

На правах рукописи

Соловьев Иван Васильевич



**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ
К ПОВЕРХНОСТНОЙ ВЫЕМКЕ ОРГАНОГЕННОГО
СЫРЬЯ И СТРУКТУРЫ ВЫЕМОЧНО-
ТРАНСПОРТНОГО МОДУЛЯ**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Михайлов Александр Викторович

Официальные оппоненты:

Лагунова Юлия Андреевна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра горных машин и комплексов, заведующий кафедрой;

Кривенко Александр Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», кафедра горного оборудования, транспорта и машиностроения», доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» г. Пермь.

Защита диссертации состоится **29 сентября 2025 г. в 10:30** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Благодаря особым физико-механическим свойствам торфяное сырье малой степени разложения (органогенное сырье) применяется для производства торфяных фильтрующих элементов, используемых в природоохранных системах очистки поверхностного стока. За последние 20 лет разработано и внедрено более 1500 систем очистки разного масштаба на объектах Санкт-Петербурга, Ленинградской и Новгородской областей, Республики Карелия.

Добыча органогенного сырья для производства фильтрующих элементов осуществляется методом поверхностной выемки, при котором торфяная залежь является как опорной поверхностью, так и объектом разработки. Метод ведения горных работ основан на природоохранных принципах – добыча происходит на неосушенном торфяном месторождении. Особенностью процесса добычи органогенного сырья для производства природоохранной продукции на основе торфа является минимальное нарушение его естественной структуры при выемке для сохранения эксплуатационных свойств материала.

Задача выбора средств механизации для осуществления поверхностной выемки без нарушения естественной структуры сырья должна решаться комплексно, охватывать разработку и внедрение универсальных машин повышенного технического уровня с расширенными функциональными возможностями их рабочих органов путем адаптации к условиям эксплуатации, сочетающих функции выемочного оборудования и функции перемещения экскавированного материала в кузов транспортного средства.

Установление технологических требований к процессу механизированной поверхностной выемки органогенного сырья для организации добычных работ в условиях неосушенной залежи, и определение структуры и параметров оборудования для добычи сырья без нарушения его естественной структуры является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в направлении исследования торфяных месторождений, процессов добычи торфа и созданию средств механизации посвящены работы Амаряна Л.С., Афанасьева А.Е., Богатова Б.А., Гревцева Н.В., Зюзина Б.Ф., Иванова С.Л., Корчунова С.С., Ларгина И.Ф.,

Лиштвана И.И., Малкова Л.М., Михайлова А.В., Опейко Ф.А., Самсонова Л.Н., Селеннова В.Г., Солопова С.Г., Терентьева А.А., Тюременова С.Н., Штина С.М., Clarke D., Leinonen A. и др.

Ими определены свойства и характеристики торфяных месторождений, основы технологии разработки и условия функционирования технологического оборудования при добыче торфяного сырья. Однако создание комбинированных машин для выемки, погрузки и транспортирования торфяного сырья без нарушения его естественной структуры требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Объект исследования – процесс добычи органогенного сырья из поверхностного слоя месторождения без нарушения структуры.

Предмет исследования – элементы и основные параметры технологии поверхностной выемки органогенного сырья, структура и основные параметры выемочно-транспортного оборудования.

Целью работы является установление технологических требований и закономерностей процесса механизированной поверхностной выемки органогенного сырья в условиях неосушенной залежи с обоснованием структуры комплекта оборудования для добычи сырья без нарушения естественной структуры материала.

Идея заключается в том, что при обеспечении установленных технологических требований возможно разработать алгоритм механизированной поверхностной выемки органогенного сырья по блочной технологии с применением принципов палудикультуры, которая реализуется при помощи универсального многофункционального выемочно-транспортного модуля, который перемещается по легко-возводимым дорожным покрытиям на поверхности неосушенной торфяной залежи.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме работы с выявлением основных принципов поверхностной выемки сырья на неосушенном месторождении.

2. Провести анализ размерно-массовых и физико-механических свойств верхнего слоя торфяной залежи и требований к вынимаемому сырью.

3. Обосновать структуру выемочно-транспортного оборудования для реализации блочной технологии поверхностной выемки торфяного сырья.

4. Провести полевые и лабораторные исследования для установления основных закономерностей процесса выемки сырья с ненарушенной структурой с помощью двухчелюстного вильчатого грейфера.

5. Разработать замкнуто-циклическую блочную технологию поэтапной поверхностной выемки органогенного сырья с рекультивацией выработанных площадей методом самозарастания (элементы палудикультуры).

Научная новизна:

1. Разработан алгоритм ведения добычных механизированных работ на поверхности неосушенного месторождения по блочной технологии с обоснованием глубины выемки и размеров производственных и транспортных областей по замкнуто-циклической схеме в зависимости от периода цикла самовосстановления выработанных территорий.

2. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что комбинированный выемочно-транспортный модуль с двухчелюстным вильчатым грейфером осуществляет выемку, погрузку и транспортирование органогенного сырья без нарушения структуры с поверхности месторождения на легковозводимых дорожных покрытиях в условиях неосушенной залежи.

Соответствие паспорту научной специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины по пункту 14: «Критерии и технологические требования при создании новых и совершенствования применяемых горных машин с учетом особенностей условий их эксплуатации при разработке месторождений твердых полезных ископаемых».

Теоретическая и практическая значимость:

1. Установлены параметры блочной технологии поверхностной выемки органогенного сырья с выделением границ рабочей площади, в которой выемочные работы выполняются на технологических участках по циклической схеме с периодом смены циклов – 4 года.

2. Разработана инженерная методика определения параметров рабочих площадок в рамках реализации блочной технологии поверхностной выемки с определением производительности технологических участков за один добычный сезон.

3. Обоснована структура и параметры комбинированного выемочно-транспортного модуля для ведения добычных работ на неосвоенном месторождении.

4. На основе анализа размерно-массовых характеристик органогенного сырья обоснована структура и параметры гидравлического двухчелюстного вильчатого грейфера.

5. Разработано новое техническое решение устройства для выемки волокнистого материала с боковыми режущими парами, защищенное патентом на полезную модель № 218971.

6. Результаты работы использованы в деятельности ООО «Агровит» при организации добычи торфяного сырья из поверхностного слоя месторождения с целью производства природоохранной продукции «Элементы фильтрующие торфяные» (акт внедрения от 27.03.2025 г.).

Методология и методы исследования. В ходе выполнения работы принят комплексный метод исследований, включающий анализ и обобщение научно-технической и патентной информации; положения теории машин и механизмов, механики грунтов; проведение экспериментальных исследований с помощью оригинального экспериментального оборудования в полевых и лабораторных условиях на образцах натурального материала, направленных на оценку влияния параметров вильчатого грейфера на эффективность выемки торфяного сырья.

Положения, выносимые на защиту:

1. Поверхностную выемку органогенного сырья следует осуществлять с легковозводимых дорожных покрытий с помощью выемочно-транспортного модуля с глубины 0,3 м по замкнуто-циклической блочной технологии с периодом цикла 4 года для полного самовосстановления выработанных площадей.

2. Для поверхностной выемки органогенного сырья без нарушения структуры материала следует применять выемочно-транспортный модуль с вильчатым грейфером вместимостью 0,13 м³ с боковыми режущими парами, 5 зубьями на одной челюсти с шагом их расстановки 135 мм при компактировании материала с коэффициентом 2 в процессе захвата.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность положений, выносимых на защиту, выводов и результатов подтверждается корректностью постановки задач исследований; непротиворечивостью их фундаментальным законам и зависимостям; применением лицензионного программного обеспечения на всех этапах исследования, качественным и количественным согласованием результатов теоретических и экспериментальных материалов, удовлетворительными результатами сопоставления авторских разработок с данными независимых исследователей, апробированных научных методов экспериментальных исследований, достаточным объемом экспериментальных данных и стандартными методами обработки полученных результатов.

Апробация диссертационной работы. За последние 3 года принято участие в 6 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: VI Международная научно-практическая конференция «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» (30 ноября – 01 декабря 2022 г., г. Кемерово); VI Международная научно-практическая конференция «Машиностроение: инновационные аспекты развития» (18 апреля 2023 г., г. Санкт-Петербург); XXI Международная научно-техническая конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека» Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности (06-07 апреля 2023 г., г. Екатеринбург); VII Международная научно-

практическая конференция «Машиностроение: инновационные аспекты развития» (29 марта 2024 г., г. Санкт-Петербург); Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (21-25 октября 2024 г., г. Санкт-Петербург); XX Всероссийская конференция конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (01-07 декабря 2024 г., г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, анализе зарубежной и отечественной литературы по теме исследования, разработке программы и методики полевых и лабораторных исследований, организации и проведении исследований, в анализе полученных результатов и разработке алгоритма проведения выемочных работ с поверхности неосушенного торфяного месторождения по блочной технологии, определении структуры выемочно-транспортного модуля, разработке технического решения по конструкции вильчатого грейфера, подготовке публикаций по теме исследования.

Публикации. Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 9 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 систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на полезную модель.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 106 наименований, и 7 приложений. Диссертация изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор состояния изученности темы исследования. Проведен анализ размерно-массовых и физико-механических характеристик верхнего слоя торфяной залежи и требований к вынимаемому сырью. Предложена блочная технология добычи сырья на поверхности неосушенного месторождения и обоснована структура комбинированного выемочно-транспортного модуля. Исходя из результатов проведенного анализа, сформулированы цель, идея и задачи научного исследования.

Во второй главе представлено схемное решение блочной технологии поверхностной выемки органогенного сырья. Проведен анализ выбора основных параметров структурных единиц выемочно-транспортного модуля. Выполнен анализ процесса функционирования двухчелюстного вильчатого грейфера при выемке, определены его конструктивные и геометрические параметры, определяющие энергоемкость процесса захвата сырья и его отрыва из залежи.

В третьей главе приведена программа и методика проведения экспериментальных исследований в полевых и лабораторных условиях для установления периода самовосстановления растительного слоя торфяной залежи и анализа процессов внедрения зубьев грейфера в залежь, компатирования сырья при захвате и его отрыва из массива с помощью модели вильчатого грейфера.

В четвертой главе приведены результаты определения периода самовосстановления растительного слоя торфяной залежи с применением палудикультуры. Приведены результаты полевых и лабораторных исследований по реализации этапов захвата и отрыва сырья с помощью двухчелюстного вильчатого грейфера.

В пятой главе приведены практические рекомендации по результатам исследования. Приведен алгоритм ведения добычных работ по замкнуто-циклической блочной технологии поэтапной поверхностной выемке органогенного сырья с рекультивацией выработанных площадей методом самозарастания.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам диссертационного исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Поверхностную выемку органогенного сырья следует осуществлять с легковозводимых дорожных покрытий с помощью выемочно-транспортного модуля с глубины 0,3 м по замкнуто-циклической блочной технологии с периодом цикла 4 года для полного самовосстановления выработанных площадей.

При поверхностной выемке залежь одновременно является опорной поверхностью и объектом разработки. В залежи верхового типа в верхних генетических горизонтах залегает сфагновый торф – *Sphagnum magellanicum* и *Sphagnum fuscum* со степенью разложения до 10 %. Максимальное значение предела прочности на сдвиг – 20 кПа отмечено на глубине 0,1 м, максимальная величина удельного сопротивления грунта статическому зондированию – 80 кПа отмечена на глубине 0,2 м; плотность верхнего слоя залежи в естественном залегании варьируется в пределах 470-500 кг/м³.

Виду торфа *Sphagnum magellanicum* свойственна губчатая структура, он представляет слабоуплотненный поверхностный слой залежи с глубиной залегания до 0,3 м, относится к изотропному структурному классу и обладает волокнистой текстурой с длиной волокон до 200 мм. *Sphagnum fuscum* характеризуется пloyчатой структурой, относится к анизотропному структурному классу с волокнистой текстурой с длиной волокон до 50 мм.

Водопроницаемость изотропного *Sphagnum magellanicum* одинакова в горизонтальном и вертикальном направлениях. При ведении выемочных работ на глубине 0,3 м уровень влаги в месте выемки сохраняется, что способствует сохранению избыточной увлажненности отработанных территорий.

Сохранение естественного гидрологического режима (избыточной увлажненности) места выемки с введением дополнительных центров ревегетации способствует ускорению восстановления растительного слоя в месте выемки (элементы палудикультуры).

В условиях торфяного месторождения Камешки (Ленинградская обл.) проведен эксперимент по выемке торфяного сырья с глубины 0,3 м и определению скорости восстановления растительного слоя в лагунах при естественной колонизации растений. Растительный покров в рецепторных участках с частичным добавлением сфагнума за 4 года восстановился на 100 %.

В условиях неосушенной залежи основным технологическим требованием является проходимость оборудования, поэтому функционирование оборудования при ведении добычных работ осуществляется с легковозводимых щитовых дорог.

При поверхностной выемке эксплуатационное пространство месторождения разделяется на технологические участки. Каждый участок располагается перпендикулярно берегу месторождения и состоит из центральной транспортной полосы (временной дороги) и двух боковых параллельных выемочных областей (рисунок 1). Длина рабочей площадки L определяется продолжительностью сезона добычи и производительностью оборудования. Ширина транспортной полосы $B_{тр}$ определяется размерами применяемых дорожных покрытий.

Разработана блочная технология разработки выемочных областей. В рамках каждого блока проводится серия циклов выемки сырья с образованием лагун и сохранением участков растительного слоя между соседними блоками и внутри каждого блока. Образованные участки (бермы-перемычки) служат естественным барьером для перемещения воды внутри блока. Размеры блоков и лагун зависят от параметров выемочного оборудования, которое расположено в центре транспортной полосы. Ширина блока $B_{бл}$ определяется разностью между максимальным и минимальным радиусом копания выемочного оборудования (рисунок 2).

Длина блока $L_{бл}$ принимается равной его ширине. При разработке каждого блока образуются 4 лагуны, каждая из которых состоит из 2-х выемок (рисунок 3).

Реализация блочной технологии выемки проходит в несколько этапов. Первый этап – подготовительные работы: расчистка и разравнивание площадки на суходоле под штабель, подготовка подъездных дорог. Второй этап: разметка трасс, подготовка основания участка для укладки дорожного покрытия, монтаж дорожного покрытия. За добычной сезон разрабатывается один технологический участок. При завершении производственных работ на первом участке осуществляется демонтаж дорожного покрытия и его перебазирование на второй параллельный участок (рисунок 4).

Отработка блоков происходит с введением вегетативной части растений на поверхность каждой лагуны с использованием сырья из верхнего слоя последующих блоков.

Количество блоков на одном технологическом участке $n_{\text{бл}}$ (1):

$$n_{\text{бл}} = 2L / (L_{\text{бл}} + L_{\text{берм}}), \quad (1)$$

где L – длина рабочей площадки, м; $L_{\text{бл}}$ – длина блока, м; $L_{\text{берм}}$ – длина бермы, м.

Поскольку выемочные области полностью восстанавливаются за 4 года, то количество участков соответствует количеству годов в цикле восстановления, в одном участке могут находиться несколько рабочих зон; ширина эксплуатационного пространства (2):

$$B_{\text{эл}} = 4n_{\text{рп}} [2B_{\text{бл}} + B_{\text{тр}} + (3 + n_{\text{рп}})B_{\text{берм}}], \quad (2)$$

где $n_{\text{рп}}$ – количество рабочих площадок на технологическом участке; $B_{\text{берм}}$ – ширина бермы, м.

В рамках обоснования структуры комплекта малогабаритное оборудование объединяется в технологический модуль для выполнения операций в едином производственном цикле. В состав модуля включены колесный трактор Беларус МТЗ-622 с тяговым классом 0,9 в агрегате с колесным полуприцепом самосвальным 1-ПТС2 с кузовом вместимостью 2 м³. В передней части полуприцепа на поворотной колонне монтируется шарнирно-сочлененный гидроманипулятор типа Атлант 90 с вылетом стрелы 7,8 м. Для выполнения выемки с организацией берм-перемычек между лагунами и минимизации нарушения естественной структуры сырья в процессе выемки за базу выбран двухчелюстной вильчатый грейфер FLO-10 вместимостью 0,13 м³ (рисунок 5).

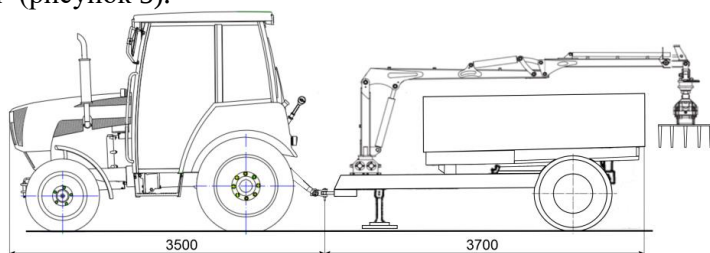


Рисунок 5 – Схема технологического модуля

С помощью комбинированного выемочно-транспортного модуля выполняются производственные работы по выемке сырья из залежи, его перемещению в кузов полуприцепа и вспомогательные операции по монтажу-демонтажу щитов временной дороги.

Алгоритм функционирования технологического модуля в производственном цикле состоит из последовательных операций: заезд обратным ходом на транспортную полосу до фронта работ, проведение выемки торфяного сырья, его погрузки в кузов полуприцепа и вывоз сырья за пределы рабочей площадки в штабель. Цикл повторяется по всей длине рабочей площадки.

При существующем ручном методе выемки и транспортировки производительность труда одного работника составляет 1 м³/смена. При применении комбинированного выемочно-транспортного модуля производительность повышается до 16 м³/смена.

На следующий год после отработки четвертого технологического участка, работы проводятся вновь на первом, где растительный слой в местах выемки полностью восстановился. Работы осуществляется по замкнутому циклу с периодом 4 года на площади с длиной L и шириной $B_{\text{эп}}$ (рисунок 4).

2. Для поверхностной выемки органогенного сырья без нарушения структуры материала следует применять выемочно-транспортный модуль с вильчатым грейфером вместимостью 0,13 м³ с боковыми режущими парами, 5 зубьями на одной челюсти с шагом их расстановки 135 мм при компактировании материала с коэффициентом 2 в процессе захвата.

Выемка органогенного сырья с помощью двухчелюстного вильчатого грейфера основана на процессе захвата волокнистого материала и отрыва от залежи. Приведена схема захвата материала вильчатым грейфером при глубине внедрения зубьев грейфера H , равной половине глубины выемки при ширине захвата L (рисунок 6, а). При закрытии челюстей грейфера материал компактируется в грейфере под действием горизонтальных сжимающих сил (рисунок 6, б).

При внедрении зубьев грейфера в залежь преодолевается сила сопротивления залежи внедрению (3):

$$R_{\text{вн}} = f q_{\text{к}} (\cos(x/2) + \sin(x/2)) F_{\text{к}} + f q_{\text{ц}} F_{\text{ц}} + F v^2 k_v, \quad (3)$$

где $q_{\text{к}}$ и $q_{\text{ц}}$ – удельное давление на коническую и цилиндрическую части наконечника рабочего органа соответственно, МПа; x – угол заострения зуба, °; $F_{\text{к}}$ и $F_{\text{ц}}$ – площадь конической и цилиндрической частей наконечника элемента рабочего органа, м²; F – лобовая проекция наконечника рабочего органа, м²; f – коэффициент трения торфяной залежи о материал рабочих элементов; v – скорость погружения, м/с; k_v – коэффициент, зависящий от формы наконечника зуба.

Энергоемкость процесса внедрения определяется углом заострения зуба и формой наконечника.

В результате серии полевых экспериментов на полноразмерных физических моделях вильчатого грейфера установлено, что среднее значение необходимого усилия для преодоления сопротивления внедрению зубьев грейфера на площадке со *Sphagnum magellanicum* – 0,44 кН.

В процессе смыкания челюстей происходит захват сырья и его сжатие межчелюстным пространством при закрытии грейфера.

Из результатов экспериментальных исследований процесса деформации образца торфяной залежи ненарушенной структуры при влажности 90 % в условиях двухосного напряженного состояния для имитации смыкания челюстей в торфяной залежи установлено, что деформация, обусловленная сопротивлением волокнистой структуры сжатию, доминирует на поздней стадии процесса.

При компактировании образца в 2 раза процесс переходит в стадию выпора. Установлено, что весь образец грунта ведет себя информативно в соответствии со стандартной твердотельной моделью, состоящей из последовательно соединенных упругого элемента Гука (пружины) и тела Кельвина-Фойгта – модель с тремя параметрами (E_1 ; E_2 и η) (рисунок 7).

Сопротивление материала при горизонтальном сдвиге и упругой деформации при сжатии определяется структурным сцеплением и трением между частицами макроструктуры материала.

Линейное соотношение между напряжениями, деформациями и их первыми производными, соответствующее модели стандартного вязкоупругого тела (4):

$$(E_1 + E_2)\sigma + \eta\dot{\sigma} = E_1E_2\varepsilon + E_1\eta\dot{\varepsilon}, \quad (4)$$

где σ – горизонтальная нагрузка, Па; E_1 – мгновенный модуль упругости, Па; E_2 – длительный модуль упругости, Па; ε – величина деформации; η – вязкость при сдвиге, Па·с; $\eta\dot{\varepsilon}$ – сопротивление упруговязкой деформации, Па.

Для вязкоупругого материала полное восстановление не достигается, и в материале останется остаточная деформация. При появлении горизонтального напряжения на зубе волокнистый материал деформируется, и возникают микротечения жидкой фазы в поровом пространстве. При мгновенном приложении напряжения возникает упругая обратимая деформация. Далее деформация идет по криволинейному участку (рисунок 8). После снятия напряжения образец за счет упругой деформации восстанавливается, величина остаточной деформации составила 33 %, что учитывается при выборе емкости кузова транспортного средства. Одной из причин релаксации напряжения в образце является падение давления внутри материала по мере отжатия избыточной жидкости.

Установлено, что влажность торфа после отжатия влаги при компактировании образца сырья в 2 раза снижается до 87 %, а влаго-содержание порции сырья перед началом отрыва уменьшается на 27 %. Следовательно, около трети влаги в захватываемой порции возвращается в залежь до отрыва сырья, что снижает энергоемкость выемки и транспортирования.

Технологическими требованиями при реализации второго этапа выемки вилчатым грейфером являются компактирование материала в 2 раза при смыкании челюстей с преодолением силы сопротивления сдвигу захватываемой порции сырья с образованием плотного компакта.

При повороте челюсти вокруг т. О на угол φ конец зуба грейфера перемещается по криволинейной траектории из т. А в т. С на величину L (рисунок 9).

Уравнение моментов сил, действующих на зуб грейфера при компактировании материала в межчелюстном пространстве (5):

$$\Sigma M_O(\varphi) = 0; Pa(\varphi) = Rb(\varphi) + fRc(\varphi) + mgl(\varphi). \quad (5)$$

Сила P , необходимая для смыкания челюстей грейфера (6):

$$P = \frac{1}{a(\varphi)} [Rb(\varphi) + fRc(\varphi) + mgl(\varphi)], \quad (6)$$

где R – сосредоточенная сила от распределенной нагрузки на зуб (компонент сопротивления залежи), Н; a, b, c, l – плечи действия сил относительно оси вращения зуба, м; f – коэффициент трения торфа о зуб; m – масса материала, кг.

Среднее значение модуля общей деформации в естественном залегании, характеризующего сжимаемость материала под действием внешних нагрузок, составляет для *Sphagnum magellanicum* – 22 кПа (рисунок 10).

Компактирование волокнистой среды при взаимодействии с элементами грейфера сопровождается образованием уплотненного тела. В рамках эксперимента заглубленная на 0,3 м модель челюсти вильчатого грейфера перемещалась на длину до 0,5 м. При установке зубьев с интервалом 0,135 м отделяемый материал деформируется по обе стороны зуба, вспучивается над поверхностью залежи, формирует общее тело без провисания сырья между зубьями.

Основными технологическими требованиями при отрыве сырья из залежи являются преодоление сил сопротивления отрыву и обеспечение устойчивости выемочно-транспортного модуля.

Устойчивое состояние модуля при вылете стрелы 4,3 м обеспечивается при грузоподъемности 550 кг (рисунок 11).

Усилие отрыва захваченного сжатого объема материала (7):

$$G_o = q_{\text{осн}}F_{\text{осн}} + q_{\text{бок}}F_{\text{бок}} = kg(m_r + m_{\text{сыр}}), \quad (7)$$

где $q_{\text{осн}}, q_{\text{бок}}$ – удельное сопротивление отрыву сырья из залежи по основанию и боковым поверхностям порции сырья соответственно, Н; $F_{\text{осн}}, F_{\text{бок}}$ – площадь основания и боковой поверхности соответственно, м², k – коэффициент отрыва; m_r – масса грейфера, кг; $m_{\text{сыр}}$ – масса сырья в грейфере, кг; g – ускорение свободного падения, м/с².

При вместимости грейфера 0,13 м³ в межчелюстном пространстве находится 130 кг сырья; масса грейфера составляет 155 кг. Экспериментально установлено усилие, необходимое для отрыва порции сырья массой 130 кг, составляет 4 кН – условие обеспечения устойчивости модуля выполняется.

При подрезании боковых поверхностей захваченной порции усилие отрыва уменьшается и составляет 2,5 кН.

Разработано техническое решение, защищенное патентом на полезную модель «Устройство для выемки волокнистого материала с боковыми режущими парами», которое состоит из вильчатого грейфера и боковых режущих пар с центральным ножом и лезвиями, выполненными по логарифмической спирали (рисунок 12). С боковым подрезанием материала усилие отрыва материала снижается на 38 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-исследовательской работой, в которой на основе установленных требований к процессу механизированной поверхностной выемки органогенного сырья изложены научно обоснованные решения по технологии и оборудованию для выемки органогенного сырья с поверхности неосушенной торфяной залежи без нарушения естественной структуры материала.

По результатам выполненной диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. К основным принципам поверхностной выемки следует отнести: залежь является опорной поверхностью и объектом разработки; осушения производственных площадей не требуется; поверхностная выемка сырья выполняется с применением принципов палудикультуры.

2. Удлиненная волокнистая текстура *Sphagnum magellanicum* и его изотропность являются определяющими эксплуатационными характеристиками сырья, выемка которого осуществляется с глубины 0,3 м от поверхности залежи при постоянной степени разложения в слое.

3. Элементы блочной технологии включают 4 технологических участка, состоящих из 2 рабочих площадок длиной 384 м, в которых выделены: транспортная полоса шириной 3 м и две параллельные выемочные области по 2,8 м. Выемочные области разделяются на блоки, разработка которых ведется с образованием лагун с сохранением бERM-перемычек между лагунами шириной 0,4 м. Количество технологических участков равно количеству лет, необходимых для восстановления растительного слоя после выемки. Рабочая ширина эксплуатационного пространства равна 85 м.

4. Для выполнения производственных и вспомогательных операций применяется выемочно-транспортный модуль: колесный

трактор Беларус МТЗ-622 с тяговым классом 0,9, колесный полуприцеп-самосвал 1-ПТС2 с кузовом вместимостью 2 м³; шарнирно-сочлененный гидроманипулятор Атлант-90 с вылетом стрелы 7,8 м; двухчелюстной вилчатый грейфер FLO-10 вместимостью 0,13 м³ с боковыми режущими парами.

5. Процесс внедрения зубьев грейфера реализуется с преодолением сил сопротивления проникновению зубьев грейфера. Среднее значение усилия внедрения зубьев грейфера на площадке с *Sphagnum magellanicum* – 0,44 кН.

6. При уплотнении сырья вилчатым грейфером материал сжимается в 2 раза со снижением влагосодержания на 27 %. Среднее значение модуля общей деформации E_0 в естественном залегании, характеризующего сжимаемость торфяной залежи под действием внешних нагрузок, для *Sphagnum magellanicum* составляет 22 кПа.

7. Усилие отрыва захваченного материала после подрезки боковых поверхностей снижается на 38 % с обеспечением отрыва без провисания материала между зубьями с расстоянием 135 мм; размах челюстей грейфера 1,3 м, ширина 0,65 м.

8. Разработано «Устройство для выемки волокнистого материала с боковыми режущими парами» (патент РФ на полезную модель № 218971), с установленными на нем боковыми режущими парами по обеим сторонам, образованными из центрального ножа и боковых ножей с лезвием, выполненным по логарифмической спирали.

9. Результаты работы использованы в деятельности компании ООО «Агровит» при организации добычи торфяного сырья с целью производства «Элементов фильтрующих торфяных» (акт (справка) о внедрении от 27.03.2025 г.).

10. Перспективным направлением дальнейшей разработки темы исследования является анализ процесса транспортировки экскавированного органомогенного сырья за пределы рабочей зоны карьера для формирования научно обоснованных решений по выбору рационального автоматизированного способа перемещения материала с сохранением его ненарушенной структуры в зону последующей подготовки.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Соловьев, И.В.** Анализ выбора оборудования для поверхностной выемки органогенного грунта / **И.В. Соловьев**, А.В. Михайлов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 17-1. – С. 203-209. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-17-203-209.

2. **Соловьев, И.В.** Особенности компоновки технологического модуля для добычи торфяного сырья малой степени разложения / **И.В. Соловьев**, А.В. Михайлов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 16. – С. 103-109. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-16-103-109.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. **Соловьев, И.В.** Анализ грейферной выемки волокнистого торфяного сырья / **И.В. Соловьев**, А.В. Михайлов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15, № 4(58). – С. 1098-1107. – DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-1098-1107.

4. Михайлов, А.В. Анализ элементов блочной технологии поверхностной выемки органогенного сырья / А.В. Михайлов, **И.В. Соловьев**, Ю.А. Казаков // Горная промышленность. – 2025. № 1. – С.129-136. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-129-136.

Патент:

5. Патент на полезную модель № 218971 Российская Федерация, МПК В66С 3/04 (2023/05). Устройство для выемки волокнистого материала с боковыми режущими парами. Заявка № 2023114145: заявл. 30.05.2023; опубл. 21.06.2023 / А.В. Михайлов, **И.В. Соловьев**, Ю.А. Казаков; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» - 11 с.

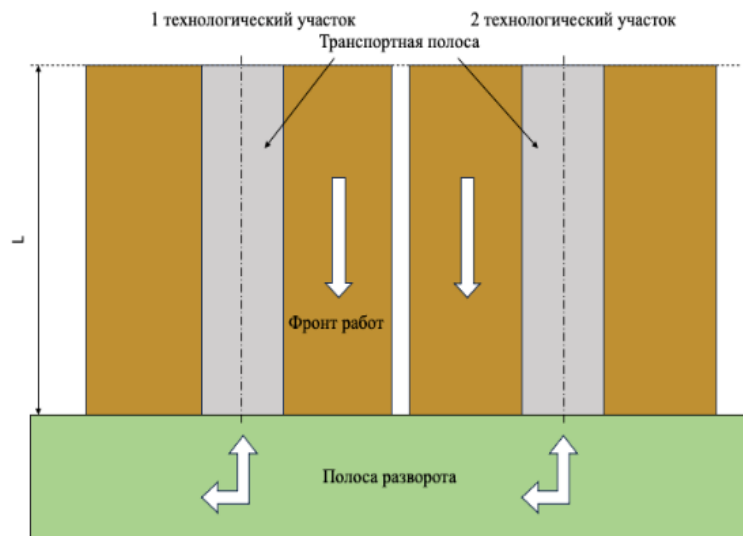


Рисунок 1 – Схемное решение блочной технологии выемки

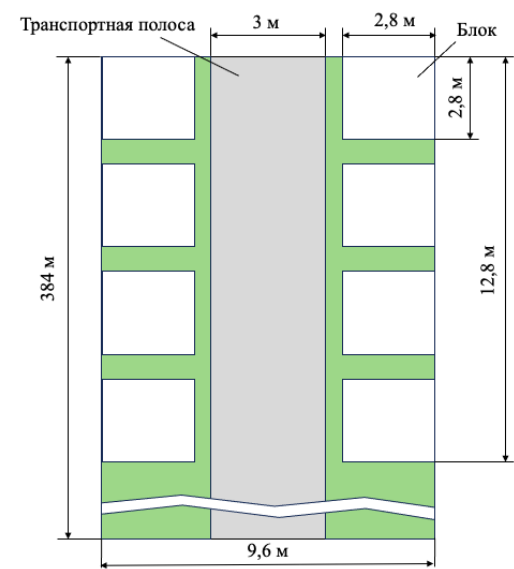


Рисунок 2 – Схема рабочей площадки

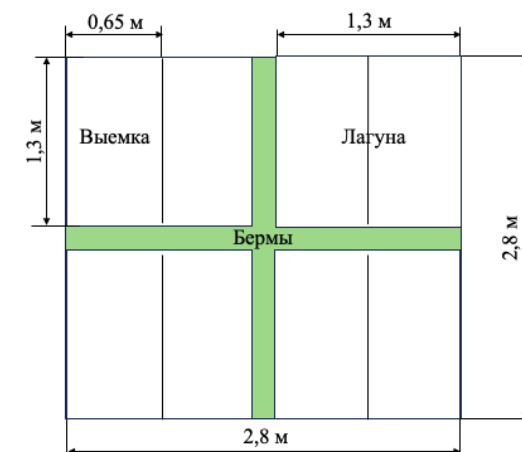


Рисунок 3 – Схема отработки блока

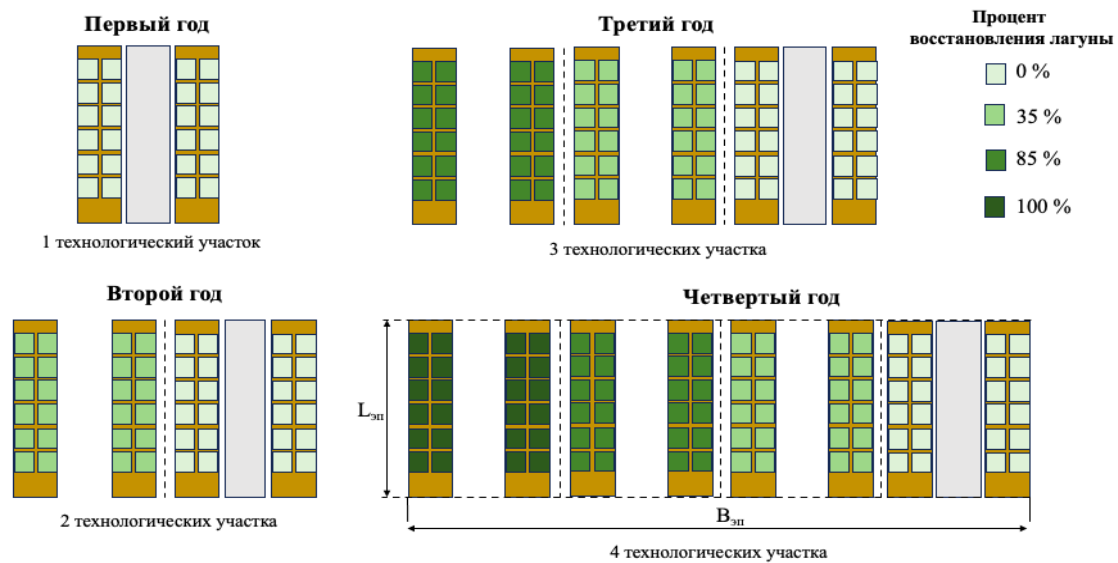


Рисунок 4 – Этапы проведения выемочных работ

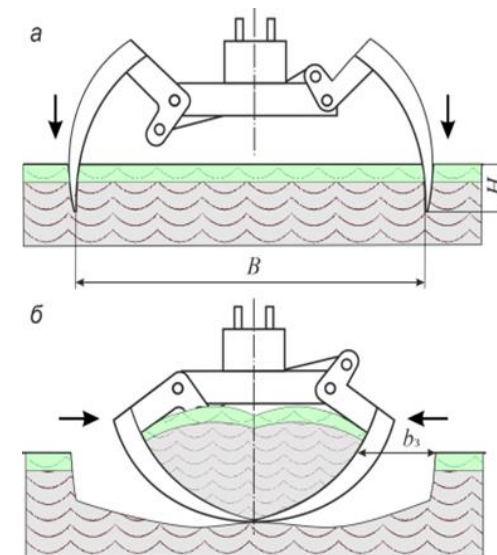


Рисунок 6 – Схема выемки сырья: а – внедрение зубьев; б – грейфер закрыт

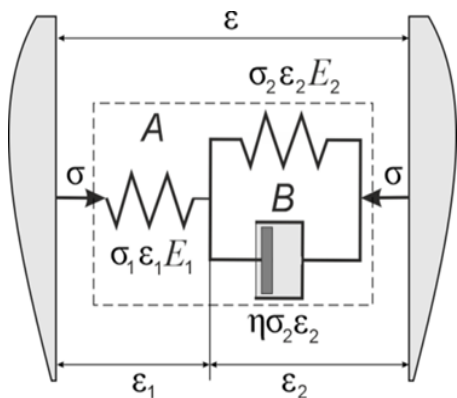


Рисунок 7 – Стандартная линейная твердотельная трехэлементная модель

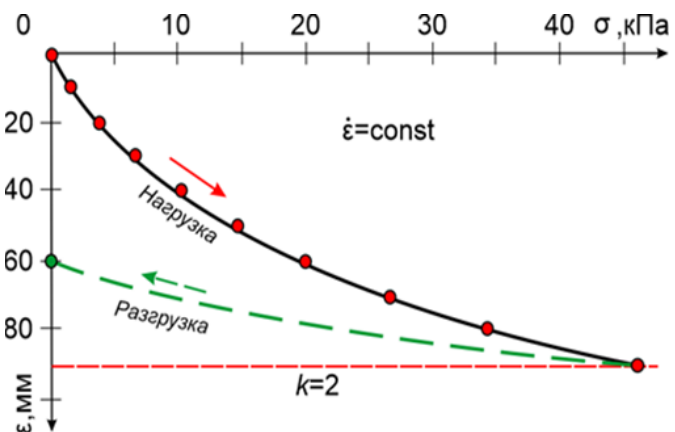


Рисунок 8 – График уплотнения материала и разгрузки

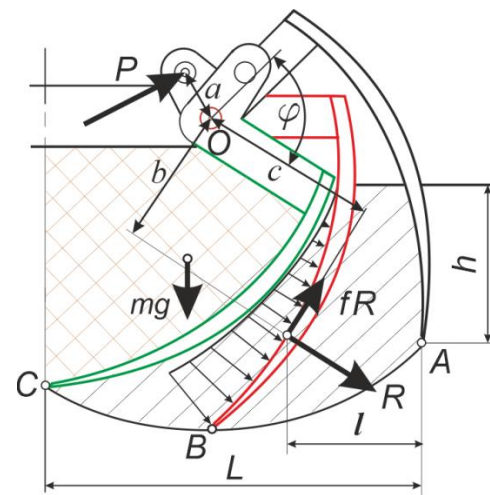


Рисунок 9 – Силы, действующие на зуб грейфера

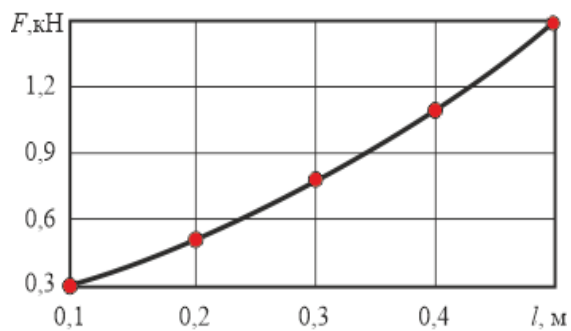


Рисунок 10 – Усилие перемещения, введенного зуба грейфера в залежь от длины перемещения

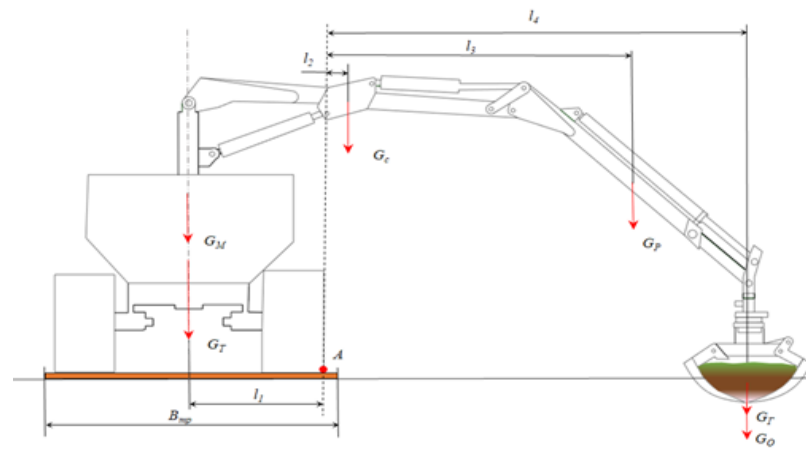


Рисунок 11 – Схема действия сил при отрыве сырья из массива



Рисунок 12 – Устройство для выемки торфяного сырья