



На правах рукописи

ХАЙРУЛЛИН ДАМИР РИНАРДОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЛОКАЛИЗАЦИИ
АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ НА ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДАХ
НЕФТЕПРОВОДОВ ЧЕРЕЗ РЕКИ**

Специальность: 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,
баз и хранилищ (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа 2026

Работа выполнена на кафедре «Проектирование и строительство объектов нефтяной и газовой промышленности» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
**Султанмагомедов Султанмагомед
Магомедтагирович**

Официальные оппоненты: **Земенкова Мария Юрьевна**
доктор технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Тюменский индустриальный
университет» / кафедра «Транспорт
углеводородных ресурсов», профессор (г. Тюмень)

Шестаков Роман Алексеевич
кандидат технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Калининградский государственный
технический университет» / кафедра инженерной
инфраструктуры объектов капитального
строительства, заведующий кафедрой
(г. Калининград)

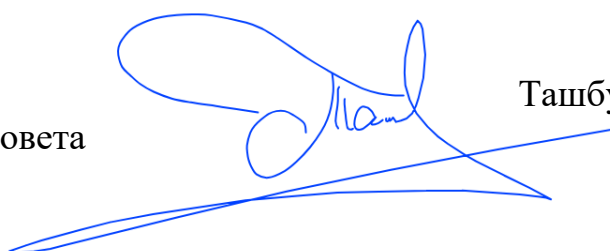
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II»
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «16» апреля 2026 года в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.428.03 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ташбулатов Радмир Расулевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Добыча нефти и нефтепродуктов, их транспортировка и хранение оказывают негативное влияние на окружающую среду. Несмотря на принятые меры по предупреждению аварий, они происходят и приводят к ее загрязнению. Вопрос сохранения окружающей среды является актуальным, учитывая масштаб нефтегазового комплекса России. Наибольший экологический ущерб наносится при попадании нефти и нефтепродуктов в водные объекты. Технология ликвидации аварийных разливов имеет свои особенности при авариях на море или на реках и озерах.

Объектом исследования выбраны реки, так как на территории России большое число подводных переходов нефте- и нефтепродуктопроводов через реки, которые являются потенциальными источниками разлива нефти или нефтепродукта. При авариях на нефте- и нефтепродуктопроводах на переходах через реки в водоем сразу и в больших количествах попадает нефть или нефтепродукт, который затем быстро разносится по реке. В связи с чем крайне важными являются оперативные действия по ликвидации разливов. Процесс ликвидации разлива нефти разделяется на стадии локализации, сбора и утилизации загрязнения. Методы сбора и утилизации загрязнения хорошо изучены в существующей литературе, однако проблема локализации разлива нефти требует более подробных исследований, в особенности на реках и водотоках, на которых из-за наличия течения осложняется процесс ликвидации и локализации разлива.

Проектированию и развитию боновых заграждений должно уделяться должное внимание, так как они выполняют важную роль в защите гидросферы от негативного влияния трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов.

При установке боновых заграждений на подводных переходах нефтепроводов через реки могут встречаться следующие ситуации, осложняющие локализацию разлива:

- высокая скорость течения;

- наличие ледового покрова;
- русловые процессы, приводящие к неравномерному распределению скоростей в русле.

На ответственных переходах нефтепроводов через реки, в случае аварии на которых будут затронуты объекты, обладающие большой экологической ценностью, обоснованным является применение заранее установленных на дно реки всплывающих боновых заграждений.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов посвящено большое количество трудов. Можно выделить работы Багаутдинова Н.Я., Бадретдинова Р.Г., Бронштейна И.С., Булатова А.И., Воробьева Ю.Л., Габдуллина А.М., Гумерова А.Г., Егоровой Н.А, Забелы К.А., Знобищева Г.П., Идрисова Р.Х., Идрисовой К.Р., Комаровского Д.П., Консейсао А.А. да, Кунафина Р.Н., Лебедича С.П., Липского В.К., Лурье М.В., Малышкина Д.А., Мастобаева Б.Н., Мерициди И.А., Пластинина А.Е., Рогозина В.И., Саковича Н.Е., Султанмагомедова С.М., Хасанова И.Ю., Хлесткина Р.Н., Чебана Е.Ю., Шаммазова А.М., Шаммазова А.А., Шлапакова А.В., Шестакова Р.А.

В существующей литературе практически не учитываются прогибы боновых заграждений при их установке на подводных переходах нефтепроводов через реки, однако они также могут оказать влияние на удерживающую способность заграждения. Не рассматривается влияние выбора берега для начала установки боновых заграждений на реках. Кроме того, для всплывающих боновых заграждений не учитывается тот факт, что лед может быть разрушен при всплытии заграждения, что повлияет на процесс ликвидации разлива.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тематика и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ, а именно пункту 1 – «Технологические процессы и технические средства для проектирования, сооружения, эксплуатации, теоретические и практические основы взаимодействия объектов трубопроводного транспорта с окружающей средой

с целью создания высокоэффективных, энерго- и ресурсосберегающих, надежных, механически и экологически безопасных сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта».

Целью работы является совершенствование методов и средств локализации аварийных разливов нефти на подводных переходах нефтепроводов через реки для повышения их удерживающей способности.

Основные задачи исследования

1. Анализ существующих методов и технических средств для локализации аварийных разливов нефти на подводных переходах нефтепроводов через реки и разработка решений для повышения их удерживающей способности.

2. Исследование пространственного положения всплывающих боновых заграждений при приведении их в рабочее состояние с целью выявления его влияния на удерживающую способность заграждения и на целостность ледового покрова.

3. Определение допустимых углов установки боновых заграждений на подводных переходах нефтепроводов через реки и оценка влияния выбора берега для начала их установки на их удерживающую способность.

Научная новизна работы

1. Сформулирована и аналитически решена новая задача, позволяющая определить максимально допустимый угол установки всплывающих боновых заграждений на подводных переходах нефтепроводов через реки. Установлена зависимость величины максимально допустимого угла установки всплывающего бонового заграждения от скорости течения, расположения точек крепления его к опорам относительно направления течения, глубины и ширины русла реки.

2. Разработана методика расчета позволяющая определить целостность ледового покрова на подводных переходах нефтепроводов через реки при всплытии бонового заграждения. Установлена зависимость между диаметром камеры

плавучести всплывающего бонового заграждения и неразрушаемой толщиной ледового покрова.

3. Для не всплывающих боновых заграждений сформулирована и впервые решена задача по определению минимально допустимого угла их установки на подводных переходах нефтепроводов через реки. Определена зависимость минимально допустимого угла их установки от выбранного берега для начала их развертывания, ширины и распределения скоростей течения по руслу реки.

Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость исследования обусловлена тем, что разработанная методика расчета по определению допустимых углов установки боновых заграждений на подводных переходах нефтепроводов через реки позволяет теоретически исследовать контур плети бонового заграждения в зависимости от различных факторов, включающих глубину, ширину и распределение скоростей течения в русле реки, а также расположения точек крепления заграждения относительно направления течения.

Практическая значимость работы

Разработанная методика по определению допустимых углов установки боновых заграждений на подводных переходах нефтепроводов через реки позволяет определить наиболее эффективные параметры установки боновых заграждений на реках с учетом неизбежно образующегося прогиба плети бонового заграждения под действием течения.

Разработанные рекомендации по установке всплывающих боновых заграждений на подводных переходах нефтепроводов через реки с определенным диаметром камеры плавучести позволяют оценить целостность ледового покрова на замерзающих реках при всплытии бонового заграждения и спрогнозировать методы ликвидации аварийного разлива нефти на покрытой льдом или свободной ото льда реке и подобрать соответствующий диаметр камеры плавучести.

Разработанная конструкция секции бонового заграждения с внутренним каркасом пружинного типа позволяет предотвратить перелив воды через его верхнюю

часть при уменьшении занимаемого объема секции заграждения за счет складывания ее вдоль своей оси (патент на полезную модель RU2808239).

Разработанный способ установки бонового заграждения вдоль несущего каната с предварительным натяжением позволяет установить боновое заграждение с меньшим прогибом, что повышает его удерживающую способность, а также позволяет передать нагрузку от течения на несущий канат (патент на изобретение RU2808239).

Результаты исследований были внедрены в производственный процесс ООО «Нефтетранстехника» при проектировании и изготовлении секций боновых заграждений.

Методология и методы исследования

Поставленные задачи решались с помощью эмпирических и теоретических методов. Эмпирический метод включал в себя эксперименты, сравнение анализируемых параметров установки боновых заграждений, измерение величины прогиба и определение положения точки изгиба плети бонового заграждения. Теоретический метод включал в себя научный анализ и обобщение современной теории и практики ликвидации и локализации аварийных разливов нефти, сравнительный анализ методов и параметров установки боновых заграждений на реках и обработку результатов.

Положения, выносимые на защиту

1. Задача по определению максимально допустимого угла установки всплывающих боновых заграждений на подводных переходах нефтепроводов через реки для недопущения перелива нефти за заграждение при приведении их в рабочее состояние. Максимально допустимый угол их установки составляет от 55° до 80° по отношению к направлению течения реки в зависимости от комбинации данных факторов.

2. Методика расчета по определению допустимой нагрузки на ледовый покров от всплывающего бонового заграждения для предотвращения перемешивания льда и нефти в процессе ликвидации аварийного разлива. Так, при диаметре камеры

плавучести всплывающего бонового заграждения 0,15 м минимально допустимая толщина льда составляет 0,027 м, иначе лед будет разрушен.

3. Задача по определению минимально допустимого угла установки не всплывающего бонового заграждения в зависимости от выбранного берега для начала его установки, ширины реки и распределения скоростей течения по её руслу для недопущения перелива нефти за боновое заграждение по положению точки его изгиба. Установлено, что минимально допустимый запланированный угол установки не всплывающих боновых заграждений в зависимости от комбинации данных факторов составляет 11° - 20° по отношению к направлению течения реки, так как при меньших его значениях значительно увеличивается фактический угол установки (из-за прогиба заграждения).

Степень достоверности и апробация результатов

Основные положения работы докладывались на следующих конференциях: 72-ая Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ, г. Уфа, 2021 г., XVII Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2022», г. Уфа, 2022 г., IV (XVI) Международная научно-техническая конференция молодежи ПАО «Транснефть», г. Уфа, 2023 г., IV (XVI) Международная научно-техническая конференция молодежи ПАО «Транснефть», г. Хабаровск, 2024 г., 76-ая Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ, г. Уфа, 2025 г., XX Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2025», г. Уфа, 2025 г. По теме диссертации поддержано два гранта «Фонда содействия инновациям»: договор №16636ГУ/2021 от 03.06.2021; договор №2621ГССС15-L/93085 от 27.03.2024. Достоверность результатов работы подтверждена данными экспериментальных исследований, полученных с использованием поверенных средств измерения с применением теории планирования эксперимента с многократным повторением опытов.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 3 статьи в научных журналах, индексируемых в международных базах Scopus, 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения; содержит 147 страниц машинописного текста, в том числе 10 таблиц, 39 рисунков, 2 приложения и библиографический список из 152 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена основная суть исследования, обоснована актуальность диссертационной работы, приведена цель и задачи исследования, выдвинуты защищаемые положения, а также определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

Первая глава диссертации посвящена исследованию проблемы ликвидации и локализации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на реках.

В Российской Федерации существует обширный пакет документов, регулирующих борьбу с аварийными разливами нефти, который включает в себя международные документы, Федеральные законы, Указы Президента РФ, Постановления Правительства РФ, Приказы, нормативно-технические, производственно-отраслевые и методические документы.

Одним из наиболее опасных и распространённых видов загрязнения окружающей среды является разлив нефти и продуктов ее переработки. Перечень объектов, из которых она может попадать в окружающую среду, достаточно обширный. Среди них можно выделить объекты добычи, хранения, транспортировки и потребления нефти и нефтепродуктов.

Наиболее серьезные экологические последствия возникают при попадании нефти и нефтепродуктов в водные объекты. При разливе нефти по поверхности воды

нефть растекается в виде очень тонкого слоя, занимая большие площади воды, при этом она не дает возможности воде обмениваться с атмосферой.

Анализ материалов, имеющейся литературы показал, что методы локализации разлива нефти можно разделить на следующие: механические, физико-химические, химические, биологические, а также сжигание нефти на месте разлива.

По способу ликвидации слоя нефти на поверхности воды можно выделить следующие методы:

- методы, основанные на извлечении нефти с поверхности воды;
- методы, основанные на разрушении слоя нефти;
- методы, основанные на рассеивании и разложении слоя нефти.

Следует отметить, что самым правильным с точки зрения экологии методом ликвидации разлива нефти является ее извлечение с поверхности воды. Другие методы только заменяют один вид загрязнения на другой и могут применяться в исключительных случаях.

При рассмотрении всех методов и средств локализации нефтяной пленки на водной поверхности стоит выделить применение боновых заграждений, которые являются наиболее универсальными и эффективными.

Боновое заграждение – это наиболее эффективное средство локализации разливов нефти, необходимое для облегчения процесса сбора продукта с поверхности воды. Боновое заграждение в общем виде представляет собой соединенные секции, которые оснащены надводной камерой, удерживающей полотнище и балласт в нижней части полотнища.

В результате анализа существующих видов боновых заграждений выявлено, что только часть из них подходит для работы на реках, а наиболее эффективными и распространёнными являются боновые заграждения надувные и постоянной плавучести.

При исследовании существующих боновых заграждений, способных работать при наличии ледового покрова на реках, выявлены недостатки, заключающиеся в трудностях осуществления установки заграждений. Всплывающие боновые

заграждения, способные работать в ледовых условиях, не учитывают прочность льда при их всплытии, а также имеют недостаточную удерживающую способность.

При определении нагрузок, действующих на боновые заграждения, стоит выделить нагрузку от течения, действующую на «юбку» бонового заграждения, и ветровую, действующую на надводный борт заграждения, которая значительно меньше первой.

Уточненная формула по определению нагрузки на боновое заграждение от течения

$$F_{теч} = \rho_{\text{в}} \cdot l \cdot h_{\text{подв}} \cdot (v \cdot \sin \alpha)^2, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, кг/м³; l – длина бонового заграждения, м; $h_{\text{подв}}$ – высота подводной части бонового заграждения, м; v – скорость течения, м/с; α – угол постановки бонового заграждения.

При исследовании сбоев в работе бонов на реках выявлено, что они связаны прежде всего с высокой скоростью течения и приводят к протеканию нефти под боном или к потере устойчивости самого бона.

Проведено исследование существующих решений по повышению удерживающей способности боновых заграждений, среди которых стоит выделить установку заграждений под определенным углом, зависящим от скорости течения, а также от добавления гибкого полотна в нижнюю часть бонов.

Во второй главе диссертации приводится описание разработанных методов и средств локализации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на реках и обосновываются их преимущества в сравнении с существующими решениями.

1. Разработка бонового заграждения с внутренним каркасом пружинного типа

Разработка конструкции бонового заграждения с пружиной во внутренней полости камеры плавучести была начата с целью повышения качества работы заграждения, поскольку такая конструкция имеет следующие преимущества:

- возможность надежно удерживать нефть на поверхности водоема даже при быстром течении (исключает такое явление, как перелив воды, через локальные участки смятия мембраны, которое приводит к уменьшению высоты надводной части);

- удобство транспортировки, благодаря тому что секции заграждения могут складываться вдоль своей оси;

- быстрый перевод секции в рабочее состояние благодаря тому что камера плавучести самопроизвольно заполняется воздухом во время распрямления пружины при выравнивании давления в секции с атмосферой.

В основе конструкции лежит использование пружины во внутренней полости камеры плавучести, что позволяет складываться конструкции вдоль центральной оси по типу гармошки.

Выполнены расчеты параметров пружин, подходящих для их применения в качестве каркаса внутренней камеры плавучести. В расчете была установлена взаимосвязь между диаметром прутков проволоки, диаметром пружины и числом ее витков. На основании расчета определялись длина и масса пружин, подходящих для применения, длина пружин составила от 4,7 до 5,7 м с массой погонного метра от 2,93 до 4,99 кг.

2. Совершенствование всплывающего бонового заграждения, способного работать в ледовых условиях

Усовершенствовано всплывающее боновое заграждение способное работать при наличии ледяного покрова на поверхности реки. Данное заграждение имеет повышенную удерживающую способность в сравнении с существующими решениями за счет добавления в нижней части бона гибкого полотна и «юбки». Кроме того, добавлена емкость для сбора нефтешлама, которая необходима для оперативного удаления нефтяной эмульсии, до прибытия службы ликвидации аварийных разливов нефти.

В связи с тем, что заграждение располагается на дне реки, а трос в нижней части заграждения удлиняется, при всплытии заграждения образуется прогиб. Были определены допустимые углы установки в зависимости от распределения скоростей течения, от выбранного берега для размещения переднего конца по ходу течения, глубины и ширины русла реки с целью предотвращения образования «карманов», в которых возникают воронки, которые приводят к пропуску нефти за боновое заграждение.

Полная длина бонового заграждения после всплытия будет определяться по формуле

$$l_{всп} = l_{дна} + a, \quad (2)$$

где $l_{дна}$ – длина кривой дна реки, м, определяемая в зависимости от отношения глубины к ширине реки и планируемого угла установки α ;

a – удлинение троса в нижней части заграждения, возникающее от действия течения и определяемое по закону Гука, м.

Зная полную длину бонового заграждения $l_{всп}$, длину по прямой l , планируемый угол установки α и распределение скоростей течения, можно определить точку изгиба заграждения и далее определить фактический угол установки бонового заграждения β при сравнении его с 90° , можно установить, является ли планируемый угол α допустимым.

Было определено влияние распределения скоростей течения в русле v_{max} / v_{min} на допустимые углы установки заграждения (Рисунок 1). При расчете учитывалось максимальное удлинение стального троса a , равное $0,007l$.

Как видно из рисунка 1, угол установки всплывающего бонового заграждения зависит от выбранного берега для размещения переднего конца по ходу течения (варианты a и b) и от профиля русла реки, а именно от отношения глубины к ширине реки h/L . В зависимости от профиля русла реки максимально допустимый угол установки заграждения может отличаться на 10 и даже более градусов.

Для определения минимально допустимого угла установки всплывающего бонового заграждения были проанализированы запланированные углы установки α и соответствующие им фактические углы β . Для наглядности были составлены зависимости между запланированными α и разностями между фактическим и запланированным углом, $\alpha - \beta$. А именно рассматривался профиль глубокого русла реки с отношением $h/L = 3,5$ при неравномерном распределении скоростей течения в русле (варианты установки a) и b) Рисунка 2) и при равномерном распределении скоростей в русле $v_{max} = v_{min}$.

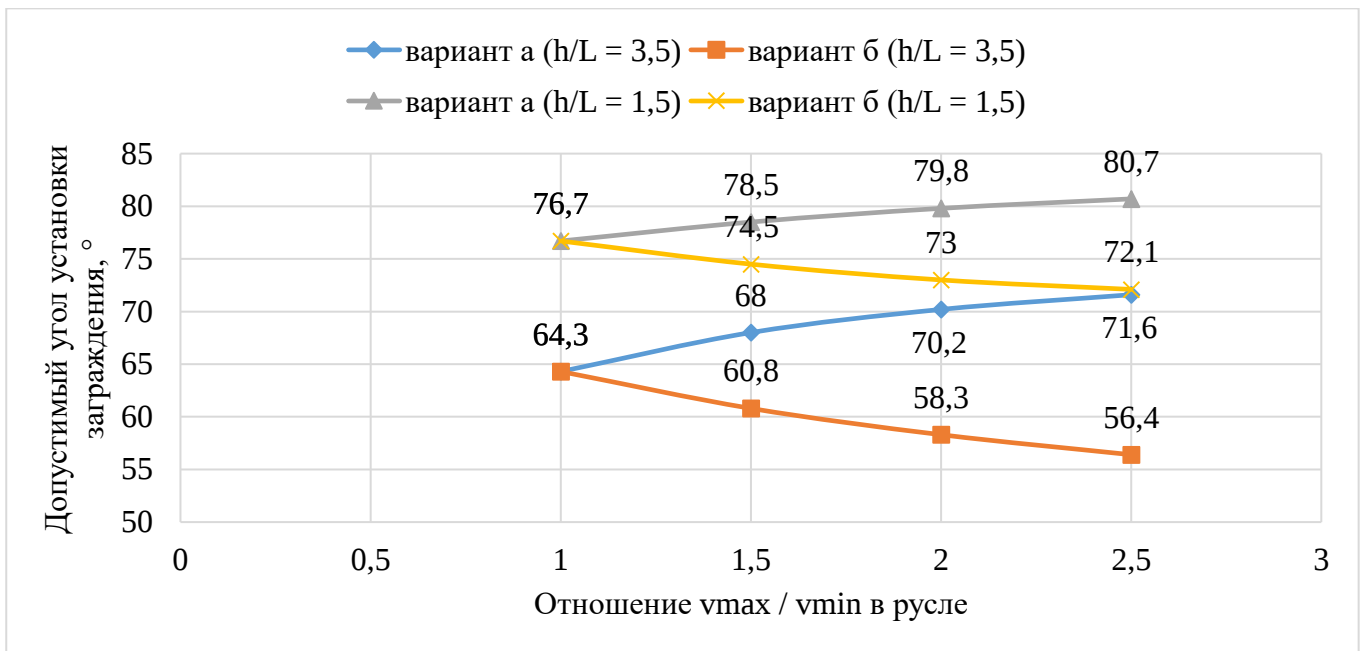


Рисунок 1 – Зависимость между допустимыми углами установки заграждения и распределением скоростей в русле v_{max} / v_{min} при различных отношениях глубины к ширине реки

Данная зависимость наглядно показывает, что для глубоких рек чем меньше запланированный угол установки, тем меньше будет и разница с фактическим углом установки. Для таких рек предпочтительнее устанавливать всплывающее боновое заграждение под углом $20^\circ - 40^\circ$ к направлению течения, при возможности его размещения на реке под таким углом. Максимально допустимый угол установки может достигать от 56° до 72° в зависимости от v_{max} / v_{min} .

При рассмотрении профиля русла неглубокой реки с отношением $h/L = 1,5$ установлено, что при снижении запланированного угла установки всплывающего бонового заграждения в отличии от глубоких рек разница с фактическим углом β не будет меняться. Это говорит о том, что для данных рек принимать малый угол установки не обязательно. Принимать угол установки для таких рек нужно в зависимости от береговых и русловых условий для размещения всплывающего заграждения и от скорости течения.

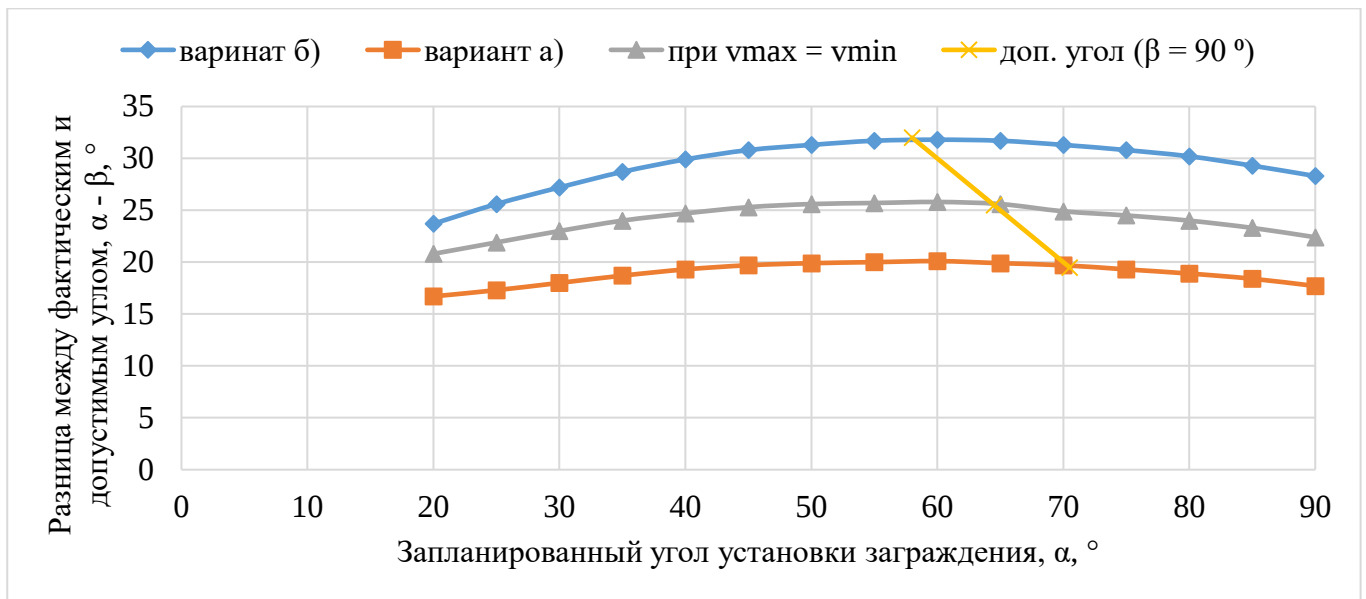


Рисунок 2 – Зависимость между запланированным α и разницей между фактическим и запланированным углом, $\alpha - \beta$ для глубокой реки с отношением $h/L = 3,5$

В работе выполнен расчет по определению допустимой толщины льда, достаточной, чтобы он не разрушился при всплытии бонового заграждения, для исключения перемешивания льда и нефти, установлена зависимость между толщиной льда и диаметром камеры плавучести заграждения. Для льдов толщиной менее 2,7 см рекомендуется не уменьшать диаметр камеры плавучести менее 15 см, так как тогда заграждение будет иметь слишком малый надводный борт, эффективно применять дополнительные пригрузки, прикрепленные вдоль всего бонового заграждения. Для льдов толщиной менее 0,5 - 1,0 см предлагается допустить его разламывание при всплытии заграждения, а также очистить пространство перед боновым заграждением.

Предлагается установку всплывающих боновых заграждений сделать обязательной на ответственных переходах нефтепроводов через реки, в случае аварии которых будут затронуты объекты, обладающие большой экологической ценностью, например водозаборные сооружения. Кроме того, их установка может предусматриваться на переходах нефтепроводов через реки в ряде случаев на усмотрение эксплуатирующей организации, например для старых нефтепроводов с высоким риском аварийной утечки нефти.

3. Совершенствование способа установки бонового заграждения с использованием несущего каната

Существующих решений по установке боновых заграждений на реках довольно мало. Способ их установки на реках, как правило, сводится к тому, что собранное в плетъ боновое заграждение закрепляют на одном берегу, протаскивают через реку и далее закрепляют на другом берегу. Данная схема рекомендована при ширине зеркала воды до 50 м. Для более широких рек регламентируются разные варианты установки заграждений, например в несколько рубежей. Однако данный способ имеет свои недостатки, связанные с прочностью элемента продольного натяжения ограждения, а также с вероятностью образования «карманов» при его установке. В руководстве по эксплуатации надувных боновых заграждений УЖ-2М при длине секций более 100 м и скорости течения более 1 м/с предписывается применение несущего каната.

При исследовании существующих решений по установке боновых заграждений вдоль несущего каната выявлено, что в них описывается установка со значительными провисаниями каната, что осложняет дальнейшее перемещение секций бонового заграждения вдоль него. Кроме того, само крепление бонового заграждения к несущему канату осуществляется с помощью кольца, что вызывает повышенное трение при его перемещении.

С целью исключения данных недостатков был усовершенствован способ, при котором снижается провисание несущего каната за счет использования предварительного натяжения лебедкой и снятия нагрузки с нее с помощью тисков. Кроме того, изменяется крепление поводков к несущему канату на роликовые блоки, обладающие меньшим трением.

В третьей главе приводятся результаты определения оптимальных параметров установки боновых заграждений на реках с учетом экспериментальных исследований.

При установке бонового заграждения через реку неизбежно произойдет прогиб заграждения, связанный с тем, что в момент начала его крепления к опоре оно будет не в виде прямой линии, а будет иметь незначительный изгиб, кроме того, за время

крепления к опоре оно также переместится течением, а уже после крепления к опоре удлинится под действием нагрузки от течения.

Величину удлинения бонового заграждения можно определить по формуле

$$\Delta l = a + b + c, \quad (3)$$

где a – удлинение элемента продольного натяжения бонового заграждения (троса);

b – величина перемещения переднего конца плети бонового заграждения за время его крепления к опоре;

c – разница между длиной плети заграждения в момент начала его крепления за опору и длиной по геометрической прямой между опорами.

На основании проведенных экспериментов в формулу (3) можно добавить длины $a_{дон}$, $c_{дон}$, что позволит определить величину удлинения Δl при неблагоприятных сценариях установки, связанных с неслаженной работой персонала при установке боновых заграждений.

При определении Δl стоит отметить, что она будет разной для варианта начала установки с крутого и пологого берега из-за значения b в формуле (3). По значению Δl можно определить полную длину бонового заграждения $l_{полн}$. После чего можно определять расстояние l_R от берега до точки изгиба заграждения по оси приложения сосредоточенной нагрузки от течения (Рисунок 3).

Расстояние до оси, на которой располагается сосредоточенная нагрузка от течения, можно определить по формуле

$$l_R = x_c \cdot \sin \alpha, \quad (4)$$

где x_c – расстояние до центра распределенной нагрузки от течения q_x и q_y (Рисунок 3), которое можно определить по формуле

$$x_c = \frac{\sum A_i \cdot x_i}{\sum A_i} = \frac{\sum (q_x)_i \cdot L_i \cdot x_i + q_y \cdot f \cdot x_y}{\sum (q_x)_i \cdot L_i + q_y \cdot f}, \quad (5)$$

где A_i – площади единичных фигур (прямоугольников) от распределенных скоростей q_x и q_y ;

x_i – расстояние от крутого берега (точка 0 на Рисунке 3) до центра единичных фигур (прямоугольников) от распределенных скоростей q_x ;

x_y – расстояние от крутого берега (точка 0 на Рисунке 3) до центра приложения распределенной нагрузки q_y .

f – прогиб заграждения, определяется по формуле

$$f = 0,87 \sqrt{\left(\frac{l_{\text{полн}}}{2}\right)^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2}. \quad (6)$$

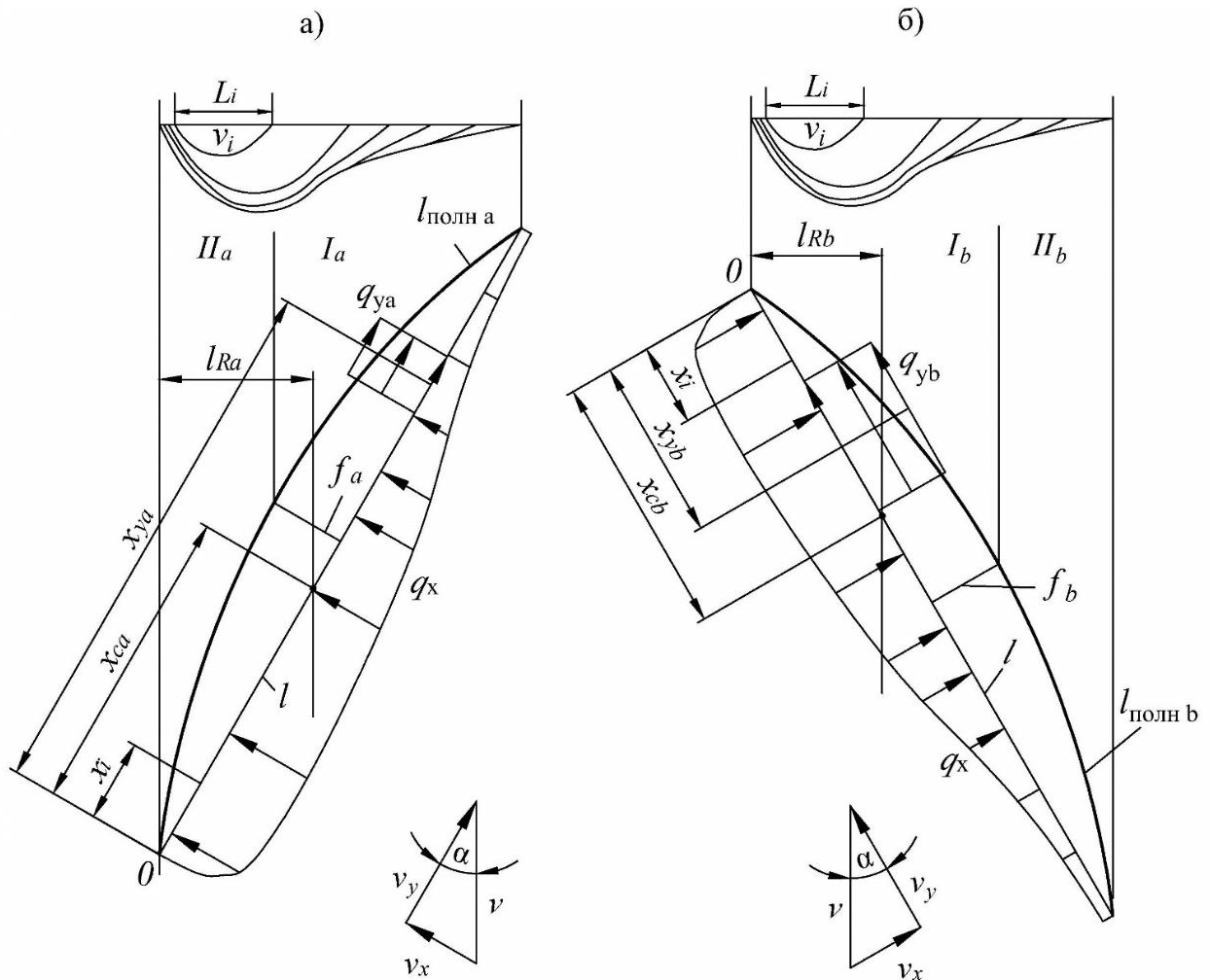


Рисунок 3 – Распределение нагрузок на боновое заграждение от действия течения

а) при установке с крутого берега; б) при установке с пологого берега

По положению точки изгиба заграждения определяется фактический угол установки заграждения β , и если он больше 90° , то образуется «карман», т.е. – это недопустимый угол установки (Рисунок 4).

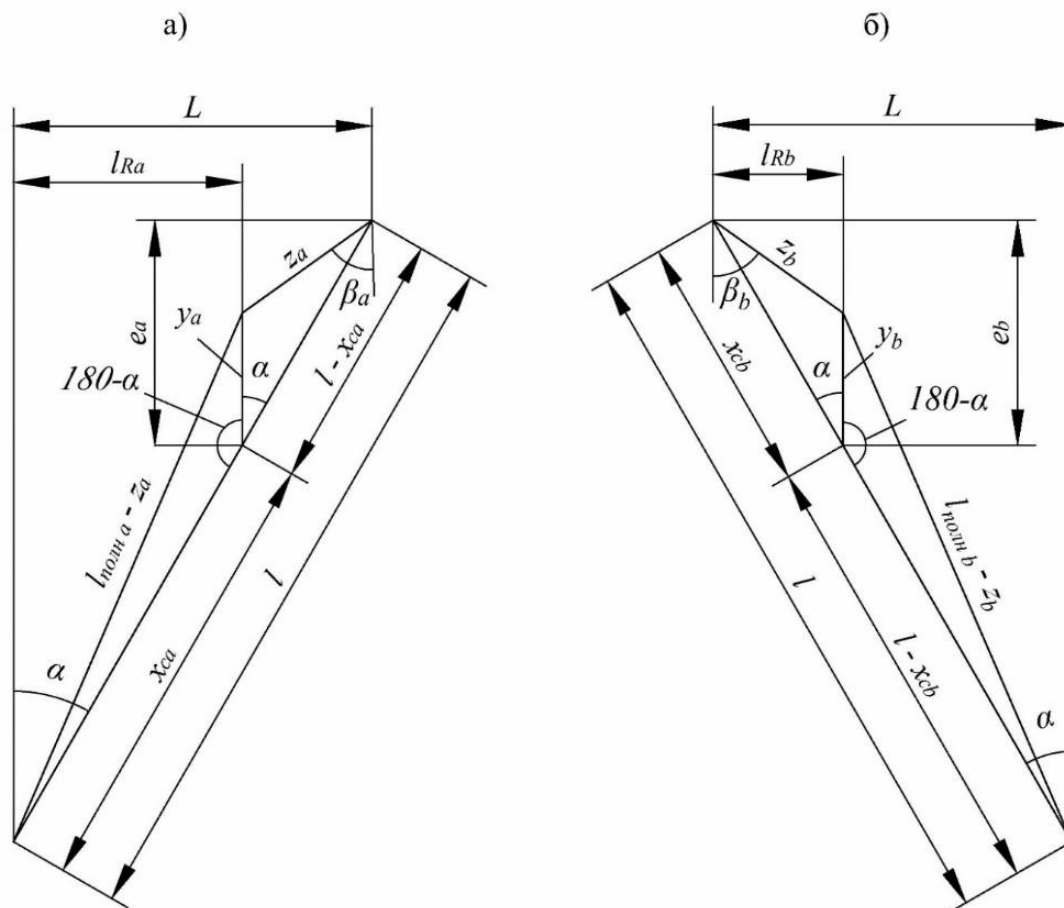


Рисунок 4 – Схема по определению точки изгиба бонового заграждения
а) при установке с крутого берега; б) при установке с пологого берега

Была исследована зависимость между запланированным углом α и фактическим β при $v_{max} / v_{min} = \text{const} = 1,5$; $v_{max} = 1,5$; $L = 25$ м, результаты которой представлены на Рисунке 5.

На основании данной зависимости можно сделать вывод, что чем меньше угол установки заграждения планируется, тем больше будет разница между фактическим и запланированным углом, а это значит, что при малом угле установки заграждения оно будет в большей части идти вдоль берега и перекроет русло только в конце по ходу течения. Кроме того, видно, что при запланированном угле установки α , равным 15 градусам, находится точка излома графика – экстремум, что говорит о том, что ниже данного угла не эффективно устанавливать боновое заграждение, так как фактический угол β останется таким же или начнет увеличиваться.

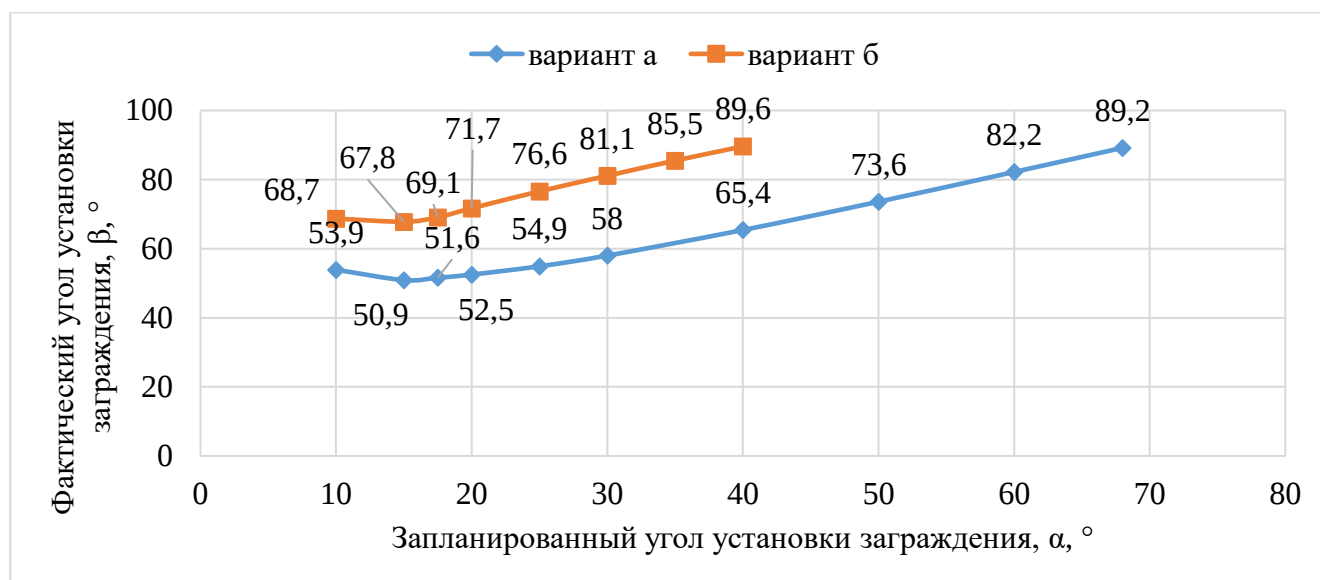


Рисунок 5 – Зависимость между запланированным и фактическим углом установки бонового заграждения

Для определения минимально допустимых углов установки боновых заграждений на реках были построены аналогичные с рисунком 5 графики зависимости и для других исходных данных. Для каждого из них определялся угол, который соответствовал экстремуму графика. Эти углы и являются минимально допустимыми углами установки заграждений на реках. Были составлены зависимости между минимально допустимыми углами установки боновых заграждений на реках от распределения скоростей течения в русле реки v_{max} / v_{min} , ширины реки L и максимальной скорости течения v_{max} . Данные зависимости приведены на Рисунках 6, 7.

На основании приведенных зависимостей следует, что минимально допустимый угол установки боновых заграждений практически не зависит от ширины реки L , распределения скоростей течения v_{max} / v_{min} и выбора берега для начала установки заграждений, а зависит только от максимальной скорости течения в русле v_{max} . Определено, что минимально допустимый угол установки боновых заграждений на реках лежит в диапазоне от 11 до 20 градусов по отношению к направлению течения реки.

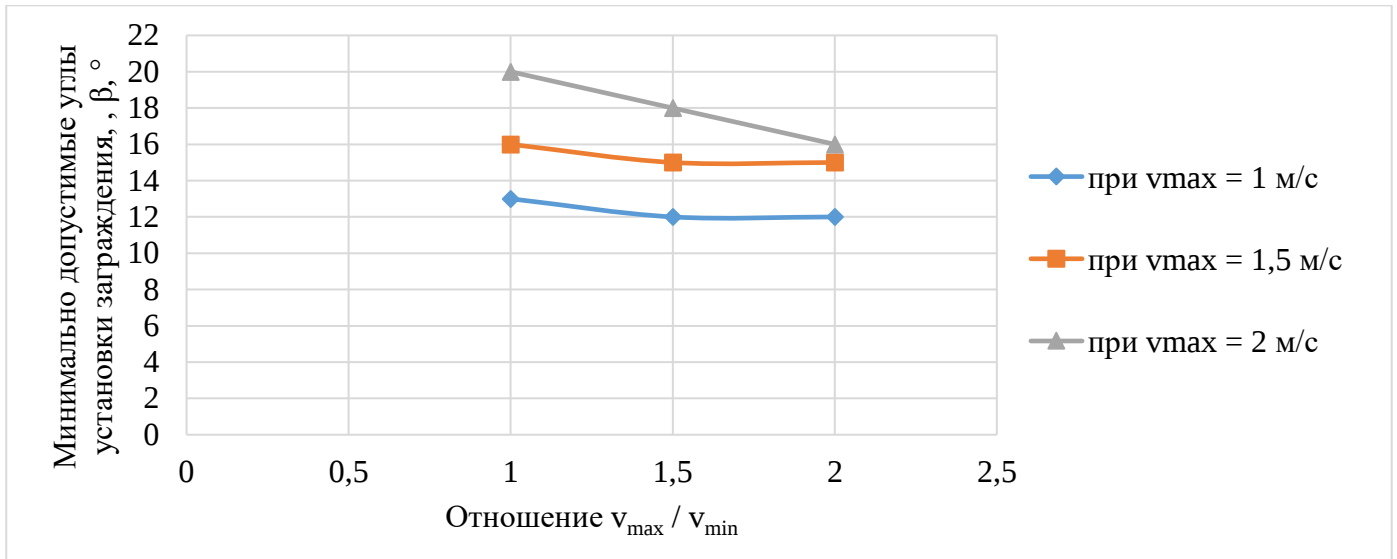


Рисунок 6 – Зависимость между минимально допустимыми углами установки боновых заграждений от распределения скоростей в русле $v_{\max} / v_{\min}$

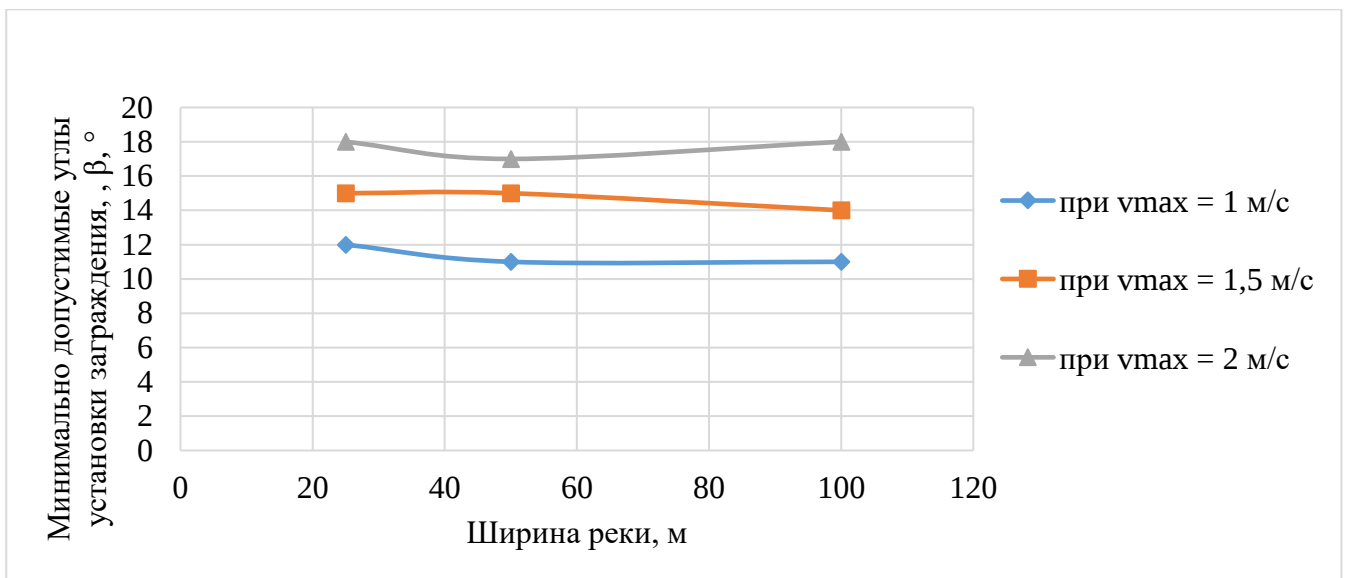


Рисунок 7 – Зависимость между минимально допустимыми углами установки боновых заграждений от ширины русла реки

Если опираться на существующие рекомендации по углам установки боновых заграждений относительно скорости течения, то при высоких скоростях течения они предлагают слишком малые углы установки боновых заграждений, так как не учитывают прогиб заграждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ существующих методов и технических средств для локализации аварийных разливов нефти на подводных переходах нефтепроводов через реки. Разработана модель бонового заграждения с внутренним каркасом пружинного типа, которая обладает несминаемым каркасом, препятствующим переливу нефти через верхнюю часть бонового заграждения при локализации аварийных разливов нефти из трубопроводов, резервуаров и других емкостей на реках. При анализе удерживающей способности всплывающих боновых заграждений, устанавливаемых на подводных переходах нефтепроводов через реки выявлено, что они имеют малую высоту подводной части, для чего было внедрено гибкое полотнище в нижней части заграждения. Усовершенствован способ установки бонового заграждения вдоль несущего каната, где для облегчения процесса перемещения бонового заграждения вдоль несущего каната добавляется его предварительное натяжение, а также внедряются роликовые блоки, снижающие трение до 5 раз. Анализ величины натяжения несущего каната показал, что экспериментальные значения нагрузки от течения ниже расчетных на величину до 17 %, что можно объяснить такими факторами, как погрешностями при измерении скорости течения в русле реки.

2. Получена зависимость величины допустимого угла установки всплывающих боновых заграждений, установленных на подводных переходах нефтепроводов через реки от отношения глубины к ширине реки, расположения точек крепления заграждения к опорам относительно направления течения и ее скорости. Максимально допустимый угол их установки составляет от 55° до 80° по отношению к направлению течения реки в зависимости от комбинации данных факторов. Разработаны рекомендации по установке всплывающих боновых заграждений с определенным диаметром камеры плавучести в зависимости от толщины ледового покрова. Например, для диаметра камеры плавучести 0,15 м толщина льда должна быть не менее 0,027 м, иначе лед будет разрушен.

3. Для не всплывающих боновых заграждений установлена зависимость допустимого угла их установки от выбранного берега для начала их развертывания, ширины и распределения скоростей течения по руслу реки. Определено, что минимально допустимый запланированный угол установки не всплывающих боновых заграждений в зависимости от комбинации данных факторов составляет от 11° до 20° по отношению к направлению течения реки, так как при меньших его значениях из-за прогиба заграждения значительно увеличивается фактический угол установки. Расчетами определено и подтверждено экспериментально, что предпочтительнее начинать установку боновых заграждений на реках с крутого берега, так как при этом длина плети будет меньше, чем при начале установки с пологого берега, что уменьшает фактический угол установки заграждения и риск образования недопустимых «карманов».

Основные результаты работы опубликованы в следующих научных трудах:

В ведущих рецензируемых журналах и изданиях, утверждённых ВАК РФ:

1. Хайруллин Д.Р., Султанмагомедов С.М. Разработка всплывающего бонового заграждения, способного работать в ледовых условиях на реках // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2020. – №2. – С. 19-23.

2. Хайруллин Д.Р. [и др.] Разработка новых методов защиты склонов от водной эрозии // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2020. – №5-6. – С. 67-70.

3. Хайруллин Д.Р., Султанмагомедов С.М. Совершенствование всплывающего бонового заграждения, способного работать в ледовых условиях на реках // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2024. – №1. – С. 105-117.

В изданиях, индексируемых в базе данных Scopus и/или Web Of Science:

4. Султанмагомедов С.М, Хайруллин Д.Р., Кунафин Р.Н. Разработка бонового заграждения с внутренним каркасом пружинного типа / Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР, 2021. – С.105-114.

5. Хайруллин Д.Р., Султанмагомедов С.М., Султанмагомедов Т.С. Выбор берега при установке боновых заграждений на реках / Экология и промышленность России. – 2023. – Т.27. – №8. – С. 22-26.

6. Хайруллин Д.Р., Султанмагомедов С.М., Хасанов Р.Р. Разработка способа установки бонового заграждения через реку при быстром течении / Экология и промышленность России. – 2024. – Т.28. – №2. – С. 19-25.

По результатам исследований получены патенты на следующие РИД:

1. Пат. 213645 Рос. Федерация. МПК E02B 15/06, E02B 15/04. Секция бонового заграждения [Текст] / Хайруллин Д.Р., Султанмагомедов С.М., Султанмагомедов Т.С.; заявитель и патентообладатель Хайруллин Д.Р. – №2022103534; заявл. 11.02.2022; опубл. 21.09.2022, Бюл. №27. – 6 с.

2. Пат. 2809239 Рос. Федерация. МПК E02B 15/06, E02B 15/04. Способ установки бонового заграждения [Текст] / Хайруллин Д.Р., Султанмагомедов С.М., Султанмагомедов Т.С.; заявитель и патентообладатель Хайруллин Д.Р. – №2023103292; заявл. 08.10.2022; опубл. 28.11.2023, Бюл. №34. – 7 с.