

*На правах рукописи*



**ЯКШИБАЕВ ИЛЬНАР НАИЛЕВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И ОСТОЙЧИВОСТИ ПОНТОНОВ  
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ  
СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ**

Специальность 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа – 2021

Работа выполнена на кафедре «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Лукьянова Ирина Эдуардовна**

Официальные оппоненты: **Тарасенко Александр Алексеевич**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» / кафедра «Транспорт углеводородных ресурсов», профессор

**Сальников Антон Павлович**  
кандидат технических наук  
ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» / кафедра «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и хранилищ», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится «10» июня 2021 года в 16 - 00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.04 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Несмотря на большое внимание к вопросам сокращения потерь, количество выбросов нефтепродуктов в атмосферу из резервуаров на нефтебазах Российской Федерации оценивается в 100000 т в год. Сокращение потерь от испарения нефти и нефтепродуктов на протяжении всего производственного цикла от добычи, хранения, транспорта, переработки и реализации – это немаловажный вопрос сохранения энергетического ресурса, снижения воздействия на жизнь и здоровье людей, и обеспечения экологической безопасности технологических процессов. Одним из наиболее эффективных средств сокращения потерь от испарения нефти и нефтепродуктов является оснащение резервуаров вертикальных стальных (РВС) плавающими покрытиями – понтонами.

Высокие требования к технологичности, безопасности при эксплуатации, к термохимической стойкости понтонов обусловили тот факт, что одним из самых распространенных типов плавающих покрытий в нашей стране и за рубежом является понтон поплавкового типа из алюминиевых сплавов.

Повышенные эксплуатационные показатели надежности понтонов из алюминиевых сплавов не исключают аварий и инцидентов на резервуарах вертикальных стальных с понтоном (РВСП). При касании понтоном стенок резервуара, на понтон оказывает воздействие сила трения.

Основными причинами крена и заклинивания понтонов являются:

- изменение геометрической формы стенки РВСП и направляющей понтона;
- заплескивание нефтепродукта на поверхность понтона;
- нарушение режимов эксплуатации РВСП при наполнении и опорожнении.

Вышеуказанные факторы приводят к значительным деформациям или разрушениям понтонов. Для повышения остойчивости понтонов и их эксплуатационной надежности предлагается использовать успокоители – специальные устройства, крепящиеся к днищу понтонов и задерживающие

некоторый объем нефтепродукта при возникновении колебаний, т.е. выведении понтона из состояния равновесия.

Высокоустойчивый алюминиевый понтон поплавкового типа способствует изменению эксплуатационных режимов работы резервуара, позволяя увеличить скорость наполнения и опорожнения РВСП.

### **Степень разработанности исследуемого направления**

Анализ литературы и нормативных документов в области резервуаростроения свидетельствует о большом научном и практическом вкладе в развитие использования резервуаров с плавающими покрытиями таких отечественных ученых и специалистов как Абузова Ф.Ф., Веревкин С.И., Евтихин В.Ф., Жданов Р.А., Мастобаев Б.Н., Каравайченко М.Г., Константинов Н.Н., Коробков Г.Е., Коршак А.А., Лукьянова И.Э., Макаренко О.А., Мустафин Ф.М., Ржавский Е.Л., Тарасенко А.А., Чолоян Г.С. и зарубежных – Виггинс И., Нельсон А. и другие.

Успокоители для понтонов вертикальных стальных резервуаров были предложены в работах Лукьяновой И.Э., Рябининой В.П., Михайловой В.А., но возможность их установки и влияния на алюминиевый понтон поплавкового типа не рассматривалась, соответственно актуальными на сегодняшний день являются и вопросы конструктивного повышения прочностных характеристик понтонов из алюминиевых сплавов.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту заявленной специальности 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ», а именно: п.1 «Напряженное состояние и взаимодействие с окружающей средой трубопроводов, резервуаров и оборудования при различных условиях эксплуатации с целью разработки научных основ и методов прочностного, гидравлического и теплового расчетов нефтегазопроводов и газонефтехранилищ».

## **Цель работы**

Повышение работоспособности понтонов поплавкового типа из алюминиевых сплавов для цилиндрических вертикальных стальных резервуаров на основе конструктивных решений с учетом напряженно-деформированного состояния.

## **Основные задачи исследования**

1. Анализ основных типов конструкций понтонов и разработка классификации, позволяющей определить возможность оснащения понтонов успокоителями, в зависимости от степени влияния успокоителей на несущие элементы понтона.

2. Разработка и обоснование математической модели для определения напряженно-деформированного состояния алюминиевого понтона с успокоителями.

3. Разработка нового конструктивного решения несущей конструкции понтона поплавкового типа из алюминиевых сплавов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

## **Научная новизна**

1. Введен коэффициент корректировки отношения пролета настила к его толщине в формулу Телояна А.Л. и получены значения указанного коэффициента при установке успокоителей на понтоны чашеобразного, однодечного и двудечного типов. Введен и рассчитан коэффициент корректировки расчетного изгибающего момента несущих элементов в формулу расчета на прочность для понтонов поплавкового типа, что позволило разработать классификацию понтонов с оценкой их прочности при дополнительной нагрузке от успокоителей.

2. Впервые разработана математическая модель, описывающая напряженно-деформированное состояние понтона с силовыми профилями радиального типа при заклинивании в стальном вертикальном резервуаре в виде кругового сектора, защемленного по дуговому краю, и позволяющая рассчитывать прогиб понтона как в случае деформации только настила, так и в случае деформации настила и силовых профилей.

3. По результатам теоретических и экспериментальных исследований доказана адекватность разработанной конечно-элементной модели алюминиевого понтона, применяемой для исследования напряженно-деформированного состояния понтона и разработки конструктивной схемы понтона радиального типа.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Создание математической модели напряженно-деформированного состояния (НДС) алюминиевого понтона поплавкового типа с успокоителями для оценки возможности его использования при нагрузках от продукта хранения при крене понтона.

Разработан алгоритм определения геометрических параметров устройств для повышения остойчивости алюминиевых понтонов при условии выполнения требований прочности.

Разработана численная модель понтона, позволившая воспроизвести процессы внутри резервуара при выполнении технологических операций и определить изменения в конструкции, обеспечивающие равномерное распределение усилий при нагрузке на понтон.

Научные результаты, полученные в работе, были применены при разработке учебно-методического пособия «Линейный расчет математической модели РВСП-5000 в интегрированной системе прочностного анализа и проектирования конструкций SCAD OFFICE» (Лукьянова И.Э., Якшибаев И.Н. - Уфа: Изд. УГНТУ, 2014), используемого для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Нефтегазовое дело», специальности «Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ» в УГНТУ (справка о внедрении № 077-41/33 от 07.09.2015).

Результаты исследования НДС алюминиевого понтона были применены при производстве работ и оформлении исполнительной документации по капитальному ремонту РВСП ООО «Ремонтно-эксплуатационное управление» (справка о внедрении № 00042 от 17.02.2016).

Практическая значимость работы заключается в разработке новой конструкции алюминиевого понтона поплавкового типа, обеспечивающая повышение его работоспособности.

На конструктивную схему понтона получен патент Российской Федерации на полезную модель № 146047 «Алюминиевый понтон поплавкового типа».

### **Методология и методы исследования**

Для решения поставленных задач применялся комплексный метод, в составе которого использовались аналитические методы расчета НДС понтона, математическое моделирование с применением сертифицированных программных комплексов ANSYS и SCAD Office, основанных на методе конечных элементов, пакета прикладных программ FlowVision, основанного на методе конечных объемов, и экспериментальных методов исследования НДС алюминиевого понтона.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработанная классификация различных конструкций понтонов для вертикальных стальных резервуаров, с оценкой возможности оснащения успокоителями. Обоснование коэффициента корректировки отношения пролета настила к его толщине при установке успокоителей для понтонов чашеобразного, однодечного, двудечного типов и коэффициента корректировки расчетного изгибающего момента несущих элементов для понтонов поплавкового типа, использованных при создании данной классификации.

2. Математическая модель кругового сектора понтона для случая прогиба, при деформации настила и силовых профилей, на основании которой получено аналитическое выражение для определения напряженно-деформированного состояния понтона радиального типа, позволяющее производить расчет НДС понтона с различными характеристиками при заклинивании и крене.

3. Разработанные конечно-элементные модели понтона из алюминиевых сплавов поплавкового типа в традиционном исполнении и предлагаемой конструкции с радиальным расположением силовых профилей, позволившей

обосновать возможность использования успокоителей для алюминиевых понтонов, уменьшив внутренние усилия от нормативной нагрузки на 33 %.

### **Апробация результатов**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: международный форум «Инженерные системы», 2013, г. Москва; 64-я, 65-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 2013-2014, г. Уфа; VII международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы развития инновационной деятельности в новом тысячелетии», 2014, г. Новосибирск; открытая конференция молодых ученых и специалистов «Рационализаторская и изобретательская деятельность «Новатор - 2014» 2014, г. Новый Уренгой; международная научно-техническая конференция «Современные технологии в нефтегазовом деле», 2016, г. Октябрьский; VIII, IX, X, XIII, XIV, XV международная научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт», 2012-2020, г. Уфа.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 22 научные работы, в том числе 8 статей в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных изданий в соответствии с требованиями ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, 1 статья в издании, индексируемом в международной базе данных Scopus, получен 1 патент на полезную модель.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов. Содержание работы изложено на 209 страницах машинописного текста, включая 12 таблиц, 67 рисунков, список литературы из 127 наименований и 8 приложений.

*Автор выражает искреннюю благодарность за помощь в процессе работы над диссертацией коллективу кафедры СТ ФГБОУ ВО УГНТУ - научному руководителю д.т.н., профессору кафедры Лукьяновой И.Э.; д.т.н., заведующему кафедрой Кантемирову И.Ф.; д.т.н., профессору Азметову Х.А.; д.т.н., профессору Быкову Л.И.*

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, проведена постановка цели и задач исследования, представлена научная новизна и практическая значимость комплекса исследований, приведены примененные в работе методы исследований и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации проведен обзор литературных источников, отечественной и международной нормативно-технической документации.

Установлено, что одним из наиболее распространенных средств сокращения потерь от испарения продуктов хранения на сегодняшний день является понтон из алюминиевых сплавов благодаря механическим, технологическим и химическим свойствам материала. Техническое и технологическое развитие плавающих покрытий, классификации типов понтонов разных стран, отраженные в нормативных и руководящих документах, свидетельствуют о том, что в конструктивном отношении распространены понтоны поплавкового типа сборно-разборной конструкции.

С целью оценки потенциального риска возникновения чрезвычайных ситуаций на РВС проведен обзор аварий и инцидентов с 1960 по 2020 гг. Анализ статистики свидетельствует, что из общего числа аварий на резервуарах 50 % случаев произошло на резервуарах с плавающими покрытиями. Оценка количества аварий по объему резервуаров констатирует, что большее число чрезвычайных ситуаций произошло на резервуарах объемом 5000 м<sup>3</sup>, на основании чего исследования по повышению надежности работы понтонов целесообразно проводить для резервуаров РВСП-5000.

Анализ причин, последствий чрезвычайных ситуаций стал основанием для идентификации опасностей на вертикальных стальных резервуарах. Проведена идентификация опасностей на РВС, рассмотрены условия и факторы, приводящие к возникновению опасных ситуаций, и меры управления ими.

Изучение актов расследований аварий резервуаров за последние 30 лет показывает, что в 80 % случаев разрушения РВС имела место неравномерная

осадка основания, что при использовании понтонов приводит к их заклиниванию, крену и потоплению. Применение устройств, повышающих остойчивость понтонов, может существенно способствовать положительной динамике в вопросах снижения аварийности на РВС.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы оснащения понтонов успокоителями, степени воздействия конструктивных элементов на работоспособность понтонов и выполнены исследования работы понтонов в эксплуатационных условиях.

Требование к надежности плавающих покрытий для вертикальных стальных резервуаров заключается в бесперебойной работе покрытия, которая обеспечивается плавучестью, непотопляемостью, прочностью и остойчивостью.

Дополнительная остойчивость понтонов обеспечивается успокоителями, но их использование повышает нагрузку на плавающее покрытие. Для удовлетворения требований прочности необходимо провести корректировку расчетных параметров настила и силовых профилей понтонов. С этой целью введены коэффициенты  $K_u$ ,  $K_{us}$ , позволяющие определить степень уменьшения отношения пролета настила понтона к его толщине и расчетного изгибающего момента при установке на понтон успокоителей. Для выявления характера и величины воздействия успокоителя на понтон проведен расчет понтонов, оборудованных устройствами для повышения остойчивости. Рассчитаны и введены коэффициент корректировки отношения пролета настила к его толщине ( $K_u$ ) в формулу Телояна А.Л. и коэффициент корректировки расчетного изгибающего момента ( $K_{us}$ ) в формулу расчета на прочность при установке успокоителей на понтон поплавкового типа. Коэффициенты рассчитаны для каждого из основных конструктивных типов понтонов, и составлена классификация конструкций понтонов, оборудованных успокоителями, которая позволяет обосновать возможность оснащения успокоителями как вновь вводимых, так и эксплуатируемых понтонов (Рисунок 1).

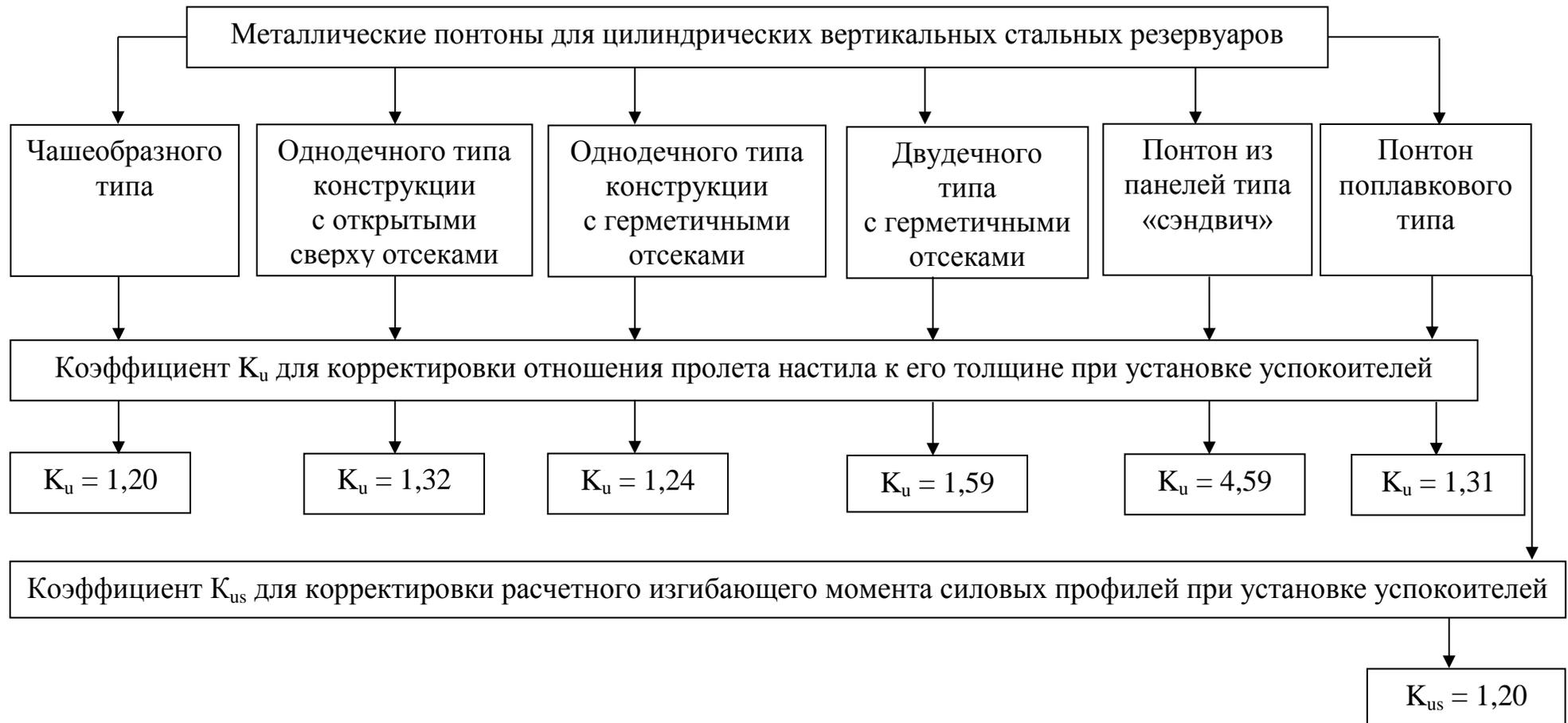


Рисунок 1 - Разработанная классификация конструкций понтонов для вертикальных стальных резервуаров РВСП-5000, оборудованных успокоителями

Эксплуатация понтонов свидетельствует о случаях крена, заклинивания, последующего падения понтонов на откачиваемый продукт, с возникновением теплового эффекта, приводящего к пожарам.

Установлено, что существующие конструкции понтонов из алюминиевых сплавов не могут выдержать нагрузки, возникающие при работе успокоителей, поэтому основную нагрузку воспринимают силовые профили.

Обоснована необходимость внесения изменений в конструкцию силовых профилей понтона из алюминиевых сплавов. При крене понтон выходит из своего эксплуатационного положения, кроме постоянно действующих усилий от силы тяжести понтона, успокоителей и Архимедовой силы, возникают момент крена и момент восстановления.

Возникают случаи заплескивания продукта хранения на поверхность понтона, что приводит к появлению распределенной нагрузки на поверхность понтона. При потоплении одной половины понтона и отрыве от поверхности продукта хранения другой половины, сила поверхностного натяжения и разница давления в подпontonном и надпontonном пространстве, оказывают нагрузку в момент отрыва. При касании борта понтона со стенками резервуара, на понтон оказывает воздействие сила трения.

Для получения характеристик воздействия продукта хранения в резервуаре на понтон разработана математическая модель «РВС-пonton-нефтепродукт» в программных комплексах AutoCAD, FlowVision, SCAD Office.

Модель позволяет воспроизвести процессы, протекающие внутри резервуара при выполнении технологических операций. Исследовано влияние на понтон технологических процессов, протекающих в резервуаре.

Проанализированы случаи работы покрытия на плаву в горизонтальном положении, и смоделированы случаи экстремального положения понтона с различными углами крена. По результатам расчета установлено, что понтон после усилия, приводящего к крену, возвращается в горизонтальное положение, что обусловлено высокой плавучестью и правильными геометрическими параметрами математической модели.

В процессе обработки результатов определены значения усилий и нагрузок, воздействие которых наблюдалось в процессе исследования модели. Результаты расчета применимы при оценке напряженно-деформированного состояния понтона.

С целью изучения характера и величины воздействия конструктивных элементов понтона на его остойчивость выполнен гидродинамический расчет в программе FlowVision, проведено сравнение двух моделей резервуаров с понтоном:

1) модели понтона, включающей основные конструктивные элементы (настил, борт, силовые профили, поплавки);

2) модели понтона в форме сплошного диска.

Полученные расчетные значения момента в модели понтона, включающей основные конструктивные элементы и модели в форме сплошного диска отличаются менее чем на 3 %. Результаты расчета свидетельствуют о незначительном влиянии конструктивных элементов на остойчивость понтона, что позволяет упростить модель понтона без существенной потери точности гидродинамических расчетов. Для существенного повышения остойчивости плавающего покрытия целесообразно применять успокоители (Рисунок 2).

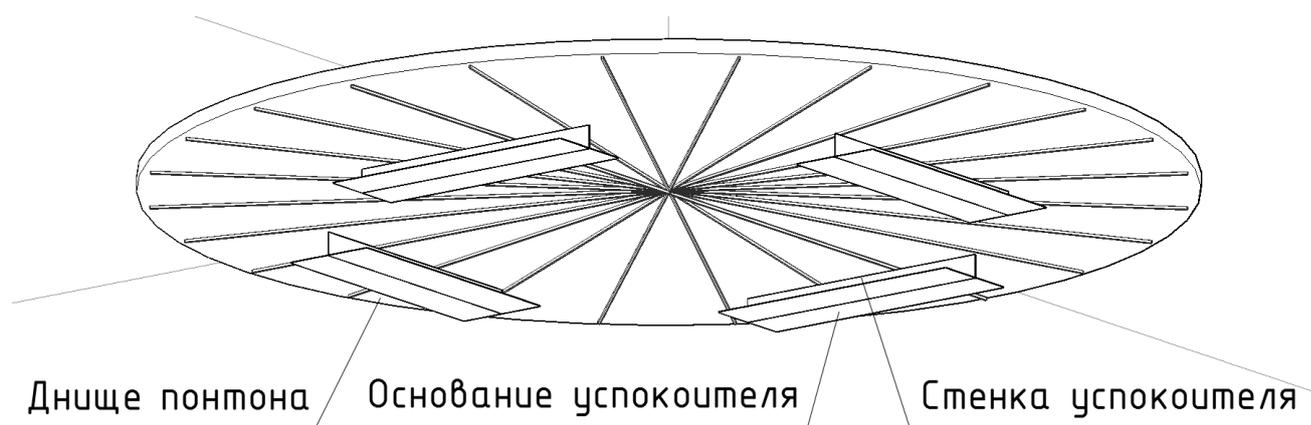


Рисунок 2 - Понтон, оснащенный устройствами для повышения остойчивости

На основании анализа прочностных характеристик, материалоемкости успокоителей и значений восстанавливающего момента понтона выполнен

подбор геометрических размеров и предложено устройство для повышения устойчивости понтонов из алюминиевых сплавов (Рисунок 3).

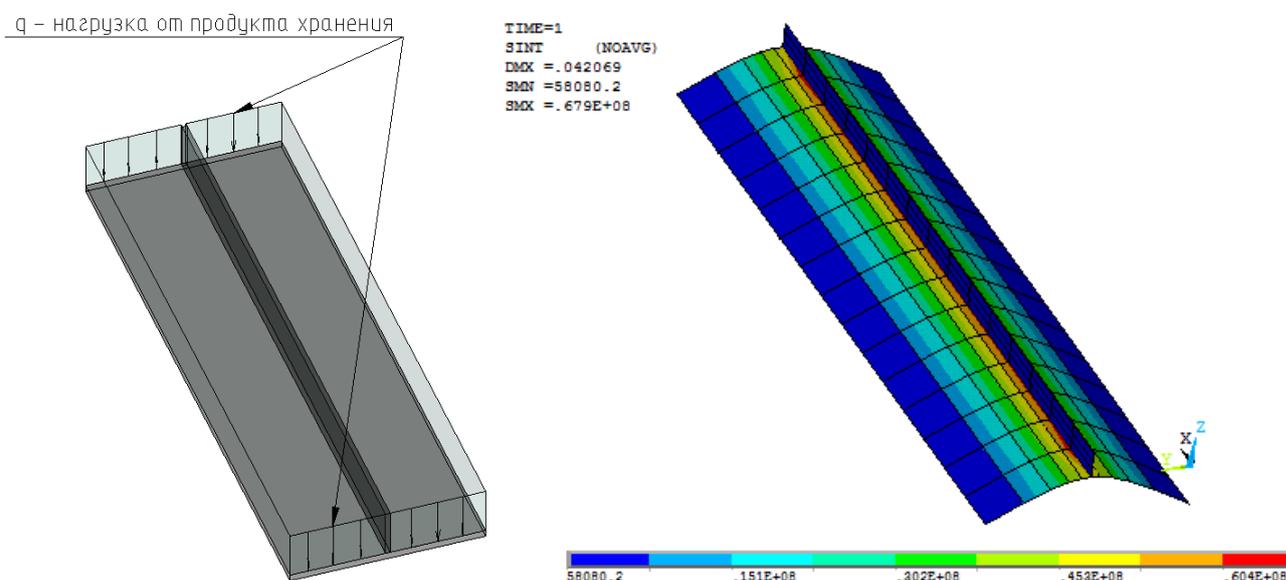


Рисунок 3 - Нагрузка от продукта хранения на основание успокоителя.

### Определение НДС успокоителя в программе ANSYS

Оснащение алюминиевых понтонов поплавкового типа успокоителями из алюминиевых сплавов позволит получить плавающее покрытие с дополнительными устройствами, имеющими идентичные с понтоном механические и физические свойства.

**Третья глава** посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния алюминиевого понтона.

Для исследования НДС алюминиевого понтона предложена и представлена методика расчета на прочность на основе разработанной математической модели в программно-вычислительном комплексе SCAD Office. Результаты расчета включают в себя числовые данные, характер деформаций и изополей напряжений, получены данные о характере работы несущих элементов понтона, что является основанием для решения задачи по повышению прочностных характеристик понтона.

Характер деформаций, распределение напряжений в понтоне свидетельствуют о том, что основную нагрузку от налива нефтепродукта на

поверхность понтона при крене воспринимают силовые профили, нагрузка оказывает воздействие только на силовые профили, находящиеся в зоне приложения нагрузки, соответственно не все несущие элементы включаются в работу при крене. Кроме того, деформация или разрушение загружаемых несущих элементов приводит к деформации всего каркаса и понтона в целом. Прочностной анализ конструкции алюминиевого понтона свидетельствует о необходимости разработки конструктивных решений, позволяющих увеличить прочностные характеристики плавающего покрытия.

На основании результатов исследования разработана конструкция алюминиевого понтона поплавкового типа с радиальным расположением силовых профилей, проведен сравнительный анализ НДС алюминиевого понтона традиционного типа, с параллельным расположением силовых профилей, и предложенного радиального, проведен расчет на прочность для нагрузок при крене и потоплении понтона. Результаты расчета внутренних усилий свидетельствуют о том, что предложенный понтон радиального типа обладает высокими прочностными характеристиками и более адаптирован к экстремальным условиям эксплуатации – при крене и заклинивании. Внутренние усилия, возникающие от нормативной нагрузки, в несущих элементах предложенной конструкции на 33 % ниже, чем в конструкции традиционного исполнения.

Расчет на прочность несущих элементов понтонов различной конструкции показал, что при одинаковой нагрузке на плавающее покрытие, значения внутренних усилий разные. При нагрузке на половину понтона от попадания нефтепродукта на настил поперечная сила в несущих балках понтона радиальной конструкции на 50 % меньше, по сравнению с соответствующими характеристиками понтона традиционного исполнения. Расчет позволяет обоснованно утверждать, что понтон радиального типа более надежен и при экстремальных условиях эксплуатации.

Проведенные в работе расчеты плоского листового настила и опорного кольца, фиксирующего силовые профили в понтоне радиальной конструктивной

схемы, свидетельствуют о несущественной разнице затрат на материалы. Наличие дополнительной связи в несущих балках даёт возможность уменьшения сечений силовых профилей до 40 % за счет уменьшения внутренних усилий более чем на 50 %, что является преимуществом предложенной конструкции понтона.

Конструкция понтона из алюминиевых сплавов радиального типа представляет собой круглую пластинку с постоянной толщиной, имеющей сегменты в виде круговых секторов, ограниченных силовыми профилями и одинаково воспринимающих нагрузки на понтон. Для исследования НДС предложенной конструкции понтона целесообразно рассмотреть прогиб одного сегмента плавающего покрытия, представляющего собой пластинку клиновидной формы.

На основании решения дифференциального уравнения круглой пластинки в частных производных, Лукьяновой И.Э. получено аналитическое решение для определения прогиба пластинки для случая свободного дугового контура и случая, когда сектор понтона свободно опирается по всем краям. Несмотря на значительное количество научных трудов, посвященных исследованию пластинок клиновидной формы, ряда ученых и специалистов (Тимошенко С.П., Уфлянд Я.С., Войновский-Кригер С., Койтер В.Т.), для частного случая заклинивания понтона радиального типа целесообразно рассмотреть неосвещенный ранее случай математической модели круглой пластинки, защемленной по дуговому краю.

Для приведения решения задачи о прогибе понтона рассмотрим понтон радиального типа, содержащего  $2m$  сегментов в виде одинаковых круговых секторов, здесь  $m \geq 1$ .

Ограничимся рассмотрением задачи о прогибе кругового сектора с углом  $\alpha = \pi/m$  и радиуса  $R$ . При отсутствии нагрузок пластинка располагается горизонтально. Пусть пластинка жестко защемлена по круговому краю  $\Gamma_1$  и свободно оперта по двум прямолинейным краям  $\Gamma_2$ , это случай заклинивания понтона.

Знаком плюс обозначены сегменты, к которым прикладывается нагрузка от собственного веса  $q$ , направленная вертикально вниз (Рисунок 4).

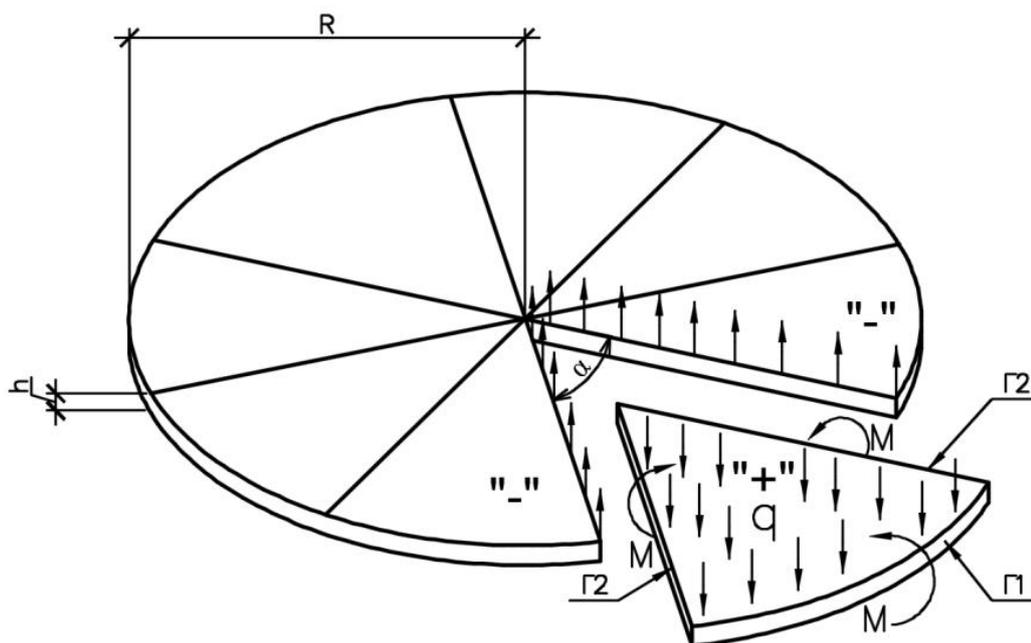


Рисунок 4 - Расчетная схема модели понтона поплавкового типа

Для определения прогиба понтона в случае заклинивания при крене можно использовать уравнение:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right) \cdot \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right) w = \frac{q}{D}, \quad (1)$$

с краевыми условиями:

$$w|_{\varphi=0} = 0, \quad w|_{\varphi=\frac{\pi}{m}} = 0, \quad w|_{r=R} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0.$$

Выполнив эквивалентные преобразования, получили решения для определения прогиба сегмента понтона, вида:

$$w = \sum_{m=m,3m,5m\dots} (A_m r^m + B_m r^{m+2} + r^4 C_m) \sin m\varphi, \quad (2)$$

$$\text{где } A_m = \frac{2-m}{2} R^{4-m} C_m; \quad B_m = \frac{m-4}{2} R^{2-m} C_m; \quad C_m = \frac{4mq}{D\pi m(16-m^2)(4-m^2)}. \quad (3)$$

На основании уравнения (1) получим различные приближенные формулы – частные решения для определения прогиба сегмента понтона, вида:

$$w \approx (A_m r^m + B_m r^{m+2} + r^4 C_m) \sin m\varphi. \quad (4)$$

Поскольку ряд является быстросходящимся, то с достаточной степенью точности можно использовать первые члены ряда. Например, при  $m = 3$  (т.е. когда понтон состоит из 6 сегментов) получим:

$$w \approx -\frac{12q_0}{105D\pi} r^3 \left( r - \frac{R}{2} - \frac{r^2}{2R} \right) \sin 3\varphi. \quad (5)$$

Максимальное значение прогиба сегмента понтона достигается при значении  $r \approx 0,6R$  и  $3\varphi = \pi/2$ , т.е. на оси симметрии угла сегмента, что не противоречит известным результатам определения прогибов клиновидной пластинки.

На основании математической модели круглой пластинки получено решение для определения прогиба сегмента понтона с радиальным расположением силовых профилей. Предложенная методика расчета понтона может быть использована для определения НДС понтона в случае заклинивания при крене для РВСП разной вместимости.

С целью проверки и подтверждения правильности гипотез, проведенных аналитических исследований, поставлена задача проведения экспериментальных исследований НДС понтона.

**В четвертой главе** приведены этапы проведения экспериментальных исследований. Планирование эксперимента построено на базе проведенных аналитических исследований.

В процессе моделирования переход от натурного понтона к модели произведен на основании необходимых условий подобия. Расчет геометрических параметров модели произведен пропорционально оригинальным размерам, введен единый коэффициент подобия  $k = 0,1$ .

С целью исследования НДС понтона изготовлена физическая модель алюминиевого понтона с радиальной конструктивной схемой, смоделированы

условия эксплуатации при крене и потоплении.

Проведены статические испытания, по результатам исследований получены экспериментальные данные о напряженно-деформированном состоянии понтона, изучен характер воздействий при крене и потоплении понтона, оценена степень участия несущих элементов в работе понтона, в зависимости от места приложения нагрузок. Определены значения прогибов и напряжений в несущих элементах понтона. Получены графики зависимости значений прочностных характеристик от величины нагрузки (Рисунок 5).

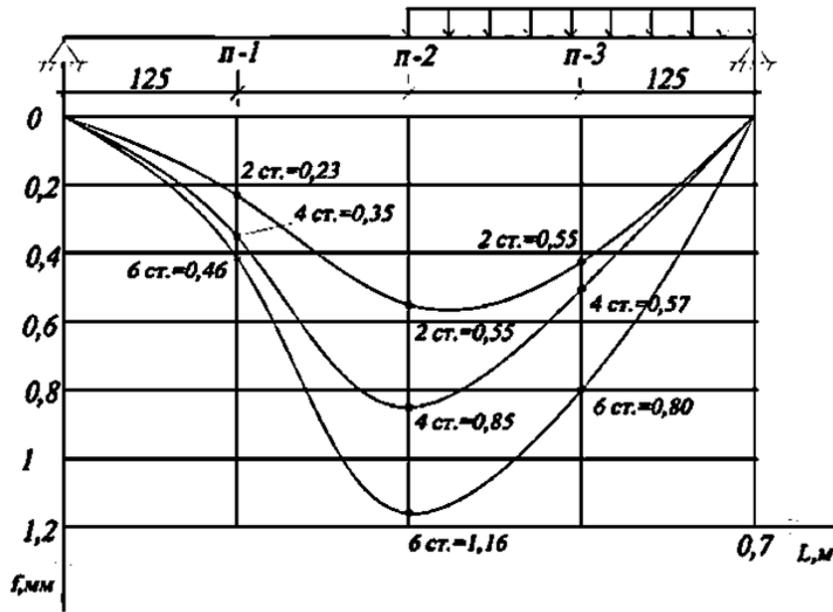
Значение расхождений при реализации первого этапа эксперимента колеблется в пределах от 0 до 13 %.

Выполнена проверка результатов проведенных испытаний на соответствие теоретическим данным, проведен расчет НДС математической модели понтона в программном комплексе SCAD Office и проведено сопоставление результатов значений максимальных прогибов несущей конструкции понтона, полученных экспериментальным и теоретическим путем (Таблица 1).

Таблица 1 – Сопоставление значений прогибов понтона

Ступень №	Нагрузка, кН	Экспериментальное значение, мм (Прогибомер П-2)	Расчетное значение, мм (SCAD)	Расхождение значений	
				мм	%
Нагрузка на половину поверхности понтона					
0	0	0	0	0	0
1	0,098	0,29	0,31	0,03	6,89
2	0,196	0,55	0,58	0,03	5,45
3	0,294	0,69	0,69	0,00	0,00
4	0,392	0,85	0,92	0,13	8,21
5	0,490	1,01	1,14	0,13	12,87
6	0,588	1,16	1,37	0,21	18,10

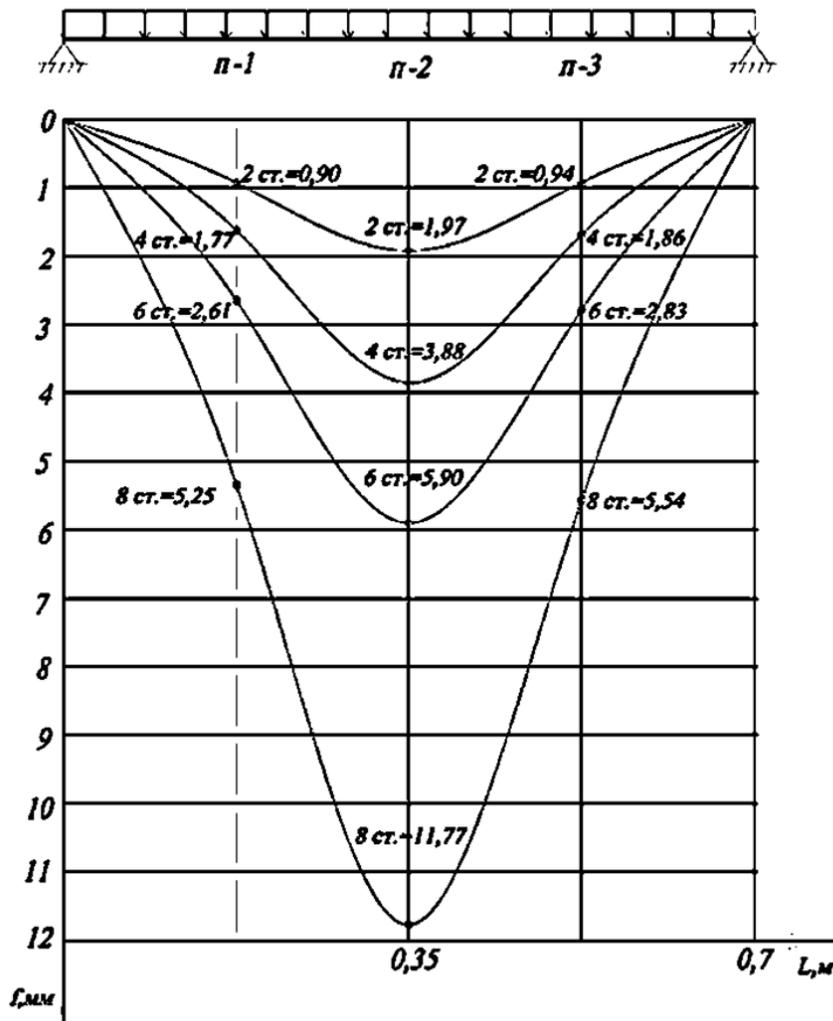
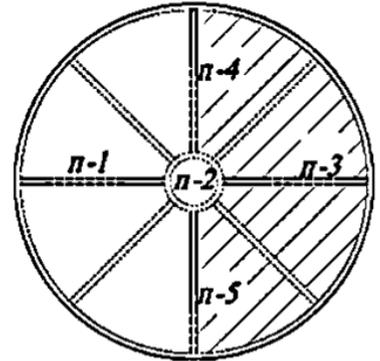
Значение результатов второй части эксперимента имеют более широкое расхождение, что обусловлено наличием у физической модели понтона остаточной деформации от нагрузок первых 6 ступеней и отсутствием их на математической модели.



Ступени

- 1 – 0,098 кН
- 2 – 0,196 кН
- 3 – 0,294 кН
- 4 – 0,392 кН
- 5 – 0,490 кН
- 6 – 0,588 кН

Схема приложения нагрузки на половину настила понтона



Ступени

- 1 – 0,392 кН
- 2 – 0,784 кН
- 3 – 1,176 кН
- 4 – 1,569 кН
- 5 – 1,961 кН
- 6 – 2,353 кН
- 7 – 2,745 кН
- 8 – 3,183 кН

Схема приложения нагрузки на всю поверхность настила понтона

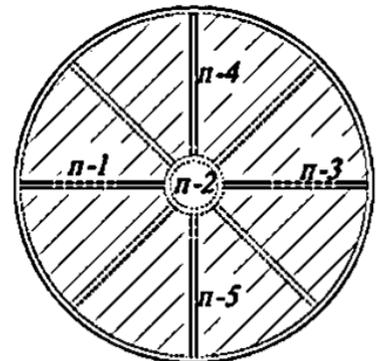


Рисунок 5 - Характер изменения прогиба несущей конструкции понтона в зависимости от значения и характера нагрузок

Сравнение экспериментальных данных с результатами расчета НДС понтона в программном комплексе SCAD Office, расчет погрешности полученных экспериментальных данных свидетельствует об адекватности модели понтона.

По результатам экспериментальных и теоретических исследований проведена модернизация конструкции алюминиевого понтона радиального типа с помощью оценки соединения узлов силовых профилей и опорного кольца. Выполнен расчет на прочность, по результатам расчета принято конструктивное решение шарнирного соединения рассматриваемых несущих элементов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении диссертации приведены основные выводы:

1. Предложена классификация конструкций металлических понтонов на основе введенного в формулу Телояна А.Л. коэффициента корректировки отношения пролета настила к его толщине ( $K_u$ ) и введенного в формулу расчета на прочность коэффициента корректировки расчетного изгибающего момента ( $K_{us}=1,20$ ) при установке успокоителей на алюминиевый понтон. Классификация позволяет рассчитать возможность оснащения успокоителями как вновь вводимые, так и эксплуатируемые понтоны.

2. Для стальных вертикальных резервуаров с понтоном из алюминиевых сплавов, исходя из требований прочности и остойчивости, проведены расчеты несущих элементов на прочность и определены геометрические размеры устройств для повышения остойчивости.

Разработана математическая модель кругового сектора понтона для случая прогиба понтона, при деформации настила и силовых профилей понтона. На основании математической модели круглой пластинки, защемленной по дуговому краю, получено аналитическое выражение для определения прогибов понтона радиального типа, позволяющее производить расчет напряженно-деформированного состояния понтона с различными геометрическими параметрами при заклинивании и крене.

3. По результатам теоретических и экспериментальных исследований доказана адекватность конечно-элементной модели алюминиевого понтона, позволившая разработать конструктивную схему алюминиевого понтона радиального типа, в которой внутренние усилия, возникающие от нормативной нагрузки, в несущих элементах конструкции на 30 % ниже, чем в конструкции традиционного исполнения.

**Содержание диссертации опубликовано в следующих основных научных трудах - в рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ:**

1. Якшибаев И.Н. Линейный расчет математической модели РВСП-5000 в интегрированной системе прочностного анализа и проектирования конструкций SCAD Office [Электронный ресурс] / И. Н. Якшибаев, И. Э. Лукьянова // Нефтегазовое дело: электрон.науч. журн. - 2013. - №5. - С. 325-340. Режим доступа: [http://ogbus.ru/authors/YakshibaevIN/YakshibaevIN\\_1.pdf](http://ogbus.ru/authors/YakshibaevIN/YakshibaevIN_1.pdf).

2. Якшибаев И.Н. Определение характера работы алюминиевых понтонов стальных вертикальных резервуаров при крене [Электронный ресурс] / И. Н. Якшибаев, И. Э. Лукьянова // Нефтегазовое дело: электрон.науч. журн. – 2014. – №3. – С. 105-123. Режим доступа: [http://ogbus.ru/issues/3\\_2014/ogbus\\_3\\_2014\\_p105-123\\_YakshibaevIN\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/3_2014/ogbus_3_2014_p105-123_YakshibaevIN_ru.pdf).

3. Якшибаев И.Н. Классификация понтонов, оборудованных устройством для повышения остойчивости [Текст] / И. Н. Якшибаев // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2014 – №11. – С. 40-45.

4. Якшибаев И.Н. Сравнение прочностных характеристик понтонов из алюминиевых сплавов различных несущих конструкций для вертикальных стальных резервуаров [Текст] / И. Н. Якшибаев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – №3. – С. 19-24.

5. Якшибаев И.Н. Идентификация опасностей на вертикальных стальных резервуарах [Текст] / И. Н. Якшибаев, И. Э. Лукьянова // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – №1. – С.108-112.

6. Якшибаев И.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния алюминиевого понтона на основании физического моделирования [Текст] / И. Н. Якшибаев, И. Э. Лукьянова, М. З. Зарипов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2015. – №3.

7. Якшибаев И.Н. Исследование математической модели деформации понтона

радиального типа для цилиндрических вертикальных стальных резервуаров / Якшибаев И.Н., Лукьянова И.Э., Юмагулов М.Г. // «Нефтегазовое дело», 2016. – Т. 15, №2 – С. 93-98.

8. Якшибаев И.Н. Выбор типа узлового соединения в конструкции понтона радиального типа для цилиндрических вертикальных стальных резервуаров /Якшибаев И.Н., Лукьянова И.Э. // «Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов», 2019. – №5 – С. 144-151.

**– патенты:**

9. Пат. на полезную модель №146047. Алюминиевый понтон поплавкового типа / И. Н. Якшибаев, И. Э. Лукьянова, Ф. М. Мустафин; владелец охр. док. Уфим. гос. нефт. техн. ун-т. – №2014111880; Заявл. 27.03.2014; Опубл. 27.09.2014, Бюл. №27.

**– в других научных изданиях:**

10. Якшибаев И.Н. Повышение прочностных характеристик алюминиевых понтонов для стальных вертикальных резервуаров [Текст] / И. Н. Якшибаев // Рационализаторская и изобретательская деятельность «Новатор-2014»: сб. тез.открыт. конф. молодых ученых и специалистов / ООО «Газпром добыча Уренгой». – Новый Уренгой, 2014. – С. 88-89.

11. Якшибаев И.Н. Статическое испытание модели алюминиевого понтона для вертикальных стальных резервуаров / И. Н. Якшибаев, И. Э. Лукьянова, М. З. Зарипов // Трубопроводный транспорт-2015: материалы X Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. / УГНТУ. – Уфа, 2015. – С. 345-346.;

12. Лукьянова И.Э. Возможности повышения надежности эксплуатации вертикальных стальных резервуаров с понтонами / И. Э. Лукьянова, И. Н. Якшибаев // Современные технологии в нефтегазовом деле-2016: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. / УГНТУ; ОктФ. - Уфа, 2016. - Т. 2. - С. 353-357.

13. Исследование работы различных типов узловых соединений алюминиевого понтона для вертикальных стальных резервуаров / И. Э. Лукьянова, И. Н. Якшибаев // Трубопроводный транспорт-2018: Тезисы докладов XIII Международной учебно-научно-практической конференции / Издательство УГНТУ. - Уфа, 2018. - С. 302-304.

14. Study of ignition of binding substances used in foundations of tanks / I.E. Lukyanova, V.A. Mikhailova, I.F. Kantemirov, I.N. Yakshibaev// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 378, conference 1, 2019. – p. 1-6.

15. Конструирование и компоновка успокоителей алюминиевого понтона для вертикальных стальных резервуаров И. Н. Якшибаев, И. Э. Лукьянова, А.Н. Якшибаев // Трубопроводный транспорт-2020: Тезисы докладов XV Международной учебно-научно-практической конференции (18-19 ноября 2020г.) / Издательство УГНТУ. - Уфа, 2020. - С. 224-225.