

*На правах рукописи*



ДЕМИРОВ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ  
НЕФТЕПРОДУКТООБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СБОРНО-  
РАЗБОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

Специальность: 2.8.5.— Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

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

Уфа 2026

Работа выполнена на кафедре «Транспорт и хранение нефти и газа» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
**Мастобаев Борис Николаевич**

Официальные оппоненты:

**Неганов Дмитрий Александрович**

доктор технических наук

ООО «НИИ Транснефть» / первый  
заместитель генерального директора

**Мокроусов Алексей Сергеевич**

кандидат технических наук

Научно-исследовательский институт

(военно-системных исследований МТО ВС

РФ) Военной академии МТО им. Генерала

армии А.В. Хрулёва / начальник 1 управления

организации материально-технического  
обеспечения

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Тюменский индустриальный  
университет» (г. Тюмень)

Защита состоится 18 июня 2026 года в 14:00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 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 государственный нефтяной технический университет» и на сайте [http:// rusoil.net](http://rusoil.net) .

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Ташбулатов Радмир Расулевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертационного исследования** обусловлена необходимостью повышения устойчивости и функциональной эффективности полевых трубопроводных систем обеспечения топливом в условиях современных военных угроз и возрастающих требований к надежности инфраструктуры нефтепродуктообеспечения. Современные вооруженные конфликты характеризуются высокой плотностью огневого воздействия, широким применением высокоточного оружия, беспилотных летательных аппаратов и скрытных диверсионных средств поражения инфраструктурных объектов. В таких условиях традиционная линейная архитектура полевых магистральных трубопроводов (ПМТ), основанная на последовательном соединении участков, демонстрирует критическую уязвимость: повреждение всего одного звена приводит к прекращению функционирования всей системы. Альтернативные способы доставки горючего – автомобильный, железнодорожный и воздушный транспорт – не обеспечивают требуемую пропускную способность при масштабных операциях и одновременно характеризуются повышенной уязвимостью, зависимостью от дорожной инфраструктуры и более значительными эксплуатационными затратами. Следовательно, надежность обеспечения бесперебойной подачи топлива требует совершенствования не только средств и техники, но и самой архитектуры полевых трубопроводных систем.

Особую актуальность приобретает переход от линейной к сетевой структуре сборно-разборных трубопроводов (СРТ) с функциональным резервированием потоков топлива. Такая архитектура позволяет сохранять работоспособность системы при частичном разрушении ее элементов за счет перераспределения потоков топлива и наличия альтернативных маршрутов транспортировки. Дополнительным направлением возможного повышения эффективности является увеличение пропускной способности трубопроводов малого диаметра за счет применения агентов снижения гидравлического сопротивления – противотурбулентных (ПТП) / антифрикционных присадок (АФП). В условиях ограниченного материального ресурса и невозможности оперативного строительства лупингов данный подход позволяет увеличить объем перекачки без расширения линейной части.

Актуальность данной темы определяется также двойным назначением сетей сборно-разборных трубопроводов. Помимо военного применения, они широко используются при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, обеспечении населения водой и топливом в условиях разрушенной в результате военных действий, природных или техногенных чрезвычайных ситуаций инфраструктуры, а также при временных технологических схемах при ремонте и реконструкции линейных объектов нефтегазового комплекса. Таким образом, развитие

теоретических и прикладных основ проектирования и эксплуатации СРТ соответствует задачам обеспечения обороноспособности и устойчивости экономики страны.

**Степень разработанности проблемы.** Проблематика проектирования и эксплуатации СРТ имеет значительную историю научного и практического развития. Формирование научных основ трубопроводного обеспечения войск в СССР связано с деятельностью Управления снабжения горючим РККА и последующим развитием трубопроводных войск. Существенный вклад в развитие теории и практики полевых магистральных трубопроводов внесли исследования Никитина В.В., Швецова В.А., Мамыкина Н.И., Гладкого В.А., Акунина В.Г., Кузьмина В.Г., Абдурахманова Э.Ф., Горчакова В.А., Каграманьяна Б.Р., Германовича П.К., Шеина К.Г., Середы В.В., Данильченко И.Г., Мельникова Д.И., Шахраманьяна М.А., Браткова А.А., Дроздова Д.А., Белякова А.М., Юденичева В.В., Кузнецова И.И., Кузнецова А.И., Михайлова В.В., Коваленко В.Г., Егорова Н.Т., Комарова Л. Д., Михайлова В.В., Татлыева Р.Д., Мокроусова А.С., Квашнина Б.С., Кострикина В.Д., Баранца Ю.Г., Козулева В.А., Рыбакова Ю.Н., Михеева Ю.М., Суярова А.С., Варнакова В.В., Варнакова Д.В., Усина В.В. и др. специалистов в области военной логистики и трубопроводного транспорта. Значительная часть этих работ посвящена историческому анализу применения сборно-разборных трубопроводов в период Великой Отечественной войны, в том числе при обеспечении блокадного Ленинграда, а также в последующих военных конфликтах, включая Афганистан. Исследования вышеуказанных авторов позволили сформировать представление о тактико-технических возможностях линейных ПМТ и их роли в системе материально-технического обеспечения. Подробно освещены аспекты развития трубопроводных войск страны и технические характеристики существующих систем. Вопросы живучести линейных трубопроводных систем исследовались в трудах В.В. Никитина и Б.Р. Каграманьяна, где обосновывалась необходимость их защиты от воздействий противника. За рубежом вопросы оперативного трубопроводного снабжения получили развитие в работах, посвященных военной логистике США и стран НАТО, включая анализ эксплуатации временных трубопроводных систем при обеспечении операций в Европе и на Ближнем Востоке.

Оценке гидравлической эффективности трубопроводов и применению противотурбулентных присадок посвящены фундаментальные исследования Г.И. Баренблатта, А.Х. Мирзаджанзаде, М.Д. Миллионщикова, И.Л. Повха, М.В. Лурье и других представителей отечественной школы. Практические аспекты использования противотурбулентных присадок в магистральных трубопроводах рассматривались в работах Алиева Р.А., Абдусаламова А.В., Амфилохиева В.Б., Анисимова И.А., Асланова П.В., Баренблатта Г.И., Бахтизина Р.Н., Белоусова Ю.П., Блейхера Э.М., Булиной И.Г., Валиева М.И., Васецкой В.А., Гареева М.М., Гольдштика М.А.,

Голунова Н.Н., Горина Я.Я., Городцова В.А., Грешилова Е.М., Григоряна С.С., Гумерова А.Г., Ерошкиной И.И., Жолобова В.В., Иванюты Ю.Ф., Иоселевича В.А., Калашникова В.Н., Кобец Г.Ф., Манжая В.Н., Марона В.И., Мастобаева Б.Н., Мацкина Л.А., Муратовой В.И., Несына Г.В., Нечваля А.М., Новоселова В.Ф., Пилипенко В.Н., Пименова О.В., , Прохорова А.Д., Ревель-Муроза П.А., Седова В.А., Станева В.С., Ступина А.Б., Чекаловой Л.А., Челинцева С.Н., Челинцева Н.С., Черникина А.В., Шаммазова А.М., Шварца В.М., Шибаета В.П., Юфина В.А. и многих других. На основе работ этих авторов были сформированы комплексная теоретическая база и практические методы проведения инженерных расчетов для решения задач проектирования и эксплуатации трубопроводов с применением ПТП.

В то же время анализ существующих публикаций показывает, что по состоянию на сегодняшний день:

- не разработаны вопросы построения сетевых архитектур ПМТ с функциональным резервированием системно;
- отсутствуют достоверные математические модели количественной оценки живучести линейных и сетевых структур применительно к условиям ПМТ при высоких рисках боевого воздействия;
- не сформированы методологические основы для интеграции ПМТ в единую эшелонированную систему с магистральными продуктопроводами;
- применение противотурбулентных присадок в ПМТ малого диаметра и протяженности для военных систем исследовано фрагментарно.

Таким образом, несмотря на наличие значительного объема данных об исследованиях по отдельным направлениям, комплексная задача повышения эффективности ПМТ из СРТ на основе сочетания сетевой архитектуры и гидравлической интенсификации остается недостаточно разработанной, что определяет необходимость настоящего исследования.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема работы и содержание исследований соответствуют **пунктам 2 и 4** области исследований, определяемой паспортом специальности 2.8.5. – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»: «2. Научные основы системного комплексного (мультидисциплинарного) проектирования конструкций, прочностных, гидромеханических, газодинамических и теплофизических расчетов сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, подземных и наземных газонефтехранилищ, терминалов, инженерной защиты и защиты от коррозии, организационно-технологических процессов их сооружения, эксплуатации, диагностики, обеспечения системной надежности, механической и экологической безопасности» и «4. Методы и средства информационных технологий, моделирования, мониторинга, прогнозирования, интеллектуального

инжиниринга и управления, автоматизации и роботизации, стандартизации и цифровизации технологических процессов проектирования, сооружения, эксплуатации, диагностики, ремонта 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 с целью повышения эффективности, надежности и безопасности использования отраслевого потенциала и ресурса трубопроводных конструкций».

### **Цель диссертационной работы**

Целью работы является разработка научно обоснованных методов и средств повышения надежности и эффективности полевых магистральных трубопроводов из сборно-разборных конструкций на основе формирования сетевых архитектур с функциональным резервированием и применения противотурбулентных присадок для адаптивного регулирования пропускной способности в условиях боевых действий и чрезвычайных ситуаций.

**Основные задачи исследования.** Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

1. Выполнить системный анализ исторического опыта и современного состояния применения полевых магистральных трубопроводов в военных и гражданских условиях с выявлением ограничений линейных архитектур.

2. Разработать математическую модель количественной оценки живучести трубопроводных систем при различных конфигурациях с учетом вероятностного характера внешних воздействий.

3. Создать алгоритм проектирования сетевых структур полевых магистральных трубопроводов, учитывающий тактико-эксплуатационные ограничения эксплуатации и требования по обеспечению функционального резервирования.

4. Экспериментально обосновать эффективность применения противотурбулентных присадок для повышения пропускной способности сборно-разборных трубопроводов, отличающихся малым диаметром.

5. Разработать комплекс практических рекомендаций по техническому переоснащению трубопроводных подразделений и повышению эксплуатационной эффективности системы обеспечения горючим.

### **Научная новизна**

1. Методами математического моделирования обосновано, что сетевая архитектура полевых магистральных трубопроводов с функциональным резервированием потоков обеспечивает существенное повышение надежности по сравнению с линейной. Установлено, что увеличение числа резервируемых подсистем свыше четырех не дает значимого эффекта.

2. Предложен алгоритм проектирования сетевых трубопроводных структур, отличающийся от классического алгоритма Прима введением топологических ограничений, запрещающих прямое соединение однотипных вершин (источник–источник, потребитель–потребитель) для формирования множества альтернативных маршрутов транспортировки, исключения образования критических «узких мест» в виде единственных межгрупповых перемычек и повышения структурной устойчивости системы при локальных повреждениях.

**Теоретическая значимость** результатов исследования заключается в развитии научных основ для проектирования и эксплуатации полевых магистральных трубопроводов, как элементов распределенных сетевых систем, функционирующих в условиях повышенных внешних воздействий и ограничений по ресурсам. Разработанная математическая модель, основанная на использовании геометрического и отрицательного биномиального распределений, формирует количественный инструментарий оценки живучести трубопроводных конфигураций с учетом вероятностного характера повреждений и структурных особенностей системы. Предложенный подход позволяет перейти от описательной характеристики устойчивости линейных схем к формализованной оценке эффективности различных архитектур на стадии проектирования, что расширяет теоретические положения в области системной надежности трубопроводных конструкций. В работе уточнены и дополнены методы структурной оптимизации трубопроводных сетей. Модифицированный алгоритм построения сетевых конфигураций развивает прикладные аспекты теории графов с учетом функциональной неоднородности узлов (источников и потребителей), что обеспечивает корректное моделирование распределения потоков в системах специального назначения. Тем самым расширяется область применения классических алгоритмов минимальных остовных деревьев к задачам трубопроводного транспорта с требованиями резервирования. Существенное развитие получили теоретические представления о гидромеханических процессах в сборно-разборных трубопроводах малого диаметра. В частности, обоснована возможность корректного учета влияния противотурбулентных присадок на гидравлическое сопротивление в мобильных системах, что дополняет существующие модели турбулентного течения применительно к трубопроводам с ограниченным диаметром и переменными режимами работы. Разработанные теоретические положения формируют основу для перехода к концепции проектирования полевых магистральных продуктопроводов как адаптивных распределенных систем с функциональным резервированием и регулируемой производительностью. Данный подход расширяет научную базу строительства и эксплуатации трубопроводов в условиях повышенных рисков и создает предпосылки для дальнейшего развития методов системного анализа, моделирования и оптимизации трубопроводных архитектур.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в разработке и апробации комплекса инженерных решений, направленных на повышение эксплуатационной эффективности, пропускной способности и живучести полевых магистральных продуктопроводов в реальных условиях функционирования. В рамках исследования разработана передвижная перекачивающая насосная установка, оснащенная системой дозированного ввода противотурбулентных присадок, обеспечивающая увеличение пропускной способности трубопроводов малого диаметра без строительства лупингов и без замены линейной части. Применение данной установки позволяет оперативно адаптировать режимы перекачки к изменяющимся условиям эксплуатации и требованиям по объему подачи горючего. Разработаны практические рекомендации по формированию сетевых структур полевых магистральных трубопроводов с учетом рельефа местности, протяженности трасс, характера дислокации потребителей и вероятностных рисков повреждения участков. Предложенные решения могут быть использованы при планировании развертывания трубопроводных систем и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Создана трубомонтажная машина ТММ-100 с «револьверным» типом хранения и подачи труб, обеспечивающая механизацию процессов погрузки и монтажа. Внедрение данной конструкции позволяет увеличить темп развертывания трубопроводов в 1,5 раза, снизить трудозатраты и сократить время приведения системы в рабочее состояние. Разработаны методики гидравлического расчета полевых трубопроводов с учетом применения противотурбулентных присадок для различных видов горючего, позволяющие обоснованно определять режимы перекачки и прогнозировать прирост пропускной способности. Методики могут использоваться при проектировании, реконфигурации и эксплуатации сборно-разборных трубопроводных систем. Результаты исследования внедрены на практике при развертывании временных водопроводных систем на территории Республики Крым, при выполнении работ по ликвидации последствий природных пожаров, а также в деятельности трубопроводных подразделений войск. Практическая реализация полученных результатов работы подтверждает работоспособность предложенных технико-технологических решений.

Внедрение результатов диссертационного исследования подтверждено официальными актами организаций промышленного и образовательного профиля. В частности, комиссией ООО «БАЛТИКФЛЕКС» подтверждена эффективность использования разработанных в работе технических решений при формировании тактико-технических требований на комплект беспричальной заправки кораблей на рейде БЗКР-100Э, комплект многоцелевого плоскосворачиваемого трубопровода КМПТ-100-2,5. Результаты исследования внедрены в учебный процесс филиала Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева (г. Вольск) при преподавании дисциплин, связанных с проектированием,

сооружением и эксплуатацией магистральных трубопроводов, а также с основами нефтегазового дела, что подтверждает их методическую и прикладную ценность для подготовки специалистов трубопроводных войск. Кроме того, в ООО «НЕАТЕХ» положения и технические решения диссертации использованы при восстановлении рабочей конструкторской документации на комплект полевого магистрального трубопровода ПМТП-100, что свидетельствует о практической применимости разработанных подходов при модернизации и актуализации изделий трубопроводной техники.

Таким образом, результаты работы нашли реальное применение как в производственной деятельности профильных предприятий, так и в системе профессиональной подготовки кадров, обеспечивая их востребованность в задачах оборонного и гражданского назначения.

### **Методология и методы научного исследования**

Методология диссертационного исследования основана на системном подходе к анализу и синтезу полевых трубопроводных систем как сложных технических объектов, функционирующих в условиях внешних воздействий, ресурсных ограничений и изменяемых эксплуатационных режимов. В работе полевые магистральные трубопроводы рассматриваются как распределенные инженерные структуры, требующие учета конструктивных, гидравлических, организационно-технологических и вероятностных факторов. В процессе исследования использованы следующие методы:

- теоретический анализ отечественных и зарубежных научных публикаций, нормативно-технической документации и материалов практической эксплуатации трубопроводных систем;
- методы математического моделирования живучести трубопроводных конфигураций на основе расчетов вероятностных распределений, включая геометрическое и отрицательное биномиальное распределения, примененные для количественной оценки отказов и устойчивости системы;
- гидравлические расчеты режимов перекачки с использованием зависимостей типа Съенитцера-Марона для оценки изменения коэффициента сопротивления при введении противотурбулентных присадок;
- методы теории графов и элементы задачи Штейнера при разработке алгоритмов оптимальной трассировки и формирования сетевых архитектур с функциональным резервированием;
- экспериментальные исследования оценки эффективности применения противотурбулентных присадок на трубных и лабораторных установках с последующей статистической обработкой результатов;
- методы комплексного системного анализа и инженерного синтеза при формировании комплексной методологии для повышения надежности и эксплуатационной эффективности трубопроводных систем.

Экспериментальная достоверность данных и практическая значимость полученных результатов подтверждена опытом практического развертывания полевых трубопроводных систем в различных природно-климатических и эксплуатационных условиях, а также сопоставлением расчетных данных и фактических параметров работы.

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

1. Переход от линейной к сетевой архитектуре полевых магистральных трубопроводов с функциональным резервированием потоков обеспечивает кратное повышение живучести трубопроводной системы.

2. Модифицированный алгоритм проектирования сетевых структур, основанный на алгоритме Прима с учетом топологических ограничений на соединение однотипных узлов, обеспечивает формирование устойчивых конфигураций с множественными альтернативными маршрутами транспортировки и исключает образование критических одиночных перемычек, определяющих структурную уязвимость системы.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов и основных результатов подтверждается применением устоявшихся методов математического моделирования и численных исследований, подтвердивших высокую степень соответствия с теоретическими представлениями и успешно апробированных в процессе стратегических учений «Запад-2017», «Центр-2019» и «Кавказ-2020».

Результаты работы были представлены на межвузовской научно-практической конференции «Становление и развитие трубопроводных войск в системе материально-технического обеспечения» (г. Вольск, ВВИМО, 2020 г.), на XVIII Международной научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт-2023» (г. Уфа, УГНТУ), на XIX Международной научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2024», на XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса» (г. Москва, РГУНГ (НИУ) имени И.М. Губкина, 2025 г.), опубликованы в ведущих рецензируемых журналах. Разработанные решения рекомендованы к внедрению, акты внедрения прилагаются к диссертации.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 18 печатных работ, в том числе 3 из них – в ведущих рецензируемых изданиях перечня ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 1 монография, 2 тезиса в сборниках научно-практических конференций и 3 патента РФ.

**Объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения с основными выводами, списка использованных источников из 211 наименований; изложена на 174 страницах машинописного текста и содержит 74 рисунка и 20 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследований, приведены научная новизна и практическая значимость результатов работы.

**В первой главе** проведен комплексный анализ исторического опыта и современного состояния применения сборно-разборных магистральных трубопроводов в военных и гражданских целях. Рассмотрена эволюция трубопроводных технологий от первых образцов Великой Отечественной войны до современных систем.

Подробно описаны истоки развития сборно-разборных трубопроводов. Показано, что еще в 1933 году основатель службы горючего РККА комкор Мовчин Н.Н. предложил использовать разборные трубопроводы для подачи горючего войскам. В 1935 году в районе Армавира состоялись первые испытания полевого коллектора протяженностью 1,5 км. Особое внимание уделено героическому эпизоду Великой Отечественной войны – созданию Ладожского подводного бензопровода, по которому с июня 1942 по март 1943 года было подано 47,4 тыс. т горючего, что сыграло важную роль в разгроме немецко-фашистских войск на Ленинградском фронте.

Анализ зарубежного опыта показал массовое применение сборно-разборных трубопроводов союзниками в ходе Второй мировой войны. Особое место занимает операция «Плут» (Pipe-LinesUnderThe Ocean) – прокладка подводных трубопроводов через Ла-Манш для обеспечения войск союзников горючим. К маю 1945 года по «Плут» было перекачено 781 млн литров топлива.

Подробно рассмотрен опыт применения сборно-разборных трубопроводов в Афганской войне. Созданная в 1982 году 276-я трубопроводная бригада развернула две трубопроводные системы общей длиной около 1000 км, включавшие 13 складов горючего общим объемом более 160 тыс. м<sup>3</sup>. Самый сложный участок проходил через перевал Саланг на высоте 3878 м над уровнем моря.

Рассмотрено совместное применение магистральных нефтепродуктопроводов (МНПП) и полевых магистральных трубопроводов (ПМТ). На примере стратегических учений «Запад-2017» и «Кавказ-2020» показана эффективность интеграции стационарных и полевых трубопроводных систем. Разработана концепция единой эшелонированной трубопроводной сети с возможностью оперативного перераспределения потоков при повреждении участков.

Проанализирован опыт применения сборно-разборных трубопроводов для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Приведены конкретные примеры: развертывание 7,5 км трубопровода ПМТП-150 для тушения лесных пожаров в Забайкалье (2001 г.), применение при ликвидации Чернобыльской аварии, где тремя трубопроводными ротами было подано 114 тыс. т воды.

Показано использование сборно-разборных трубопроводов в нефтегазовом комплексе. Представлены характеристики четырех нефтепроводов, сооруженных из оборудования комплектов ПМТ в сложных климатических условиях: «Талакан–Витим» (110 км), «Мусюршор–Сандивей» (50,5 км), «Яракта–Верхнемарково» (112 км) и «Дулисьма–Яракта» (78,3 км).

Особое внимание уделено применению сборно-разборных трубопроводов для обеспечения водой населения Республики Крым после закрытия Украиной Северо-Крымского канала. В 2020 году во исполнение решения Президента РФ было развернуто 15 линий трубопровода общей протяженностью 819 км для наполнения Симферопольского водохранилища.

В заключение главы представлен сравнительный анализ сборно-разборных трубопроводов РФ, США и ФРГ, который показывает, что отечественные системы обладают преимуществами по темпам монтажа, надежности и адаптивности к различным климатическим условиям.

На основе систематизации фактического материала выявлен системный недостаток традиционных подходов: линейная архитектура полевых магистральных трубопроводов обладает критической уязвимостью к современным средствам поражения (высокоточное оружие, БПЛА, диверсионные средства), поскольку повреждение даже одного участка приводит к полному прекращению функционирования всей системы. Это обусловило необходимость поиска принципиально новых архитектурных и технологических решений.

**Во второй главе** показано, что классические понятия надежности, базирующиеся на теории случайных отказов и стационарных эксплуатационных нагрузках, не в полной мере отражают специфику функционирования трубопроводных систем в условиях целенаправленного боевого воздействия рационального противника (Таблица 1).

Проведенный анализ выявил неадекватность классических подходов, ориентированных на оценку безотказности при случайных, стохастических нагрузках (коррозия, усталость металла, температурные деформации), к условиям современных вооруженных конфликтов. В диссертации строго разграничены эти понятия: если надёжность описывает пассивное сопротивление системы случайным отказам, то живучесть характеризует её способность противостоять целенаправленному, адаптивному воздействию рационального противника, который целенаправленно выявляет и поражает наиболее уязвимые структурные элементы. На этой базе введено и формализовано определение живучести как свойства распределённой сетевой системы сохранять или восстанавливать в установленные сроки заданную функциональность транспортировки за счёт функционального резервирования и оперативной перемаршрутизации потоков при локальных повреждениях.

Таблица 1 – Сравнительный анализ задач проектирования линейных и сетевых трубопроводов

| Основная цель                  | Минимизация длины и стоимости строительства                        | Максимизация живучести и надежности                                           |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Критерии оптимизации           | Стоимость, гидравлическое сопротивление, энергозатраты             | Надежность, ремонтпригодность, гибкость, устойчивость к повреждениям          |
| Топология                      | "Точка-точка" с минимальным количеством ответвлений                | Многосвязная сеть с замкнутыми контурами и альтернативными маршрутами         |
| Методы расчета                 | Динамическое программирование, классические гидравлические расчеты | Задача Штейнера, теория графов, вероятностные модели живучести                |
| Гидравлические особенности     | Простые однозначные зависимости потока от перепада давления        | Сложное распределение потоков по ветвям сети с возможностью перераспределения |
| Требования к ремонтпригодности | Локализация повреждений на конкретном участке                      | Возможность перераспределения потоков при повреждении любого участка          |
| Тактические характеристики     | Высокая уязвимость к точечным ударам                               | Устойчивость к множественным повреждениям                                     |

Для количественной оценки живучести разработана оригинальная вероятностно-статистическая модель, учитывающая характер угроз и архитектурные особенности системы. Для традиционной линейной конфигурации полный отказ описывается геометрическим распределением, где отказ фиксируется уже при первом успешном поражении любого сегмента трассы. Для сетевой структуры, состоящей из  $m$  функционально независимых и равнозначных подсистем, вероятность полного поражения системы моделируется отрицательным биномиальным распределением, поскольку отказ наступает только при одновременном выведении из строя всех резервированных ветвей. В модель вероятности попадания для одной атаки интегрирована система коэффициентов боевой уязвимости:

$$p = p(\text{Зона}) \cdot k_{\text{СП}} \cdot k_{\text{маск}}$$

где  $p(\text{Зона})$  — базовая вероятность поражения, зависящая от зоны развёртывания (расстояния от линии боевого соприкосновения, ЛБС);

$k_{\text{СП}}$  — поправочный коэффициент типа средства поражения;

$k_{\text{маск}}$  — поправочный коэффициент маскировки трубопровода.

Предложенная модель позволяет дифференцировать риски в зависимости от удаления от линии боевого соприкосновения, типа применяемого средства и степени маскировки или заглубления трубопровода. Численные расчёты вероятности поражения всей трубопроводной системы от числа атак продемонстрировали качественный скачок устойчивости: переход от линейной схемы к сети с четырьмя резервированными подсистемами увеличивает количество

необходимых прицельных воздействий для гарантированного отказа системы (например, с вероятностью 0,99) более чем в 10 раз (Рисунок 1).

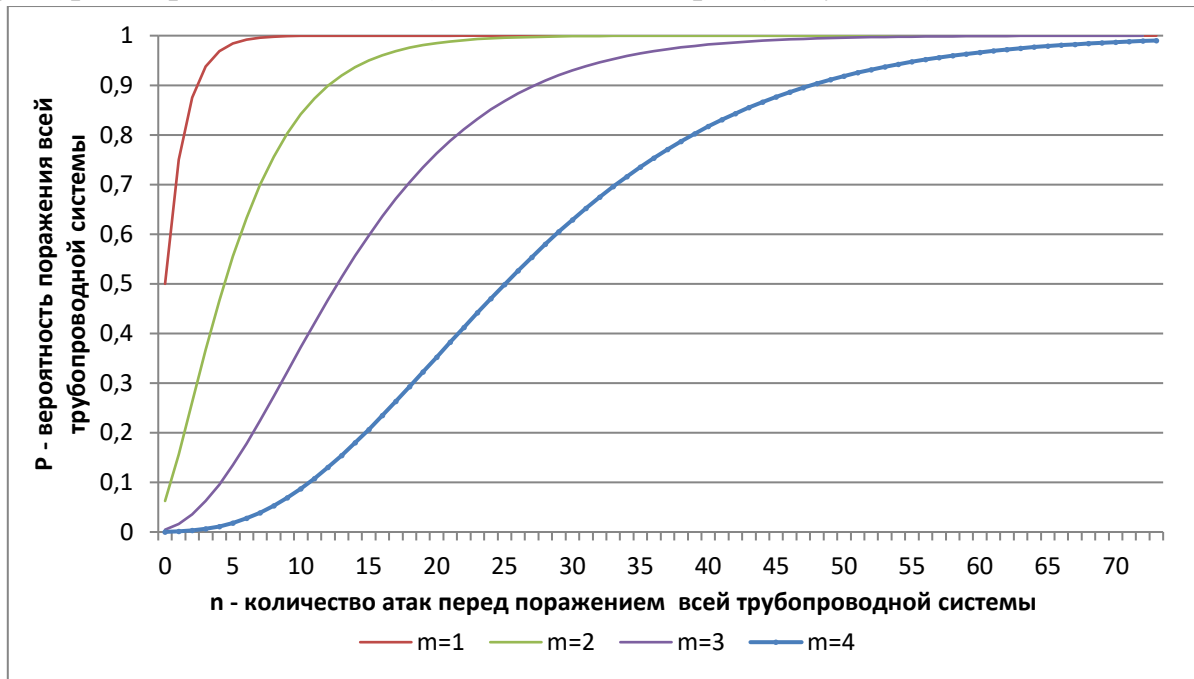


Рисунок 1 – Функции распределения вероятности поражения трубопроводной системы для  $m = 1$ ;  $m = 2$ ;  $m = 3$ ;  $m = 4$  независимых подсистем

По Рисунку 1 можно заметить, что область, ограниченная между графиком функции вероятности поражения всей трубопроводной системы от числа атак и единиц (по сути это сумма вероятностей «непоражения» трубопроводной системы) не зависит от числа атак и она пропорциональна живучести трубопроводной системы. Однако видно, что при увеличении числа подсистем эта область будет кратно увеличиваться, но их увеличение снизит эффективность использования каждой подсистемы. Поэтому для сравнения удобно использовать удельный показатель: область приходящаяся на единицу количества подсистем. При этом стоит отметить, что в условиях функционального резервирования расход в каждой подсистеме для эффективного использования каждой подсистемы также пропорционален их количеству. Трубопроводный коридор, по которому перекачивается малый объем жидкости не эффективен. Поэтому в качестве сравнения был выбран параметр, который показывает отношение суммы вероятности «непоражения» трубопроводной системы на квадрат количества подсистем:

$$Ж = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (1 - F(n))}{m^2}$$

Полученные результаты количественно подтверждают значительное повышение живучести трубопроводной системы при переходе к сетевой архитектуре с функциональным резервированием (Рисунок 2).

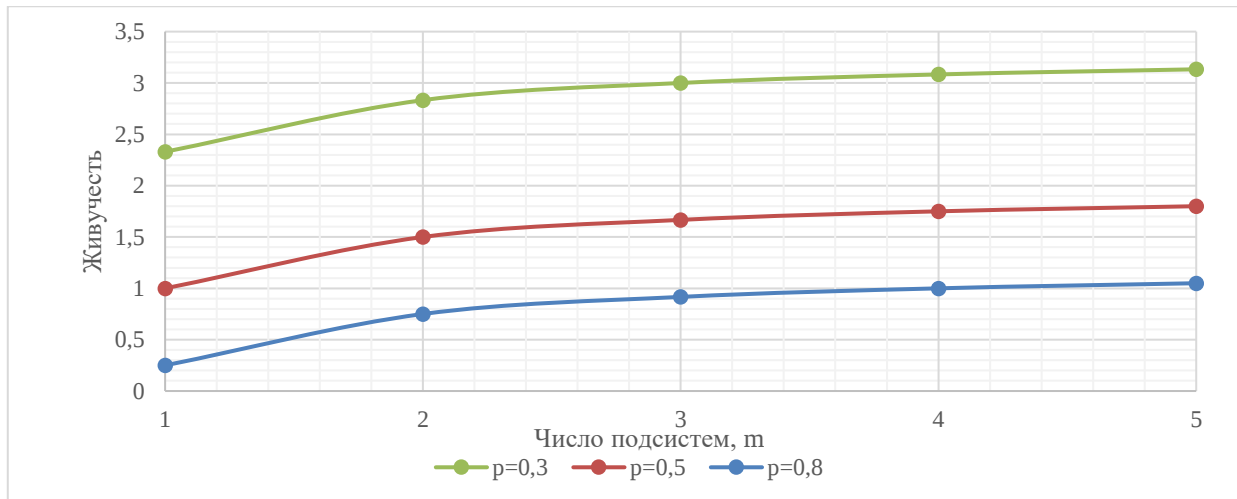


Рисунок 2 – Живучесть для трубопроводных систем с различным количеством резервирования и различной вероятностью отказа

Результаты расчетов показывают, что повышать количество подсистем более 4 не имеет смысла, так как приращение живучести становится невелико.

В части топологической оптимизации проведён критический анализ существующих алгоритмов трассировки. Установлено, что классические методы поиска кратчайших путей (волновой алгоритм Ли, алгоритмы Дейкстры и A\*) и приближённые решения задачи Штейнера (в частности, алгоритм Мельхорна) неприменимы в военных условиях, поскольку трактуют источники и потребители горючего как равнозначные вершины графа. Это приводит к формированию структур с единственной критической «перемычкой» между группами узлов, разрушение которой мгновенно парализует всю систему снабжения (Рисунок 3 – слева).

Для устранения данного недостатка разработан модифицированный алгоритм проектирования на основе алгоритма Прима с введением жёстких топологических ограничений (Рисунок 4). Математически из множества допустимых рёбер полностью исключаются связи типа «источник–источник» и «потребитель–потребитель». Алгоритм принудительно формирует соединения через промежуточные узлы местности, что генерирует избыточную сеть с множественными альтернативными маршрутами, равномерно распределяет гидравлические нагрузки и полностью исключает образование структурных «узких мест» (Рисунок 3 – справа).

Практическая реализация предложенной методологии обеспечена разработкой комплексной методики учёта топографических, эксплуатационных и тактических параметров при проектировании. В весовую функцию графа местности интегрированы факторы уязвимости от обстрела, доступности для ремонтных бригад, перепадов высот и необходимости гидравлической балансировки разветвлённой сети. Обосновано применение полевых эластичных резервуарных

парков в ключевых узлах сети как буферных ёмкостей, обеспечивающих непрерывность подачи топлива на период ликвидации повреждений (до 3 суток).

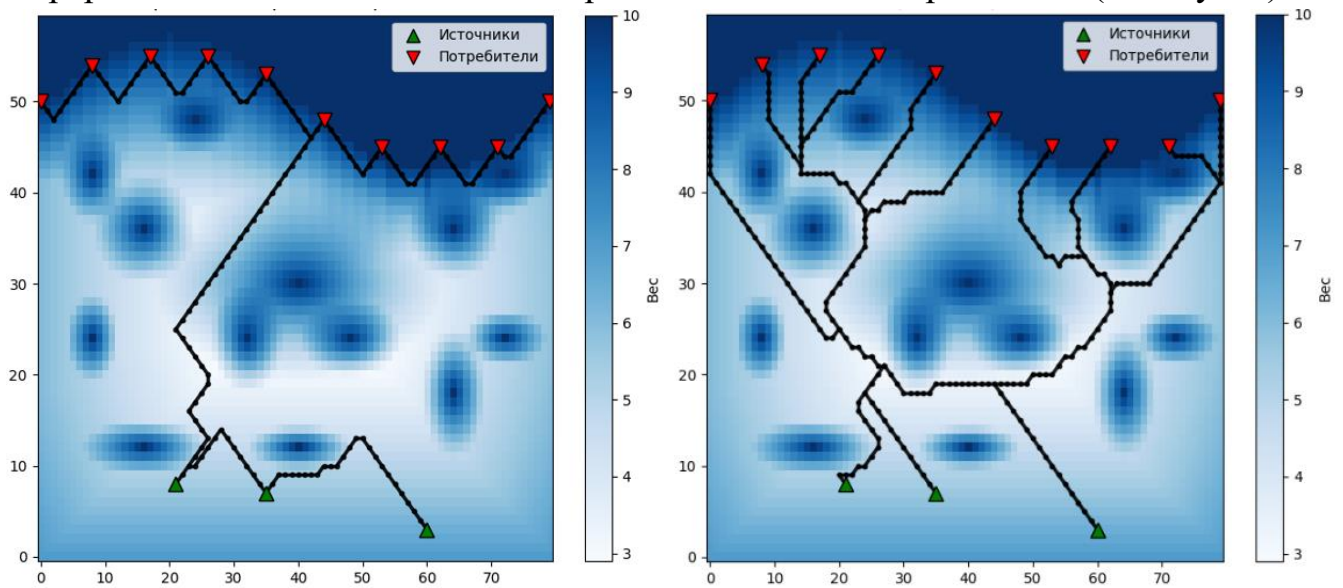


Рисунок 3 – Сеть Штейнера, сформированная по алгоритму Мельхорна (слева) и по предложенному алгоритму (справа)

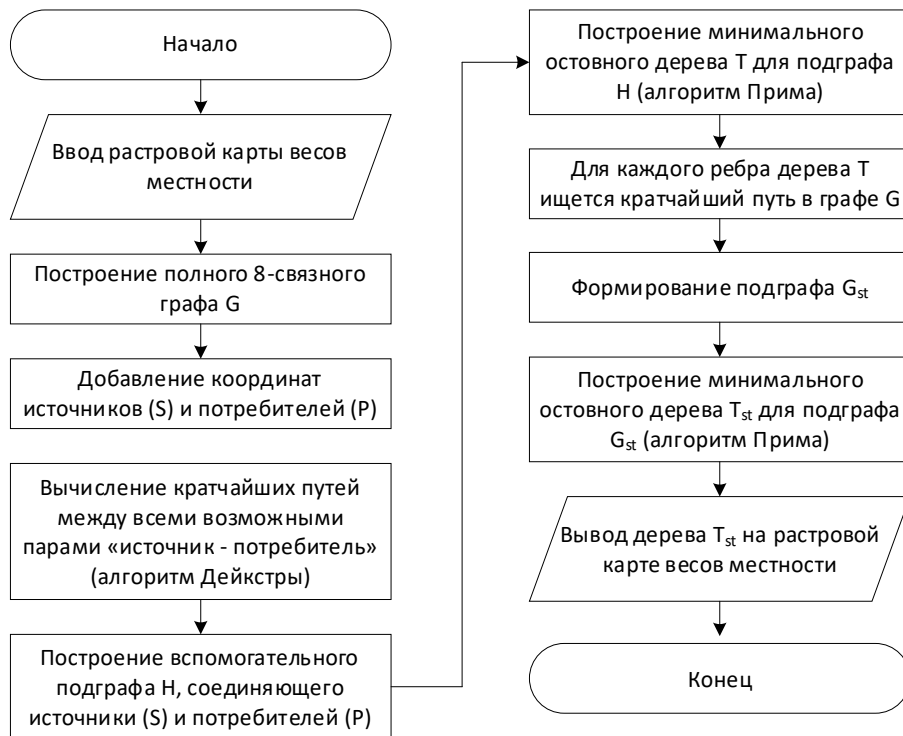


Рисунок 4 – Блок-схема модифицированного алгоритма определения конфигурации трубопроводной сети

Несмотря на рост капитальных затрат на удлинение трассы при сетевой архитектуре, совокупный эффект достигается за счёт многократного снижения рисков поражения всей системы, сокращения затрат на аварийное восстановление и сохранения боеспособности группировки войск. Таким образом, во второй главе обоснован концептуальный переход к сетевым архитектурам, логически

подготавливая обоснование технологических методов компенсации потерь пропускной способности пораженных противником части трубопроводных подсистем, рассмотренных в третьей главе.

В третьей главе обосновано применение противотурбулентных присадок (ПТП) в качестве технологического механизма адаптивного повышения живучести сети. В условиях, когда часть трубопроводных линий выведена из строя, оставшиеся в работоспособном состоянии участки сети должны компенсировать потерю пропускной способности и обеспечить выполнение транспортной функции. Проанализирован опыт применения ПТП на магистральных нефтепроводах. В целом, эффективность ПТП зависит от их концентрации и типа перекачиваемого продукта. Отмечено, что применяемые в мире на объектах трубопроводного транспорта углеводородов ПТП можно поделить на гелеобразные и суспензионные (дисперсионные). ПТП в виде геля содержат до 90% растворителя (как правило, дизеля, бензина или каких-то еще жидких углеводородов) и до 10% непосредственно самого полимера. ПТП в виде суспензии содержат 23% полимера, 66% растворителя и 11% стабилизаторов.

Представлены результаты экспериментальных исследований применения ПТП в системах сборно-разборных трубопроводов (Рисунок 5). Проведен гидравлический расчет для стального и полиуретанового сборно-разборного трубопровода протяженностью 110 км для трех видов топлива: бензина ( $\rho=740 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu=0,6 \text{ сСт}$ ), керосина ( $\rho=800 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu=2,0 \text{ сСт}$ ) и дизельного топлива ( $\rho=850 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu=6,0 \text{ сСт}$ ) при концентрациях ПТП 10, 15 и 30 ppm. Показано, что в зависимости от типа перекачиваемого топлива применение ПТП концентрацией 10-30 ppm позволяет повысить пропускную способность стального трубопровода диаметром 100 мм на 18-43%, а из полиуретана – от 16 до 30% (для разных величин рабочего давления и диаметра). Максимальный эффект достигается, как правило, при перекачке дизельного топлива.

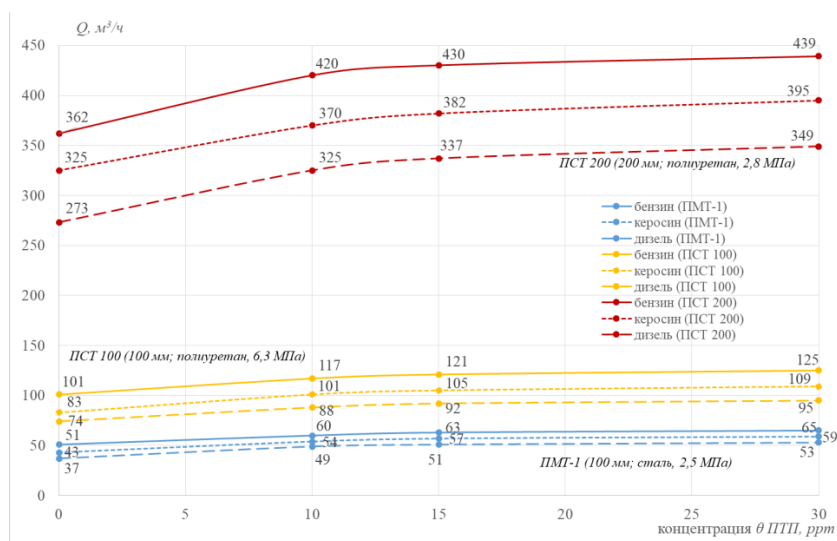


Рисунок 5 – График изменения расхода  $Q$  перекачки трех топлив по СРТ при изменении концентрации  $\theta$  ПТП

Представлено техническое решение – передвижная перекачивающая насосная установка с дозатором ПТП (Рисунок 6). Разработана конструкция, позволяющая автоматически добавлять необходимое количество присадки в поток перекачиваемой жидкости.

**В четвертой главе** сформирован и обоснован комплекс организационно-технических мер, направленных на дальнейшее повышение живучести системы нефтепродуктообеспечения в условиях современных угроз.

Определены основные направления совершенствования системы транспортировки нефтепродуктов. Сформулированы ключевые принципы преобразований системы обеспечения нефтепродуктами (максимальное использование существующей инфраструктуры, повышение устойчивости системы в условиях воздействия современных средств поражения, оптимизация транспортных связей между поставщиками и потребителями, обеспечение высокой степени маневренности запасов нефтепродуктов).

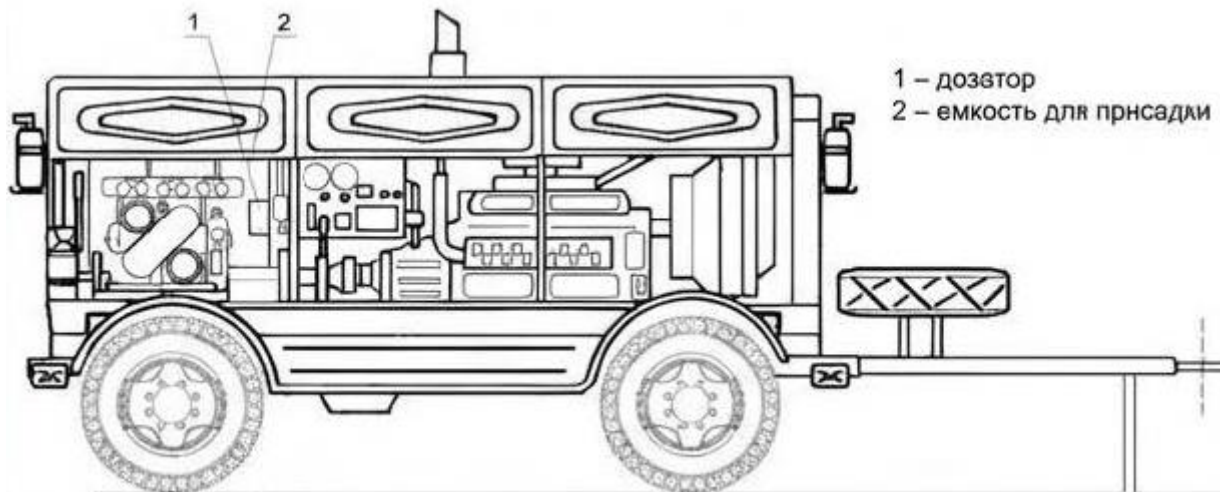


Рисунок 6 – Передвижная перекачивающая насосная установка, вид справа по ходу движения

Предложена интеграция полевых магистральных трубопроводов с магистральной сетью для формирования единой эшелонированной системы нефтепродуктообеспечения (Рисунок 7). Это позволит осуществлять оперативное перераспределение потоков при повреждении участков без полного отказа системы.

Представлены основные направления технического переоснащения частей трубопроводных подразделений, направленные на:

- сокращение сроков ввода в эксплуатацию в 2 раза
- увеличение темпов развертывания в 1,5-2 раза;
- повышение производительности перекачки горючего на 25;
- увеличение оперативности управления процессами более чем в 2 раза;

- повышение производительности перекачки горючего до 12% за счет применения противотурбулентных присадок;
- увеличение темпов свертывания в 1,2 раза.

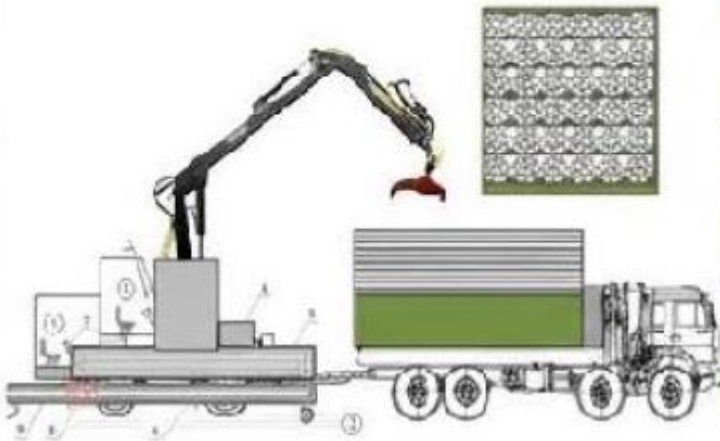


Рисунок 7 – Основные направления технического переоснащения трубопроводных подразделений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача разработки научно обоснованных методов повышения надежности и эффективности полевых магистральных трубопроводов на основе формирования сетевых архитектур с функциональным резервированием и применения противотурбулентных присадок для адаптивного регулирования пропускной способности в условиях боевых и чрезвычайных воздействий. Полученные результаты последовательно соответствуют поставленным задачам исследования и позволяют сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. Выполнен системный анализ исторического опыта и современного состояния применения полевых магистральных продуктопроводов в военных и гражданских условиях. В частности, установлено, что традиционная линейная архитектура трубопроводных систем обладает высокой уязвимостью при локальных повреждениях и не обеспечивает требуемый уровень устойчивости при воздействии современных средств поражения. Подтверждена эффективность отечественных разработок сборно-разборных трубопроводов, которые обеспечивают высокую скорость развертывания, технологическую адаптивность и возможность применения в широком диапазоне климатических условий. Обосновано двойное назначение данных систем – как инструмента обеспечения войск горючим и как средства ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

2. Разработана математическая модель количественной оценки живучести полевых трубопроводных сетей с использованием вероятностных распределений (геометрического и отрицательного биномиального), которая позволяет формализованно сравнивать различные конфигурации сети. Численные расчеты показали, что при расчетной вероятности поражения при одной атаке, равной 0,5, переход от линейной к сетевой структуре с четырьмя равнозначными подсистемами приводит увеличению числа воздействий, необходимых для гарантированного отказа всей системы с вероятностью 0,99 в 10 раз. Тем самым подтверждена высокая эффективность и надежность сетевой архитектуры как структурного механизма повышения устойчивости.

3. Разработан алгоритм проектирования сетевых структур полевых магистральных трубопроводов на основе алгоритма Прима с введением ограничений на соединение однотипных узлов. Предложенный алгоритм обеспечивает формирование множественных альтернативных маршрутов транспортировки, равномерное распределение потоков между источниками и потребителями, устранение критических структурных «узких мест»; повышение структурной устойчивости системы при частичных повреждениях. Таким образом, создан надежный инструмент инженерного проектирования живучих конфигураций трубопроводных систем.

4. Проведены теоретические и экспериментальные исследования эффективности применения противотурбулентных присадок в трубопроводах малого диаметра (98-100 мм). Установлено, что при концентрации 10-30 ppm обеспечивается увеличение пропускной способности участков на 20-43 % в зависимости от типа перекачиваемого топлива (бензин, керосин, дизельное топливо). Полученные результаты исследований подтверждают возможность регулирования производительности трубопроводной системы без изменения геометрических параметров линейной части, что существенно расширяет эксплуатационные возможности полевых магистралей.

5. Разработаны практические рекомендации по переоснащению трубопроводных подразделений, включающие применение передвижных насосных установок с дозированным вводом противотурбулентных присадок, внедрение трубомонтажной машины ТММ-100 с повышенной степенью механизации, использование эффективных средств рекогносцировки трасс и дистанционного мониторинга технологических режимов. Предложенные решения направлены на повышение темпов развертывания, надежности эксплуатации и адаптивности трубопроводных систем, подтвердили свою эффективность на практике в ходе учений и реальных боевых действий.

Наиболее значимые результаты исследования отражены в следующих печатных работах и научных трудах (всего опубликовано 18 печатных работ):

**– Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Демиров В. И. Особенности сборно-разборных трубопроводов: инженерные решения и практика применения / В. И. Демиров, Н. Н. Голунов, Б. Н. Мастобаев // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2025. – Т. 15, № 1. – С. 47–55.

2. Демиров В. И. Обоснование сетевого функционального резервирования полевых магистральных трубопроводов в условиях современных военных угроз / В. И. Демиров, Р. Р. Ташбулатов, Б. Н. Мастобаев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2025. – № 3–4. – С. 16–21.

3. Демиров В. И. Определение оптимальной конфигурации сети полевых магистральных трубопроводов в условиях современного театра военных действий / В. И. Демиров, Р. Р. Ташбулатов, Б. Н. Мастобаев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2025. – № 5–6. – С. 18–22.

**– Монография**

4. Демиров В. И. Становление и развитие сборно-разборных трубопроводов в интересах обороны и экономики страны : монография / В. И. Демиров, Б. Н. Мастобаев, Н. Н. Голунов, И. Р. Габдрашитов. – М. : Первый том, 2025. – 496 с.

**– Статьи в других научных изданиях**

5. Демиров В. И. Анализ возможности использования плоскосворачиваемых рукавов в качестве линейной части сборно-разборных трубопроводов / В. И. Демиров, В. С. Ивагин, И. Р. Габдрашитов, А. Безручкин // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. – 2024. – № 62. – С. 434–439.

6. Демиров В. И. Начало применения сборно-разборных трубопроводов для перекачки нефтепродуктов в военных условиях / В. И. Демиров, Б. Н. Мастобаев // История и педагогика естествознания. – 2024. – № 2. – С. 19–24.

7. Демиров В. И. Применение мягких резервуаров для доставки и хранения нефтепродуктов в военных условиях / В. И. Демиров, Б. Н. Мастобаев, Н. Н. Голунов // История и педагогика естествознания. – 2024. – № 3–4. – С. 13–23.

8. Давлятшин И. М. Методика обоснования рационального варианта применения сил и средств службы горючего в ходе боевых действий / И. М. Давлятшин, В. И. Демиров // Региональные аспекты управления, экономики и права Северо-западного федерального округа России : межвузовский сборник научных трудов. – Санкт-Петербург, 2019. – № 2(47). – С. 92–96.

9. Демиров В. И. Методика обоснования создания складской системы обеспечения горючим военного округа / В. И. Демиров, А. А. Липский, Ю. А. Козулев // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения : военно-научный журнал. – 2019. – № 2(50). – С. 73–77.

10. Демиров В. И. Линейка перспективных технических средств службы горючего, принятых на снабжение в 2015–2020 годах, перспективы на 2021 год / В. И. Демиров, В. А. Маркин, В. В. Артемов // Материально-техническое обеспечение Вооруженных Сил Российской Федерации. – М. : ФГБУ РИЦ «Красная звезда Минобороны России», 2021. – Апрель, № 4. – С. 55–61.

11. Демиров В. И. Уникальные объекты службы горючего / В. И. Демиров, Г. Н. Очеретин, В. В. Артемов, В. С. Ганин, Н. С. Рушкин // Материально-техническое обеспечение Вооруженных Сил Российской Федерации. – М. : ФГБУ РИЦ «Красная звезда Минобороны России», 2022. – Сентябрь, № 9(33). – С. 44–53.

12. Демиров В. И. Гибкий трубопровод. Применение плоскостворачиваемых рукавов для преодоления водной преграды / В. И. Демиров, В. С. Ивагин, И. Р. Габдрашитов // Материально-техническое обеспечение Вооруженных Сил Российской Федерации. – М. : ФГБУ РИЦ «Красная звезда Минобороны России», 2023. – Октябрь, № 10. – С. 56–61.

13. Мурадов А. В. Способ снижения потерь светлых нефтепродуктов в процессе их хранения на объектах разработки нефтегазовых месторождений / А. В. Мурадов, В. И. Демиров, М. Ю. Кильянов, А. И. Лавренчук, С. В. Назаров // Инженер-нефтяник. – 2024. – № 2. – С. 19–23.

#### **– Тезисы докладов и материалы конференций**

14. Демиров В. И. О перспективных направлениях развития технических средств и оборудования для реализации проектов строительства сборно-разборных трубопроводов / В. И. Демиров, Н. Н. Голунов, А. И. Лавренчук // Трубопроводный транспорт-2023 : тезисы докладов XVIII Международной научно-практической конференции (16–17 ноября 2023 г.). – Уфа : УГНТУ, 2023. – С. 480–481.

15. Демиров В. И. Перспективы применения противотурбулентных присадок для транспортировки нефтепродуктов по сборно-разборным трубопроводам / В. И. Демиров, Н. Н. Голунов, Б. Н. Мастобаев // Трубопроводный транспорт – 2024 : материалы XIX Международной научно-практической конференции, приуроченной к 95-летию со дня рождения профессора В.Ф. Новоселова и к 15-летию со дня образования ООО «НИИ Транснефть». В 2 т. – Уфа, 2024. – С. 97–99.

#### **– Патенты**

16. Шарыкин Ф. Е. Автотопливомаслозаправщик : пат. 2738492 Рос. Федерация / Ф. Е. Шарыкин, В. В. Безручкин, Н. Н. Горнов, Д. Ю. Горшков, Д. В. Комаров [и др.]. – Опубл. 14.12.2020.

17. Абдурахманов Э. Ф. Топливомаслозаправщик для критических климатических условий : пат. 2741667 Рос. Федерация / Э. Ф. Абдурахманов, В. И. Демиров, В. С. Ивагин, О. И. Николюк, С. А. Романчиков. – Опубл. 28.01.2021.

18. Демиров В. И. Передвижная перекачивающая насосная установка : пат. 233794 U1 Рос. Федерация / В. И. Демиров, И. Р. Габдрашитов, Б. Н. Мастобаев, Н. Н. Голунов, А. Е. Клименко ; заявл. 26.12.2024 ; опубл. 05.05.2025.