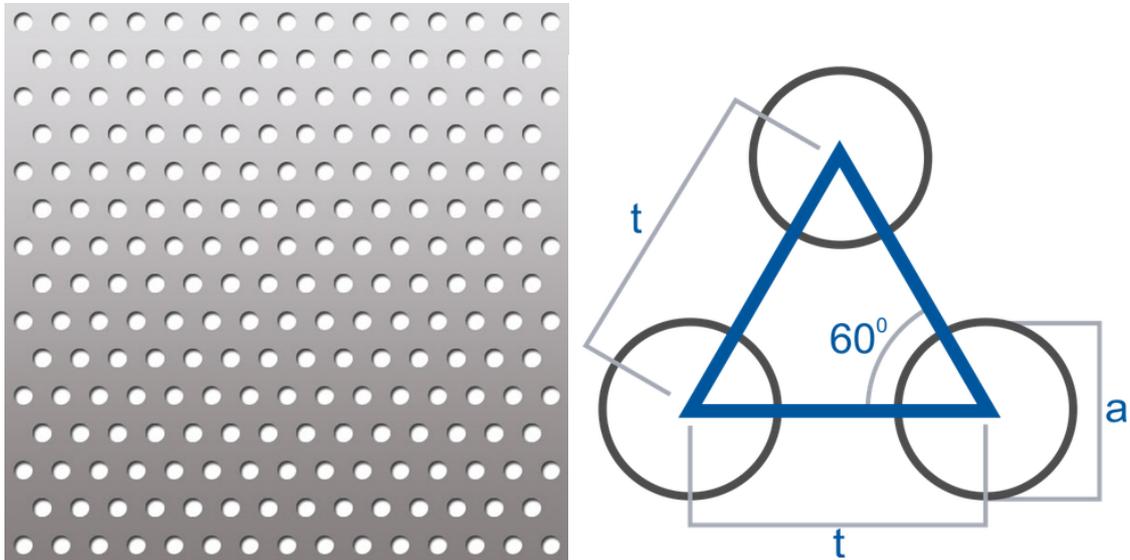


Рисунок 4.21 – Тип перфорации R_v : a – диаметр отверстий, t – межцентровое расстояние

Рекомендации по исполнению перфорированного экрана шнекового пресса для предварительного механического обезвоживания торфяного сырья следующие:

- верхняя часть экрана – сплошная из листа стали 304;
- нижняя часть экрана – перфорированная из листа стали 304;
- тип перфорации R_v 3,0 – 5,0 и R_v 4,0 – 6,0.

Перфорированный лист из нержавеющей стали обладает высокими антикоррозийными свойствами. При взаимодействии с агрессивными средами обеспечивается формирование защитной пленки на поверхности металла. Характеристики перфорированных стальных листов представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Характеристики перфорированного стального листа

Лист стальной перфорированный 1000 x 2000 мм Сталь нержавеющая 304		
Тип перфорации	Толщина, мм	Площадь отверстий, %
R_v 3,0-5,0	2,00	32,65
R_v 4,0-6,0	2,00	40,31

Уникальные антикоррозийные свойства перфорированной стали определяют широкий спектр ее использования. Она устойчива к воздействию агрессивных сред, что позволяет использовать ее на предприятиях химической, пищевой промышленности, а также в медицине.

4.5 Оценка энергоемкости процесса механического обезвоживания

Слой торфяного сырья, образующийся на перфорированном экране, имеет неодинаковую влажность по толщине. Верхний слой (ближе к оси вращения шнека) изменял свою влажность на 4-5 %, а нижний слой – на 6-8 %. В первый период за счет воздействия силового поля происходит упаковка частиц твердой фазы, что связано с уменьшением объема пор массы и, следовательно, с выжиманием жидкой фазы из них. Давление, возникающее в жидкости, приводит к фильтрации. Оно уменьшается от максимума в начале процесса до нуля в конце зоны уплотнения. Кроме того, давление изменяется во время отжима и зависит от количества жидкости, находящейся в материале. Большое влияние на процесс обезвоживания оказывает перфорация и её физико-механические свойства. С одной стороны, перфорированный экран должен обладать высокой пропускной способностью имея наименьшее гидравлическое сопротивление, а с другой – задерживать твердые частицы, не допуская проскока их вместе с отжимаемой водой.

Шнековый пресс с коническим шнеком и цилиндрической перфорированной обечайкой, состоит из трех зон: загрузочная горловина и зона уплотнения, зона фильтрации и зона отжатия (рисунок 4.22).

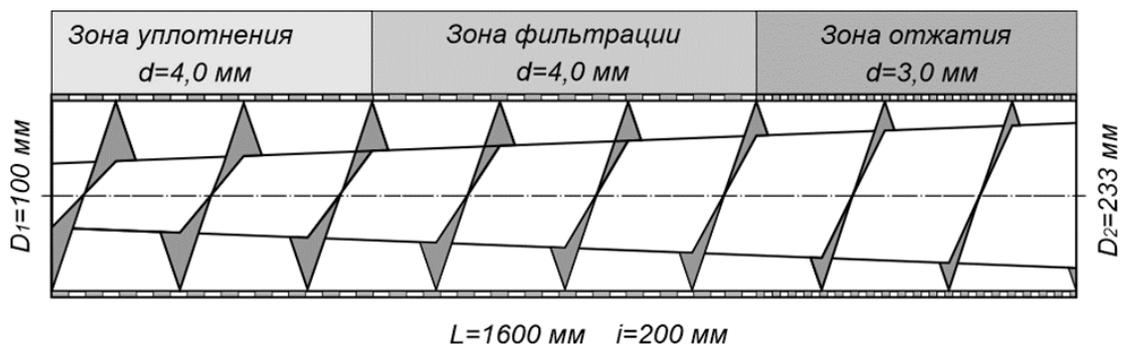


Рисунок 4.22 – Зоны обезвоживания шнекового пресса

В первый период за счет воздействия силового поля происходит упаковка частиц твердой фазы, что связано с уменьшением объема пор торфяного сырья, и, следовательно, с выжиманием жидкой фазы из них. Давление, возникающее в жидкости, приводит к ее фильтрации через пористый материал. Она уменьшается от максимума в начале процесса до нуля в конце зоны отжатия.

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить следующие рациональные конструктивные параметры шнекового пресса: шаг винта шнека 0,2 м; диаметр шнека 0,3 м; частота вращения шнека 12 мин⁻¹. Удельные затраты энергии при работе установки с указанными технологическими режимами, конструктивными параметрами и производительностью 250 кг/ч составляют 203,9 кДж/кг.

4.6 Выводы по главе 4

1. В результате экспериментальных исследований определены пористость и плотность исходных образцов торфяного сырья низкой и высокой степени разложения, а также их смеси при объемном соотношении компонентов 50:50. Определены фрактальные размерности поверхностей образцов.

2. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить следующие рациональные конструктивные параметры устройства: шаг лопастей шнека 0,2 м; диаметр шнека 0,3 м; конусность шнека 1:12; частота вращения шнека 12 мин⁻¹. Удельные затраты энергии при работе установки с указанными технологическими режимами, конструктивными параметрами и производительностью 250 кг/ч составляют 203,9 кДж/кг.

3. В результате экспериментальных исследований предложены следующие рекомендации по исполнению фильтрующего экрана вокруг шнекового пресса: верхняя часть – сплошная на секторе кожуха 90 град, нижняя – перфорированная на секторе кожуха 270 град. Размеры отверстий перфорации в нижней части составляет соответствии с зонами: уплотнения – 4,0 мм, фильтрации – 4,0 мм и отжатия – 3,0 мм

4. Анализ экспериментальных данных показал, что при соотношении компонентов торфяного сырья низкой и высокой степени разложения 50:50 в торфяном сырье отмечается стабильный процесс обезвоживания в сравнении с сырьем высокой степени разложения (микроструктура), благодаря содержанию физического кондиционера в виде торфяных волокон в торфяном композите.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Рекомендации по функционированию оборудования в условиях комплексно-механизированного карьера

В условиях комплексно-механизированного карьера с одним выемочно-погрузочным экскаватором проходка осуществляется зигзагообразно (рисунок 5.1). Ширина рабочей площадки карьера составляет 30 м, что соответствует ширине рабочей площадки при добыче кускового торфа [6].

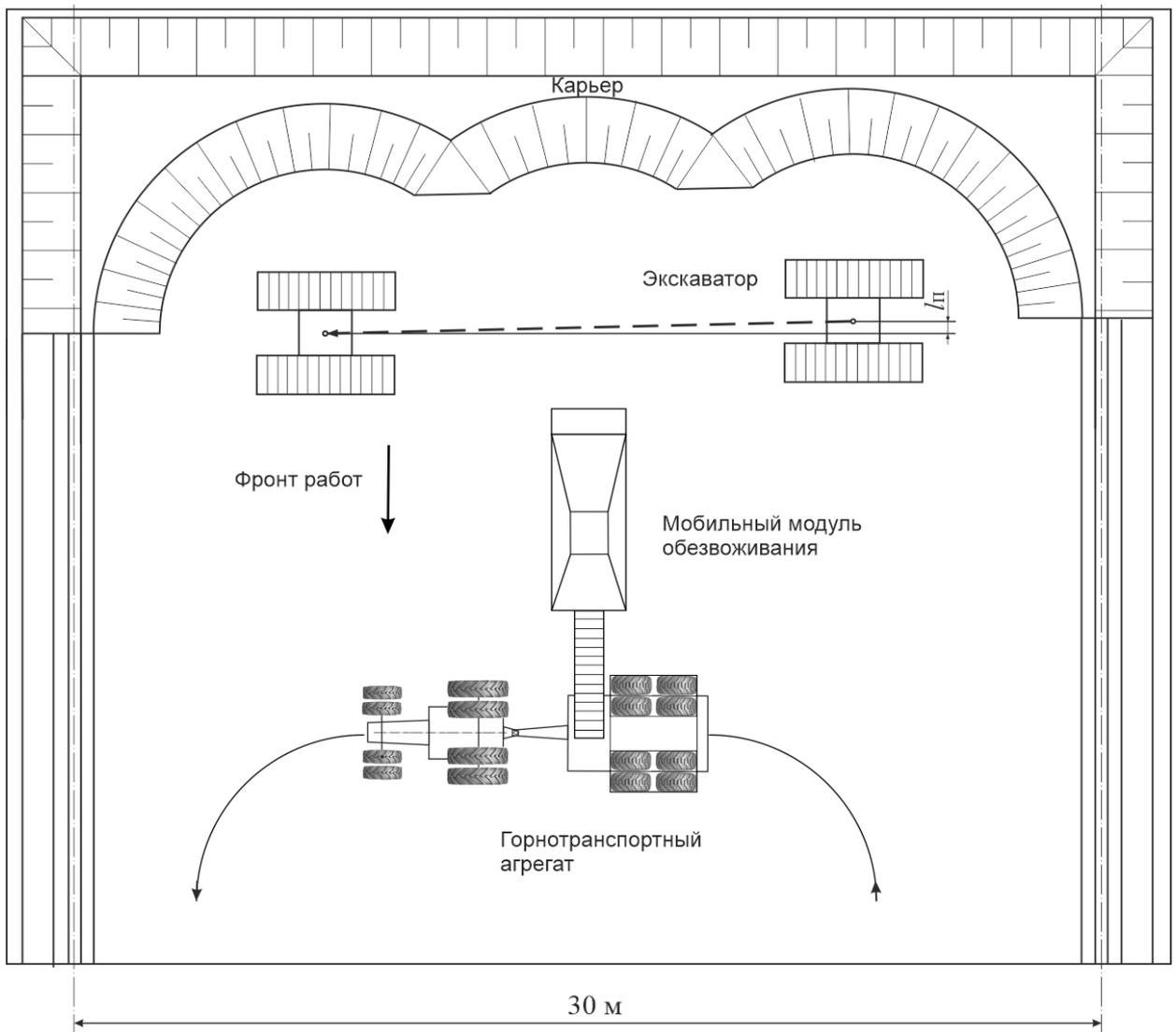


Рисунок 5.1 – Технологическая схема выемки, обезвоживания и транспортирования торфяного сырья

Рабочая площадка ограничена с боков водоотводящими канавами шириной 1,2 м и с учетом ширины двух приканавных полос имеет рабочую ширину 26,8 м и длину 217 м.

Процесс выбора оборудования включает выбор типов технологического оборудования, размера и количества единиц, необходимых для обеспечения согласованной с выемочным экскаватором производительности. Производительность мобильного модуля обезвоживания составляет $Q_{\text{мо}}=116 \text{ м}^3/\text{ч}$ при производительности экскаватора на выемке и погрузке торфяного сырья $Q_{\text{экс}}=112 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Проведенный анализ комплектации парка выемочно-транспортным оборудованием при карьерной добыче торфяного сырья показал возможность использования, в качестве выемочного оборудования серийный экскаватор, модели E160C на широких гусеницах и, в качестве транспортного оборудования, трактор Беларус-1221.4 с полуприцепом на сдвоенном колесном ходу [42].

Анализ показал, что в технологию добычи торфяного сырья карьерным способом целесообразно включить внутрикарьерное механическое обезвоживание экскавированного торфяного сырья. На схеме рабочей площадки карьера (рисунок 5.1) показано расположение мобильного модуля обезвоживания между выемочным экскаватором и горнотранспортным агрегатом.

5.2 Структура и параметры модуля обезвоживания торфяного сырья

Мобильная установка в составе внутрикарьерного комплекта оборудования позволяет производить одновременное обезвоживание и усреднение экскавированного торфяного сырья.

Практический опыт применения шнековых прессов в горной промышленности показывает, ряд преимуществ перед другими видами оборудования по механическому обезвоживанию:

- непрерывность процесса;
- эффективность процесса обезвоживания;

- минимальная материалоемкость и энергоемкость;
- простота конструктивного исполнения модуля;
- удобство при обслуживании и ремонте.

Шнековые прессы хорошо масштабируемы, что делает их идеальным выбором для монтажа на мобильном гусеничном шасси для перемещения по территории карьера [41].

Для обоснования геометрических параметров конструкции шнекового пресса по обезвоживанию торфяного сырья, на основании выполненного выбора рациональной формы предложены размеры, представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Характеристики конусного шнека пресса

Наименование параметра	Величина
Диаметр шнека, м	0,30
Начальный диаметр трубы шнека, м	0,10
Конечный диаметр трубы шнека, м	0,22
Конусность (по ГОСТ 53440 – 2009)	1:12
Длина шнека, м	1,60
Шаг витков шнека, м	0,20

Перспективный мобильный модуль обезвоживания состоит из премного бункера с решеткой для сепарации древесных включений, одношнекового пресса, выдающего ленточного конвейера и системы слива отжатой воды. Отделившаяся вода возвращается в карьер по гибкому трубопроводу. Интенсивность последующей сушки торфяной продукции в полевых условиях повышается. Сокращение количества часов работы горнотранспортного агрегата связано со значительным сокращением объема перевозки воды [99].

Мобильная установка в составе внутрикарьерного комплекта оборудования позволяет производить одновременное обезвоживание и усреднение экскавированного торфяного сырья.

Анализ существующего дробильно-сортировочного оборудования показал, что за основу при рассмотрении конструктивных особенностей мобильных перерабатывающих модулей может быть принята мобильная дробилка типа ДУ

серии ТТ (рисунок 5.2) для дробления древесных отходов компании «ТОПТЕХНО» на гусеничном ходу, оборудованная дизельным двигателем [43]. В рамках модернизации конструкции происходит замена дробящих валов рабочего органа серийной дробилки на шнековый пресс со снижением общей массы машины.



Рисунок 5.2 – Концепция мобильного модуля измельчения торфяного сырья на базе мобильной дробилки типа ДУ серии ТТ

В таблице 5.2 приведены технические характеристики перспективные мобильного модуля механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья.

Таблица 5.2 - Технические характеристики мобильного модуля механического обезвоживания

Показатели	Величина
Длина, мм	8000
Ширина, мм	2480
Высота, мм	3100
Загрузочная воронка, мм	1600x1200
Ширина выдающего конвейера, мм	800
Высота конвейера, мм	2950
Скорость вращения шнека, мин ⁻¹	13 ÷ 20
Мощность двигателя, кВт	60
Производительность, м ³ /ч	120
Масса, кг	10 000

В результате проведенных теоретических исследований было разработано одно из технических решений по механическому обезвоживанию торфяного сырья защищенное патентом на полезную модель [51] (Приложение Г).

5.3 Выводы по главе 5

При выемке торфяного сырья из залежи проходку экскаватора следует осуществлять зигзагообразно, что обеспечивает его максимальную производительность. Ширина рабочей площадки при обеспечении минимума маневров горнотранспортных агрегатов составляет 30 м, что соответствует ширине рабочей площадки при добыче кускового торфа.

Проведенный анализ комплектации парка выемочно-транспортным оборудованием при карьерной добыче торфяного сырья показал возможность использования, в качестве выемочного оборудования серийный экскаватор, модели E160C на широких гусеницах и, в качестве транспортного оборудования для передвижения модуля обезвоживания, трактор BELARUS-1221.4 на сдвоенном колесном ходу. Производительность мобильного модуля обезвоживания составляет $Q_{\text{мо}}=116 \text{ м}^3/\text{ч}$ при производительности экскаватора на выемке и погрузке торфяного сырья в приемный бункер модуля $Q_{\text{экс}}=112 \text{ м}^3/\text{ч}$. По мере сработки торфяной залежи мобильный модуль обезвоживания сдвигается в направлении фронта работ.

Выбор параметров мобильного модуля обезвоживания осуществляется исходя из горно-геологических и природно-климатических условий торфяного карьера с обеспечением энергоэффективной и безопасной работы на карьере.

Мобильная установка в составе внутрикарьерного комплекта оборудования позволяет производить одновременное обезвоживание и усреднение экскавированного торфяного сырья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе результатов проведенных исследований изложено научно обоснованное техническое решение актуальной задачи по выбору и обоснованию конструкции и параметров шнекового пресса для предварительного механического обезвоживания торфяного сырья в условиях добычи карьерным методом. Реализация полученных результатов вносит существенный вклад в совершенствование транспортировки влажного торфяного сырья при осуществлении карьерного метода его добычи.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. В диссертационной работе на основе анализа карьерного способа разработки торфяных месторождений и новых систем внутрикарьерной переработки и транспортирования сырья (IPCC) обоснована перспективность применения процесса предварительного механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья в условиях карьера без значительных энергозатрат. Что позволит снизить исходное влагосодержание экскавированного торфяного сырья примерно на 45 %. При этом отжатая вода возвращается в карьер, являющийся искусственным водоемом после осуществления выемки. Анализ технологий механического обезвоживания органогенного сырья показал, что шнековый пресс непрерывного действия является наиболее рациональным решением выбора оборудования для механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья.

2. На основе анализа физико-механических и размерно-массовых свойств торфяного сырья при экскавации предложена реологическая модель поведения торфяного сырья при отжатии в шнековом прессе – стандартная линейная твердотельная трехэлементная модель (тело Зинера).

3. В результате теоретических и экспериментальных исследований обоснована конструкция шнека с коническим исполнением вала, с конусностью

1:12. Длина шнека составляет 1,6 м и шаг шнека постоянный 0,2 м. Начальный диаметр вала шнека составляет 0,1 м с увеличением до 0,233 м, диаметр обечайки шнека постоянный – 0,3 м.

4. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований выявлена линейная зависимость с коэффициентом детерминации между пористостью и фрактальной размерностью поверхности материала, позволяющая производить экспресс-оценку структуры исходного композитного торфяного сырья перед механическим обезвоживанием.

5. На основе экспериментальных исследований механического отжатия торфяного сырья разработана и обоснована конструкция фильтрующего экрана шнека: в верхней части выполняется сплошным, а в нижней части шнека перфорированным в соответствии с зонами: уплотнения – 4 мм, фильтрации – 4 мм и отжатия – 3 мм.

6. В результате теоретических и экспериментальных исследований определено, что рациональному механическому обезвоживанию торфяного сырья в шнековом прессе соответствует вертикальное уплотнение торфяного сырья в уменьшающемся по высоте межлопастном пространстве по длине конического шнека с коэффициентом уплотнения 3 для снижения влагосодержания торфяного сырья от 9,0 кг/кг до 4,88 кг/кг при соотношении компонентов макро и микроstructures торфяного сырья (низкой и высокой степени разложения) 1:1.

7. Результаты диссертационной работы приняты к использованию при разработке «Проекта по созданию производства кипованного торфа» в привязке к участку недр местного значения (торфяное месторождение Рогали, Фировский район Тверской области; кадастровый номер 491) (акт внедрения от 25.03.2019).

8. В качестве перспективы дальнейшей разработки темы исследования показано, что за основу при рассмотрении конструктивных особенностей мобильных перерабатывающих модулей может быть принята мобильная дробилка типа ДУ серии ТТ компании «ТОПТЕХНО». В рамках модернизации конструкции происходит замена дробящих валов рабочего органа на шнековый пресс со снижением общей массы машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамец, А.М. Массоперенос в природных дисперсных системах / И.И.Лиштван., Н.В. Чураев – Минск: Наука и техника, 1992. –288 с.
2. Адамов, А.А. Методы прикладной вязкоупругости / В.П. Матвеевко., Н.А. Труфанов— Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 412 с.
3. Азевич, З.Ф. Руководство к практическим занятиям по методам санитарно-гигиенических исследований / З. Ф. Азевич, А.И. Громов, А.А. Галич и др.; под ред. Л. Г. Подуновой. – М.: Медицина, 1990. – 304 с.
4. Амарян, Л.С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения. – М.: Недра, 1990. 220 с.
5. Амикс, Джемс В. Физика нефтяного пласта: Пер. с англ. / Дж. Амикс, Д. Басс, Р. Уайтинг. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 572 с.
6. Афанасьев, А.Е. Технология и комплексная механизация разработки торфяных месторождений: учебное пособие для вузов / А.Е. Афанасьев [и др.]. – М.: Недра, 1987. – 311 с.
7. Базин, Е.Т. Технический анализ торфа / Е.Т. Базин, В.Д. Копенкин, В.И. Косов и др. Под общ. ред. Е.Т. Базины. – М.: Недра, 1992. – 431 с.
8. Базин, Е.Т. Влияние уплотнения на водопроницаемость торфа. Технология производства и переработки торфа. – М.: Недра, 1970. С. 32-36.
9. Бобрышев, А. Н. Кинетические модели релаксации напряжений в композитах / П. В. Воронов, Э. Р. Галимов, А. В. Лахно., И. А. Абдуллин // Вестник Казанского технологического университета, №14, Т. 17, 2004. – С. 431-434.
10. Богатов, Б.А. Добыча и переработка горных пород. Осадочные горные породы: Учебное пособие / Б.А. Богатов, Н.И. Березовский. – Минск: БНТУ, 2005. –133 с.
11. Булышко, М.Г., Некоторые опытные данные по искусственному обезвоживанию прессованием верховых торфов малой степени разложения. – М.: – В кн.: Сб. статей по изучению торфяного фонда, вып.3. 1958. – С. 32-37.

12. Булычев, В.Г. Некоторые теоретические соображения по вопросу искусственного обезвоживания торфа / В.Г. Булычев // Труды Калининского торфяного института. Вып. 13. М., Л.: Госэнергоиздат, 1963. С. 79-86.
13. Веденяпин, Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. – 3-е изд. – М.: Колос, 1973. – 199 с.
14. Винарский, М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. / М.С. Винарский, М.В. Лурье // – Киев: Техника, 1975. – 168 с.
15. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
16. Гаврильчик, А. П. Трансформация свойств торфа при антропогенном воздействии / Т. Я. Кашинская. Под ред. И. И. Лиштвана. – Минск: Беларус. навука, 2013. 305 с.
17. Гамаюнов, Н.И. Некоторые особенности состояния и связи влаги с торфом / А.М. Лыч., П.Н. Давидовский. – Химия твердого топлива, 1972, № 6, С. 57-60.
18. **Гармаев, О.Ж.** / Методы интенсификации полевой сушки торфяного сырья и способы ее механизации: Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» / Михайлов, А.В. **Гармаев, О.Ж.** Северикова, Д.Д. учредитель ООО Издательский дом «Науковедение»; редакционная коллегия: В.О. Чулков (главный редактор) [и др.]. – Москва, 2017 – Выходил 6 раз в год. – ISSN 223-5167. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/73TVN317.pdf> (дата обращения: 30.08.2019). - Текст электронный.
19. Геррман, Х. Шнековые машины в технологии. – СПб: Изд. «Химия», 1975. – 232 с.
20. Гидроторф. Искусственное обезвоживание торфа по способу Гидроторфа. Ч. 1. М., 1923. Ч. 2. М., 1927.
21. Головач, А.А. Структура верховых торфов низкой степени разложения / Н.В. Чураев // В кн.: Комплексное использование торфа. – М.: Недра, 1965. – С. 281-288.

22. Горохов, М.М. Влагопроводность и пористая структура не полностью насыщенного влагой торфа / М.М. Горохов, Н.В. Чураев // Торф и его переработка. Труды КИИ. Вып. 2(15). М.: Недра, 1968. С. 289-295.
23. Горячев, В.И. Искусственное обезвоживание торфа: монография - Тверь. ТвГТУ, 2012. –183 с.
24. ГОСТ Р 54477-2011. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик деформируемости грунтов в дорожном строительстве. М.: Стандартиформ, 2012. – 28 с.
25. ГОСТ 54332-2011. Торф. Методы отбора проб: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 июня 2011 г. №132-ст: дата введения 01-01-2013. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200085580> (дата обращения 22.01.2019).
26. ГОСТ Р 58602-2019. Листы перфорированные. Технические условия. М.: Стандаринформ, 2019. – 11 с.
27. Дьяков, В.П. Механика почвы и реология грунтов. Точки соприкосновения и различия // Достижения науки и техники АПК, №7 - 2007. – С. 48-51.
28. Иванец, В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / И.А. Бакин, С.А. Ратников – Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2004. – 180 с.
29. Король, Н.Т. Торф. Методы отбора проб из залежи и обработки их для лабораторных испытаний / В.М. Петрович, Н.С. Якобсон // ГОСТ-17644-83. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1983. – 14 с.
30. Корчунов, С. С. Исследование физико-механических свойств торфа: Труды ВНИИТП. – М.: Госэнергоиздат, 1953. – Вып. XII. – 232 с.
31. Корчунов, С.С. Исследование процесса механического обезвоживания торфа: сборник трудов ВНИИТП. Вып. 18 / С.С. Корчунов, И.И. Могилевский. М., Л.: Госэнергоиздат, 1961. С. 109-134.
32. Костюк, Н.С. Физика торфа. – Мн.: Вышэйшая школа, 1968. – 214 с.
33. Лиштван, И.И. Физика и химия торфа / И.И. Лиштван, Е.Т. Базин, Н.И. Гамаюнов, А.А. Терентьев – М.: Недра, 1980. – 304 с.

34. Лиштван, И.И. Физические процессы в торфяных залежах / Е.Т. Базин., В.И. Косов – Минск: Наука и техника, 1989. – 287 с.
35. Лиштван, И.И. Физико-химические свойства торфа и их трансформация при использовании торфяных месторождений // Химия твердого топлива, № 6. – 2010. – С. 3–10.
36. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
37. Мащенко, А.В. Специальные разделы механики грунтов и механики скальных грунтов / А.В. Мащенко, А.Б. Пономарев, Е.Н. Сычкина. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 176 с.
38. Методические указания по инженерно-геологическому обследованию болот при изысканиях автомобильных и железных дорог. М. 1973. URL: <http://www.gosthelp.ru/text/MetodicheskieukazaniyaMet48.html> (дата доступа 21.05.2019).
39. Миронов, В.А. Дистортность и сакральная геометрия. Избранное: монография// В.А. Миронов, Б.Ф. Зюзин. Ч.1. Тверь: ТГТУ, 2011. – 400 с.
40. Михайлов, А.В. Целесообразность применения механического обезвоживания торфяного сырья при карьерной добыче [Текст] / А.В. Михайлов, **О.Ж. Гармаев**, А.И. Жигульская // Горный информационно-аналитический бюллетень. – №8. – 2018. – С. 45-54 – Деп. в издательстве «Горная книга» 01.06.2018 № 1146/08-18, 1147/08-18, 1148/08-18.
41. Михайлов, А. В. Эффективность карьерной добычи торфа с полевым механическим обезвоживанием / А.В. Михайлов А. В., **О.Ж. Гармаев**, А.С. Федоров, Д.Р. Гарифуллин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – № 7. – 2019.– С. 30-41. DOI: 10.25018/0236-1493-2019- 07-0-30-41.
42. Михайлов, А. В. Анализ парка машин при карьерной добыче торфа / Казаков Ю. А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – № 7 (специальный выпуск 20). – 2019. – С. 3-14. DOI: 10.25018/0236- 1493-2019-7-20-3-14.

43. Мобильная дробилка типа ДУ серии ТТ для дробления древесных отходов, ООО «ТОПТЕХНО»: toptehno.com: сайт. – Москва, 2019 – URL: <http://toptehno.com/mobilnyie-drobilki-dlya-drevesinyi.html> (дата обращения: 26.06.2019). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
44. Могилевский, И.И. Теоретическое исследование обезвоживания торфа в прессах непрерывного действия / И.И. Могилевский // Подготовка торфяной залежи к эксплуатации, переработка и транспорт торфа: \ Сборник трудов ВНИИТП. Вып. 33. Л., 1973. С. 75-91.
45. Науменко, В. Г. Обезвоживание продуктов обогащения полезных ископаемых / В. Г. Науменко, В. Г. Самойлик, Н. А. Звягинцева, Е. И. Назимко; ГОУВПО «ДОН-НТУ». – Донецк: ДОННТУ, 2019. – 183 с.
46. Наумович, В.М. Влияние твердых добавок на механическое обезвоживание торфа: дисс. канд. техн. наук/ В.М. Наумович. М.: МТИ, 1941.
47. Наумович, В.М. Ленточно-кольцевой пресс для механического обезвоживания торфа низкой степени разложения / В.М. Наумович, В.И. Горячев // Машины и технология торфяного производства. Вып. 4. Минск: Высшая школа, 1974. С. 183-190.
48. Оден, Свен. Механическое обезвоживание торфа / Свен Оден // Торфяное дело. – № 6. – 1927.– С. 8-9.
49. Остриков, А.Н., Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств / О.В. Абрамов // Учебник для вузов. - СПб.: ГИОРД, – 2003. – 352 с.
50. Падохин, В.А., Физико-механические свойства сырья и пищевых продуктов: Учеб. пособие / Н.Р. Кокина // Иван. гос. хим.-технол. ун-т., Институт химии растворов РАН. – Иваново, 2007. – 128 с.
51. Патент №191627 Российская Федерация, МПК С10F 7/04 (2006.01). Прессовое устройство для формования и обезвоживания торфяного сырья: заявл. 09.04.2019: опубликовано 14.08.2019, Бюл. №23 / Лях Д. Д., Коконков А.А., Иванов С. Л., **Гармаев О. Ж.**; заявитель Санкт-Петербургский Горный университет - с.7.

52. Потапов А.А. Новейшие методы обработки изображений / А.А. Пахомов, С.А. Никитин, Ю.В. Гуляев // М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
53. Ривкин, С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара / А.А. Александров – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
54. Сепаратор шнековый EcoPulse Миасского завода промышленного оборудования: mzpo74.ru: сайт – Миасс. 2019 – URL: <https://mzpo74.ru/shnekovuj-separator-ot-ooo-mzpo-ecopulse-s-2-1> (дата доступа 12.01.2019). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
55. Солопов, С.Г. Торфяные машины и комплексы/ С.Г. Солопов, Л. О. Горцакалян, Л.Н. Самсонов, В.И. Цветков. – М.: Недра, 1981. – 416 с.
56. Справочник по торфу / Под ред. А.В. Лазарева и С.С. Корчунова. М.: Недра, 1982. – 760 с.
57. Стабников, В. Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В. М. Лысянский, В.Д. Попов – М.: Агропромиздат, 1985. – 503 с.
58. Терентьев, А.А. Структура и свойства формованной торфяной продукции / В.И. Суворов – Монография. Тверь: Созвездие, 2004. –136 с.
59. Терцаги, К. Механика грунтов в инженерной практике / К. Терцаги, Р. Б. Пек; пер. с англ. А. В. Сулима-Самуило / под ред. М. Н. Гольдштейна. – М.: Госстройиздат, 1958. – 609 с.
60. Томсон, А. Э. Торф и продукты его переработки / Г. В. Наумова– Минск: Белорусская наука, 2009. – 328 с.
61. Тюремнов, С.Н. Торфяные месторождения. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1976. – 488 с.
62. Федоров, А.С. Эффективность карьерной добычи торфа с полевым механическим обезвоживанием / А.В. Михайлов, **О.Ж. Гармаев**, А.С. Федоров, Д.Р. Гарифуллин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. - № 7. - С. 30-41. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-30-41.
63. Хлюпин, А.Н. Фрактальный анализ трехмерной микроструктуры пористых материалов / О.Ю. Динариев // Журнал технической физики, том 85, вып. 6, 2015. – С. 17-22.

64. Худякова, И.Н, Выбор и обоснование параметров технологического оборудования комплекса добычи торфяного сырья из натуральной залежи / Худякова И.Н., Вагапова Э.А., Иванов С.Л. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № S4. С. 3-15.
65. Чураев, Н.В. Изменение водных свойств и структуры при прессовании малоразложившегося торфа. – Торфяная промышленность, № 1, 1963. – С. 15-17.
66. Шашкин, А.Г. Вязко-упругопластическая модель поведения глинистого грунта / Развитие городов и геотехническое строительство, выпуск №2/2011. – С. 1-32.
67. Штин, С.М. Гидромеханизированная добыча торфа и производство торфяной продукции энергетического назначения / Под ред. И.М. Ялтанца. — М.: Изд. «Горная книга», 2012. – 360 с.
68. AGP Style – Agri-Press Screw Press: www.presstechnology.com: сайт. — Спрингфилд, 2019 – URL:<https://www.presstechnology.com/agp-style-agri-press-screw-press/> (дата обращения: 09.01.2019). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
69. Aho, M. Efficiency and environmental effects of peat dewatering by mechanical pressing / P. Pirkonen // FUEL, Vol 72, 1993. pp. – 239-243.
70. Bargale, P. C. Prediction of Oil Expression by Uniaxial Compression using Timevarying Oilseed Properties / D. Wulfsohn, J. Irudayaraj, R. J. Ford, F. W. Sosulski, // Journal of Agricultural Engineering Research, 77(2), 2000. – 171-181.
71. Bargale, P. C. Measurement of Consolidation and Permeability Properties of Extruded Soy under Mechanical Pressing / D. Wulfsohn, J. Irudayaraj, R. J. Ford, F. W. Sosulski // Agricultural Engineering Research – 200. – № 74.– pp. 155–165.
72. Beckwith, C.W. Anisotropy and depth-related heterogeneity of hydraulic conductivity in a bog peat. II: modelling the effects on groundwater flow / Baird, A.J., Heathwaite, A.L. – Hydrol. Process – 2003. – № 17.– pp. 103–113.
73. Bergins, C. Mechanical/thermal dewatering of lignite. Part 3: physical properties and pore structure of MTE product coals / J. Hulston, K. Strauss, A.L. Chaffee // Fuel, 86, 207. – 3-16.

74. Béreaux, Y. Series solutions for viscous and viscoelastic fluids flow in the helical rectangular channel of an extruder screw / M. Moguedet, X. Raoul, J. Y. Charneau, J. Balcaen, D. J. Graebing // *Non-Newton Fluid Mech* 123, 2004. – 237–257.
75. Bird, R.B. *Transport Phenomena* / W.E. Stewart, E.N. Lightfoot // Wiley, New York 1960.
76. Bouvier, Jean-Marie. *Extrusion processing technology: food and non-food biomaterials/ Campanella Osvaldo* // John Wiley & Sons, 2014, P. 536. DOI:10.1002/9781118541685.
77. Braunsman, C. Creep compliance mapping by atomic force microscopy / R. Proksch, I. Revenko, T. E. Schäffer // *Polymer* 55, 2014. – 219–225. DOI: 10.1016/j.polymer.2013.11.029.
78. Bujang, B.K. *Geotechnics of Organic Soils and Peat* Published by CRC / Huat, Arun Prasad, Afshin Asadi, Sina Kazemian // Press, 2014, Pp. 250. DOI <https://doi.org/10.1201/b15627>.
79. Carter, W. E. H. *Peat fuel, its manufacture and uses*, Ont. Bureau Mines Kept., Vol. XII, 1903. Chester, S. A. A constitutive model for coupled fluid permeation and large viscoelastic deformation in polymeric gels. *Soft Matter* 8, 2012. – pp. 8223–8233. DOI: 10.1039/c2sm25372k.
80. Clayton, S.A. Dewatering of biomaterials by mechanical thermal expression / O.N. Scholes, A.F.A. Hoadley, R.A. Wheeler, M.J. McIntosh, D.Q. Huynh // *Drying Technology*, 24, 2006. – pp. 819-834.
81. Compressibility and consolidation: sos.bangor.ac.uk: сайт. – Bangor. сайт. – URL: www.sos.bangor.ac.uk/~oss082/consolidation.ppt (дата обращения 18.02.2019). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
82. Conical-screw-shaft: vincentcorp.com: – Tamra. сайт. – URL: <https://vincentcorp.com/content/conical-screw-shaft> (дата обращения 18.02.2019). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
83. Converse, J.C. *Nutrient and Solids Separation of Dairy and Swine Manure Using a Screw Press Separator* / R.G. Koegel and R.J. Straub. // ASAE Paper No. 99-4050. St. Joseph, MI: ASAE. 1999.

84. Converse, J.C. Nutrient Separation of Dairy Manure / R.G. Koegel and R.J. Straub // In Proc. 8th International Symposium of Animal, Agricultural and Food Processing Wastes. – 2000. – 118-131. Des Moines, Iowa, 9-11 October: American Society of Agricultural Engineers.
85. Eaves, T.S. Instability of sheared density interfaces/ Neil J. Balmforth. // Journal of Fluid Mechanics 860, pp. 145 – 171 (2018). <https://doi.org/10.1007/jfm.2018.827>.
86. Evers, W. Die Schmeckenpresse (Expeller) als mechanische Trenneinrichtung fest-flüssig in der chemischen Industrie. Techn. Mitt. Krupp, 1, 39-43 (1961).
87. Fan-beltec BP screw press: www.fan-separator.de: – Marktschorgast. сайт. – URL: <https://www.fan-separator.de/ru/eraespedeueltseliya/shaoieelpveyeruka-eresiebeltec/bp-601> (дата обращения 18.02.2019). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей. – Текст: электронный.
88. Fei, Y. Allardice Comparison of some physico-chemical properties of Victorian lignite dewatered under non-evaporative conditions / Y. Artanto, L. Giroux, M. Marshall, W.R. Jackson, J.A. MacPhee, A.L. Charland, D.J. Chaffee, // Fuel, 85, 2006. – 1987-1991.
89. Fereidoun, R. Structure of peat soils and implications for water storage, flow and solute transport: A review update for geochemists / Jonathan S. Price, William L. Quinton, Bernd Lennartz, Tatjana Milojevic, Philippe Van Cappellen. // Chemical Geology 429, 2016. – pp. 75–84. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.03.010.
90. Firdaus, M. Preliminary Design on Screw Press Model of Palm Oil Extraction Machine / Salleh S. M., Nawi I., Ngali Z., Siswanto W.A., Yusup E. M. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 165, 2017. – pp. 012-029. DOI:10.1088/1757-899X/165/1/012029.
91. Ford, M. Fleming R. Mechanical Solid-Liquid Separation of Livestock Manure. Literature Review. Ridgetown College – University of Guelph (Canada), Ontario, 2002. – pp. 55. URL: <http://www.international-food-safety.com/pdf/Mechanical%20Solid%20Liquid%20Seperation%20of%20Livestock%20Manure%20Literature%20Review.pdf> (дата обращения 20.04.2019).

92. Frączek, J. Analysis of mechanical dewatering of digestate / K. Mudryk, M. Wróbel, M. Jewiarz, K. Dziedzic // *Agricultural Engineering*, 2016. – Vol. 20, No. 4, pp. 157-166.
93. Gwyddion: data analysis software [Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM)] / разработчик “Чешский метрологический институт». – Брно: 2019. – URL: <http://gwyddion.net> (дата обращения 12.02.2019).
94. Haanel, B. F. Peat Its Manufacture and Uses Final report of the peat committee appointed jointly by the Governments of the Dominion of Canada and the Province of Ontario, 1925. – p. 419.
95. Hayward, P.M. Profiles of water content and pore size in Sphagnum peat, and their relation to peat bog ecology / R.S. Clymo, P.M. Hayward // *Proceedings of the Royal Society of London, Series B* 215, 1982, – pp. 299-325.
96. Hausding, A. Handbook on the Winning and the Utilization of Peat London, 1921. – p. 490.
97. Hinchley, J. W. The Dewatering of Peat by Pressure, Wh.So., A.R.S.M., F.I.C. Transactions Society of Chemical Industry, Vol. XLI, No. 24, 1922. – p. 365.
98. Hobbs, N.B. Mire morphology and the properties and behavior of some British and foreign peats. *Q. J. Eng. Geol.* 1986. – pp. 7–80.
99. Johnson, M. Impact of in-pit crushing and conveying on pit shell optimization. URL: <https://www.deswik.com/resources>, 2019. (дата обращения 21.01.2019).
100. KP presses: vincentcorp.com: – Тампа. сайт. – URL: <https://vincentcorp.com/content/series-kp-presses> (дата обращения 18.02.2019). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
101. Körmendy, I. Contribution to the three-dimensional pressing theory and its one-dimensional application. *Acta Alimentaria* 3, 1974. – pp. 93–110.
102. Kremer, C. Distribution of cell wall components in Sphagnum hyaline cells and in liverwort and hornwort elaters / F. Pettolino, A. Bacic and A. Drinnan. // *Planta*, 219, 2004, – pp. 1023-1035.
103. Landva, A.O. Peat fabric and structure / P.E. Pheeney, A.O. Landva // *Geotechnique*, 17, 1980 – pp. 416-435.

104. Matus, M. Modularity of Pressing Tools for Screw Press Producing Solid Biofuels / P. Krizan // *Acta Polytechnica*. Vol. 52 No. 3/2012, – pp. 71-76.
105. Mechanical Properties of Biological Tissues: courses.washington.edu: – Washington. сайт. – URL:<http://courses.washington.edu/bioen520/notes/Viscoelasticity.pdf> (дата обращения 30.07.2019). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
106. Meskat, W. Der Fließ- und Entlaugungsvorgang einer Alkaliacelluloseisaser-Suspension in einer Schneckenpresse. *Chem. Ing. -Techn.*, 1962. – pp. 742 – 748 ().
107. Mikhailov, A. V. A potential application of in-pit crushing-conveying and dewatering system in peat mining / O. Z. Garmaev, D. R. Garifullin, Y.A. Kazakov // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, no. 378, 2019. Pp. 86 – 90. DOI:10.1088/1755-1315/378/1/012086.
108. Mikhailov, A.V. Preliminary study of tubular peat extrusion / A.V. Mikhailov, **O.Z. Garmaev**, A.S. Fedorov – DOI: 10.1088 / 1757-899X/560/1/012061 – Text electronic // *IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*. - 2019. - Vol. 560: 012061. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/560/1/012061> (дата обращения 30.07.2019).
109. Mikhailov, A. An integrated approach to strip mining of peat / A. Zhigul'skaya and O. Garmaev // *2019 IOP Conference Series Earth and Environmental Science* Vol. 378:012087 DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012087 (дата обращения 30.07.2019).
110. Mikhailov, A.V. The fleet analysis at open-pit mining of peat / Y. Kazakov // *MINING INFORMATION AND ANALYTICAL BULLETIN (SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL)*, 2019. Doi: 10.25018/0236-1493-2019-7-20-3-13.
111. Miloš, B. Fractal approach in characterization of spatial pattern of soil properties / A. Bensa // *Eurasian J Soil Sci*, 6 (1), 2017. – pp. 20 – 27.
112. Mrema, G.C. Mathematical Model of Mechanical Oil Expression from Oilseeds / P.B. McNulty // *Journal of Agricultural Engineering Research*, 31(5), 1985. – pp. 361-370.

113. Oden, Sven. Nagra Kolloidkemiska torvproblem, Teknisk Tidskrift. Vol. 50. Redogorelse for Undersokningar over Torvens Kemi, 1921. Fran en Torvetenskaplig och Torvteknisk Studieresa, 1922.
114. Ohlson, I. S. R. "Modern processing of rapeseed", Journal of the American Oil Chemists' Society, 69, 1992. – pp. 195-198.
115. Omobuwajo, T.O. Theoretical Prediction of Extrusion Pressure and Oil Flow Rate During Screw Expeller Processing of Palm Kernel Seeds / M.T. Ige, A.O. Ajayi // Journal of Food Engineering 38, 1999. – pp. 469-485.
116. Pelin, S. Preliminary Design and Construction of a Prototype Canola Seed Oil Extraction Machine. The Degree of Master. Middle East Technical University; 2006. – p. 129.
117. Plaseied, A. Deformation response and constitutive modeling of vinyl ester polymer including strain rate and temperature effects / A. Fatemi // J. Mater. Sci. 43, 2008, 1191–1199. DOI: 10.1007/s10853-007-2297-z.
118. Price, J.S. Importance of shrinkage and compression in determining water storage changes in peat: the case of a mined peatland / S.M. Schlotzhauer, // Hydrol. Process. 13, 1999. – pp. 2591–2601.
119. Price, J.S. Assessment of peat compressibility: is there an easy way / J. Cagampan, E. Kellner, // Hydrol. Process. 19, 2005. – pp. 3469–3475.
120. Qu, Qingwen. Study on modular design and key technology of screw pressing for sludge treatment system / Hu Xiaoqing, Lin Chunmei, Zhang Dejun and Li Ya. // Journal of Engineering and Manufacturing Technology 6, 2018. – pp. 1-7.
121. Rebouillat, S. Mechanical characteristics of raw and processed peat. / OH. Campanella, M. Peleg // Powder Technology 51, 1987. – pp. 273–275.
122. Ruiz, T. Dewatering of urban residual sludges: Filterability and hydro-textural characteristics of conditioned sludges / T. Kaosol, C. Wisniewski // Sep. and Pur. Technol., 72, 2010. – pp. 275-281.
123. Screw Press by Vincent Corporation: vincentcorp.com: – Tampa. сайт. – URL:<https://vincentcorp.com/content/screw-press/> (дата обращения 30.07.2019). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.

124. Schwartzberg, HG. Expression of fluid from biological solids. *Separation and Purification Methods* 26, 1997. – pp. 1-213.
125. Schwartzberg, HG. The removal of water by expression / JR. Rosenau, G. Richardson // *AIChE Symposium Series* 73, 1977. – pp. 177–190.
126. Shirato, M. Fundamental studies of expression under variable pressure / T. Murase, M. Negawa, T. Senda // *Journal of Chemical Engineering of Japan* 3, 1970. – pp. 105–112.
127. Shirato, M. Analysis of expression operations / T. Murase, M. Negawa, H. Moridera // *Journal of Chemical Engineering of Japan* 4(3), 1971. – pp. 263–268.
128. Shirato, M. Fundamental studies on continuous extrusion using a screw press / T. Murase, N. Hayashi, K. Miki, T. Fukushima, T. Suzuki, N. Sakakibara, T. Tazima // *Int Chem Eng* 18, 1978. – pp. 680–688.
129. Shirato, M. Pressure profile in a power-law fluid in constant-pitch, straight-taper and decreasing pitch screw extruders / T. Murase, M. Iwate // *Int Chem Eng* 23, 1983. – pp. 323–332.
130. Strauß, K. Mechanical/thermal brown coal dewatering. 20th International Mineral Processing Congress (IMPC), 1997. – pp. 75-82.
131. Tadmor, Z. *Principles of Polymer Processing* / CG. Gogos // 2nd edn. New York: John Wiley, 2006.
132. Takashi, Ishida. Advanced Oxidation Ditch Process and Screw Press Dewatering // Japan Institute of Wastewater Engineering and Technology, 24th Aug. 2012.
133. Tekad, Sitepu. Analisa Umur Pemakaian Screw Press Pada Mesin Pengekstraksi Minyak Mentah Kelapa Sawit. Vol 1, No. 7, 2010. – pp. 1-9.
134. Tiller, FM. The role of porosity in filtration: IV. Constant pressure filtration / HR. Cooper // *AIChE Journal* 6(4), 1960. – pp. 595–601.
135. Tiller, FM. The role of porosity in filtration: VI. New definition of filtration resistance / M. Shirato // *AIChE Journal* 10(1), 1964. – pp. 61–67.
136. Tiller, FM. The role of porosity in filtration. Part XI: Filtration followed by expression. *AIChE Journal*, 33(8): pp. 1241–1256.

137. Vogt, C. Mechanical/thermal dewatering of lignite. Part 4: Physico-chemical properties and pore structure during an acid treatment within the MTE process / Wild T., Bergins C., Strauß K., Hulston J., Chaffee A.L. // *Fuel*, 93, 2012. – pp. 433-442.
138. Wang, F. Canola paste extrusion for feeding supercritical extractors / A. Melson // *Can J Phys* 73, 1995. – pp. 304–309.
139. Ward, J.A. Processing high oil content seeds in continuous screw presses. *J Am Oil Chem Soc* 53, 1976. – pp. 261–264.
140. Wheeler, R.A. Modelling the mechanical thermal expression behavior of lignite / Hoadley, A.F.A., Clayton S.A. // *Fuel*, 88, 2009. – pp. 1741-1751.
141. Whitton, S. Application of Screw Press Filtration to Tailings Dewatering / W. Wimmer, T. Vangsness // *The Australian Coal Industry's Research Program, Project Number C23041*, 2015.
142. Wimmer, W. The underdog mechanical alternative for tailings dewatering: the screw press / S. Whitton, L. Wimmer // *Paste 2019*, Cape Town, South Africa. pp. 349-360. DOI:10.36487/ACG_rep/1910_24_Wimmer.
143. Yu, Q. Development of a helical coordinate system and its application to analysis of polymer flow in screw extruders / G-H. Hu //Part I. The balance equations in a helical coordinate system. *J Non-Newton Fluid Mech* 69, 1997. – pp. 155–167.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Технические характеристики шнековых прессов

Таблица А.1 – Технические характеристики шнекового пресса FAN-beltec ВР 601

Параметры	Величина
Размеры, мм	
L_1	1875
L_2	2209
L_3	830
B	1630
B_1	1300
B_2	600
H	1612
H_1	1533
H_2	870
Общая длина, мм	4 084
Металл корпуса	нержавеющая сталь 1.4301
Шнек	фланцевый
Перфорация экрана, мм	5-6
Производительность по сухому веществу, т/ч	0,5-2,5
Мощность, кВт	37+2,2
Масса, кг	7400

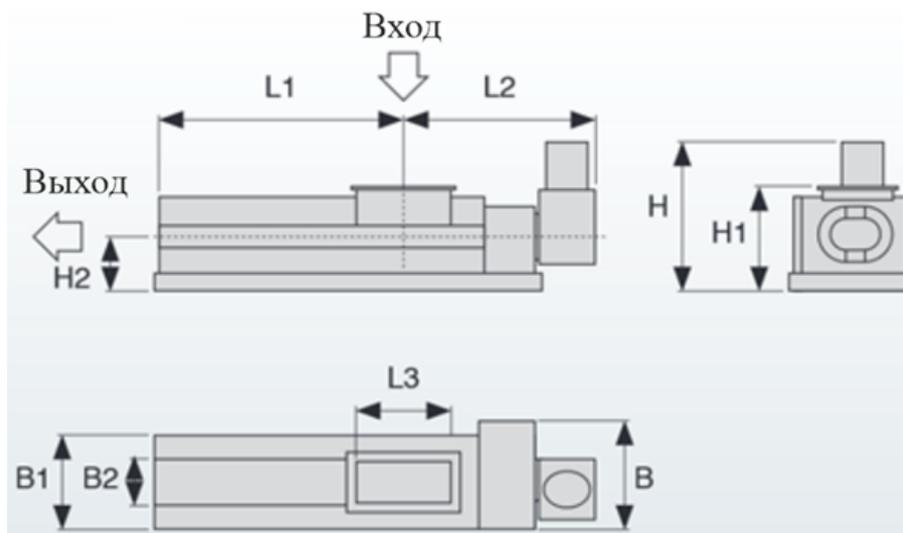


Рисунок А.1 – Основные размеры шнекового пресса FAN-beltec ВР 601

Таблица А.2 – Технические характеристики шнекового пресса модели КР компании Vincent Corporation

Параметры	Величина	
Модель	КР-30	КР-30L
Размеры, мм		
длина	7620	8080
ширина	1830	1830
высота	1680	1680
Частота вращения шнека, мин ⁻¹	26	
Металл корпуса и перфорированного экрана	нержавеющая сталь	
Шнек	конический	
Перфорация экрана, мм	3,2	
Производительность по сухому веществу, т/ч	22,7-54,4	22,7-54,4
Мощность, кВт	30-74,6	30-74,6
Масса, кг	1179	1451

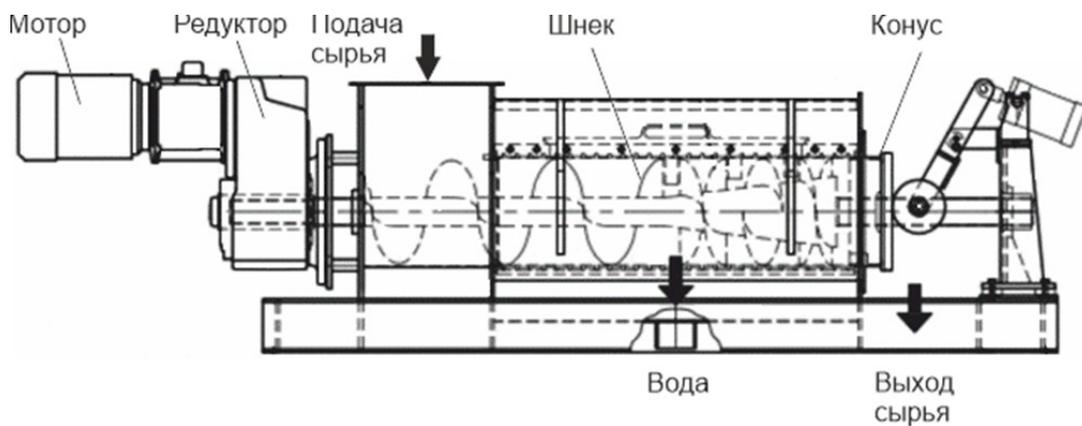


Рисунок А.2 – Схема пресса модели КР компании Vincent Corporation

Таблица А.3 – Технические характеристики шнекового пресса AGRI-PRESS

Параметры	Величина	
Модель	AGP1200	AGP1600
Размеры, мм		
длина	3810	4267
высота	1105	1473
Диаметр шнека, мм	305	406
Отношением площади сита к диаметру шнека	9:1	
Металл корпуса	нержавеющая сталь 304	
Шнек	конический	
Перфорация экрана, мм	0,889	
Производительность по сухому веществу, м ³ /ч	22,7	31,8
Мощность, кВт	26	60
Масса, кг	2268	4536

Таблица А.4 – Технические характеристики шнекового сепаратора EcoPulse S-3.1

Параметры	EcoPulse S-3.1
Производительность, м ³ /ч	10-70
Электродвигатель	7,8 кВт; 380 В;
Габариты ДхШхВ, мм	2373x872x2656
Сито, мм	0,25-4,0
Размеры сита, мм	Усиленное, Ø 300, L 810, нерж. сталь Aisi 304/321
Шнек	с твердосплавным износостойким покрытием и наплавкой реборды, нерж. сталь Aisi 304/321,
Частота вращения шнека, мин ⁻¹	32
Способ монтажа	Стационарно
Управление	Автоматическое
Масса сепаратора, кг	610
Особенности сепаратора	Для производства подстилки КРС из навоза с содержанием сухого вещества после сепарации до 36-40 %. Усиленный шнек, Усиленное сито, усиленный механизм створок.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты механического обезвоживания на лабораторном шнековом прессе

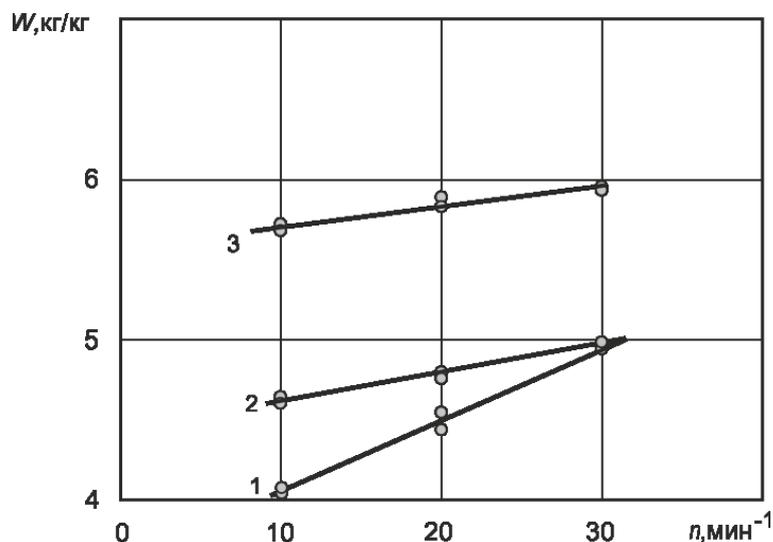


Рисунок Б.1 - Эффект обезвоживания обезвоживании торфяного сырья с разными размерами выходного сопла и частотой вращения шнека прессы:

1 – сырье низкой степени разложения; 2 – смесь 50:50; 3 – сырье высокой степени разложения

Таблица Б.1 – Эффект обезвоживания при 23 °С с разными размерами выходного сопла, диаметром отверстий сетки и частотой вращения шнека прессы на торфяном сырье низкой степени разложения при начальной влажности 94,0 % (15,7 кг/кг)

№ опыта	Диаметр сопла, мм	Диаметр отверстия сита, мм	Частота вращения шнека, мин ⁻¹	Влажность конечная, %	Влагосодержание, %	Процент выхода сухого вещества с водой, %
1	14	1	10	80,08	4,02	0,31
2	14	1	10	80,23	4,06	0,30
3	14	2	20	81,56	4,42	0,44
4	14	2	20	81,89	4,53	0,42
5	14	3,5	30	83,21	4,96	0,54
6	14	3,5	30	83,15	4,93	0,53
7	18	1	10	82,31	4,65	0,45
8	18	1	10	82,17	4,60	0,47
9	18	2	20	83,42	5,02	0,68
10	18	2	20	83,39	5,02	0,72
11	18	3,5	30	84,09	5,29	0,92
12	18	3,5	30	84,00	5,25	0,95

Таблица Б.2 – Эффект обезвоживания при 23 °С с разными размерами выходного сопла, диаметром отверстий сетки и частотой вращения шнека пресса на торфяном сырье высокой степени разложения при начальной влажности 91,7 % (11,05 кг/кг)

№ опыта	Диаметр сопла, мм	Диаметр отверстия сита, мм	Частота вращения шнека, мин ⁻¹	Влажность конечная, %	Влагосодержание, %	Процент выхода сухого вещества с водой, %
1	14	1	10	85,08	5,68	4,68
2	14	1	10	85,17	5,75	4,75
3	14	2	20	85,30	5,80	5,01
4	14	2	20	85,29	5,80	5,03
5	14	3,5	30	85,37	5,84	5,36
6	14	3,5	30	85,35	5,83	5,34
7	18	1	10	85,33	5,81	5,05
8	18	1	10	85,37	5,84	5,11
9	18	2	20	85,52	5,91	5,42
10	18	2	20	85,59	5,94	5,46
11	18	3,5	30	85,79	6,04	5,57
12	18	3,5	30	85,82	6,05	5,51

Таблица Б.3 – Эффект обезвоживания при 23 °С с разными размерами выходного сопла, диаметром отверстий сетки и частотой вращения шнека пресса на смеси торфяного сырья 50/50 при начальной влажности 91,7 %

№ опыта	Диаметр сопла, мм	Диаметр отверстия сита, мм	Частота вращения шнека, мин ⁻¹	Влажность конечная, %	Влагосодержание, %	Процент выхода сухого вещества с водой, %
1	14	1,5	10	82,16	4,61	2,61
2	14	1,5	10	82,13	4,61	2,64
3	14	2,0	20	82,39	4,68	2,78
4	14	2,0	20	82,43	4,69	2,81
5	14	3,5	30	83,28	4,99	3,12
6	14	3,5	30	83,24	4,96	3,16
7	18	1,5	10	84,67	5,50	2,80
8	18	1,5	10	84,64	5,50	2,80
9	18	2,0	20	84,72	5,55	3,25
10	18	2,0	20	84,76	5,57	3,27
11	18	3,5	30	84,99	5,67	3,69
12	18	3,5	30	84,98	5,67	3,67

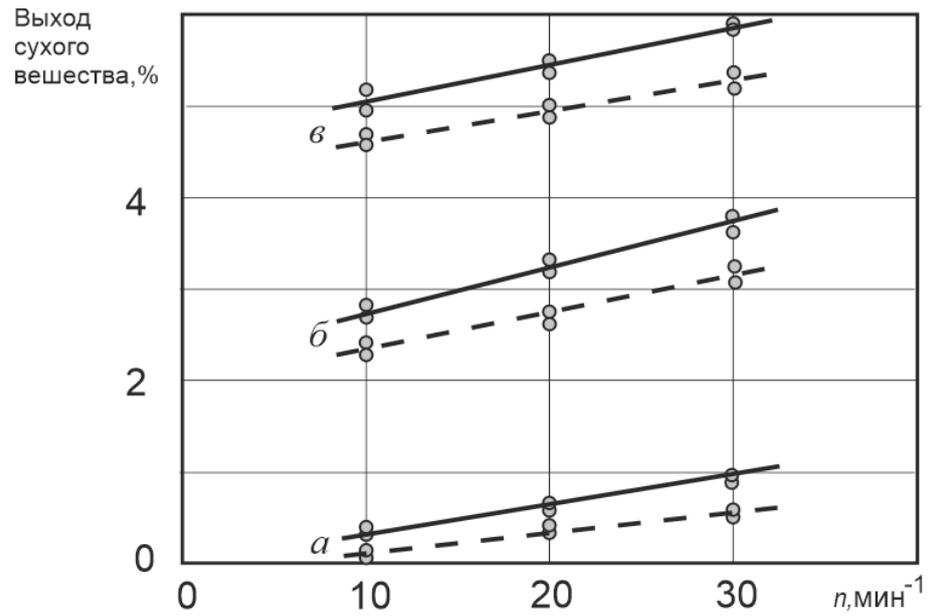


Рисунок Б.2 - Выход сухого вещества с водой при обезвоживании торфяного сырья (а – низкой степени разложения; б – высокой степени разложения; в – смесь 50/50) с разными размерами выходного сопла и частотой вращения шнека пресса: --- диаметр сопла 14 мм; — диаметр сопла 18 мм

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ
№ 191627

**ПРЕССОВОЕ УСТРОЙСТВО ФОРМОВАНИЯ И
ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Лях Дарья Дмитриевна (RU), Коконков Александр Александрович (RU), Иванов Сергей Леонидович (RU), Гармаев Оюн Жаргалович (RU)*

Заявка № 2019110655
Приоритет полезной модели 09 апреля 2019 г.
Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 14 августа 2019 г.
Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 09 апреля 2029 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ Д**Справка о внедрении результатов работы****СПРАВКА**

**о внедрении результатов диссертационной работы
Гармаева Оюна Жаргаловича**

**«Обоснование и выбор параметров шнекового пресса для обезвоживания
экскавированного торфяного сырья в условиях карьера»**

Справка дана Гармаеву О.Ж. в том, что разработанное в диссертационной работе техническое решение по конструктивным и технологическим параметрам шнекового пресса для предварительного механического обезвоживания экскавированного торфяного сырья в условиях карьера, использовано на стадии проектирования комплекса технологического оборудования карьерной добычи сырья для производства кипованного торфа.

Определенные в работе конструктивные и геометрические параметры шнекового пресса в составе мобильного автономного модуля механического обезвоживания, позволяют снизить влажность экскавированного торфяного сырья малой степени разложения с 90% до 83% (по влагосодержанию с 9,0 кг/кг до 4,88 кг/кг).

При предварительном обезвоживании торфяного сырья полученная вода используется для промывки оборудования и возвращается обратно в карьер. Это позволяет значительно снизить транспортные расходы (примерно на 40%) на перевозку менее влажного торфяного сырья в цех по производству кипованной торфяной продукции.

В настоящее время материалы по предлагаемой технологии и конструктивному оформлению технологического оборудования для предварительного обезвоживания экскавированного торфяного сырья заложены в исходные данные «Проекта по созданию предприятия по добыче и последующей переработке торфяного сырья для производства кипованного торфа» в привязке к участку недр местного значения (торфяное месторождение Рогали, Фировский район Тверской области; кадастровый номер 491).

Генеральный директор,
канд. техн. наук
25.03.2019



С.Н. Горохов

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Справка о депонировании рукописи

ДЕПОЗИТАРИЙ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



СПРАВКА

№ 1147/08-18 от 01.06.2018 г.

О депонировании рукописи "Целесообразность применения механического обезвоживания торфяного сырья при карьерной добыче"

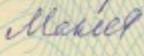
(9 стр.)

Авторы: Гармаев О.Ж., Михайлов А.В., Жигульская А.И.

Издательство «Горная книга» депонировало настоящую рукопись для постоянного хранения. Библиографическое описание опубликовано в «Горном информационно-аналитическом бюллетене» № 8, 2018 г.

Настоящим удостоверяется, что А.В. Михайлов является автором настоящей работы. В соответствии с существующими нормативными актами РФ депонированная рукопись приравнивается к открытому печатному изданию.

Генеральный директор
издательства «Горная книга»  Н.А. Голубов

Зав. депозитарием  С.А. Макеева

