

На правах рукописи

ХУДЯКОВА Ирина Николаевна



**ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР СХЕМНЫХ И
КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ КОМПЛЕКСА
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДОБЫЧИ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ
НА НЕОСУШЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ**

Специальность: 05.05.06 – Горные машины

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

Санкт-Петербург – 2020

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Иванов Сергей Леонидович

Официальные оппоненты:

Горлов Игорь Васильевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет», кафедра технологии и автоматизации машиностроения, профессор

Шишлянников Дмитрий Игоревич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Горная электромеханика», доцент

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет»

Защита диссертации состоится 25 сентября 2020 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. № 1171а.

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

Автореферат разослан 24 июля 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Реализация «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» (Стратегия) предполагает ввод новых генерирующих мощностей, функционирующих на нетрадиционных возобновляемых источниках энергии, к которым относится торф. Существующие комплексы оборудования торфодобывающих компаний представляют собой достаточно сложные технические системы, требующие структурной модернизации и применения комбинированных агрегатированных комплексов горного оборудования для повышения эффективности его рационального использования. При этом процесс производства торфяной продукции, как правило, предполагает подготовку и осушение торфяных месторождений для обеспечения условий применения горной техники, что влечет за собой понижение уровня грунтовых вод и, как следствие, нарушение биосферного равновесия ареала, повышение экологических и пожарных рисков, значительных затрат, связанных с рекультивацией выработанных месторождений в будущем. Результаты оценки потенциала торфодобывающих предприятий на соответствие принципам НДТ – наилучших доступных технологий, внедряемых в соответствии с Федеральным законом № 219-ФЗ (ред. от 03.07.2016) и Стратегией, утвержденной 09.06.2020, в рамках проектов климатически нейтральной хозяйственной деятельности, показывают, что целесообразно отойти от способов добычи связанных с осушением разрабатываемых площадей.

Для осуществления добычи и переработки торфяного сырья без предварительного осушения территорий необходимо создание агрегатированных торфодобывающих комплексов (АТДК) на единой базовой платформе и агрегируемых с ней модулей и функциональных элементов, при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов на борту АТДК.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами механизации добычи и переработки торфяного сырья, занимались ученые: Антонов В.Я., Афанасьев А.Е., Богатов Б.А., Гамаюнов С.Н., Горячев В.И., Гревцев Н.В., Жигульская А.И., Зюзин Б.Ф., Косов В.И., Кремчев Э.А., Малков Л.М., Мисников О.С., Михайлов А.В., Опейко Ф.А., Селеннов В.Г., Солопов С.Г., Терентьев А.А., Штин С.М., Ялганец И.М., Clarke D., Leinonen A., Malterer T. и др.

Их исследования посвящены вопросам механизации трудоемких процессов добычи и переработки торфяного сырья. Однако, переходя от поверхностно-послойной добычи торфяного сырья к карьерной и стремясь к уменьшению отрицательного воздействия на окружающую среду, необходимо научно обосновывать и выбирать приемлемые схемные и конструктивные решения агрегатированного торфодобывающего комплекса горного оборудования (АТДК ГО) для работы на неосушенных месторождениях на принципах климатически нейтральной хозяйственной деятельности, что требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Целью работы является установление закономерностей изменения основных параметров функциональных элементов агрегатированного торфодобывающего комплекса горного оборудования для работы на неосушенных месторождениях в рамках формирования возможных схемных решений при структурно-параметрическом синтезе комплекса по блочно-иерархическому принципу и определение энергомассовых характеристик составляющих его функциональных элементов от заданной производительности, для научно обоснованного технического решения в виде единого комплекса горного оборудования для добычи торфяного сырья в указанных условиях функционирования и отдельных конструктивных решений функциональных элементов АТДК ГО, включая базовый, что имеет существенное значение для горной отрасли страны.

Идея работы заключается в предварительной оценке по критерию удельных энергозатрат сформированной блочно-иерархической структуры АТДК ГО и основных энергомассовых характеристик его функциональных элементов для условий функционирования на неосушенном месторождении, при этом технические параметры функциональных элементов АТДК ГО взаимосвязаны между собой, формируются по специальному алгоритму, реализованному в математической модели, позволяющему осуществлять решение задачи оценки величин установленной мощности, массы и производительности функциональных элементов комплекса при максимально возможной их загрузке с учетом пооперационных потерь и снижения массы перерабатываемого торфяного сырья каждым последующим функциональным элементом, по мере глубины переработки сырья.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Провести анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы.

2. Провести анализ методик формирования агрегатированных структур систем и комплексов горного оборудования на основе принципов структурного и параметрического подходов с последующей разработкой алгоритма по оценке предлагаемых схемных решений АТДК ГО для работы на неосушенном месторождении.

3. Провести теоретические и экспериментальные исследования и выявить закономерности изменения основных энергомассовых характеристик функциональных элементов и составляющих их модулей АТДК ГО для работы на неосушенных месторождениях в функции его производительности по каждому типу функциональных элементов, в рамках соответствующих схемных решений комплекса, а также оценочные лабораторные исследования по целесообразности предварительного обезвоживания торфяного сырья через перфорированную стенку.

4. Разработать математическую модель изменения основных энерго-массовых параметров агрегатированного торфодобывающего комплекса

горного оборудования для работы на неосушенных месторождениях в рамках возможных схемных решений при структурно-параметрическом синтезе комплекса.

5. Ранжировать по критерию удельных энергозатрат выявленные схемные решения агрегатированных торфодобывающих комплексов горного оборудования (АТДК ГО) предназначенных для работы на неосушенных месторождениях.

6. Предложить технические решения по отдельным функциональным элементам и комплексу в целом применительно к условиям неосушенных торфяных месторождений и разработать рекомендации по формированию и оценке эффективности структур систем на основе регрессионных моделей процесса функционирования элементов и модулей комплекса для выбора основных конструктивно-технологических параметров на ранних стадиях процесса их проектирования.

7. Разработать прикладную компьютерную программу, реализующую результаты научных исследований.

Научная новизна работы:

Предложен алгоритм формирования основных энергомассовых характеристик агрегатированного торфодобывающего комплекса горного оборудования блочно-иерархической структуры и его функциональных элементов для условий функционирования на неосушенном месторождении в рамках возможных схемных решений комплекса и разработана математическая модель АДТК ГО, позволяющая оценить основные параметры функциональных элементов и модулей – установленной мощности, массы и производительности, на принципах структурно-параметрического синтеза для научно обоснованного выбора ряда конструктивно-технологических параметров комплекса на ранних стадиях процесса их проектирования.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Представлена структурная формула агрегатированного торфодобывающего комплекса горного оборудования как объекта, включающего функциональные элементы составляющие АДТК ГО с учетом подсистем, образующих его функциональных элементов, различной физической природы (привод, трансмиссии, силовое оборудование, управление). Показана возможность оценки надежности АДТК ГО на основе структурной формулы. Дан алгоритм оценки и выбора рациональных конструктивных и схемных решений АДТК ГО для работы на неосушенных торфяных месторождениях, включающий выявленные функциональные зависимости установленной мощности и массы функциональных элементов системы от заданной производительности.

Предложены технические решения отдельных функциональных элементов АДТК ГО, защищенные патентами на изобретения Российской Федерации, создана прикладная компьютерная программа для ЭВМ по оценке основных параметров функциональных элементов АДТК ГО.

Результаты исследований использованы ООО «НПКФ Эпицентр», г. Санкт-Петербург на стадии формирования исходных данных для разработки технического задания на проектирование комплекса оборудования по добыче и переработке торфяного сырья для участка недр местного значения.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач используется комплексный подход, включающий научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований, обработку и анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований в области горных машин и оборудования торфяного производства и функционирования этих машин, а также компьютерное моделирование.

Методологической основой работы является системный подход к изучаемым средствам добычи, включающий теоретический анализ и обобщение результатов фундаментальных и прикладных работ отечественных и зарубежных авторов, методы теории проектирования горнодобывающих комплексов, многокритериального анализа, имитационного моделирования.

Соответствие паспорту специальности. Тема исследования соответствует п.4 «Обоснование и выбор конструктивных и схемных решений машин и оборудования во взаимосвязи с горнотехническими условиями, эргономическими и экологическими требованиями» области исследований паспорта специальности 05.05.06 – Горные машины.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанный алгоритм оценки изменения величин основных параметров функциональных элементов агрегатированного торфодобывающего комплекса горного оборудования для работы на неосушенных месторождениях с учетом структурной формулы АТДК ГО, описывающей характер связей этих элементов в структурной схеме комплекса как системы, и реализованный в математической модели функционирования комплекса, позволяет производить оценку энергомассовых характеристик АТДК ГО в целом и его функциональных элементов в отдельности с учетом заданной производительности комплекса по добыче и карьерной переработке торфяного сырья.

2. Выявленные энергомассовые зависимости в функции производительности функциональных элементов комплекса оборудования для добычи и карьерной переработки торфяного сырья, достоверно описаны уравнениями регрессии в виде экспоненциальных, степенных и линейных зависимостей, входящих в состав модели функционирования АТДК ГО для работы на неосушенных месторождениях, при этом модель формирует основные параметры отдельных функциональных элементов комплекса, агрегатированных на плавучей платформе, как базовом элементе, и на борту карьера и взаимоувязывает их между собой, обеспечивая максимально возможную загрузку горного оборудования комплекса, с учетом операционных потерь и изменения массы торфяного сырья, по мере глубины и объемов его переработки.

Степень достоверности результатов исследования:

Теория построена на известных, проверяемых данных, фактах, в т.ч. для предельных случаев, согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертационной работы. Использовано сравнение авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике. Экспериментальные результаты получены на сертифицированном оборудовании.

Апробация результатов. Основные положения работы, результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались и получили положительную оценку на международных конференциях: 12-ая, 13-ая, 14-ая Международные конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (г. Тула, 2016, 2017, 2018 гг.); 57-ая Международная научная конференция студентов и молодых ученых в Краковской горно-металлургической академии (г. Краков, Польша, 2016 г.); Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME» (г. Санкт-Петербург, 2018, 2019, 2020 гг.); Международная научная конференция студентов и молодых ученых во Фрайбергской горной академии Freiburger-St.Petersburger Kolloquiumjunger Wissenschaftler, (г. Фрайберг, Германия, 2018 г.); Международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (г. Екатеринбург, 2019 г.); 62-ая Международная научная конференция в Горно-геологического университета им. И. Рильски, (г. София, Болгария, 2019 г.); 78-ая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники образования» (г. Магнитогорск, 2020 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, в анализе параметров горных машин и оборудования, влияющих на применение их как функциональных элементов в составе агрегатированного торфодобывающего комплекса горного оборудования; в составлении структурной формулы АТДК ГО, отражающей типы взаимодействия функциональных и базового элементов, в обосновании выбора схемного решения для комплекса оборудования, в разработке алгоритма и математической модели комплексной добычи торфяного сырья на неосушенных месторождениях и его первичной переработки на борту самоходной плавучей платформы; в разработке прикладной компьютерной программы оценки необходимого объема добычи торфяного сырья и рабочих параметров функциональных элементов комплекса горного оборудования в системе «добыча-переработка»; в получении исходных данных и научных экспериментах; в обработке и интерпретации экспериментальных данных; в разработке рекомендаций по проектированию и созданию комплекса оборудования для добычи и

переработки торфяного сырья; в подготовке публикаций, отражающих основные положения и результаты диссертационного исследования.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 14-ти печатных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получены 2 патента на изобретения.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы и 4-х приложений. Диссертация изложена на 169 страницах машинописного текста, в том числе содержит 16 таблиц, 47 рисунков. Список цитируемой литературы включает 105 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, идея, задачи и научная новизна работы, раскрыты теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, соответствие паспорту специальности, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов работы, личный вклад соискателя, данные о публикациях автора.

В первой главе приведен обзор состояния изученности рассматриваемой темы исследования. Показан потенциал и возможные перспективы использования торфяного сырья в отраслях хозяйствования страны, также подчеркнута значимость разработки торфяных месторождений для обеспечения удаленных и изолированных территорий топливными ресурсами в рамках климатосберегающих технологий и НДТ. Дан обзор существующих схем и машин для реализации процессов добычи и карьерной переработки торфяного сырья, как традиционными способами с применением водопонижения разрабатываемых территорий, так и посредством плавучих комплексов на неосушенных месторождениях. Представлены существующие подходы к формализации структур комплексов горных машин. Показано, что для работы на месторождениях без предварительного осушения необходимо создание агрегатированных торфодобывающих комплексов горного оборудования для добычи и переработки торфяного сырья. Отражены вопросы, касающиеся механического обезвоживания торфяного сырья.

Во второй главе представлены структура и состав функциональных элементов АДТК ГО для работы на неосушенных месторождениях. Предлагаемый комплекс имеет базовые элементы и функциональные элементы, агрегатируемые с базовым в виде плавучей самоходной платформы, обеспечивая минимум транспортных операций между функциональными элементами комплекса.

Показано, что предлагаемый АДТК ГО производительностью 50 000 т условного топлива (у.т.) в год при сравнении с комплексом горных машин, реализующих фрезерный способ добычи, требует в 20 раз меньших площадей, задействованных в добыче. На порядок меньше и период подготовки месторождения, в сравнении с фрезерным способом, расчетные энергозатраты для которого только по потребленному топливу составляют 51673 кг или 1,03 кг/т₄₅ %, что эквивалентно 44,7 МДж/т₄₅ %, суммарные же энергозатраты на 1 т 45 %-ой влаги добываемого торфяного сырья при применении комплекса машин, реализующих фрезерный способ добычи составляет – 107,7 МДж/т₄₅ %.

Агрегатированный торфодобывающий комплекс горного оборудования, помимо базовых элементов, включает целый ряд функциональных элементов, сочетание которых может варьироваться в зависимости от структурной схемы комплекса (рисунок 1). Определяющим структурным элементом являются выемочно-погрузочные функциональные элементы, среди которых возможно выделить четыре, чьи названия и дали наименования предлагаемым структурным схемным решениям:

Схема I «Одноковшовый экскаватор»/манипулятор с выемочным рабочим органом;

Схема II «Многоковшовый экскаватор»;

Схема III «Гидромеханизация»;

Схема IV «Шнековая послойная экскавация» (на полную мощность залегания торфяного пласта или его часть).

Эффективность функционирования АДТК ГО требует непрерывности материального потока торфяного сырья и, как следствие безотказной работы всех функциональных элементов комплекса с учетом номинальных потерь сырья при выполнении основных и вспомогательных операций.

Для обоснования и выбора эффективной структуры АДТК ГО была проведена предварительная оценка энергопотребления комплексов соответствующих схемным решениям, при этом в качестве энергомассовых параметров функциональных элементов взяты параметры существующего горного оборудования, типы которого предполагалось применять для указанных схемных решений комплекса годовой производительностью 50000 т у.т.

По мере прохождения материального потока торфяного сырья от одной группы функциональных элементов комплекса к другой, масса этого сырья V_i будет уменьшаться вместе со снижением влаги в торфе. Работа функционального элемента (горной машины/оборудования) комплекса для добычи и переработки торфяного сырья за годичный период определялась произведением времени работы i -й машины (t_i) на величину установленной мощности (N_i) ее привода.

В зависимости от схемного решения (рисунок 1) были получены следующие величины энергозатрат на 1 т у.т. торфяного сырья 45 %-ой влаги:

Схема I «Одноковшовый экскаватор»/манипулятор с выемочным рабочим органом – 84,38 МДж/т₄₅ %;

Схема II «Многоковшовый экскаватор» – 90,72 МДж/т₄₅ %;

Схема III «Гидромеханизация» – 84,13 МДж/т₄₅ %;

Схема IV «Шнековая послойная экскавация» – 96,8 МДж/т₄₅ %.

При этом суммарные энергозатраты на 1 т 45 %-ой влаги добываемого торфяного сырья при использовании базового комплекса горных машин при производстве фрезерного торфа, как это указывалось ранее, составили 107,7 МДж/т₄₅ %, что выше, любого из предложенных вариантов.

Наименее энергозатратным является вариант комплекса, соответствующий схеме I «Одноковшовый экскаватор» /манипулятор с выемочным рабочим органом.

Для этой структурной схемы комплекса АТДК ГО, как блочно-иерархической структуры, рекомендуемый перечень функциональных элементов (оборудования) включает: экскаватор гидравлический одноковшовый/манипулятор с выемочным рабочим органом; сепаратор; дробилка/измельчитель; центрифуга; шнековый пресс; сушилка барабанного типа; бункер-накопитель; транспорт – ленточные конвейеры/питатели, водные транспортные шаттлы. Таким образом, для осуществления функционирования АТДК ГО подобной структуры в общем случае необходимо наличие в составе системы механизмов (функциональных элементов) и модулей для выполнения следующих операций: добычи (*DB*), сепарации (*SB*), дробления/измельчения (*IzB*), механического обезвоживания (*MO*), прессования (*PrB*), сушки (*SuB*), товарной продукции (*TrB*), электрогенерации (*EB*), транспортирования (*TrB*), объединенные в единую цепочку по средством, обеспечивающих: согласование (-), соединение (+) или совмещение (·) связей. Одним из основных отличий работы комплекса от существующих является отсутствие необходимости различного рода перемещений функциональных элементов в пределах базового элемента.

Наличие базового элемента позволяет идентифицировать АТДК ГО как агрегатированную систему. Базовый элемент (например, элемент перемещения – плавучая платформа) – это конструкция (перемещающая связанные с ней функциональные элементы АТДК ГО относительно проводимой выработки или забоя на торфяном месторождении), предназначенная для агрегатирования с ней функциональных элементов комплекса, используя связи соединения.

На рисунке 2, в качестве примера, представлена функциональная блочно-иерархическая структура перемещаемой части АТДК ГО с базовым элементом в виде плавучей платформы, объединяющая перечисленные выше классификационные признаки системы и демонстрирующая принцип структурообразования и построения обобщенной структуры АТДК ГО. Комплекс имеет одну подсистему – глобальных перемещений, которая состоит из базового элемента. Все функциональные элементы и базовый элемент связаны конструктивно связями соединения.

При этом, базовых элементов, объединенных между собой связями согласования, входящих в состав АТДК ГО, может быть несколько, а их число и специфика будут определяться технико-экономической целесообразностью.

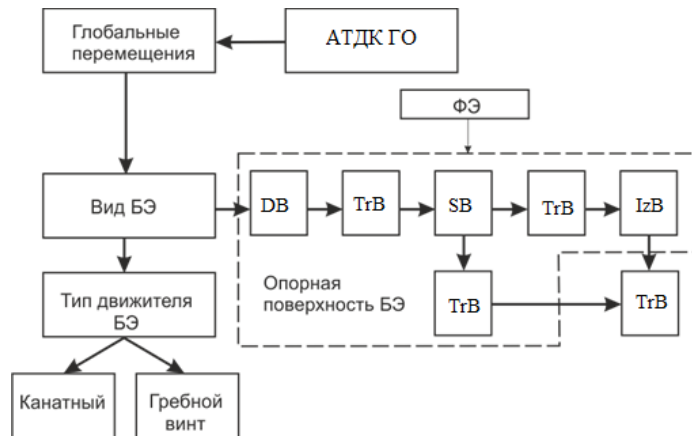


Рисунок 2 – Функциональная структура АТДК ГО

Основой любого функционального элемента (горной машины/оборудования) является механическая составляющая и ее привод (электрический, электрогидравлический или, как исключение, ДВС), служащий для приведения в действие исполнительного органа или органа перемещения. В этом случае укрупненно структурная формула в самом общем виде функционального элемента (ФЭ) АТДК ГО может быть представлена следующим образом (1):

$$\Phi Э_i = ((M_i + F_{g_i}) + F_{e_i}) + I_i \cdot E_i, \quad (1)$$

где M_i – механическая составляющая, суть механическая трансмиссия исполнительного органа; F_{g_i} – гидравлическая трансмиссия и гидропривод; F_{e_i} – электрический привод; E_i – электронная составляющая, формирующая, передающая и осуществляющая обработку электрических сигналов; I_i – информационная составляющая, обеспечивающая, формирующая, осуществляющая хранение, передачу и обработку информационных сигналов.

Две последние составляющие суть управления (E_i) и обратная связь, а также информационные потоки (I_i) от датчиков, обеспечивающих мониторинг состояния и функционирования, входящих в систему автоматизации.

Размещенный на базовом элементе экскаватор (или манипулятор с выемочным рабочим органом, установленный на подвижной тележке $M_T + F_{eT}$) детерминировано перемещается по краю платформы. Управление им осуществляется с центрального пульта. Питание элемента осуществляет электрогидравлическая станция $F_{gH} + F_{eH}$. Развернутая структурная формула добычной горной машины или соответствующего функционального элемента в нашем случае будет выглядеть так (2):

$$\Phi Э_{DB} = ((M_{DB} + F_{gH} + F_{eH}) + (M_T + F_{eT})) + I_{DB} E_{DB} \quad (2)$$

Для сепарирующей установки $\Phi Э_{SB}$, куда торфяное сырье через приемный бункер поступает на зубья гребенки с приводными валами, далее на питатели подрешетного продукта и древесных включений, механическая составляющая представлена выражением $M_{SB} + Fe_{SB}$. Здесь управление и контроль осуществляется в автоматическом режиме $I_{SB} \cdot E_{SB}$. Полная формула представлена выражением (3):

$$\Phi Э_{SB} = (M_{SB} + Fe_{SB}) + I_{SB} \cdot E_{SB} \quad (3)$$

Аналогично сепаратору, для дробилки/измельчителя структурная формула принимает вид (4):

$$\Phi Э_{LБ} = (M_{LБ} + Fe_{LБ}) + I_{LБ} \cdot E_{LБ} \quad (4)$$

Структурная формула питателей (5) объединяет механическую составляющую с электрическим приводом и систему управления:

$$\Phi Э_{TrB} = (M_{TrB} + Fe_{TrB}) + I_{TrB} \cdot E_{TrB} \quad (5)$$

Плавучая платформа оснащена гидроприводом $Fg_{БЭ}$, который приводит в действие весь механизм $M_{БЭ}$ шагания платформы. Управление перемещением платформы осуществляется так же в автоматическом режиме $I_{БЭ} \cdot E_{БЭ}$. Формула базового элемента платформы представлена выражением (6):

$$БЭ = (M_{БЭ} + Fg_{БЭ} + Fe_{БЭ}) + I_{БЭ} \cdot E_{БЭ} \quad (6)$$

Между базовым элементом и береговой частью комплекса транспортом будут служить, например, шаттлы.

Структурную формулу модуля, по аналогии со структурной формулой функционального элемента АТДК ГО запишем следующим образом (7):

$$m_j = \Sigma(\Phi Э_i) = \Sigma(((M_i + Fg_i) + Fe_i) + I_i \cdot E_i) \quad (7)$$

Производительность комплекса горного оборудования будет определяться минимальной производительностью последовательно расположенных в цепочке функциональных элементов, представленных соответствующими модулями, а энергетические затраты суммой произведений соответствующих коэффициентов суточного использования оборудования на величину первичной силовой составляющей функционального элемента.

Структурная формула АТДК ГО по добыче и первичной переработке торфяного сырья на базовом элементе перемещения БЭп (плавучем комплексе), в рамках схемы I включает лишь агрегируемые с базовым элементом функциональные модули добычи и первичной переработки может быть представлена следующим выражением (8):

$$\text{АТДК ГО}_1 = \text{БЭп} [\Phi Э_{DB} + \Phi Э_{SB} + \Phi Э_{LБ} + \Phi Э_{TrB}] = ((M_{DB} + Fg_{H1} + Fe_H) + (M_T + Fe_T)) + I_{DB} \cdot E_{DB} + (M_{SB} + Fe_{SB}) + I_{nSB} \cdot E_{nSB} + (M_{nLБ} + Fe_{nLБ}) + I_{nLБ} \cdot E_{nLБ} + (M_{nTrB} + Fe_{nTrB}) + I_{nTrB} \cdot E_{nTrB} + (M_{ФЭ} + Fg_{ФЭ} + Fe_{ФЭ}) + I_{ФЭ} \cdot E_{ФЭ} + I_{\text{АТДК ГО}_1} \cdot E_{\text{АТДК ГО}_1} \quad (8)$$

Агрегатирование с базовым элементом перемещения других функциональных элементов всего комплекса требует неоправданно большого

водоизмещения базового элемента, делает его громоздким, менее надежным и, как следствие, малоэффективным, поэтому в дальнейшем будет рассмотрено схемное решение соответствующее выражению (9).

В итоге, развернутая структурная формула комплекса добычи торфяного сырья (АДТК ГО) с тремя базовыми элементами – перемещения, транспортирования и переработки, может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{АДТК ГО} = & \Sigma \{ DB[\Sigma(\Sigma(((M_i+Fg_i)+Fe_i)+I_i \cdot E_i)_i)] + SB[\Sigma(\Sigma((M_i+Fe_i)+ \\ & + I_i \cdot E_i)_i)] + IzB[\Sigma(\Sigma(((M_i+Fe_i)+I_i \cdot E_i)_i))] - MO[\Sigma(\Sigma(((M_i+F(e)g_i)+Fe_i)+ \\ & + I_i \cdot E_i)_i)] + PrB[\Sigma(\Sigma(((M_i+Fe_i)+I_i \cdot E_i)_i))] + SuB[\Sigma(\Sigma(((M_i+Fg_i)+Fe_i)+ \\ & + I_i \cdot E_i)_i)] - nTrB[\Sigma(\Sigma(((M_i+Fe_i)+I_i \cdot E_i)_i))] \} + I \cdot E \end{aligned} \quad (9)$$

где n – число однотипных транспортных блоков.

Применение этой формулы позволяет с одной стороны оптимизировать структуру АДТК ГО путем минимизации составляющих ее машин, модулей и блоков, необходимых для реализации поставленной задачи, с другой стороны оценивать необходимые мощности и величину работы потребные для добычи и переработки торфяного и сопутствующего сырья при заданных объемах производства товарной продукции.

Для реализации представленного решения, создания функциональных элементов АДТК ГО с техническими характеристиками, взаимоувязанными друг с другом и в первую очередь по величине их производительности и мощности от требуемой производительности, необходимо иметь инструмент обоснованного выбора технических и в первую очередь энерго-массовых параметров оборудования комплекса, которым является разработанный алгоритм (см. рисунок 3), позволяющий на принципах энергоэффективности оценивать и увязывать основные параметры функциональных элементов АДТК ГО.

При реализации заявленного алгоритма, сначала проводят оценку необходимых объемов экскавации исходя из заданной годовой программы добычи в пересчете на абсолютно сухое торфяное сырье, с последующим обратным пересчетом. На каждой стадии ведется учет технологических потерь с проверкой массы по сухому веществу. При реализации алгоритма, используя данные по массе m_i , мощности N_i и производительности Q_i функциональных элементов, определяют количество, общую массу и потребные мощности для функционирования комплекса, а также объемы исходного сырья и готовой продукции. Полученные данные служат основой для технического задания на ранних стадиях проектирования. Принципы, заложенные в алгоритме, позволяют производить соответствующую оценку по нескольким схемным решениям или вариантам одного из них для решения задач оптимизации уже на ранних стадиях проектирования.

Таким образом, первое положение, вынесенное на защиту, следует считать доказанным.

Однако следует указать, что комплектование АДТК ГО существующими типоразмерами горных машин не представляется возможным из-за их дискретных параметров, а научно-обоснованно подобрать и взаимоувязать

энергомассовые, а затем и технические параметры функциональных элементов АДТК ГО, как единой системы в рамках параметрического синтеза при создании комплекса является не стандартной задачей. Для ее решения был проведен численный эксперимент по обобщению соответствующих параметров горного оборудования и выявлению функциональных зависимостей изменения мощности и массы горных машин соответствующих функциональных элементов в зависимости от изменения их производительности, представленный в третьей главе.

В первую очередь для выявления искомых функциональных зависимостей были проанализированы данные по современным гидравлическим экскаваторам ряда производителей: Komatsu, CAT, Hitachi, Volvo, «ТВЭКС». На основании полученных данных была проведена обработка и аппроксимация искомых функциональных зависимостей: $N_{\text{Э}}=f(Q_{\text{Э}})$ – мощности экскаватора от его производительности, $m_{\text{Э}}=f(Q_{\text{Э}})$ – массы экскаватора от его производительности, $V_{\text{К}}=f(Q_{\text{Э}})$ – объема ковша от его производительности, а также $m_{\text{РСК}}=f(m_{\text{Э}})$ – массы рукояти, стрелы и ковша от массы экскаватора и $m_{\text{РСК}}=f(Q_{\text{Э}})$ – от производительности экскаватора.

Выявленные функциональные зависимости и соответствующие им коэффициенты детерминации R^2 представлены выражениями 10-14:

$$N_{\text{Э}}(Q_{\text{Э}}) = 37,9e^{0,02Q_{\text{Э}}}, R^2 = 0,78 \quad (10)$$

$$m_{\text{Э}}(Q_{\text{Э}}) = 7,7e^{0,02Q_{\text{Э}}}, R^2 = 0,75 \quad (11)$$

$$V_{\text{К}}(Q_{\text{Э}}) = 0,02Q_{\text{Э}} + 0,06, R^2 = 0,93 \quad (12)$$

$$m_{\text{РСК}}(m_{\text{Э}}) = 0,66e^{0,08m_{\text{Э}}}, R^2 = 0,84 \quad (13)$$

$$m_{\text{РСК}}(Q_{\text{Э}}) = 0,085Q_{\text{Э}}^{0,97}, R^2 = 0,81 \quad (14)$$

По такому же принципу были определены зависимости (15-26) для всех единиц оборудования, представленных функциональными элементами:

Сепаратор:

$$N_{\text{С}}(Q_{\text{С}}) = 0,57e^{0,07Q_{\text{С}}}, R^2 = 0,82 \quad (15)$$

$$m_{\text{С}}(Q_{\text{С}}) = 0,46e^{0,05Q_{\text{С}}}, R^2 = 0,83 \quad (16)$$

Дробилка/измельчитель:

$$N_{\text{ИЗМ}}(Q_{\text{ИЗМ}}) = 5,2Q_{\text{ИЗМ}}^{0,4}, R^2 = 0,88 \quad (17)$$

$$m_{\text{ИЗМ}}(Q_{\text{ИЗМ}}) = 0,52Q_{\text{ИЗМ}}^{0,53}, R^2 = 0,79 \quad (18)$$

Обезвоживающая центрифуга:

$$N_{\text{ОБ}}(Q_{\text{ОБ}}) = 5,6Q_{\text{ОБ}}^{0,5}, R^2 = 0,81 \quad (19)$$

$$m_{\text{ОБ}}(Q_{\text{ОБ}}) = 0,46Q_{\text{ОБ}}^{0,54}, R^2 = 0,77 \quad (20)$$

Пресс:

$$N_{\text{ПР}}(Q_{\text{ПР}}) = 2,01Q_{\text{ПР}}^{0,6}, R^2 = 0,78 \quad (21)$$

$$m_{\text{ПР}}(Q_{\text{ПР}}) = 0,4Q_{\text{ПР}}^{0,75}, R^2 = 0,76 \quad (22)$$

Барабанная сушилка:

$$N_{\text{суш}}(Q_{\text{суш}}) = 2,65e^{0,1Q_{\text{суш}}}, R^2 = 0,87 \quad (23)$$

$$m_{\text{суш}}(Q_{\text{суш}}) = 3,6Q_{\text{суш}}^{0,6}, R^2 = 0,97 \quad (24)$$

Ленточный питатель:

$$N_{\text{п}}(Q_{\text{п}}) = 1,2e^{0,03Q_{\text{п}}}, R^2 = 0,93 \quad (25)$$

$$m_{\text{п}}(Q_{\text{п}}) = 0,17Q_{\text{п}}^{0,7}, R^2 = 0,88 \quad (26)$$

Представляя выявленные зависимости для каждого функционального элемента комплекса на отдельной номограмме (рисунок 4), получим инструмент для быстрого и обоснованного выбора основных параметров этого оборудования.

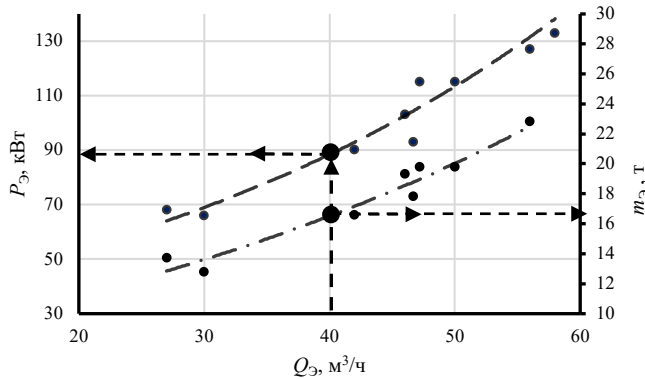


Рисунок 4 – Номограмма определения мощности и массы гидравлического экскаватора комплекса добычи

Определяющим здесь является производительность, а потребная мощность и масса соответствующие ей определяются графически по номограмме или по представленным выше регрессионным выражениям в функции производительности. Высокий коэффициент детерминации R^2 показывает, что в результате численного эксперимента выявлены факторные регрессионные зависимости.

Полученные таким образом функции изменения основных энерго-массовых параметров функциональных элементов от заданной производительности являются базовыми при формировании технического задания на проектирование, а также являются основой для получения оценочных характеристик комплекса горного оборудования.

Для минимизации функциональных элементов АТДК ГО рациональным может быть обезвоживание (отжатие) торфяного сырья в выемочном рабочем органе экскаватора или приемном бункере. Для установления

степени влияния площади перфорации при наличии прессующей стенки на интенсивность предварительного обезвоживания торфяного сырья были созданы шесть моделей ковша кубовидной формы с различной площадью перфорации на его гранях (размер каждой грани 0,075 м), параметры перфорации R_v 2-8 с площадью перфорации 32 %.

Весь объем используемого в эксперименте сырья был разделен на три группы:

- №1 – собственно экскавированное сырье;
- №2 – уплотненное торфяное сырье;
- №3 – сильно уплотненное торфяное сырье.

- каждая модель заполнялась торфяным сырьем, ее масса контролировалась тоекратным взвешиванием, среднее арифметическое значение записывалось в таблицу учета данных эксперимента;

- торфяное сырье подвергалось внешнему воздействию посредством веса груза, действующего на пуансон при расчетном давлении равном 0,02 МПа, продолжительность воздействия – 30 с.

- по истечению времени внешнего воздействия модель с отжатым торфяным сырьем оценивали взвешиванием, масса каждой модели с торфяным сырьем контролировалась тоекратно.

Аналогичные процедуры были проведены для сырья №2 и №3.

На основании полученных экспериментальных данных была проведена аппроксимация результатов измерений и построены графики изменения количества влаги торфяного сырья при отжатии в зависимости от площади перфорации ковша и уплотненности сырья, представленные на рисунке 5.

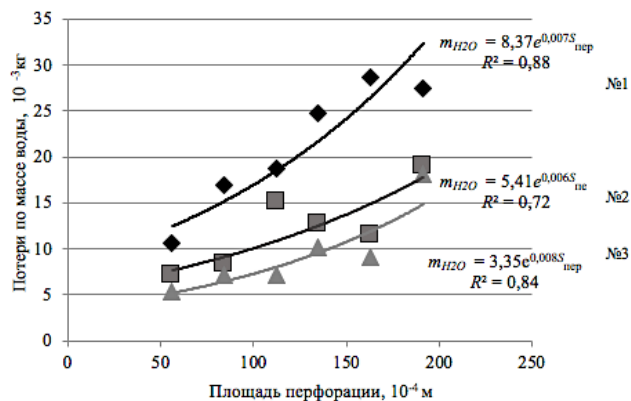


Рисунок 5 – Изменение интенсивности отделения воды в зависимости от площади перфорации ковша

Как видно из графика с увеличением площади перфорированной поверхности объем отжатой влаги увеличивается, но интенсивность этого процесса позволяет сделать вывод о том, что отделение влаги идет лишь в незначительном слое в непосредственной близости к перфорированной стенке. В глубине же проба практически своей влаги не меняет. При этом наибольший эффект водотделения имеют место в случае отжатия не уплотненного материала, когда присутствуют каналы для прохода жидкости из глубины на внешнюю поверхность, что имеет место при заполнении ковша срезанной в забое стружкой отделенного торфяного сырья.

В четвертой главе на основе предложенного алгоритма была разработана математическая модель изменения основных энергомассовых параметров АТДК ГО в системе «добыча-переработка». Структура математической модели показана на рисунке 6. Предложенная модель, уточненная по результатам теоретических и экспериментальных исследований, позволяет оценивать выбор рациональных значений параметров функциональных элементов комплекса добычи и переработки торфяного сырья, при формировании технического задания. Совместно с моделью была разработана компьютерная программа оценки рабочих параметров функциональных элементов в системе «добыча-переработка», ее интерфейс представлен на рисунках 7 и 8.

Даны описания технических решений базового элемента АТДК ГО – плавучей платформы (патент №2655235) и трансформируемого сооружения (патент №2672366) служащего для обеспечения перемещения плавучей платформы в зимний период. Его устанавливают непосредственно на платформе для создания искусственной среды непосредственно над забоем.

В работе также приведены некоторые конструктивные решения по модернизации конструкции ковша добычного агрегата.

Таким образом, второе положение, вынесенное на защиту, следует считать доказанным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной задачи – обоснование и выбор схемных и конструктивных решений агрегатированного торфодобывающего комплекса горного оборудования для добычи торфяного сырья на неосушенных месторождениях, представлено новое научно-обоснованное техническое решение в виде структуры единого комплекса горного оборудования для добычи торфяного сырья для указанных условий функционирования.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. На основе анализа и обобщения теоретических и экспериментальных исследований установлено, что существующие комплексы оборудования торфодобывающих компаний представляют собой достаточно сложные

технические системы, требующие структурной модернизации, так как в недостаточной мере реализуется системный подход в формировании комплексов горных машин, направленный на достижение высокой итоговой эффективности; четко не обоснован выбор параметров техники для максимальной производительности в конкретных горно-геологических условиях; недостаточный уровень надежности и ремонтпригодности машин ведет к потере 20-25 % времени цикла, усугубляемый сезонность ведения работ; применение существующих комплексов горных машин для добычи торфяного сырья (предполагающих подготовку и осушение торфяных месторождений) влечет за собой экологические и пожарные риски, в то время как создание и применение новых комплексов горных машин, добывающих непосредственно со специальных плавучих платформ без предварительного водопонижения месторождения позволяет повысить сезонность ведения работ, эффективность машинно-технологической системы торфяного производства и перейти к применению наилучших доступных технологий в РФ по отношению к торфодобыче, реализуемых посредством агрегатированного торфодобывающего комплекса горного оборудования.

2. На основе анализа методик формирования агрегатированных структур систем и комплексов горного оборудования на основе принципов структурно-параметрического синтеза разработана схема формирования возможных структур функциональных элементов, формирующих АДТК ГО для работы на неосушенном месторождении, проведено сравнение возможных вариантов между собой и комплексом горного оборудования для добычи фрезерного торфа с раздельной уборкой по критерию удельных энергозатрат: выявлено, что в сравнении с фрезерным практически все схемы АДТК ГО на 12-27 % менее энергоемки по сравнению с фрезерным комплексом той же годовой производительности. Разработана обобщенная структурная формула комплекса, показана возможность оценки наработки на отказ, параметра потока отказов и вероятности безотказной работы комплекса с использованием структурной формулы надежности. Разработан алгоритм выбора основных энергомассовых характеристик функциональных элементов АДТК ГО, технические характеристики которых взаимосвязаны между собой и обеспечивают при этом максимально возможную загрузку последних, с учетом пооперационных потерь при снижении массы перерабатываемого торфяного сырья по мере глубины его переработки функциональными элементами АДТК ГО.

3. На основании проведенных исследований выявлены функциональные зависимости изменения энергомассовых параметров всего спектра функциональных элементов, составляющих АДТК ГО для работы на неосушенных месторождениях от производительности соответствующего элемента, которые включены в математическую модель изменения основных параметров функциональных элементов в функции заданной производительности, реализующую предложенный алгоритм выбора параметров функциональных элементов. При этом искомые функции, в зависимости от типа функционального

элемента представлены в виде экспоненциальных, степенных и линейных зависимостей с коэффициентами регрессии R^2 в диапазоне от 0,75 до 0,97.

4. Проведены оценочные лабораторные исследования по целесообразности предварительного обезвоживания торфяного сырья через перфорированную стенку выемочного рабочего органа (ковша), выявлено, что увеличение толщины пристенного слоя негативно сказывается на протекании этого процесса, при этом величина влагоотделения, отнесенная к площади прилегающей перфорированной стенки в лабораторных условиях описана экспоненциальной зависимостью с коэффициентами регрессии R^2 в диапазоне от 0,72 до 0,88 в зависимости от уплотнённости торфяного сырья.

5. Предложены технические решения отдельных функциональных элементов агрегатированного торфодобывающего комплекса горного оборудования для работы на неосушенных месторождениях защищенные патентами на изобретения РФ № 2655235 «Плавучая платформа» и № 2672366 «Трансформируемое сооружение».

6. Даны рекомендации по формированию и оценке эффективности структур систем на основе регрессионных моделей процесса функционирования элементов комплекса для выбора основных конструктивно-технологических параметров на ранних стадиях процесса их проектирования с применением разработанной компьютерной программы на языке JavaScript и работающая в ОС Windows и iOS, функционирующей в диалоговом режиме, которая позволяет поэлементно оценивать основные параметры оборудования исходя из заданных условий функционирования и необходимого объема добычи комплекса в целом.

7. Результаты исследований использованы ООО «НПКФ Эпицентр», г. Санкт-Петербург на стадии формирования исходных данных для разработки технического задания на проектирование комплекса оборудования по добыче и первичной переработке торфяного сырья для участка недр местного значения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. Вагапова, Э.А. Обоснование и выбор оборудования для первичного обезвоживания торфяного сырья при его гидромеханизированной добыче из неосушенной залежи / Э.А. Вагапова, С.Л. Иванов, **И.Н. Худякова** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 7 (специальный выпуск 18). – С. 3-11.

2. **Худякова, И.Н.** Выбор и обоснование параметров технологического оборудования комплекса добычи торфяного сырья из натуральной залежи / И.Н. Худякова, Э.А. Вагапова, С.Л. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – №3 (специальный выпуск 4). – С. 3-15.

3. **Худякова, И.Н.** Формирование структуры основного технологического оборудования автономного комплекса для добычи торфа из

неосушенного месторождения/ Худякова И.Н., Резванова Э.А., Коконков А.А., Иванов С.Л. – Текст: электронный // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – № 9 (3). – С. 1-8. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/103TVN317.pdf>. (дата обращения: 25.09.2017).

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

4. Fadeev, D.V. Algorithm for estimating loads of supports floating platforms for the extraction and processing of peat raw materials / D.V. Fadeev, E.A. Vagapova, **I.N. Khudyakova**. – DOI:10.1088/1755-1315/378/1/012012. – Text: electronic // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). – 2019. – Volume. № 378. – pp.1-5. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/378/1/012012>. (date of request: 22.12.2019).

5. **Khudyakova, I.N.** Raw peat production and processing from flooded fields and approaches to maintain dehydration / I.N. Khudyakova, E.A. Vagapova, S.L. Ivanov. – DOI:10.1088/1755-1315/194/3/032010. – Text: electronic // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). – 2018. – Volume. № 194. – pp.1-5. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/194/3/032010>. (date of request: 28.11.2018).

6. Vagapova, E.A. Primary dehydration of peat on floating mining platforms / E.A. Vagapova, **I.N. Khudyakova**, D.V. Fadeev. – DOI:10.1088/1755-1315/378/1/012104. – Text: electronic // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). – 2019. – Volume. № 378. – pp. 1-5. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/378/1/012104> (date of request: 17.12.2019).

Патенты:

7. Патент № 2655235 Российская Федерация, МПК В63В 35/44(2006.01), В63Н 19/08(2006.01), В63В 35/34(2006.01), В63В 3/08(2006.01), Е21С 49/00(2006.01). Плавающая платформа: № 2017116467: заявл. 11.05.2017, опубл. 24.05.2018 / Фадеев Д.В., Звонарев И.Е., Иванов С.Л., **Худякова И.Н.**; заявитель Санкт-Петербургский Горный университет. – 15 с. : ил.

8. Патент № 2672366 Российская Федерация, МПК Е04Н 6/02(2006.01), В63В 17/02(2006.01), Е04F 10/10(2006.01), Е04Н 15/48(2006.01). Трансформируемое сооружение: № 2018104765: заявл. 07.02.2018, опубл. 14.11.2018/ **Худякова И.Н.**, Фадеев Д.В., Вагапова Э.А., Иванов С.Л.; заявитель Санкт-Петербургский Горный университет. – 10 с. : ил.

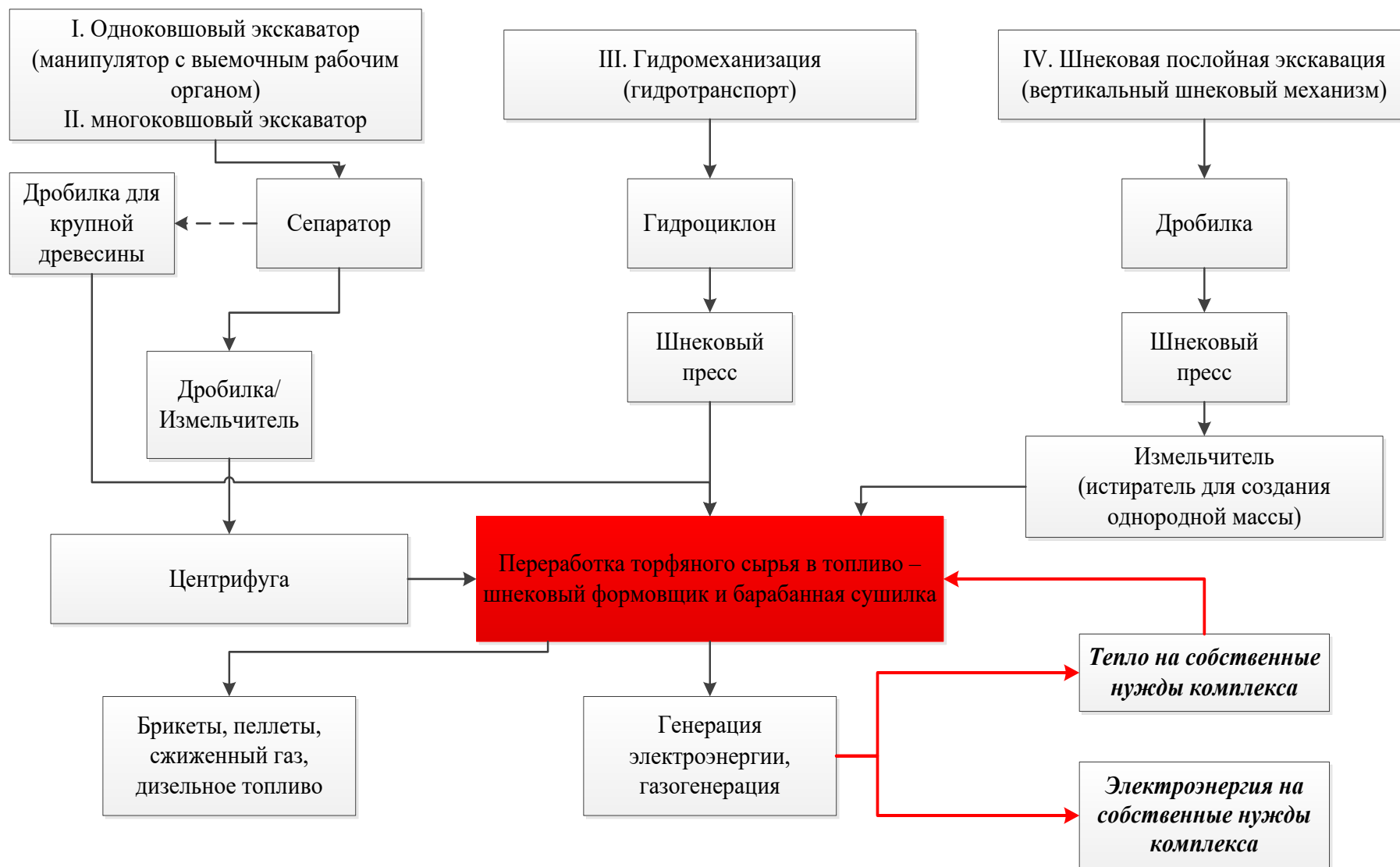


Рисунок 1 – Взаимодействие функциональных элементов комплекса горного оборудования

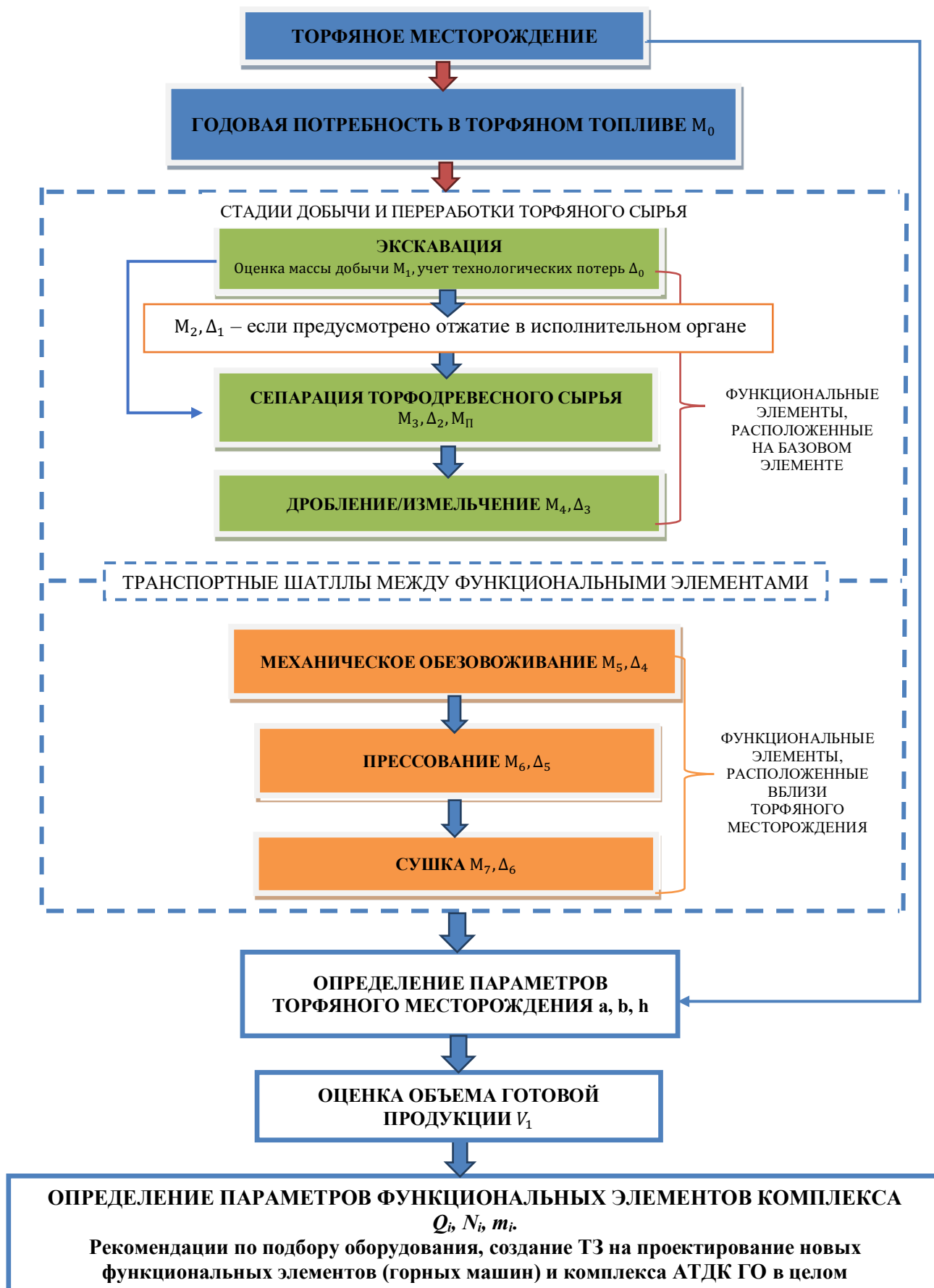


Рисунок 3 – Алгоритм по оценке предлагаемых схемных решений АТДК ГО для добычи и переработки торфяного сырья в заданных условиях функционирования

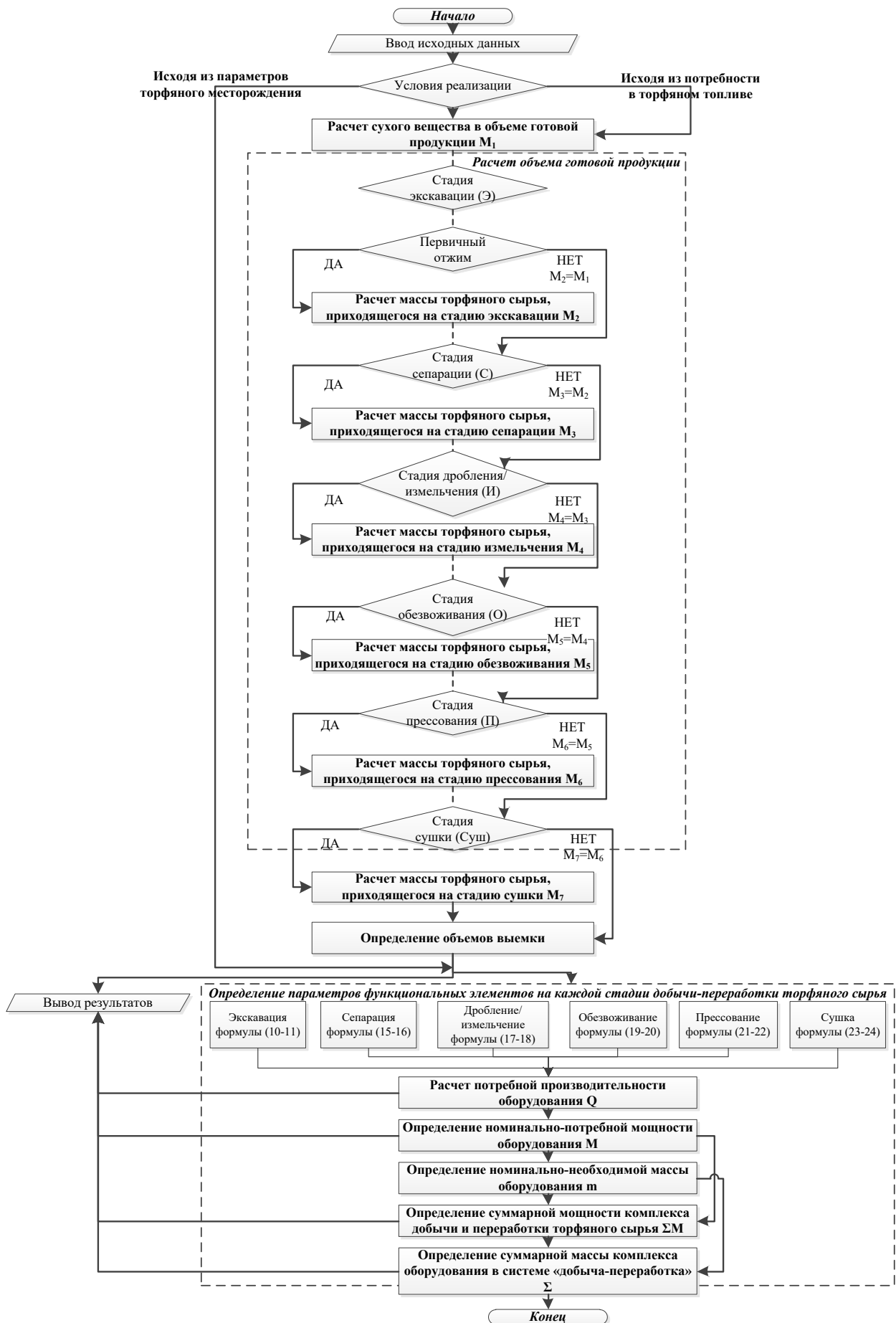


Рисунок 6 – Структура математической модели изменения основных энергомассовых параметров АТДК ГО в системе «добыча-переработка»

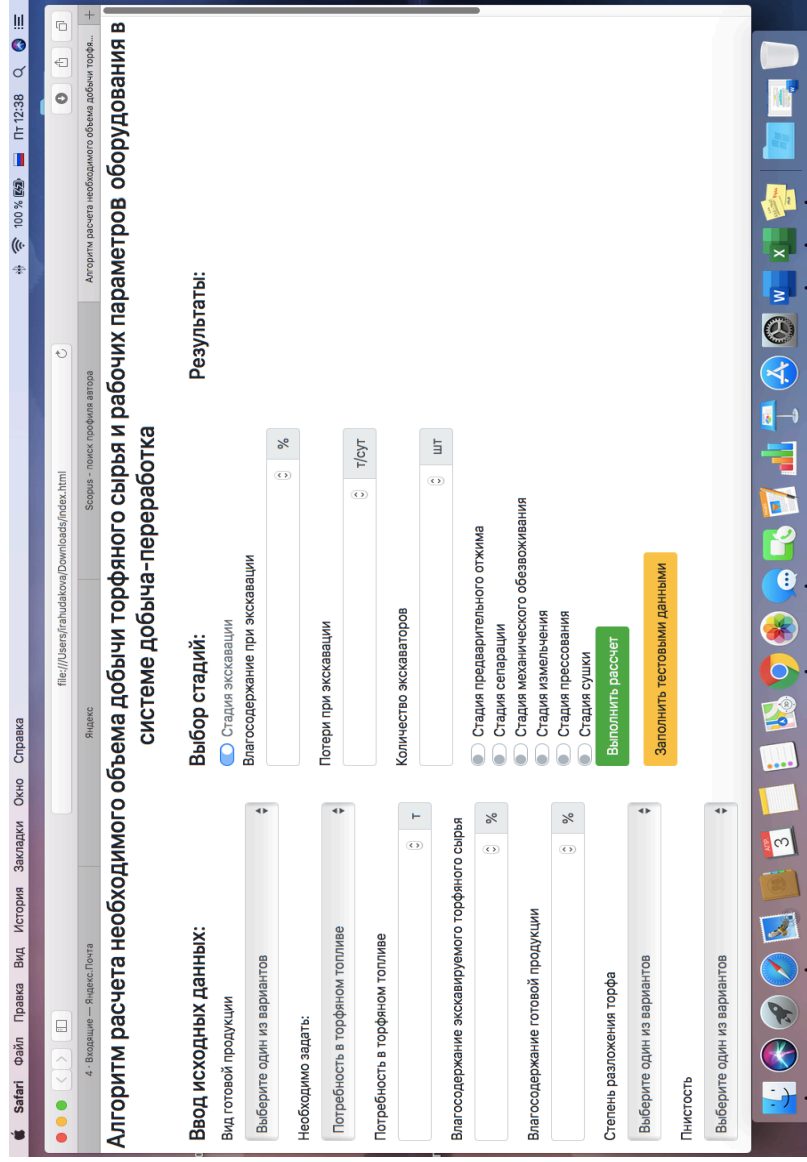


Рисунок 7 – Диалоговое окно компьютерной программы по оценке объема добычи торфяного сырья и рабочих параметров функциональных элементов комплекса оборудования в системе «добыча-переработка»

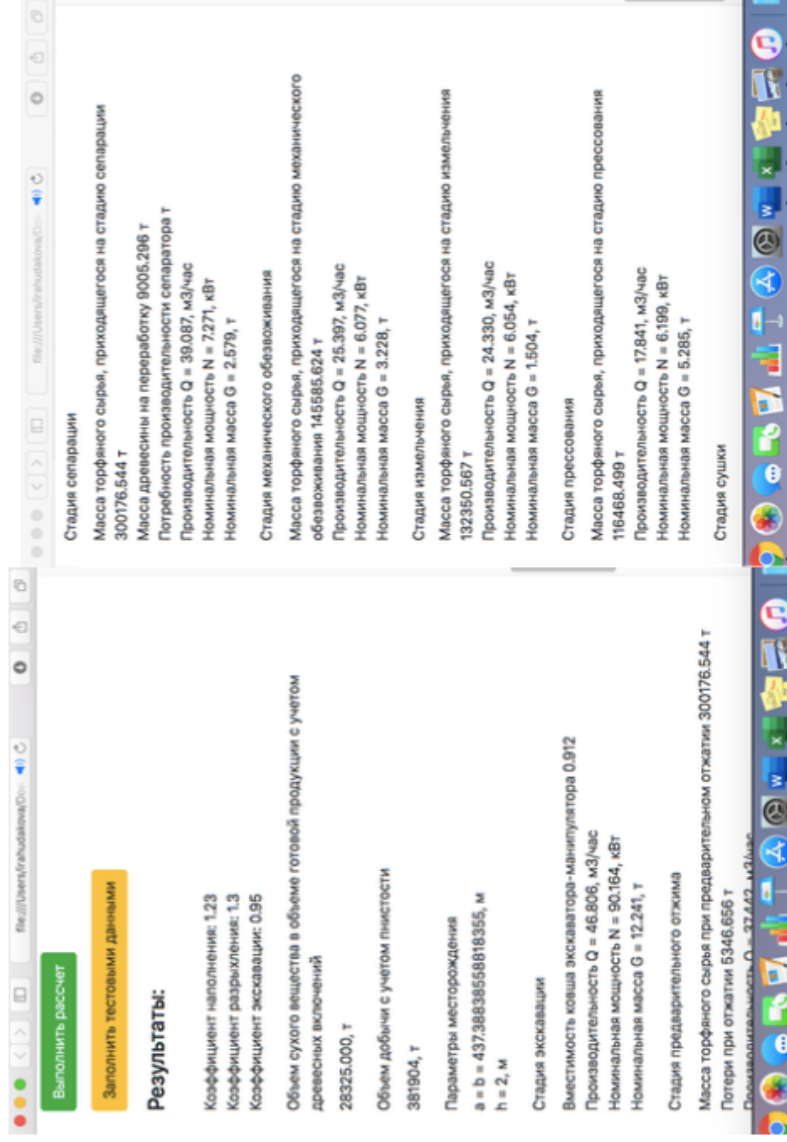


Рисунок 8 – Диалоговое окно вывода результатов компьютерной программной оценки объема добычи торфяного сырья и рабочих параметров функциональных элементов комплекса оборудования в системе «добыча-переработка»