

На правах рукописи

Фадеев Дмитрий Владимирович



**ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ
МЕХАНИЗМА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЛАТФОРМЫ
КОМПЛЕКСА ДОБЫЧИ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ НА
НЕПОДГОТОВЛЕННОЙ ЗАЛЕЖИ**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

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

Санкт-Петербург – 2022

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:

Великанов Владимир Семенович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра подъемно-транспортных машин и роботов, профессор;

Бочков Владимир Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра автоматизации и компьютерных технологий, заведующий кафедрой.

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

Защита диссертации состоится 22 сентября 2022 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. № 1163.

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

Автореферат разослан 22 июля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Добыча торфяного сырья с использованием существующего горного оборудования сопряжена с необходимостью водопонижения, что негативно влияет на флору и фауну ареала, ведет к деградации территорий и, в конечном счете, оказывает влияние на изменение микроклимата. «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» предполагает разработки наилучших доступных технологий и, в частности, климотосберегающих. Переход к таким геотехнологиям при добыче торфяного сырья требует создания новых горных машин и комплексов способных функционировать на обводненных территориях. При этом для комплексов горных машин необходимо создавать специальные самоходные платформы. Таким образом, создание самоходной платформы комплекса добычи торфяного сырья для применения на неподготовленной залежи является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Основополагающие научные разработки в области добычи и переработки сырья инновационными методами представлены трудами таких авторов, как Антонов В.Я., Афанасьев А.Е., Бессонов Е.А., Богатов Б.А., Варенцов В.С., Гамаюнов С.Н., Гревцев Н.В., Жигульская А.И., Жуковский Н.Е., Журавлев А.В., Зюзин Б.Ф., Корчунов С.С., Кузнецова Л.М., Малков Л.М., Михайлов А.В., Опейко Ф.А., Панкратов Н.С., Самсонов Л.Н., Селеннов В.Г., Солопов С.Г., Терентьев А.А., Фомин В.К., Штин С.М., Ялтанец И.М., Arvo Leinonen, Donald Clarke, Kari Mutka, Tom Malterer и другие ученые.

В трудах этих ученых недостаточно глубоко рассмотрены вопросы обоснования и выбора параметров механизма перемещения платформы комплекса добычи торфяного сырья на неподготовленной залежи, что требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Целью исследования является выявление закономерностей процесса функционирования механизма перемещения при пошаговом перемещении платформы комплекса добычи торфяного сырья по неосушенной залежи, для научно обоснованного технического решения шагающей плавучей платформы горного комплекса, что вносит значительный вклад в развитие горной отрасли страны.

Идея исследования заключается в том, что по мере отработки месторождения пошаговое перемещение плавучей платформы, состоящей из взаимосвязанных между собой понтонов, подвижные

понтонные шагающие относительно платформы перемещают по фронту движения последней по специальному алгоритму с установкой прикормных свай и последующим закреплением со дна выработки, после чего вся система перемещается по водной поверхности, обработанной части месторождения во фронтальном направлении, наезжая на вперед выдвинутые понтонные шагающие.

Задачи исследования:

1. Провести анализ теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы.
2. Провести обзор и анализ существующих комплексных технологических решений по добыче и переработке торфяного сырья.
3. Провести теоретические исследования оценки усилий в линейных подшипниках скольжения.
4. Предложить алгоритм перемещения платформы.
5. Провести экспериментальные исследования на моделях механизма шагающей платформы.
6. Разработать имитационную модель процесса шагающей платформы с оценкой кинематических и силовых параметров движения в опорах скольжения механизма шагающей платформы.
7. Предложить технические решения плавучей шагающей платформы.

Научная новизна исследования:

Предложен алгоритм и разработана имитационная модель для оценки усилий, возникающих в опорах при их пошаговом перемещении, платформы комплекса по добыче и переработке торфяного сырья, позволяющий учитывать фактическую неравномерность загрузки палубы платформы.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Предложено решение задачи учета и оценки нагрузок в стержневых опорах шагающей плавучей платформы и соответствующих нагрузках линейных подшипников скольжения понтонных шагающих.

Предложены конструктивные и схемные решения плавучей платформы с механизмом шагающей для размещения горного оборудования для обработки неосушенных торфяных месторождений.

Результаты диссертационной работы приняты к использованию для разработки технического задания в АО «ОмскВодоканал» и ЗАО «Пургаз» на проектирование комплекса добычи и переработки торфяного сырья для участков недр местного значения, также могут быть рекомендованы для разработки конструкторской документации при

создании инновационных решений для добычи и переработки торфяного сырья.

Соответствие паспорту специальности

Тема исследования соответствует следующим областям исследования паспорта научной специальности 05.05.06 – Горные машины: п.4. «Обоснование и выбор конструктивных и схемных решений машин и оборудования во взаимосвязи с горнотехническими условиями, эргономическими и экологическими требованиями».

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 по средствам программного продукта «Ansys 2019 R3».

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждена работоспособность схемы пошагового перемещения платформы, по разработанному алгоритму, при этом перемещение понтонов внешнего периметра обеспечивает движение платформы в любом из четырех направлений, по средствам силовых гидроцилиндров в линейных подшипниках скольжения.

2. Усилие в опорах между палубой платформы и понтонами с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть оценено, как совместное решение статически неопределенных задач в каждой из линий опор, условно расчленяющих платформу по принципу д'Аламбера, при этом имитационная модель процесса взаимодействия опор палубы платформы и взаимодействующих с опорами понтонов учитывает неравномерность загрузки палубы платформы и обеспечивает оценку загрузки опор платформы в контакте последних с неподвижными гнездами и линейными подшипниками скольжения.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Теория построена на известных, проверяемых данных, фактах, в том числе 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.

Основные положения работы, результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались и получили положительную оценку на международных конференциях: 59-ая международная научная конференция студентов и молодых ученых в Краковской горно-металлургической академии (г. Краков, Польша, 2018 г.); 14-ая международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (г. Тула, 2018 г.); 7-ая международная научная конференция студентов и молодых ученых во Фрайбергской горной академии Freiberg – St.Petersburger Kolloquium junger 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.); международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); III-международная научная конференция «Наука будущего - наука молодых» (г. Сочи, 2019 г.); 3-я - международная научная конференция «Науки будущего» IV Всероссийского форума «Наука будущего - наука молодых» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); 77-ая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и 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 торфодобывающего комплекса горного оборудования; в обосновании выбора схемного решения для комплекса оборудования; в разработке алгоритма и имитационной модели шагающей платформы добычи торфяного сырья на неосушенных месторождениях; в получении исходных данных и научных экспериментах; в обработке и интерпретации экспериментальных данных; в подготовке публикаций, отражающих основные положения и результаты диссертационного исследования; в апробации результатов исследования; разработке экспериментальных стендов; теоретическом

обосновании параметров усовершенствованных конструкций оборудования по торфодобыче; анализе промысловых исследований.

Публикации результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, в том числе в 2 статьях – в издании 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 1 статье – в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 патента на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 166 наименований и 3 приложений. Диссертация изложена на 115 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунка и 9 таблиц.

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. На основании выполненного анализа приведена классификация торфа и торфяных месторождений. Рассмотрены способы добычи торфяного сырья, используемые в настоящее время. Приведен обзор существующих схем и машин для реализации процессов добычи и переработки торфяного сырья, как традиционными способами, так и посредством плавучих комплексов на неосушенных месторождениях. Представлены существующие подходы к формализации структур комплексов горных машин.

Во второй главе рассмотрены схемные решения существующих комплексов для добычи и переработки торфяного сырья. Обоснованы схемные решения шагающей плавучей платформы для размещения на ней комплекса горных машин и оборудования по добыче и переработки торфяного сырья. Приведена оценка габаритов понтонного основания плавучей платформы, дан алгоритм перемещения платформы по поверхности отработанной части обводненного торфяного

месторождения, обоснованы принципы формирования линейных подшипников скольжения опор стоек платформы в понтонах шагания.

В третьей главе представлен теоретический подход в оценке нагруженности линейных подшипников скольжения понтонов шагания как решение статически неопределенной задачи в линии нагрузки. Описан экспериментальный стенд. Результаты теоретических исследований хорошо согласуются с результатами эксперимента. Обоснованы критерии работоспособности направляющих опор и подшипников скольжения.

В четвертой главе представлена имитационная модель оценки силовых воздействий на опоры платформы при неравномерной загрузке последней. Даны рекомендации к техническому заданию на плавучую платформу комплекса горного оборудования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждена работоспособность схемы пошагового перемещения платформы, по разработанному алгоритму, при этом перемещение понтонов внешнего периметра обеспечивает движение платформы в любом из четырех направлений, по средствам силовых гидроцилиндров в линейных подшипниках скольжения.

Платформа (рисунок 1) состоит из герметичных понтонов с пустотелым многослойным корпусом, образующих матрицу (рисунок 2). Понтоны соединяются в единую структуру специальными фиксирующими элементами. На понтонах установлена каркасная рама опоры, которой подвижно сочленены с понтонами с образованием линейных подшипников скольжения (для внешнего периметра матрицы) и опорными гнездами для остальных понтонов. Рама имеет «палубу», на которой находится комплект горного оборудования для добычи и переработки торфяного сырья. На кромках понтонов внешнего периметра находятся сваекрутные механизмы для фиксации платформы о дно месторождения (рисунок 3).

В состав горного оборудования, размещаемого на платформе, входят различные модули: подготовки сырья; прессования; производства электроэнергии из твердого и жидкого топлива; газогенератор; перегрузки готовой продукции; электроэнергетический и модуль экскавации.

Для данного комплекса в модуле прессования была подробно рассмотрена конструкция шнекового пресса, который повышает эффективность переработки добываемого торфа в силу особенностей его

конструкции с разделением на три зоны: нагнетательную, сжатия и формующую. Для того, чтобы торфяной кусок не терял своей первоначальной геометрической формы, в модуле создается заданное давление формования, которое обеспечивается конструкцией нагнетающего шнека, а также формой и размерами формующей зоны корпуса мундштука, создающего требуемое уплотнение непрерывно движущейся прессуемой торфомассы при противодействии зоны сжатия корпуса формующего мундштука шнекового пресса.

На выходе торфяной кусок отламывается под действием силы собственного веса и сопровождается подпружиненным укладчиком. Подпружиненный укладчик выполнен в форме цилиндрического желоба, покрытого антиадгезионным лаком, для снижения коэффициента трения торфяного куска об его поверхность.

Основание платформы состоит из матрицы понтонов, таким образом габариты выбраны по стандартным размерам военных понтонов, таблица 1.

Таблица 1 – Габариты понтона

Длина, м	Ширина, м	Высота, м	Объем, м ³	Площадь, м ²	Грузоподъёмность (норма погрузки), Н	Масса понтона, кг
5,59	2,33	1,175	16	13,7	$10,85 \cdot 10^4$	2200

На остойчивость платформы влияет загрузка палубы и расположение нагрузки по высоте.

Алгоритм цикла шагания платформы по отработанной части неосушенного месторождения следующий:

– исходное положение, прикормные сваи по внешнему периметру зафиксированы о дно залежи, платформа фронтом приближена к забою;

– комплексом горного оборудования производят экскавацию торфяного сырья по фронту платформы на всю мощность залежи на величину шага перемещения;

– после осуществления выемки прикормные сваи со стороны забоя извлекают и осуществляют выдвижение понтонов фронта на величину шага перемещения, после чего извлеченные прикормные сваи закрепляют о дно выработанного пространства;

– прикормные сваи с тыльной и боковых сторон платформы свакрутными механизмами извлекают, освобождая тем самым платформу для перемещения по фронту, включают линейные

гидравлические двигатели и подтягивают платформу к забюю, при этом опоры платформы перемещаются в линейных подшипниках скольжения; – по окончании цикла шагания платформа фиксируется прикольными сваями по всему внешнему периметру.

Для подтверждения возможности подобного типа перемещения была создана физическая модель платформы, моделирование шагания которой, подтвердило возможность перемещения по описанному выше алгоритму.

Величина шага определяется длиной хода линейного двигателя, выполненного в виде компактного гидроцилиндра, но, как правило, это расстояние не должно превышать критического расстояния выдвижения телескопического корпуса. Такие манипуляции обеспечиваются одновременным перемещением крайнего ряда понтонов с закрепленными на их верхних гранях линейных и угловых направляющих линейных подшипников скольжения и внешних стоек несущей рамы.

Достоинствами линейных гидравлических двигателей являются: способность работать в агрессивных средах, пыле- влаго-защищенность электрооборудования. Выбранные технические параметры линейных гидродвигателей Р–780/1100–11–250/150 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика линейных гидравлических двигателей

Усилие		Ход, м	Скорость		Диаме тр штока, м	Рабоче е давление, МПа	Потребл ение электроэ нергии, кВт
Прям ой ход, кН	Обрат ный ход, кН		Прям ой ход, мм/с	Обрат ный ход, мм/с			
781,3	500	2,5	3,8	6	0,15	16	4

Учитывая тот факт, что опоры скольжения будут склонны к схватыванию, так как цикл перемещения в линейных направляющих несоизмеримо мал по сравнению со временем пребывания в статическом положении, принято решение использовать опоры полужидкостного трения со специальными антикачковыми маслами с использованием поверхностно-модифицированных дисперсных металлов-наполнителей, это перспективный путь регулирования и улучшения свойств смазок и других гетерогенных систем. Эти опоры характеризуются высокой контактной жесткостью и хорошими демпфирующими свойствами.

Кроме того, обеспечивают надежную фиксацию подвижного узла после его перемещения в заданную позицию.

Использование поверхностно-модифицированных дисперсных металлов наполнителей продуктивно модифицированием порошков металлов препаратами на основе четвертичных соединений аммония (ЧСА) с использованием принципов молекулярного наслаивания. Опытная зависимость интегрального показателя трения трибосистемы со смазкой (масло И – 20) от скорости окисления (с. о.). Разделение линейной (L) и нелинейной (N) компоненты во взаимосвязи $D = F$ (с. о.) позволило количественно оценить их соотношение в зависимости от программы модифицирования наполнителя в парах ЧСА. Представляет теоретический и практический интерес проведение аналогичного рассмотрения для зависимости D от гидрофобности наполнителя рисунок 4, оцениваемой по величине обратной адсорбции паров воды ($x = l/a$).

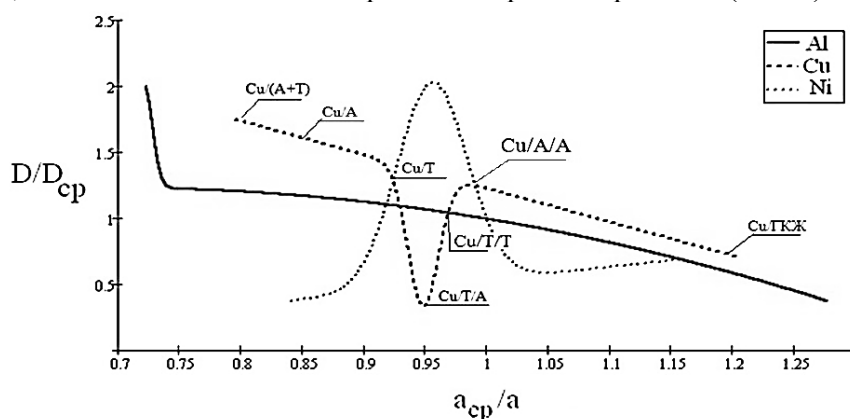


Рисунок 4 – Зависимость в нормированных координатах интегрального показателя трения D для смазки с модифицированными порошками-наполнителями на основе Al , Cu , Ni от водоотталкивающих свойств наполнителя

На графике все зависимости, включая зависимость для Al – систем (где « a » очень мало), показывает усиление нелинейности зависимости в ряду Al , Cu , Ni (по наполнителю). Синергетический эффект снижения D для наполнителя вида $Cu/T/A$ и аномальное существенное увеличение D с ростом гидрофобности Ni – наполнителей. D – показатель акустического сигнала, формируемого в подшипниковом узле, и представляет собой математическое ожидание амплитуды акустического

сигнала, генерируемого при силовом взаимодействии опоры в линейной направляющей, с учетом качества и количества антискачковой смазки.

По способности снижать интегральный показатель трения в трибологической паре со смазкой наполнителями на основе меди, никеля и алюминия их можно расположить в следующей последовательности (рисунок 5):

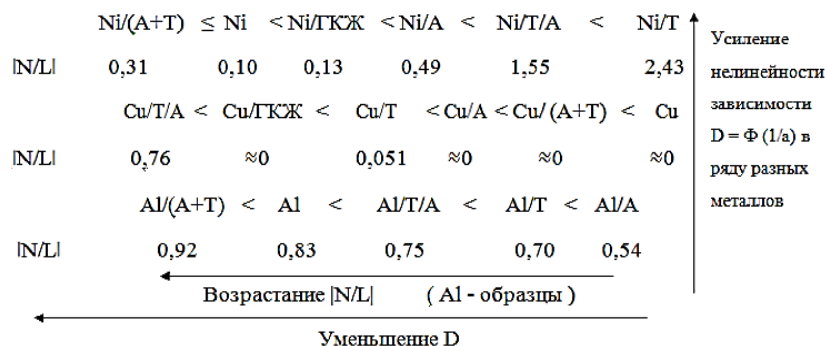


Рисунок 5 – Ряды снижения D (усиления антифрикционного эффекта) в трибосистемах, содержащих разные металлы, в зависимости от вклада нелинейной компоненты в зависимость $D = \phi(1/a)$

Логика детального изучения зависимости $D = \phi(1/a)$ связана с той важной ролью, которую играют водоотталкивающие свойства нанопленки поверхностно-активного вещества (ПАВ) на твердой поверхности для формирования максимального антифрикционного эффекта (минимизации силы трения) в системе.

Подшипники скольжения подобраны так, что соответствуют условию беспрепятственного движения в линейных направляющих.

2. Усилие в опорах между палубой платформы и понтонами с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть оценено, как совместное решение статически неопределенных задач в каждой из линий опор, условно расчленяющих платформу по принципу д'Аламбера, при этом имитационная модель процесса взаимодействия опор палубы платформы и взаимодействующих с опорами понтонов учитывает неравномерность загрузки палубы платформы и обеспечивает оценку загрузки опор платформы в контакте последних с неподвижными гнездами и линейными подшипниками скольжения.

Теоретическая оценка усилий в опорах платформы при решении статически неопределенной задачи по оценке усилий между опорами и

понтонами в подшипниках скольжения и неподвижных опорах при воздействии внешней сосредоточенной силы F , действующей на палубном настиле. Рассмотрим схему (рисунок 3) и выделим линию опор (рисунок 6).

Рассмотрим усилия, действующие в опорах при статически неопределенной схеме загрузки и задаваясь частью нагрузки P в линии от общей нагрузки F . Условно оставляя только 2 опоры, последовательно переходя от одного понтон к другому рисунки (7 а, б, в, г) составим для каждого варианта системы уравнений относительно одной из опор. Для схемы (рисунок 6) уравнения моментов относительно точки R_{P1} имеют вид (1):

$$\begin{cases} R_{P1} = P_1 = P \\ YP_1 + YP_5 = F \\ Fl_1 = YP_5(l_1 + l_2) \\ YP_5 = \frac{Fl_1}{l_1 + l_2} \\ YR_1 = F - YP_5 \end{cases} \quad (1)$$

где $YR_{(ABCDE)}$ – сила реакции в опоре; P – общая нагрузка в раме; l_E – расстояние между силами реакции опор; l_P – плечо от силы реакции опоры А до точки приложения нагрузки P .

В результате вычисления получаем величины условных реакций (2):

$$\begin{cases} YR_E = \frac{l_P P}{l_E}; \quad YR_E = P - YR_{A1} \\ YR_D = \frac{l_P P}{l_D}; \quad YR_D = P - YR_{A2} \\ YR_C = \frac{l_P P}{l_C}; \quad YR_C = P - YR_{A2} \\ YR_B = \frac{l_P P}{l_B}; \quad YR_B = P - YR_{A2} \end{cases} \quad (2)$$

Коэффициенты влияния $K_{(ABCDE)}$ возможно оценить системой уравнений (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} K_E = \frac{YR_E}{P} \\ K_D = \frac{YR_D}{P} \\ K_C = \frac{YR_C}{P} \\ K_B = \frac{YR_B}{P} \\ K_A = \frac{YR_A}{P} \end{array} \right. \quad (3)$$

А силы реакции опор $R_{(ABCDE)}$ логично описать системой уравнений (4):

$$\left\{ \begin{array}{l} R_E = K_E P \\ R_D = K_D P \\ R_C = K_C P \\ R_B = K_B P \\ R_A = K_A P \end{array} \right. \quad (4)$$

Для оценки адекватности теоретических рассуждений реальным процессам был проведен эксперимент на физической модели, рисунок 8. В качестве нагрузки при проведении эксперимента были взяты различные грузы. В ходе эксперимента производился расчет жесткости системы и ее элементов. По деформации элементов с известной жесткостью оценивались возникающие усилия в опорах при загрузке модели грузами известной массы. Сравнение результатов эксперимента и теоретических оценок величин реакций представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительная таблица реакций в опорах

Условные реакции в опорах	Экспериментальные значения	Теоретические значения	Расхождение, %
R_A	71,68	65,95	13,03
R_B	64,96	63,01	5,49
R_C	51,52	48,02	7,29
R_D	42,56	38,42	10,78
R_E	35,84	32,05	11,83
R_F	31,36	27,44	14,29

Как видно из сравнения экспериментально полученных и теоретических значений реакций опор, было выявлено расхождение не более 15 %, что достаточно для инженерных расчетов.

В перспективе данная методика может применяться для решения задач статики конструкций опоры шагающей платформы.

Исходя из значений усилий в опорах далее были подобраны направляющие скольжения и рассчитано трение (5):

$$F_T = \frac{F \cdot f}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \alpha \cdot d\alpha} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \alpha \cdot d\alpha = F \cdot f \frac{4}{\pi} = F \cdot f_{np} \quad (5)$$

где F_T – сила трения скольжения направляющей, Н; F – нагрузка на направляющую, Н; f – коэффициент трения; $d\alpha$ – давление на угол, Па.

Для оценки нагрузок в опорах от фактической загрузки платформы была разработана имитационная модель, которая решает следующие задачи:

1. *Оценка статистических нагрузок* (создание параметрической модели) в основе лежит метод конечных элементов:

1.1 Определение нагрузок (опоры; платформа) рассчитывается суммарный вес оборудования на палубном настиле, рисунок 9.

1.2 Определение сил поддержания (выталкивающая сила Архимеда).

1.3 Моделирование сетки нагрузок (план понтонов; план расположения оборудования; составление плана суммарных нагрузок (компенсированные / некомпенсированные силы); определение собственного веса конструкции (веса понтона и веса рамы), рисунки 10 – 11.

1.4 Создание 3-х мерного графика сил поддержания (расчет объемного водоизмещения понтона и его остойчивости), рисунок 12.

2. *Оценка динамических нагрузок* (моделирование процесса шагания и позиционирования платформы):

2.1 Построение диаграммы перемещений (для отображения перераспределения нагрузок между опорами платформы, а также составления прогноза и исключения рисков опрокидывания или разрыва соединений понтонного основания).

2.2 Решение контактной задачи (моделирование процесса движения опоры в линейной направляющей платформы), рисунок 13.

2.3 Оценка изгибающих, восстанавливающих и крутящих моментов (анализ критических зон на платформе и визуализация распределения нагрузок), рисунок 14.

2.4 Построение эпюры нагрузок (моделирование напряжений в функциональных узлах платформы), рисунок 15.

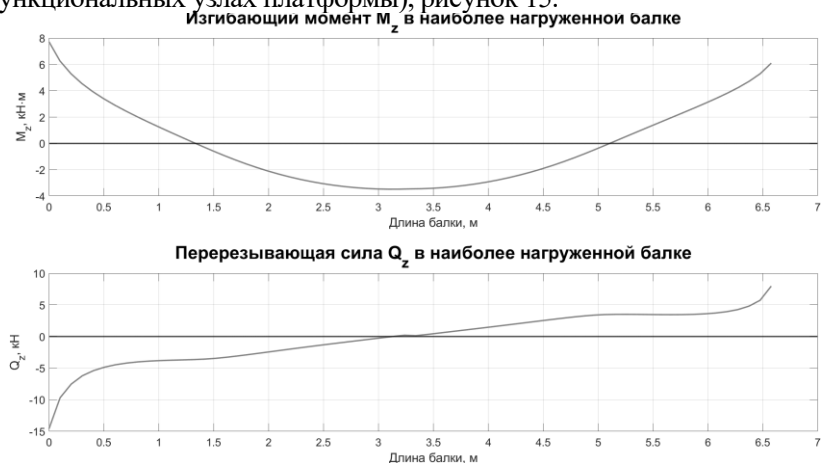


Рисунок 15 – Основные силы влияющие на опору

Результаты моделирования хорошо согласуются с расчетными данными, полученными по разработанному алгоритму с использованием метода последовательных приближений и условных весовых коэффициентов в цикле перебора условных реакций от внешней нагрузки.

При расчете поперечных колебаний для опоры при воздействии динамических нагрузок необходимо решить граничную задачу главным условием которой является выбор такой системы координат, чтобы началом являлась сторона меньшего основания (6):

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + m(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (6)$$

где EJ – изгибная жесткость опоры, Н/м; y – расстояние смещения платформы, м; m – безразмерный коэффициент.

В таком случае граничные условия для EJ будут принимать вид (7-8):

$$EJ(x)y''(x,t)|_{x=0}=0, \quad (7)$$

y – продольное смещение опоры, м; x – поперечное смещение опоры;

$$y(l,t)=0, \quad (8)$$

где l – длина опоры, м.

Граничные условия описываются формулой (9):

$$EJ(x)y''(x,t)|_{x=0}=-c_\theta\theta-J_o\ddot{\theta}, \quad (9)$$

где c_θ – жесткость упругого поворота, Н/м; J_o – момент инерции массы упорного подшипника относительно точки (центра) O ; θ – угол поворота основания подшипника с учетом жесткой состыковки опоры с гнездом $\theta=y'|_{x=l}$, θ_0 – начальная угловая скорость поворота основания подшипника.

При решении условия (9) при известных физико-механических параметрах опоры, уравнение принимает вид (10):

$$z^{v+2}y''''+2(v+2)z^{v+1}y'''+(v+2)(v+1)z^v y''=-\frac{\gamma \cdot F_2 \cdot l^4}{E \cdot J_2 (1-k)^4} z^v \cdot \ddot{y} \quad (10)$$

Исследование параметров динамического изгиба конструкции заключалось в том, что из первоначального условия (7) получим $\mu_n = 0$, из второго начального условия (8) следует зависимость (11):

$$\frac{1}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_2}{\gamma F_2}} \sum_{n=1}^{\infty} y_{on} \bar{\lambda}_n^2 Z_n(z) = \frac{\theta \cdot l}{(1-k)} (1-z), \quad (11)$$

Зависимости по изгибающему и восстанавливающим моментам определены формулами (12 - 13) соответственно.

Функция для изгибающего момента будет определяться по формуле (12):

$$y_{\max}(\tau) = \frac{\theta(\tau)}{y_A} \quad (12)$$

Функция для восстанавливающего момента будет определяться по формуле (13):

$$M(\tau) = \frac{\theta(\tau) c_\theta}{M_A} \quad (13)$$

В результате моделирования и расчетов можно сделать вывод о том, что в условиях малой относительной жесткости и точечной инерционной нагрузки на конструкцию, глобальное приложение сил и соответствующую деформацию вызывает 1-я форма колебаний, тогда можно сделать вывод о том, что применение упрощенной однодоговой модели является обоснованным.

При расчете контактной задачи (рисунок 16) «опора-понтон», соединение состоит из полусфер $2D$ элементов, для создания плоского контакта между понтоном и опорой, рисунок 17. Из-за изгиба платформы под силами тяжести контакт не нарушается. Отметим, что понтоны под действием $F_{тяж}$ должны притапливаться на 700 мм, а передний ряд принимать на себя всю нагрузку, максимально перемещение получается 3 мм, что не критично для нашей модели

Далее посредством имитационного моделирования показаны результаты расчета нагрузок и воздействия на платформу по алгоритму.

Результаты исследований использованы на предприятиях АО «ОмскВодоканал» и ЗАО «Пургаз» на стадии формирования исходных данных для разработки технического задания на проектирование комплекса оборудования по добыче и первичной переработке торфяного сырья для участков недр местного значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной задачи – обоснование и выбор схемных и конструктивных решений 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 основании выполненного анализа современного понтонного оборудования определены способы для повышения надежности эксплуатации, предложена классификация понтонов с учетом влияния конструктивных параметров понтонов на характеристики плавучести, устойчивости, непотопляемости. Учитывая габариты и прочие характеристики выявлено, что один понтон выдерживает до 7 т.

2. Данный комплекс позволит значительно сократить время на добычу торфа и тем самым сократить сроки рекультивации земель значимых объектов. Перемещение платформы за счет линейного привода

P-780/1100-11-250/150 позволяет вести добычу торфа в граничных рамках лицензионного участка, а габариты – задействовать платформу в малых карьерах торфа нестандартной формы.

3. Выполнен анализ научных и экспериментальных исследований по оценке силового взаимодействия элементов, подшипника скольжения поступательного движения при его функционировании. Таким образом, подшипники скольжения подобраны с учетом моделирования нагрузок, давления не критичные и находятся в референтных значениях до 100 кПа.

4. Сформирована технология передвижения платформы по неосушенному месторождению, а также сформированы принципы реализации функциональных схем плавучей платформы, обоснованы принципы функциональных элементов платформы.

5. Проведен расчет сопротивления и необходимых усилий по перемещению понтона. Из данных графиков делаем вывод, что оптимальная длина опоры платформы составляет 2 м. При такой длине сохраняется целостность опоры и ее функциональные свойства. Максимальное напряжение на опору по диаграмме 60,6 МПа в красной зоне. Следовательно, целостность платформы сохраняется.

6. Создана физическая модель основания платформы с динамометрическими датчиками для оценки усилий, передаваемых на понтоны платформы от размещенной на раме сосредоточенной силы в виде груза. На основе проведенного эксперимента определено, что стенд может выдерживать нагрузку в 352,8 Н, что в переводе на реальную установку отличается на 15 %.

7. Предложены технические решения торфодобывающего комплекса горного оборудования для работы на неосушенных месторождениях защищенные патентом на изобретение РФ № 2655235 «Плавучая платформа». Результаты исследований использованы на предприятиях АО «ОмскВодоканал» и ЗАО «Пургаз» на стадии формирования исходных данных для разработки технического задания на проектирование комплекса оборудования по добыче и первичной переработке торфяного сырья для участков недр местного значения.

Развитие исследований плавучих шагающих платформ для размещения горного оборудования является перспективным направлением в развитии горного машиностроения и позволяет переходить от технологий добычи торфяного сырья, оказывающих значительное антропогенное воздействие на природные ареалы к климатически нейтральным наилучшим доступным технологиям в горном деле.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Федоров, А.С. Параметры мундштука шнекового пресса с учетом требований к торфяной формованной продукции / А.С. Федоров, Ю.В. Казаков, **Д.В. Фадеев** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №S9. – С. 3 – 15.

2. Сырков, А.Г. Количественная оценка нелинейных эффектов в зависимости интегрального показателя трения трибосистемы от водоотталкивающих свойств металла-наполнителя / А.Г. Сырков, **Д.В. Фадеев**, В.В. Тарабан, М.О. Силиванов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2014. – Т.16. – №2. – С.215 – 219.

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

3. **Fadeev, D.V.** Features of the walking mechanism of a floating platform autonomous modular complex for the extraction and processing of peat raw materials / **D.V. Fadeev**, S.L. Ivanov // Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues – Proceedings of the Russian- German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion. – 2019. – Volume 1. – pp. 239 – 244. DOI:10.1201/9781003017226-33.

Патенты:

4. 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.

5. 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.

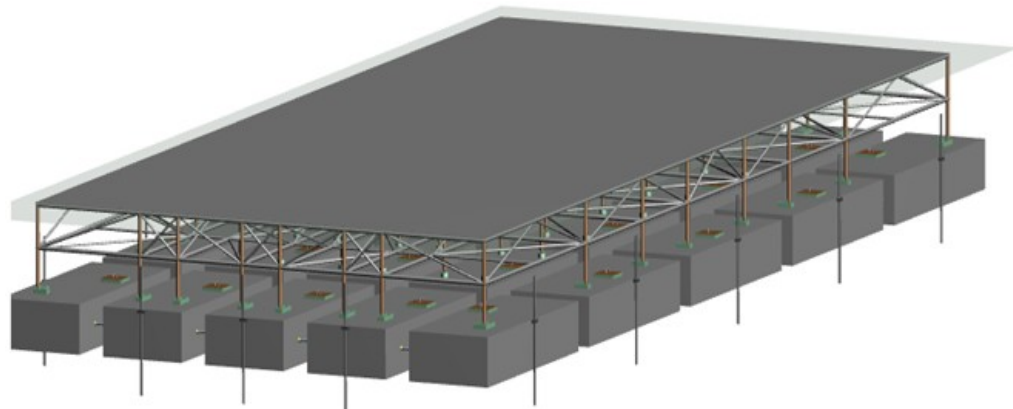
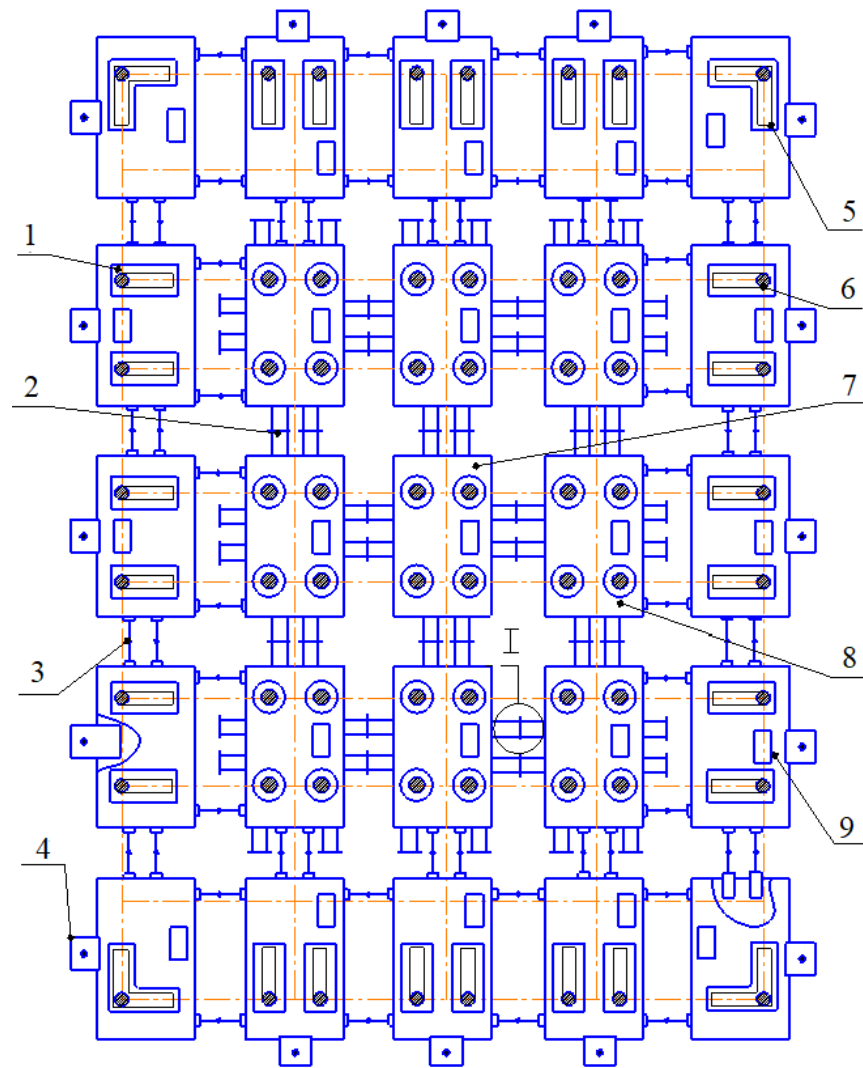
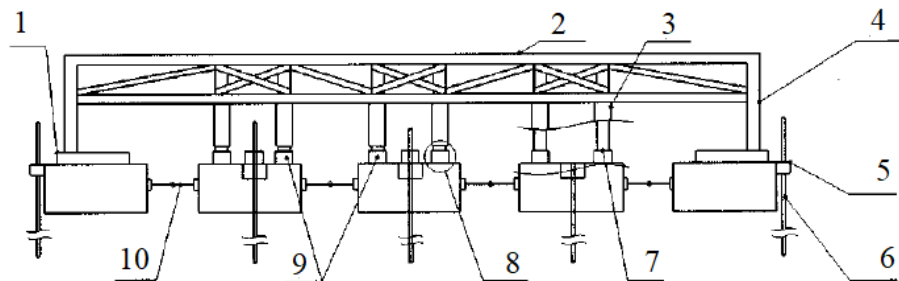


Рисунок 1 – 3D модель платформы



1, 5 – линейный подшипник скольжения; 2 – фиксирующий элемент петельное соединение; 3 – фиксирующий элемент сцепки; 4 – сваякрутный механизм; 6 – гнездо; 7 – внутренний понтон; 8 – понтон внутреннего периметра; 9 – понтон внешнего периметра
Рисунок 2 – Понтонная матрица платформы



1 – линейный подшипник скольжения; 2 – несущая рама с палубным настилом; 3, 4 – опора; 5 – сваякрутный механизм; 6 – прикольная свая; 7 – гнездо; 8 – упорный подшипник; 9 – линейная направляющая; 10 – линейный двигатель
Рисунок 3 – Устройство шагающего механизма

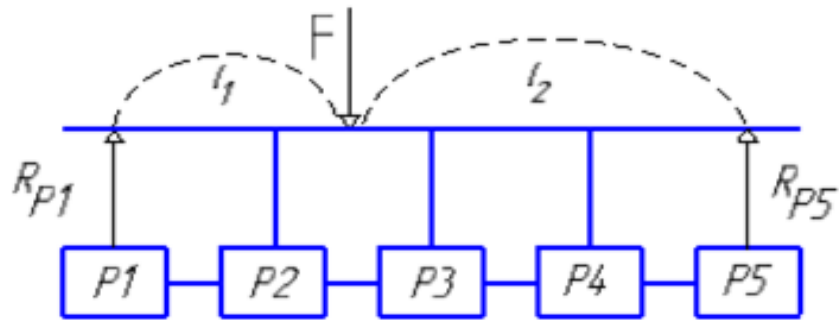


Рисунок 6 – Уравнение моментов относительно точки R_{P1}

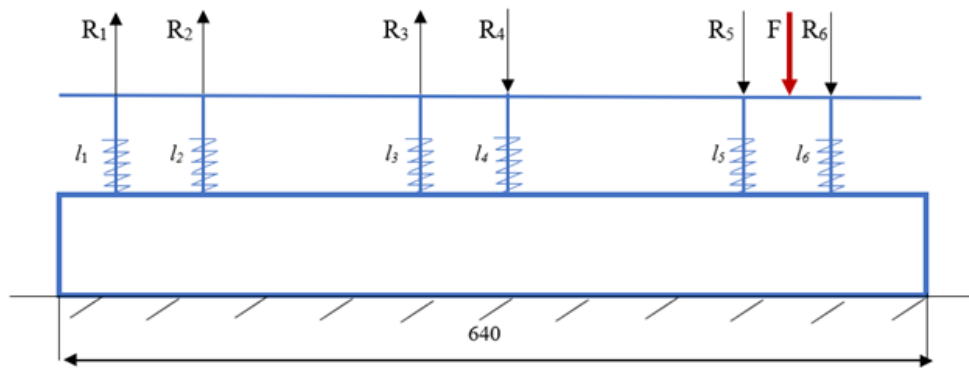
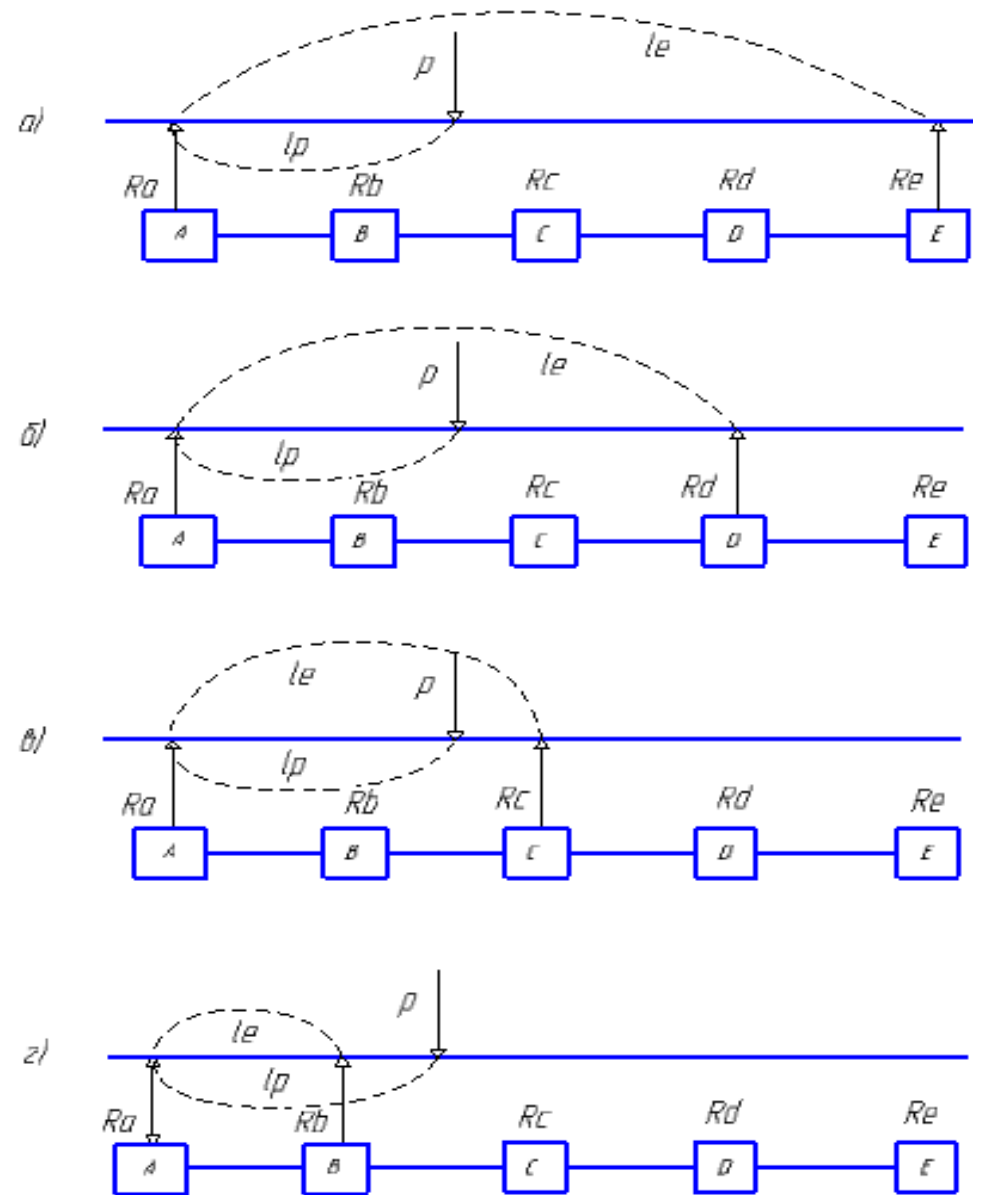


Рисунок 8 – Схема загрузки модели платформы



а, б, в, г – порядное изменение нагрузки с учетом положения опор
Рисунок 7 – Схема условной загрузки рамной конструкции

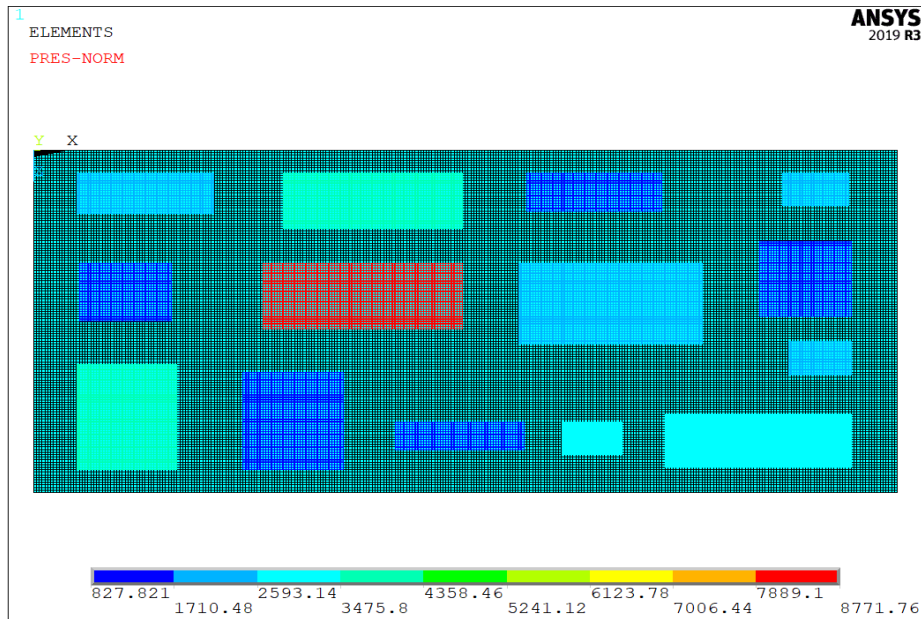


Рисунок 9 – Цветовая индикация давления оборудования на платформу

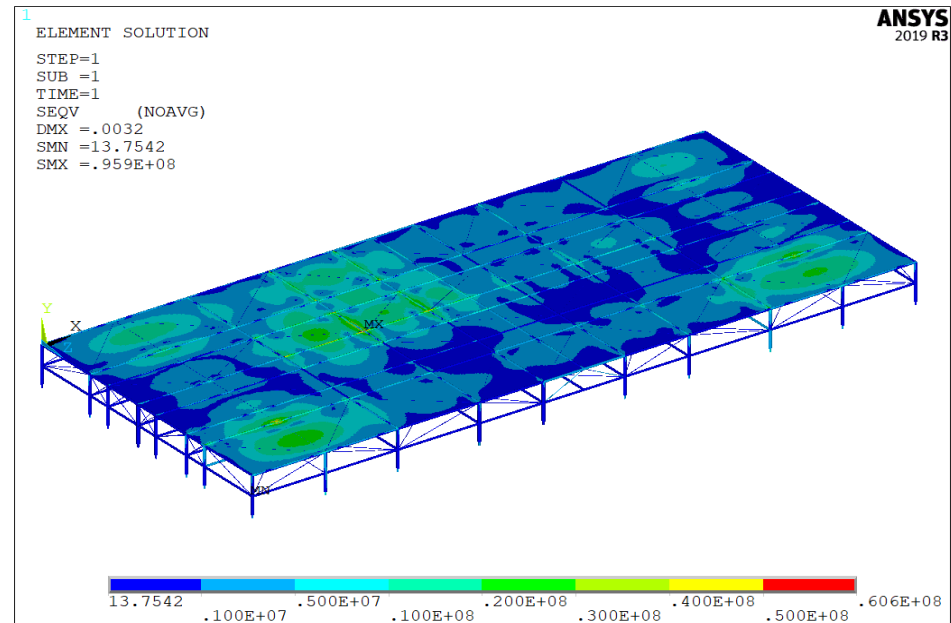


Рисунок 10 – Напряжения по принципу Мизеса

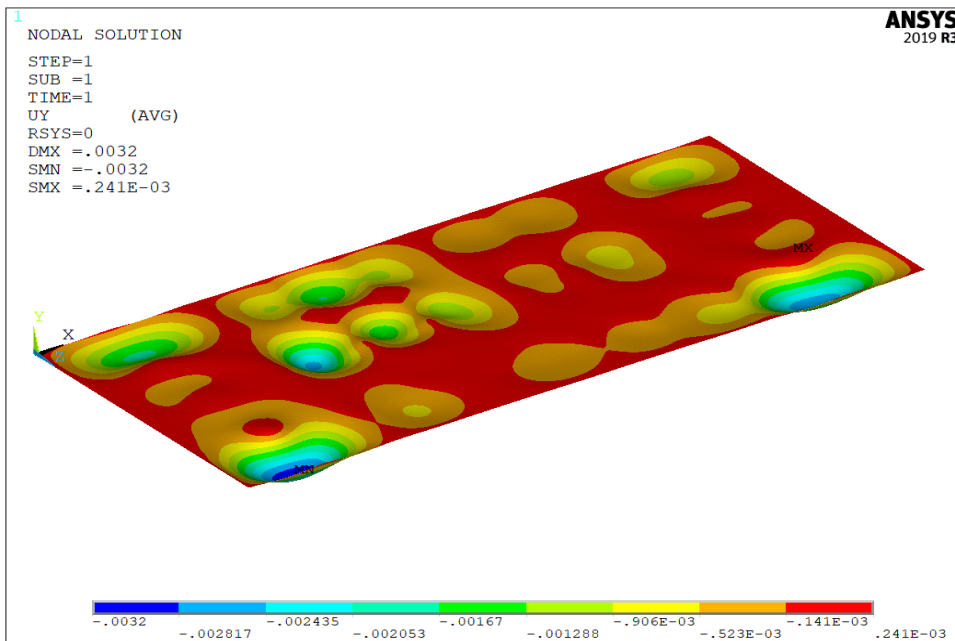


Рисунок 11 – Распределение нагрузок на палубном настиле (изометрия)

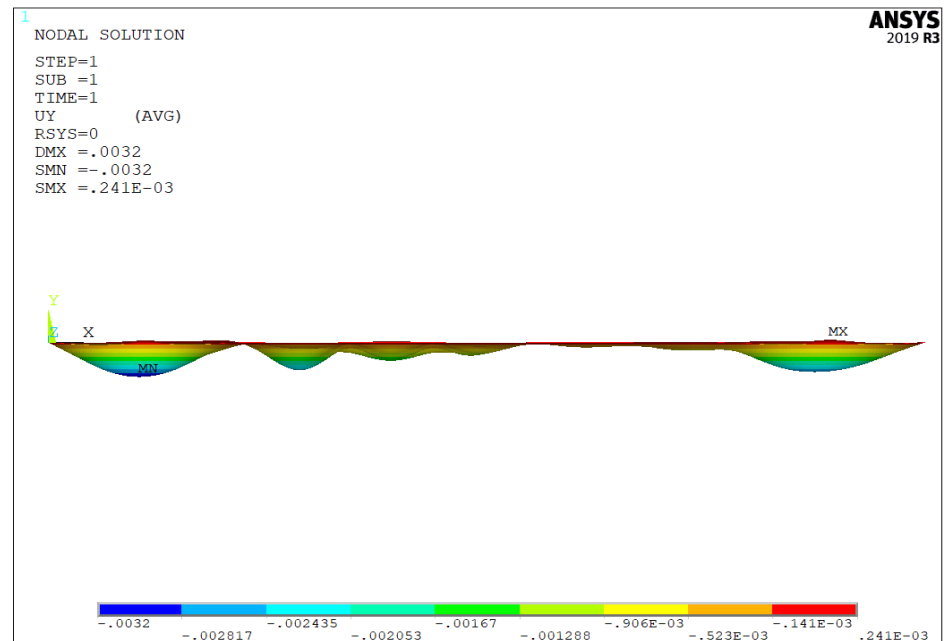


Рисунок 12 – Распределение нагрузок на палубном настиле (профиль)

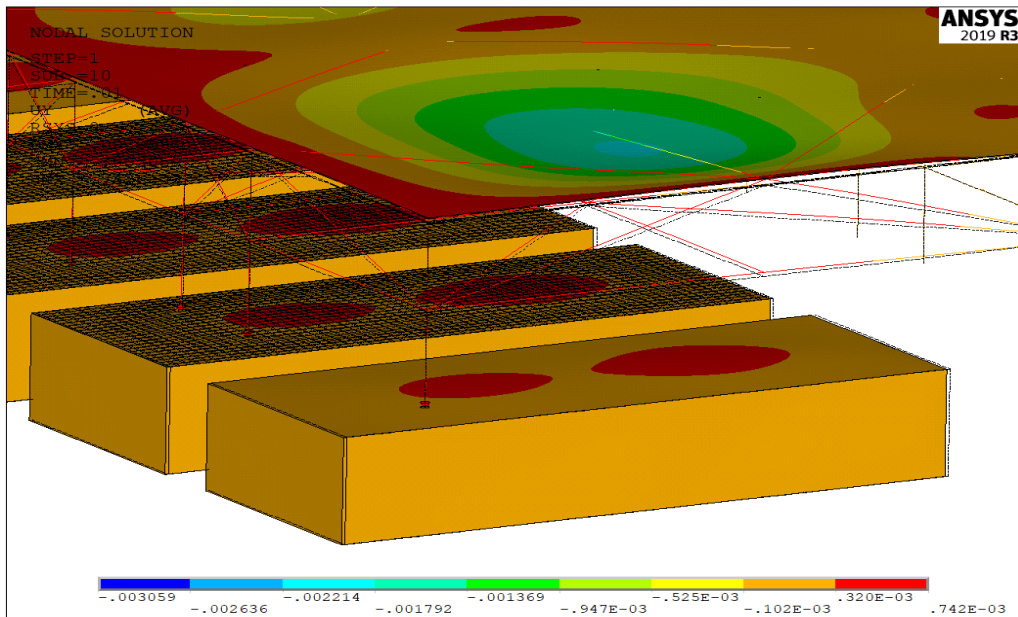


Рисунок 13 – Распределение сил при решении контактной задачи

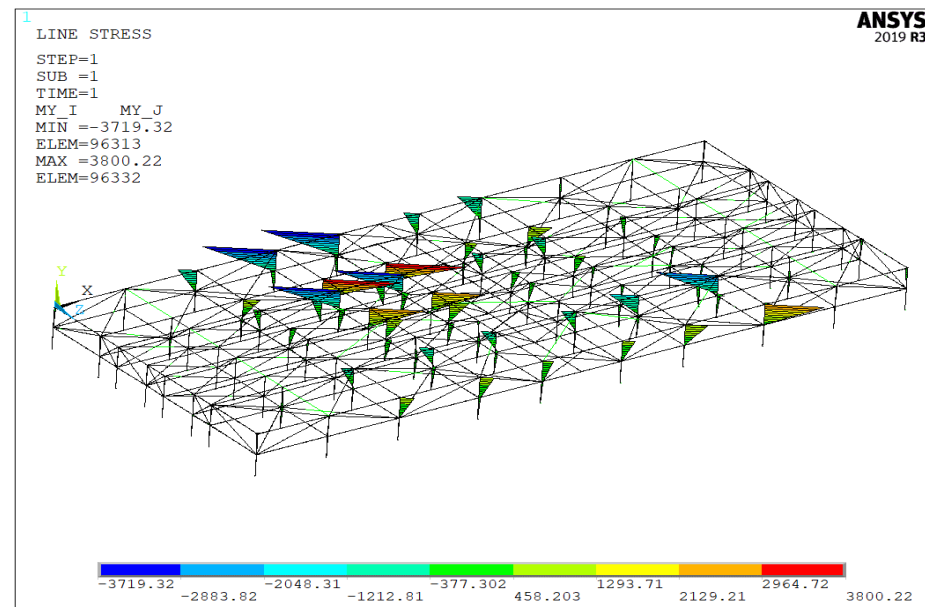


Рисунок 14 – Моделирование изгибающего момента

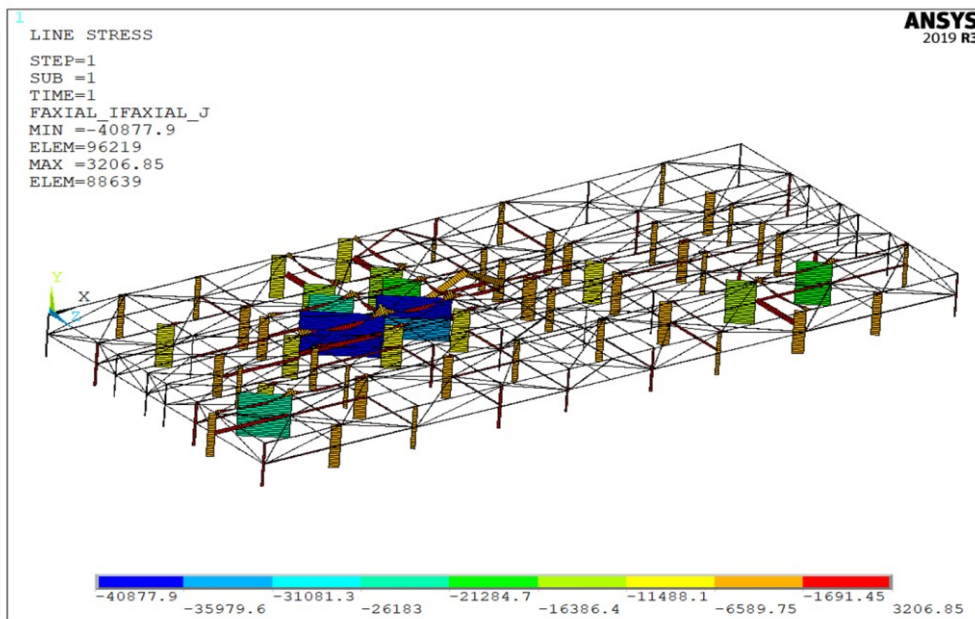


Рисунок 16 – Распределение нормальных сил

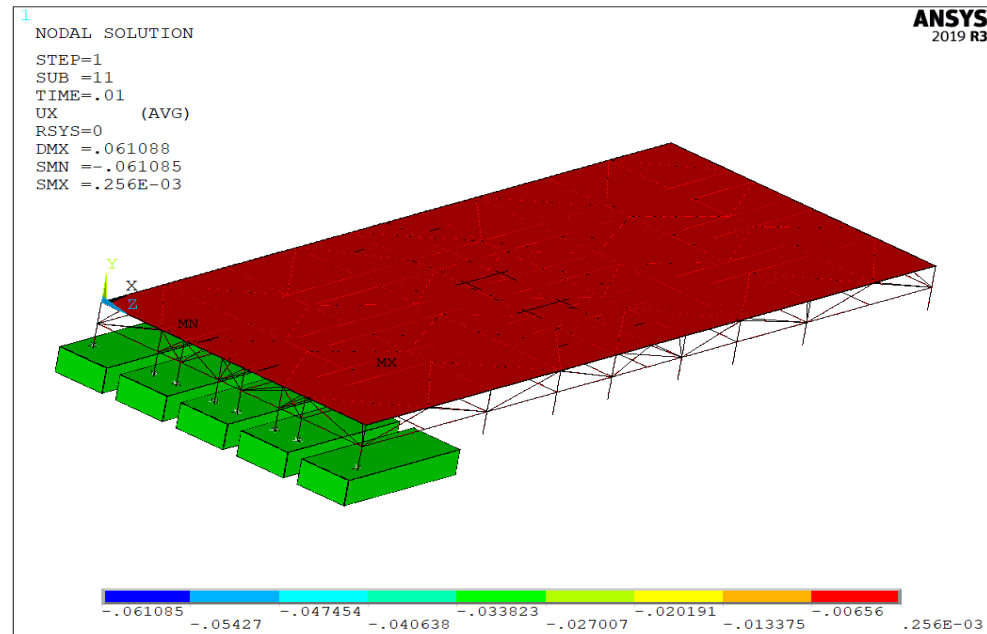


Рисунок 17 – Распределение сопротивлений при движении ряда понтонов