

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

На правах рукописи



ГАБДИНУРОВ РУСЛАН РАМИЛЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЗЕРВУАРОВ
НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБКИХ ОБОЛОЧЕК ВНУТРИ
РЕЗЕРВУАРОВ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССА
ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Гареев Мурсалим Мухутдинович

Уфа – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Обзор современных технологий и средств минимизации выбросов из резервуаров	11
1.1 Обзор методик расчета дыхательной арматуры.....	11
1.2 Процесс испарения нефтепродуктов в резервуарах.....	19
1.3 Краткий обзор методов и средств сокращения потерь от испарений из резервуаров.....	20
1.4 Установки рекуперации паров	31
1.5 Применение гибких оболочек в резервуарах.....	38
1.6 Постановка задач исследований	41
2 Разработка методики расчета дыхательной арматуры	42
2.1 Оценка производительности закачки и откачки с учетом перетока при переключении современных резервуаров	42
2.2 Оценка возможности образования предельно допустимого давления в газовом пространстве при переключении резервуаров	47
2.3 Расчёт времени образования предельно допустимого давления в газовом пространстве	51
2.4 Разработка методики учета процесса перетока при переключении резервуаров.....	57
2.5 Разработка программы для учета процесса перетока при переключении резервуаров.....	62
2.6 Способы ограничения перетока	75
3 Исключение влияния газового пространства на величину потерь от испарений.....	83
3.1 Конструкция резервуара с гибкой оболочкой	84
3.2 Экспериментальное испытание резервуаров.....	87
4 Обоснование технологий монтажа, проектирования и эксплуатации гибких оболочек в резервуарах.....	108

4.1 Технология монтажа и введения в эксплуатацию гибкой оболочки	108
4.2 Расчёт образовавшегося конденсата.....	111
4.3 Краткий обзор материалов для гибких оболочек.....	112
4.4 Оценка объема оболочки в горизонтальном резервуаре.....	115
4.5 Расчет гибкости оболочки	117
4.6 Эксплуатация гибких оболочек в осложненных условиях	127
4.7 Расчёт экономической эффективности и определение области рационального применения гибкой оболочки	132
Заключение	140
Список литературы	142
Приложение А – Программный код.....	159
А.1 Исходный код расчёта производительности закачки в резервуары типа РВС с учетом перетока при переключении задвижек.....	159
А.2 Исходный код для вывода графика расчёта производительности закачки в резервуары типа РВС с учетом перетока при переключении задвижек.....	162
А.3 Исходный код расчёта производительности откачки в резервуары типа РВС с учетом перетока при переключении задвижек.....	167
А.4 Исходный код для вывода графика расчёта производительности откачки в резервуары типа РВС с учетом перетока при переключении задвижек.....	171
Приложение Б – Расчёт в программе для ЭВМ	176
Приложение В – Паспорт бензина.....	195
Приложение Г – Коммерческие предложения	196
Приложение Д – Справки о внедрении.....	199

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований

Повышение эффективности эксплуатации нефтяных резервуаров является одной из важнейших задач в ключевой для экономики Российской Федерации нефтегазовой отрасли.

Совершенствование технологических процессов и внедрение инновационных средств требуют комплексного подхода, включающего оценку эффективности, состояния оборудования резервуаров и технологий в действующих резервуарных парках.

Совершенствование конструкций и эксплуатации нефтяных резервуаров является приоритетным направлением технологического развития ПАО «Транснефть». Программа инновационного развития ПАО «Роснефть» включает в себя минимизацию потерь на всех стадиях производства, обеспечение нового уровня энергоэффективности и обеспечение соответствия жестким требованиям экологических стандартов как к продукции, так и к соответствующим производственным мощностям.

Безопасная эксплуатация и внедрение инновационных средств требуют комплексного подхода, включающего оценку эффективности, состояния оборудования резервуаров и технологий в действующих резервуарных парках.

Расчет дыхательной арматуры является актуальным при переключении резервуаров с различным уровнем налива продукта, так как возникает переток продукта из полного в порожний, в то же время снижается используемая емкость, возможно превышение допустимого давления/вакуума в резервуарах, возрастают потери от испарений. В связи с тенденцией сооружения резервуаров высотой 18 метров и более, увеличивается разность уровней налива между полными и порожними резервуарами, что повышает производительность перетока и подчеркивает актуальность рассматриваемой задачи.

Применяемые средства для сокращения потерь от испарений нефти и нефтепродуктов не универсальны и имеют различную эффективность. Наиболее применяемым средством сокращения потерь от испарений являются понтоны и плавающие крыши. Они эффективны, но имеют высокую стоимость и их применение нерентабельно в вертикальных резервуарах малого объема и невозможно в резервуарах горизонтальных. Системы улавливания легких фракций имеют весьма эффективны только при высоких коэффициентах оборачиваемости, при снижении оборачиваемости срок их окупаемости для малых резервуаров и небольших нефтебаз зачастую превышает срок их эксплуатации. Другие разработанные средства применяются крайне редко, либо им уделено недостаточно внимания.

Таким образом, усовершенствование расчета дыхательной арматуры с учетом процесса переключения резервуара и разработка нового средства, исключающего потери от испарений в резервуарах, являются актуальными задачами для повышения эффективности эксплуатации резервуаров.

Степень разработанности темы

Разработке и совершенствованию средств и методов сокращения потерь от испарений нефти/нефтепродуктов из резервуаров посвящены работы Ф. Ф. Абузовой, М.И. Ашкинази, В. А. Афанасьева, И. С. Бронштейна, С. А. Бобровского, П.В. Валявского, В.Б. Галеева, М.А. Гиззатова, А.Г. Гумерова, С.Г., В.А. Душина, Едигарова, Ю.Д. Земенкова, М.Г. Каравайченко, Н. Н. Константинова, А. А. Коршака, С.А. Коршака, Р.Е. Левитина, В.М. Смоленцева, Г.Д. Теляшевой, В.А. Мартяшовой, В. М. Михайлова, Р.А. Молчановой, В. Ф. Новоселова, П. И. Тугунова, Н.М. Фатхиева, А.В. Филитова, Ф. М. Хафизова, В.И. Черникина, В.Г. Шухова, и других.

Разработкой и совершенствованием нефтяных резервуаров занимаются ряд научно-исследовательских и проектных организаций: 25-й ГосНИИ химмотологии МО РФ (г. Москва), РГУ нефти и газа им. Губкина

(г. Москва), ООО «РН-БашНИПИнефть» (г. Уфа), ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова» (г. Москва), ООО «НИИ Транснефть» (г. Москва) и другие.

Проблемами уменьшения потерь от испарений из резервуаров посвящены работы иностранных ученых: D. Brooksbank, H. Conrad, I.G. Curri, C.R. Gallagher, T. Gladmen, R.J. Holroid, G.T. Horton, K.G. Orlik, S. Palmer, A.K. Runchal, L. Schmidt, J.H. Wiggins, R.N. Wright, J. Ziolk.

Несмотря на большое количество научных работ, на практике наблюдаются технологические особенности, оказывающие существенное влияние на эффективность эксплуатации резервуаров, что требует дополнительных исследований.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Отраженные в диссертации научные положения соответствуют паспорту специальности 2.8.5.:

п. 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.

п. 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

Повышение эффективности эксплуатации резервуаров путем разработки нового технического решения для сокращения потерь от испарений нефти и нефтепродуктов и совершенствования расчета дыхательной арматуры резервуаров.

Основные задачи исследования

1 Анализ современных методик расчета дыхательной арматуры и технических решений для сокращения потерь от испарений нефти и нефтепродуктов.

2 Совершенствование методики расчета дыхательной арматуры резервуаров с учётом перетока при переключении резервуаров, времени открытия и закрытия задвижек и испаряемости хранимого продукта.

3 Разработка технического решения для предотвращения потерь от испарений нефти и нефтепродуктов на основе применения гибких оболочек внутри резервуаров.

4 Разработка методов расчета основных технологических параметров нового технического решения для сокращения потерь от испарений.

Научная новизна

1 Разработана методика расчета дыхательной арматуры, учитывающая производительность откачки и закачки нефти или нефтепродукта в процессе переключения резервуаров, позволяющая оценить величину вакуумметрического или избыточного давления в газовом пространстве резервуара с учетом испаряемости.

2 На основании формулы Лоренца-Тимошенко предельного

сжимающего напряжения при потере устойчивости оболочки получено условие, позволяющее определить предельную толщину оболочки, для предотвращения образования пластических деформаций при эксплуатации оболочки внутри резервуара.

Теоретическая значимость

1 Получена аналитическая зависимость для расчёта объема паровоздушной смеси, проходящей через дыхательный клапан, с учетом испаряемости нефти или нефтепродукта при переключении резервуаров.

2 Разработана методика расчета дыхательной арматуры с учетом времени срабатывания задвижек и испаряемости хранимого продукта.

3 Из условия расчета допустимой толщины предложен алгоритм выбора материала гибкой оболочки.

Практическая значимость

1 Разработана программа вычисления производительности дыхательной арматуры, учитывающая переток при переключении резервуаров, для проектирования новых и разработки технологических карт эксплуатации действующих нефтяных резервуаров (Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2021616646). Результаты, полученные из программы, приняты для разработки новой редакции отраслевого регламента ОР-23020.00-КТН-079-14 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Расчет емкости (полезной) для товарных операций и разработки технологических карт на резервуары и резервуарные парки.

2 Экономически обосновано применение гибкой внутренней оболочки для сокращения потерь от испарений из резервуаров типа РГС и РВС объемом до 10 000 м³ с учетом коэффициента оборачиваемости.

3 Предложенные методики расчета и технологии монтажа и эксплуатации могут применяться при проектировании и разработке технологических карт эксплуатации резервуаров с гибкими оболочками.

Методология и методы научного исследования

Решение задач диссертационной работы проводилось экспериментальным и аналитическим способом с использованием стандартных и лично разработанных автором оригинальных методик расчета. Эмпирические исследования включали в себя измерения массы, уровня налива в емкостях и предварительное моделирование системы, для определения эффективности средств сокращения потерь от испарений бензина. Теоретические исследования включали в себя научный анализ и обобщение современных методик расчета. Также анализировались базы данных зарубежных нормативов. Аналитические исследования включали сравнительный анализ методов и технологий, обработку полученных результатов методами математической статистики в современных программных комплексах.

Применены теоретически обоснованные методы расчёта производительности трубопроводов, расчёт образования давления в газовом пространстве, основанные на положениях гидравлики, гидродинамики и математического моделирования, электронные таблицы Excel, программирование в среде PascalABC. Применяемые методы используют экспериментальный стенд, моделирующий «большие дыхания» резервуаров.

Положения, выносимые на защиту

1 Методика расчета дыхательной арматуры резервуаров позволяет прогнозировать давление в газовом пространстве и производительность закачки и откачки из резервуаров с учетом: перетока при переключении резервуаров, испаряемости нефти или нефтепродукта и динамики открытия и закрытия задвижек.

2 Разработанная методика расчета гибкой цилиндрической оболочки позволяет определить минимальную толщину из условия обеспечения прочности и максимальную толщину из условия обеспечения гибкости материала оболочки для применения внутри резервуаров.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечивается основополагающими уравнениями гидравлики и механики. Полученные теоретические результаты сверены с данными экспериментальных исследований других авторов. Для обработки результатов экспериментальных исследований использованы статистические методы обработки данных. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих мероприятиях: 69,72,73,74,75-й Научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ, (Уфа, 2018, 2021, 2022, 2023, 2024), Международная научно-техническая конференция магистрантов им. профессора Н.А. Малюшина (Тюмень, 2018), Международная Научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт» (Уфа, 2020,2021,2023, 2024 гг.), Конкурс на лучшую научно-техническую разработку молодых специалистов ПАО «Транснефть» и студентов нефтегазовых ВУЗов (Брянск, 2021).

Публикации

По теме диссертационной работы имеется 16 публикаций, из них четыре публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК, один патент на полезную модель, одно свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ, одна публикация в издании, индексируемом в международной базе Scopus.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, основных выводов, списка литературы из 127 наименований и четырёх приложений; изложена на 199 страницах машинописного текста и содержит 58 рисунков и 35 таблицы.

1 ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СРЕДСТВ МИНИМИЗАЦИИ ВЫБРОСОВ ИЗ РЕЗЕРВУАРОВ

Продолжающийся рост производства и переработки нефти и нефтепродуктов по всему миру требует увеличения объемов строительства резервуаров и повышения уровня их безопасности для эффективного и бесперебойного хранения и использования нефтепродуктов [1 - 3].

В процессе транспортировки нефть и нефтепродукты много раз подвергаются перевалке и хранению в промежуточных емкостях, что означает их активную эксплуатацию и влечет за собой потери сопоставимые с 9% годовой добычи нефти. 2-2,5 % из них приходится на потери при транспортировке, хранении и распределении [4 - 6].

Большинство средств для сокращения потерь от испарений, используемых в настоящее время, разработаны более 20 лет назад и в настоящее время морально и технически устарели. Их эксплуатация приводит к экономическим потерям и упущенной выгоде [7 - 12]. В настоящее время исследователями из КНР [13 - 17], Германии [18 - 21], Японии [22 - 24] и РФ активно ведется моделирование процесса испарения и сбор экспериментальных данных с действующих резервуарных парков.

1.1 Обзор методик расчета дыхательной арматуры

Важными этапами проектирования новых резервуарных парков и разработки технологических карт эксплуатации на действующих резервуарных парках является определение производительности закачки и откачки. По производительности закачки/откачки определяется количество и диаметр приемо-раздаточных патрубков (ПРП) и производительность дыхательной арматуры. Для резервуаров с понтонами и плавающими крышами (ПК) производительность закачки/откачки ограничивается

максимально допустимой скоростью движения понтона или ПК.

При эксплуатации магистральных нефтепроводов возможно использование нескольких систем перекачки [25]:

1. «Через резервуары»
2. «С подключенным резервуаром»
3. «Из насоса в насос»

При использовании схемы «через резервуары», при эксплуатации нефтебаз, а также при остановке перекачки на следующем или предыдущем после нефтеперекачивающей станции эксплуатационном участке, производится переключение от одного резервуара к другому, сначала полностью открывается задвижка на следующий по схеме резервуар, и только после полного открытия запорной арматуры, перекрывается задвижка на первоначальный резервуар. Одновременное автоматическое открытие и закрытие задвижек возможно только в случае наличия защиты трубопроводов от повышения давления и возможности контроля изменения уровня в резервуаре. При одновременно открытых задвижках на двух резервуарах при наличии разности уровней взлива, возникает явление перетока жидкости из полного резервуара в порожний.

Переток при переключении задвижек был исследован в 1976 году, после выявления факта деформации резервуаров в результате чрезмерного снижения давления в резервуарах [26]. Проблема была устранена введением поправочного коэффициента в формулу для расчёта производительности дыхательной арматуры.

В действующих [27 - 30] нормативных документах РФ, США и ЕС, не обозначена необходимость учета явления перетока. Производительность закачки/откачки принимается по максимальной производительности трубопроводов и/или насосов. Необходимость корректного определения диаметра и количества приемо-раздаточных патрубков определяется недопущением образования заряда статического электричества. Когда

жидкость течет по трубопроводу, процесс трения на стенках трубы заставляет жидкость набирать заряд, и продукт с зарядом течет в заземленный резервуар. Если труба достаточно длинная, плотность заряда достигает установившегося значения к моменту достижения резервуара. Когда жидкость является слабым проводником, заряд накапливается в резервуаре, и поверхностный потенциал жидкости увеличивается и достигает максимального значения через некоторое время в процессе заполнения. Минимальный поверхностный потенциал жидкости, способный производить разряды, составляет менее -25 кВ. Когда жидкость положительно заряжена, требуются гораздо более высокие потенциалы[31].

Вопрос определения максимальной производительности дыхательной арматуры обстоит несколько сложнее, чем кажется на первый взгляд, различные международные стандарты предъявляют различные требования. Так стандарт [27] при нормальных условиях эксплуатации предлагает принимать за производительность дыхательной арматуры 0,94 производительности откачки для всех продуктов и 1,01 для продуктов с точкой кипения более или равной 148,9°C, а для продуктов с точкой кипения менее 149°C использовать 2,02 производительности закачки. Стандарт [30] указывает: при определении параметров системы вентиляции и вентиляционного оборудования и установлении общих требований к ней необходимо учитывать, как максимальные значения производительности насоса при закачке или откачке хранимого продукта, так и объем воздуха, приток или отток которого следует обеспечить в результате температурных воздействий. Согласно [28] расчетная производительность опорожнения/заполнения($Q_{отк}/Q_{зак}$) каждого резервуара определяется исходя из количества эксплуатируемых резервуаров в группе

$$Q_{отк/зак} = (Q_1 + \dots + Q_i) / N, \quad (1.1)$$

где $Q_1, \dots, Q_i$ – максимальная пропускная способность каждого отводящего технологического трубопровода от данной группы резервуаров, в

соответствии с картами технологических режимов работы.

Стандарт [32] приводит формулу для расчёта производительности дыхательной арматуры

$$Q_{кл} = 2,71 \cdot M_1 + 0,026 \cdot V, \quad (1.2)$$

где 2,71 – коэффициент, учитывающий свойства закачиваемого продукта при закачке в резервуар продуктов с высокой температурой и с высоким давлением насыщенных паров;

M_1 – производительность налива продукта в резервуар, м³/ч;

0,026 – поправка на изменение объема паров нефтепродукта в резервуаре от повышения температуры окружающего воздуха, ч⁻¹;

V – полный объем резервуара, включая объем газового пространства (ГП) под стационарной крышей, м³.

Формула (1.2) учитывает возможность превышения производительности дыхательных клапанов над производительностью закачки за счет высокого давления насыщенных паров, при этом из оценок в [33] известно, что при закачке расход ПВС через дыхательный клапан может превышать производительность закачки до 2,92 раз за счет испаряемости и сильно зависит от свойств продукта.

Объем паров нефти и нефтепродукта проходящий через дыхательный клапан резервуаров подробно исследован в работе профессора А.А. Коршака при исследовании коэффициента превышения (k_n) [34]. При расчетах были получены значения превышения расхода ПВС через дыхательный клапан над объемом закачки до 2,92 раз и при откачке до 2,01 раз, что дополнительно подчеркивает необходимость учета испаряемости при расчете дыхательной арматуры. Следует отметить, что представленные в [33] значения справедливы для оценочных расчетов при заданных эмпирических коэффициентах, описывающих свойства нефтепродукта. Таким образом использование представленных коэффициентов как констант для расчета дыхательной арматуры может быть непригодно, необходимо проводить

расчет для каждого типоразмера и хранимого продукта отдельно. К тому же оценочные расчеты не проводились для случая превышения объема закачки или откачки над проектным значением.

Одним из современных подходов к контролю за давлением в ГП резервуара является автоматизированная система мониторинга за безопасной и эффективной работой для резервуаров для нефти и нефтепродуктов [35]. Система позволяет прогнозировать давление в ГП пространстве резервуаров и потери при планировании технологических операций в резервуарном парке с учетом испаряемости нефти и нефтепродуктов. Но дополнительно не указано учитывается ли переток при переключении резервуаров при прогнозировании

Кроме того, для резервуаров с понтонами и ПК, производительность закачки/откачки ограничивается скоростью движения понтона или ПК [28].

Ни одна из перечисленных формул и методик не учитывает всего множества факторов определяющих допустимую производительность закачки/откачки в тех или иных условиях в частности в резервуаре, так и в комплексе при эксплуатации резервуарного парка с учетом возможности возникновения перетока.

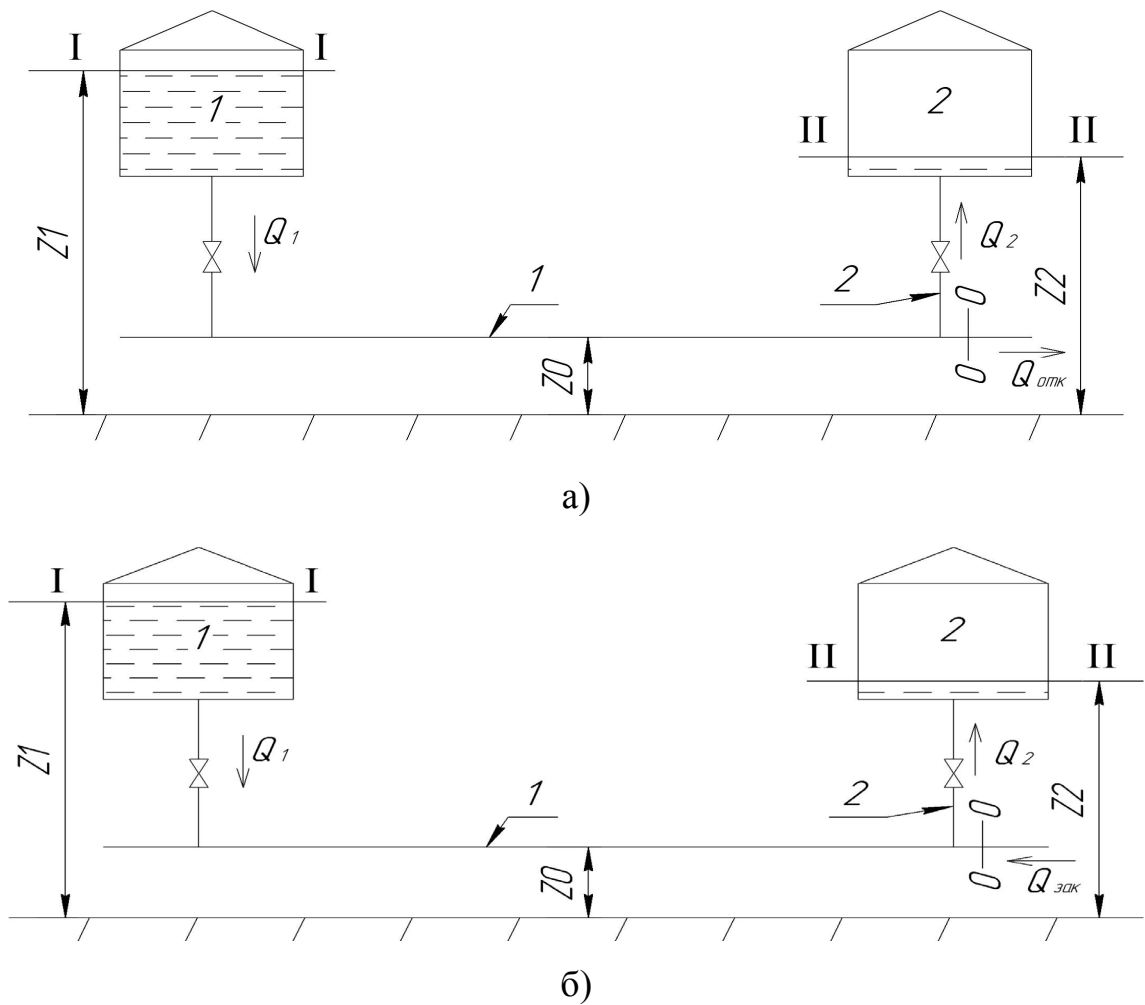
Формулы для расчета производительностей налива в резервуарах с учетом явления перетока жидкости были получены М.М. Гареевым [26].

Для расчётной схемы на Рисунке 1.1 производительность трубопроводов при откачке с учетом явления перетока соответствует уравнению материального баланса

$$Q_1 = Q_2 + Q_{отк}. \quad (1.3)$$

Для определения производительностей Q_1 и Q_2 уравнения Бернулли для ответвлений между сечениями 0-0, I-I и 0-0, II-II имеют вид:

$$\frac{V_{I-I}^2}{2g} + \frac{P_a - P_{кв}}{\rho g} + Z_1 = \frac{V_{0-I}^2}{2g} + \frac{P_0}{\rho g} + Z_0 + h_{мп1}; \quad (1.4)$$



- а) откачка нефти(нефтепродуктов) в магистральный трубопровод;
 б) закачивание нефти(нефтепродуктов) из магистрального трубопровода; Q_1 , Q_2 – производительность соответственно в ответвлениях 1 и 2 трубопроводов; $Q_{отк}$, $Q_{зак}$ – производительность соответственно откачки и закачки на магистрали трубопровода

Рисунок 1.1 – Расчетная схема обвязки резервуаров

$$\frac{V_{II-II}^2}{2g} + \frac{P_a + P_{кд}}{\rho g} + Z_2 = \frac{V_{0-II}^2}{2g} + \frac{P_0}{\rho g} + Z_0 - h_{mp2}, \quad (1.5)$$

где $V_{I-I} \approx 0$ и $V_{II-II} \approx 0$ – скорость изменения уровня нефти в резервуарах, м/с;

P_a – атмосферное давление, Па;

$P_{кв}$ и $P_{кд}$ – предел срабатывания дыхательного клапана соответственно на вакуум и давление, Па;

Z_1 и Z_2 – нивелирная высота уровня продукта в первом и втором резервуаре соответственно, м;

Z_0 – нивелирная высота середины сечения 0-0, м;

P_0 – пьезометрическое давление в середине сечения 0-0, Па;

h_{mp1} и h_{mp2} – потери напора в ответвлениях 1 и 2 соответственно, м;

ρ – плотность нефти, кг/м³.

Из уравнений (1.4) и (1.5) для схемы обвязки на Рисунке 1.1 имеем:

$$\begin{aligned} \frac{Q_2^2}{2gF_2^2}(\lambda_2 \frac{l_2}{d_2} + \sum \zeta_2 - 1) + Z_2 - Z_0 + \frac{P_{\kappa\partial}}{\rho g} = Z_1 - Z_0 - \\ - \frac{Q_1^2}{2gF_{11}^2}(\lambda_{11} \frac{l_{11}}{d_{11}} + \lambda_{12} \frac{l_{12}F_{11}^2}{d_{12}F_{12}^2} + \sum \zeta_{11} + \sum \zeta_{12} \frac{F_{11}^2}{F_{12}^2} + 1) - \frac{P_{\kappa\partial}}{\rho g}, \end{aligned} \quad (1.6)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления;

l, d, F – длина, диаметр и площадь сечения трубопровода;

$\sum \zeta$ – местные сопротивления.

Первая цифра индекса означает номер ответвления, вторая – номер участка.

Решая (1.6) с учетом (1.3) относительно производительностей q_1 и q_2 получено:

$$\frac{Q_1}{Q_{отк}} = \frac{b + \sqrt{b^2 - a(b - \frac{2g\Delta Z}{Q_{отк}^2} + 2g \frac{P_{\kappa\partial} + P_{\kappa\partial}}{\gamma Q_{отк}^2})}}{a}, \quad (1.7)$$

$$\frac{Q_2}{Q_{отк}} = \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - a(b_1 - \frac{2g\Delta Z}{Q_{отк}^2} + 2g \frac{P_{\kappa\partial} + P_{\kappa\partial}}{\gamma Q_{отк}^2})}}{a}, \quad (1.8)$$

где

$$a = b_1 + b, \quad (1.9)$$

$$b = \frac{\lambda_2 \frac{l_2}{d_2} + \sum \zeta_2 - 1}{F_2^2}; \quad (1.10)$$

$$b_1 = \frac{\lambda_{11} \frac{l_{11}}{d_{11}} + \lambda_{12} \frac{l_{12} F_{11}^2}{d_{12} F_{12}^2} + \sum \zeta_{11} + \sum \zeta_{12} \frac{F_{11}^2}{F_{12}^2} + 1}{F_{11}^2}. \quad (1.11)$$

Для случая закачки в резервуары условие материального баланса определяется уравнением

$$Q_2 = Q_{зак} + Q_l. \quad (1.12)$$

Решив систему уравнений (1.7) и (1.8) относительно производительностей q_1 и q_2 получено:

$$\frac{Q_2}{Q_{зак}} = \frac{b_1 + \sqrt{b_1^2 - a(b_1 - \frac{2g\Delta Z}{Q_{зак}^2} + 2g \frac{P_{кд} + P_{кв}}{\gamma Q_{зак}^2})}}{a}; \quad (1.13)$$

$$\frac{Q_1}{Q_{зак}} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - a(b - \frac{2g\Delta Z}{Q_{зак}^2} + 2g \frac{P_{кд} + P_{кв}}{\gamma Q_{зак}^2})}}{a}. \quad (1.14)$$

Формулы (1.7), (1.8), (1.13) и (1.14) удовлетворительно согласуются с зависимостями по экспериментальным данным [26]. По результатам работы [26] в 1985 году в формулу (1.15) [28] для расчета максимальной допустимой производительности налива была введена поправка (0,85), учитывающая явление перетока.

$$Q_{\text{макс. доп}} = 0,85 \cdot \sum Q_{\text{кл}}, \quad (1.15)$$

где $\sum Q_{\text{кл}}$ – суммарная пропускная способность дыхательных клапанов, установленных на резервуаре, м³/ч.

Данная методика учитывает переток при переключении резервуаров, но она относительно сложнее в применении и не учитывает множества других факторов, влияющих на производительность ПВС через дыхательные клапаны. В период разработки данной методики максимальная высота стенки резервуаров составляла 12 метров. В настоящее время интенсивность перетока, с увеличением высоты стенки резервуаров до 18 метров значительно возрастает, что требует повторного рассмотрения вопроса безопасности эксплуатации резервуаров с учетом перетока и испаряемости.

1.2 Процесс испарения нефтепродуктов в резервуарах

Перед началом эксплуатации чистый резервуар заполнен воздухом, при наливке в резервуар первой партии нефти или нефтепродукта, давление в ГП резервуара достигает давления открытия дыхательных клапанов и воздух из верхней части резервуара вытесняется через дыхательные клапаны, при этом в воздух в нижней части начинают поступать пары нефтепродукта. Пары нефтепродукта в ПВС в полости резервуара являются «кажущимися» потерями. Процесс насыщения ПВС парами нефтепродукта длится до момента достижения давления насыщенных паров бензина и распределения равной концентрации ПВС по всей полости ГП резервуара. В течении процесса закачки концентрация паров нефтепродукта в ПВС возрастает и через дыхательный клапан начинает вытесняться не чистый воздух, а паровоздушная смесь, появляются «безвозвратные» потери. При откачке нефтепродукта из резервуара при достижении в ГП вакуума, соответствующего настройке срабатывания дыхательных клапанов, чистый воздух вновь поступает в резервуар и смешивается с ПВС, снижая концентрацию давления насыщенных паров нефтепродукта и возобновляя процесс испарения нефтепродукта. Строго говоря, если рассматривать процесс в изотермической среде, испарение возобновляется ещё до момента открытия дыхательных клапанов, в момент снижения давления в ГП в результате откачки, пары нефтепродукта стремятся заместить недостаток давления и процесс возобновляется с момента начала откачки [36 - 40].

При откачке нефтепродукта из резервуара, чистый воздух вновь поступает в резервуар и процесс, описанный выше повторяется, сопровождаясь «кажущимися» и «безвозвратными» потерями. [41,42].

Потери в результате вытеснения ПВС из резервуара, вызванные откачкой и последующей закачкой нефтепродукта, называются потерями от «больших дыханий» [43].

Потери, вызванные суточными колебаниями температуры, сопровождающие рост и падение давления в ГП резервуара и влекущие выпуск воздуха и выпуск ПВС из ГП резервуара называются «малыми дыханиями».

Как только вакуум достигнет значения, на которое настроен дыхательный клапан, атмосферный воздух поступает в резервуар, усиливая процесс испарения.

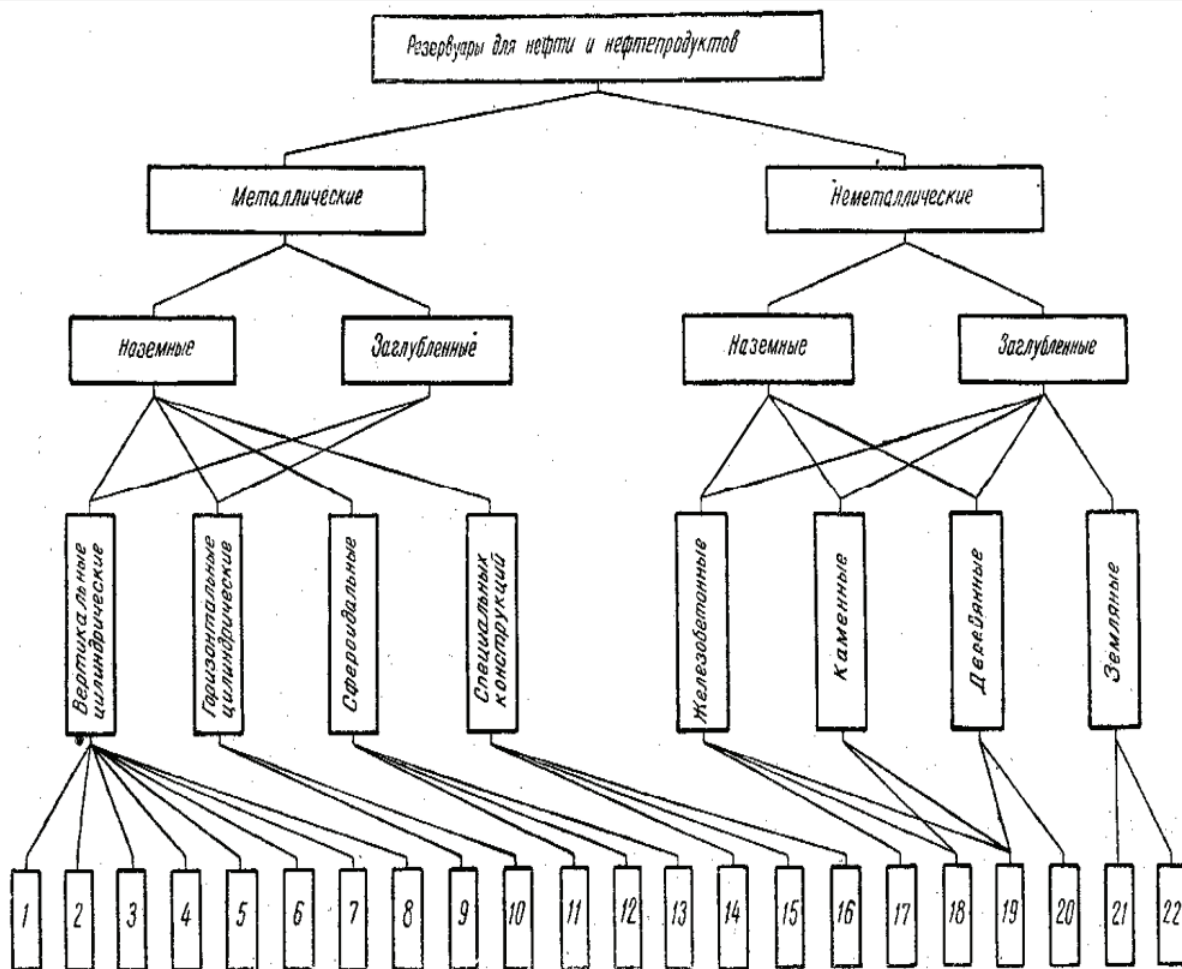
Обратный «выдох» вызван следующим: после опорожнения резервуара воздух поступает в ГП и ПВС становится ненасыщенной углеводородом, происходит насыщение ГП. Как только давление в ГП достигнет значения настройки дыхательного клапана, он открывается, и некоторое количество ПВС выбрасывается в атмосферу. Считается, что потеря нефтепродуктов из «обратного выдоха» составляет приблизительно 1% от общего объема потерь от испарений. Согласно расчетам, в весенне-летний период из резервуара вертикального стального (ПВС) 5000 м³, не оборудованного средствами сокращения потерь от испарений, заполненного до середины высоты стенки, в атмосферу уходит от 100 до 150 кг бензина [44].

По различным оценкам потери на пути жидких углеводородов от скважин до топливных баков составляют от 3 до 5% [45,46].

1.3 Краткий обзор методов и средств сокращения потерь от испарений из резервуаров

Обзор исторического развития резервуарного хранения нефти представлен в диссертации[47]. Первые вертикальные резервуары по проекту Шухова были построены в 1885 году, принципиальная схема конструкции которых применяется без существенных изменений и в настоящее время. В период с 30-х по 70-е годы были предприняты множественные попытки сократить расход стали на сооружение резервуаров, путем сооружения железобетонных, земляных, каменных деревянных и других резервуаров.

Общая классификация резервуаров 50-х годов XX-века представлена на Рисунке 1.2.



1 – стандартные (с конической крышей и плоским дном); 2 – с коническими дном; 3 – с коническими бесстропильными покрытиями; 4 – со сферическими крышами и дном; 5 – с радиальными крышами и дном; 6 – казематные; 7 – с наружной бетонной оболочкой; 8 – с несущей оболочкой; 9 – с плоскими дном; 10 – со сферическими дном; 11 – каплевидные; 12 – многокупольные (многоторовые); 13 – сферические; 14 – с плавающими крышами; 15 – с дышащими крышами; 16 – разборные; 17 – траншейного типа со стальной оболочкой; 18 – прямоугольные; 19 – цилиндрические; 20 – конические; 21 – круглые; 22 – призматические

Рисунок 1.2 – Классификация резервуаров (50-е гг XX века) [48]

Несмотря на множественные попытки промышленности снизить использование стали в резервуарах, в настоящее время всё также широко применяются резервуары типа RBC и с 1910-х годов разрабатываются и модернизируются методы и средства сокращения потерь от испарений из данных резервуаров.

Практическая реализация методов и средств путей сокращения потерь от испарений представлена на Рисунке 1.3 [49].

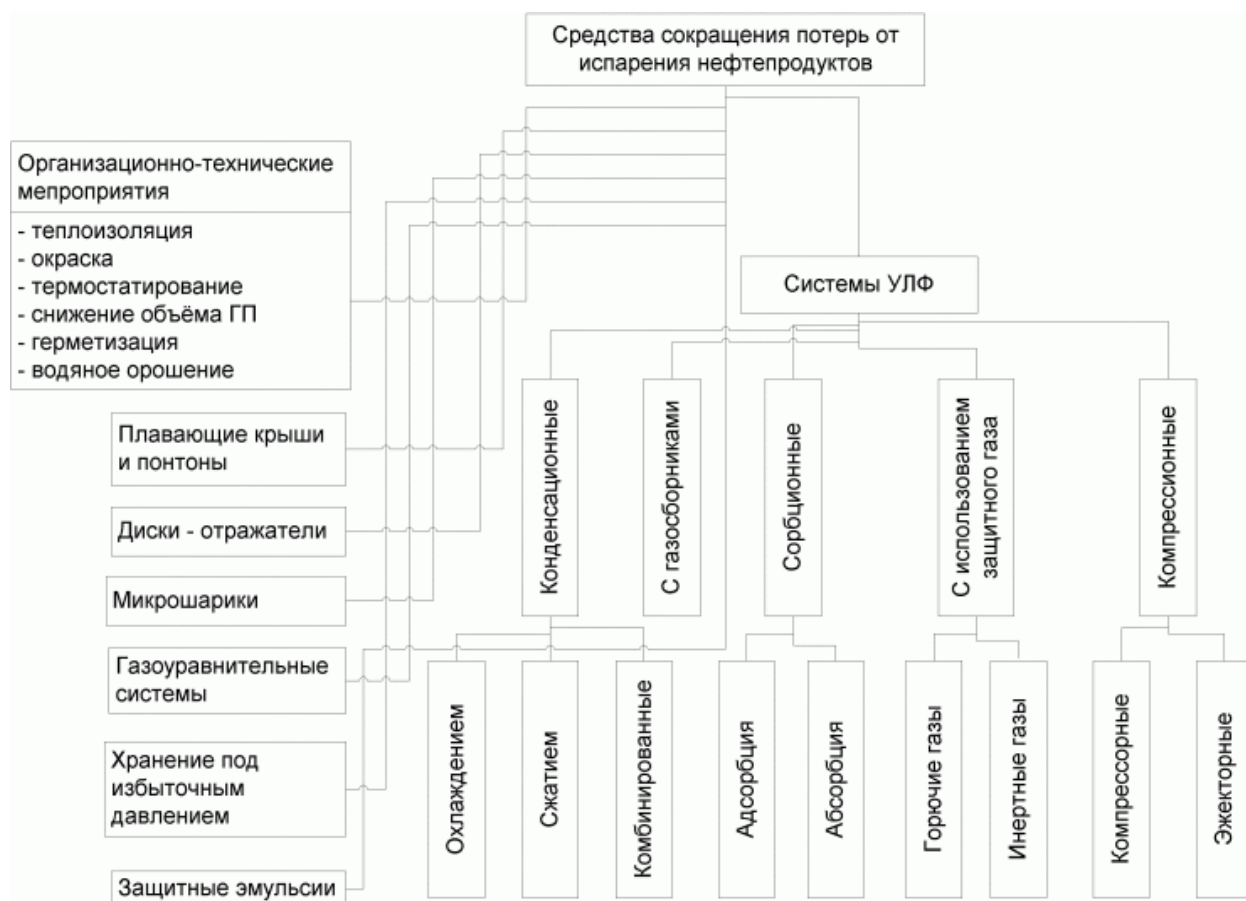
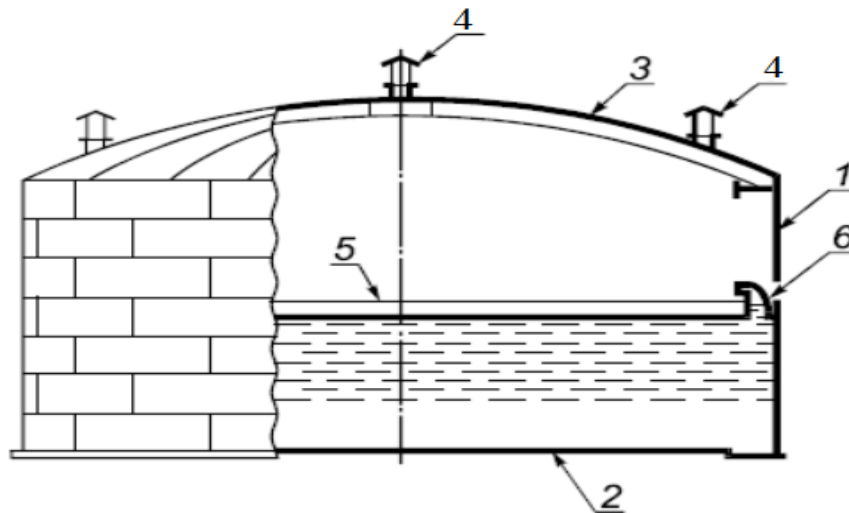


Рисунок 1.3 – Схема методов и средств сокращения потерь от испарений [49]

Различные средства и методы имеют различную эффективность и область применения. Так в Евросоюзе выбор средств сокращения потерь углеводородов производится в зависимости от упругости их паров по Рейду: при $P_R > 760000$ Па – установки рекуперации паров (УРП), при $P_R = 100000$ –

760000 Па - резервуары с плавающей крышей; при $P_R < 10000$ Па используют резервуары обычной конструкции с дыхательными клапанами.

В настоящее время наиболее распространенным устройством для сокращения потерь является понтон (Рисунок. 1.4).



1 – стенка; 2 – днище; 3 – стационарная крыша; 4 – вентиляционный проем; 5 – понтон; 6 – уплотняющий затвор

Рисунок 1.4 – Принципиальная схема резервуара с понтоном [32]

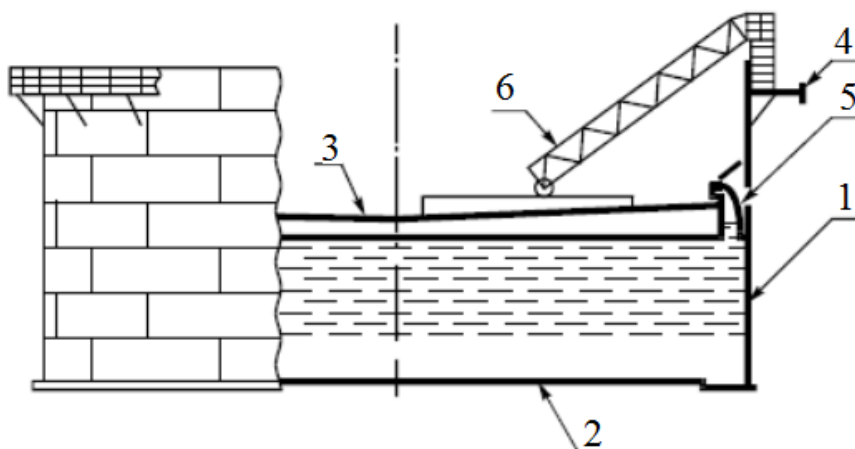
Наличие плавающих покрытий на поверхности бензина уменьшает площадь поверхности испарения и, следовательно, количество испаряющегося из него бензина в единицу времени [50-53].

Понтон представляет из себя диск, плавающий на поверхности продукта, покрывающий не менее 90% поверхности, по материалу понтоны подразделяются на металлические и синтетические. Зазор между стенкой и диском закрывается уплотняющим затвором. Затворы подразделяются на затворы мягкого и жесткого типа [54, 55].

Основными ограничениями использования понтонов и плавающих крыш (ПК) (Рисунок 1.5) являются:

- недостаточная остойчивость, влекущая за собой потопление, перекося и заклинивание понтонов и ПК [44, 56];

- испарение продуктов через кольцевой зазор и со смоченных стенок резервуара из-за недостаточной работы уплотняющего затвора;
- загрязнения продукта примесями в результате просачивания осадков через уплотняющий затвор и низкой надежности дренажного патрубка;
- повышенная опасность возгорания и взрыва.



1 – стенка; 2 – днище; 3 –плавающая крыша; 4 – ветровое кольцо;
5– уплотняющий затвор; 6– катушечная лестница

Рисунок 1.5 – Резервуар с ПК [32]

Понтон уменьшает потери от испарения, но он дорогостоящий, сложный в установке [57]. ПК дороже в эксплуатации, сложнее конструктивно, и требуют мероприятий для борьбы с осадками и обледенением (дождь, снег, лед) [58].

Большое количество трудов посвящено разработке и совершенствованию конструкций гибких плавающих крыш [59-62]. Несмотря на высокую эффективность сокращения потерь и решение вопроса заклинивания крыши о направляющую стойку при неравномерности осадков, возникает вопрос со сложностью удаления этих осадков с гибкой кровли.

Совершенствование конструкций понтонов сопряжено с совершенствованием конструкций уплотняющих затворов. Так известны конструкции мягкого и жесткого типа [63,64].

К конструкциям мягкого типа относятся затворы из резиноканевых и

пористых эластичных материалов, например, РУМ-1 и РУМ-2. Недостатком устройств мягкого типа является их низкая износостойкость. Так в результате повышенной силы прижатия затвора к стенке резервуара достигается его высокая эффективность, но повышается сила трения и снижается долговечность. Затворы жесткого типа (РУРП-1 и УЗПК-1) обеспечивают прижатие за счет прижимного механизма, но в результате неплотного обжатия, наличия неровностей на стенке резервуаров обеспечивают не столь плотное прилегание как затворы мягкого типа, а их прижимной механизм подвержен коррозии [63,64].

Эффективность применения понтонов в зависимости от объема резервуара представлена на Рисунке 1.6. Из рисунка видно, что эффективность применения понтонов тем ниже, чем меньше объем резервуаров и меньше коэффициент оборачиваемости[65].

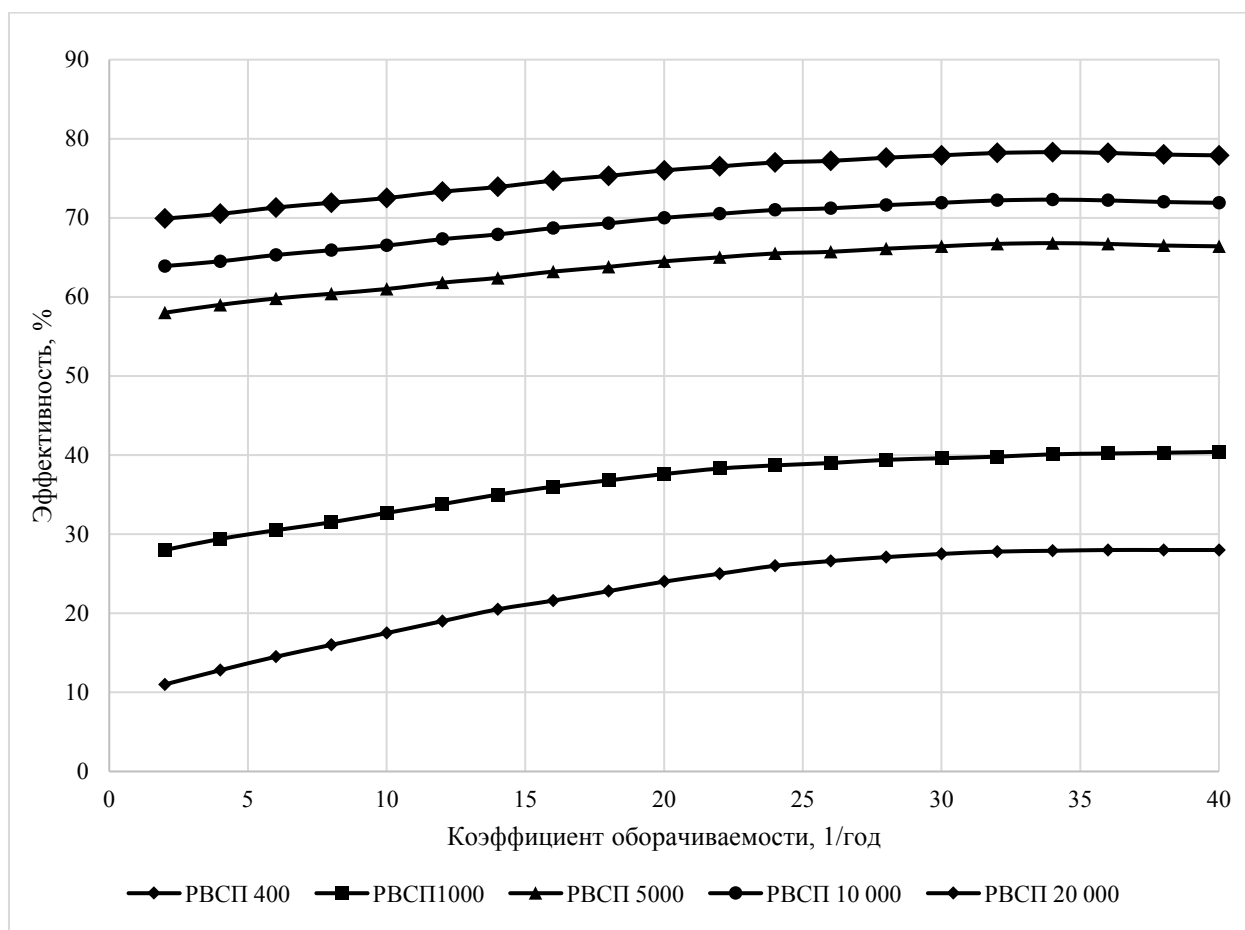
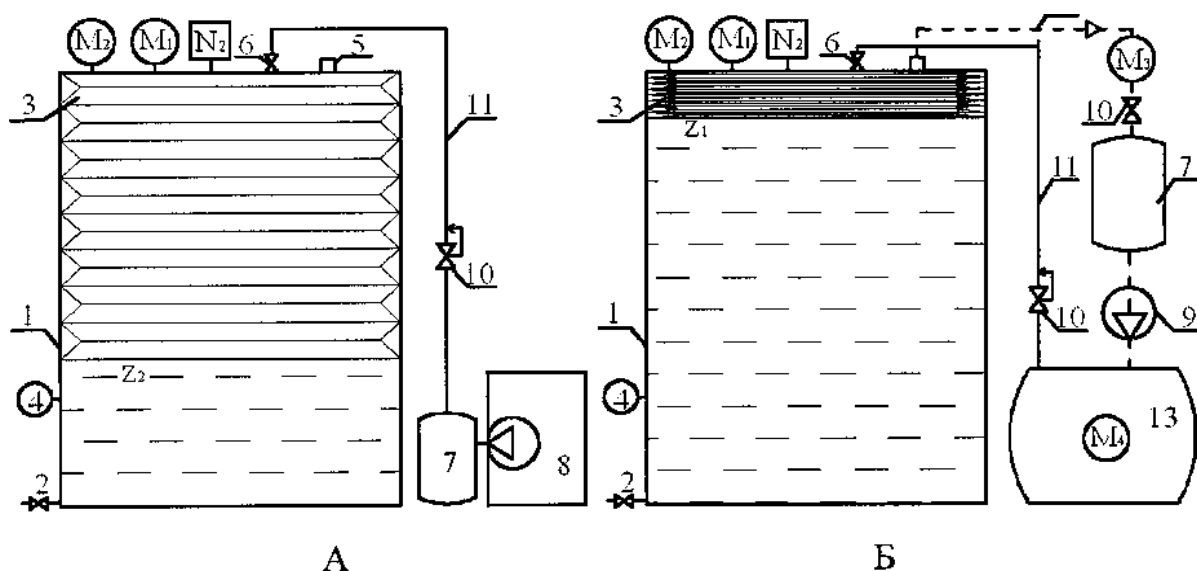


Рисунок 1.6 – Эффективность применения понтонов в зависимости от объема резервуаров [65]

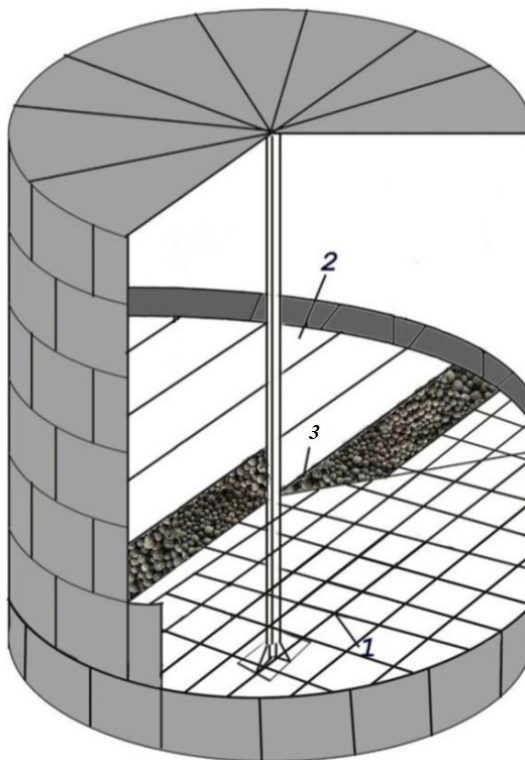
В стремлении улучшить конструкцию понтона автором работы [66] была разработана конструкция резервуара с универсальной управляемой камерой (Рисунок 1.7).



Рассчитано, что применение данной разработки эффективно для резервуаров с коэффициентами оборачиваемости от 5 до 39 раз в год, однако с ростом коэффициента оборачиваемости затраты на электроэнергию начинают превышать выгоду от сокращения потерь. При этом экономическая оценка затрат на внедрение данной разработки выглядит заниженной.

В работе [67] было изучено применение гранулированного пеностекла с закрытой пористой структурой для сокращения потерь нефтепродуктов, схема устройства представлена на Рисунке 1.8.

Автором по результатам лабораторных испытаний были получены положительные результаты, предложено применение данной разработки в резервуарах объемом до 5000 м³. Фактически предложенное устройство является новым типом понтона, более дешевым чем существующие виды, но, как известно понтоны, в малых резервуарах недостаточно эффективны [65].



1 – Вантовая решетка; 2 – Панели из стальной проволоки; 3 – Слои гранулированного пеностекла.

Рисунок 1.8 – Технологическая схема создания защитного покрытия из гранулированного пеностекла для резервуаров [67]

Диск-отражатель (Рисунок 1.9), устанавливаемый под монтажным патрубком дыхательного клапана, является препятствием для смешения воздуха, входящего через дыхательный патрубок резервуара, с ПВС в резервуаре [68, 69].

Диск-отражатель одно из наиболее дешевых средств сокращения потерь, он имеет некоторую эффективность при коэффициентах оборачиваемости от 30 раз в год, но в этой области эффективнее применение более дорогих средств. Авторы [64] указывают, что диски-отражатели неэффективны, и после 100-120 часов хранения (а в жаркую погоду 40 часов) они не работают.



Рисунок 1.9 – Диск отражатель

Газоуравнительная система (ГУС) представляет собой газопровод, связывающий ГП резервуаров, к которому подключен газосборник. Это приводит к сокращению выбросов за счет перекачки ПВС из резервуаров в газовый коллектор и обратно в резервуары. Простейшим газовым коллектором является пустой резервуар, подключенный к ГУС. Расчеты показывают, что в этом газовом коллекторе емкость хранения не превышает 27 г бензина на 1 м^3 емкости. Другими словами, если к газопроводу подключен пустой резервуар объемом 1000 м^3 , в нем может храниться не более 27 кг бензина в виде ПВС.

Шаровые резервуары, предложенные Д.Т. Хортоном (Рисунок 1.10) [70], применяются для хранения продуктов под давлением до 1,8 МПа. Хранение бензинов и нефтей в данных резервуарах позволяет полностью сократить потери от испарений, но ввиду относительно малого объема, высокой металлоемкости и больших эксплуатационных затрат такой метод для хранения бензинов и нефтей является нерентабельным.



Рисунок 1.10 – Шаровые газгольдеры

Примечательным является применение жидких эмульсий, плотностью меньше, чем нефтепродукт. Преимущество этого способа заключается в том, что эмульсия расплывается по всей поверхности «зеркала», изолируя нефтепродукт от газового пространства, никак не завися от формы резервуара. Защитные эмульсии могут применяться как в новых, так и в действующих резервуарах любой конструкции крыши без ее модернизации. Опыты с эмульсиями показали, что в среднем снижение потерь от испарений нефти составляет 80%. Однако их стабильность (срок службы) составляла всего 3 месяца, далее эмульсия разрушалась и оседала на дне резервуара. Из-за короткого срока службы эмульсий срок их окупаемости более чем в 10 раз превышает срок службы. В итоге испытываемая промышленная эмульсия не нашла применения [51, 71].

Препятствием для использования других составов эмульсий была высокая концентрация воды: при низких температурах они замерзали на стенках резервуаров, сплошность покрытия нарушалась образовавшимся льдом. Также был выявлен дополнительный недостаток: при сливе продукта из резервуаров, в случае низкого уровня налива, эмульсия захватывается воронкой, забивая на своем пути насосы и фильтры.

Необходимо отметить возможность хранения нефтепродуктов в среде

защитных газов, рассмотренную в диссертации Р.Е. Левитина [72]. При хранении в подземных резервуарах РГС исследовалось хранение бензина АИ-92 отдельно в среде неона, азота, воздуха, аргона, криптона. В ходе исследований при хранении в среде защитных газов было достигнуто сохранение качества бензина относительно хранения с воздушной средой. Выявлено, что уменьшение испаряемости наблюдается в газы, имеющие меньшую молекулярную массу, и напротив, испаряемость увеличивается при хранении в более тяжелых газах. При этом, исключая кислород, достигается сохранение качества бензина. Так наиболее эффективным для сокращения от испарений исследуемым газом явился неон. К сожалению, исследования более легким гелием не проводились и в целом эффективность данной технологии в направлении сокращения от испарений невелика и составляет примерно 20% при сравнении динамики испарений в воздух и в неон, судя по графику динамики испарений на Рисунке 1.11 [72].

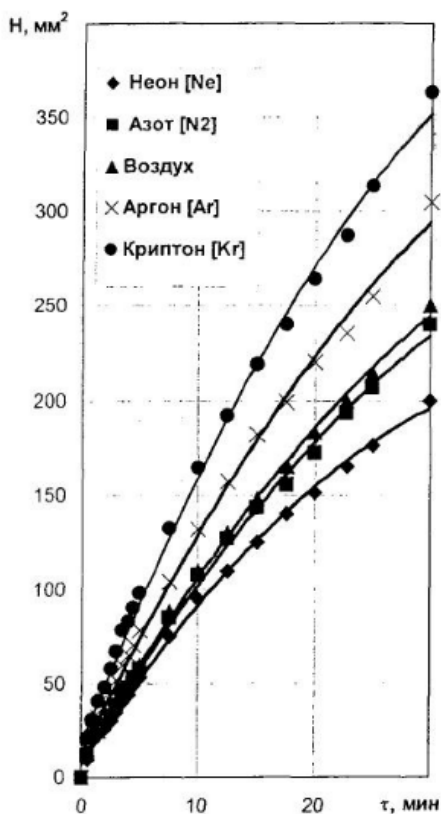


Рисунок 1.11 – Динамика испарения бензина «Регуляр» для различных инертных заполнителей [72]

1.4 Установки рекуперации паров

В настоящее время применение УРП считается наиболее эффективным. В соответствии с определением, данным А. А. Коршаком [45], система улавливания легких фракций (в настоящее время принято называть УРП) представляет собой комплекс технологического оборудования, которое обеспечивает улавливание и утилизацию легких фракций нефтепродуктов при повышении давления в резервуаре ГП до их выхода из него. Утилизация может включать в себя накопление ПВС с последующим возвратом в резервуар, отделение углеводородов от ПВС или реализацию ПВС для потребителей. В Европейском союзе и Соединенных Штатах применение таких систем закреплено законодательством. В 1999 году в г. Москве был введен подобный нормативный акт [73], но в настоящее время он отменен.

Несмотря на многообразие предлагаемых и заявляемых в качестве изобретений УРП, их можно классифицировать в несколько групп:

- адсорбционные;
- абсорбционные;
- конденсационные;
- компрессионные;
- комбинированные.

В адсорбционных системах УРП для улавливания паров бензина из паровоздушной смеси используются твердые поглотители (адсорбенты). Уголь, пористые полимеры и другие материалы могут использоваться в качестве адсорбентов. Адсорбция отличается простотой, надежностью и безопасностью в эксплуатации. В зависимости от режима работы устройства предусмотрена двухступенчатая регулировка температуры. Однако из-за низкой скорости потока и необходимости дополнительных затрат на десорбцию, адсорбционные системы не нашли практического применения для извлечения паров нефтепродуктов из ПВС.

Конденсационные системы УРП основаны на принципе более высокой температуры конденсации паров углеводородов по сравнению с воздухом. В этих системах охлаждение ПВС осуществляется в один или два этапа. Конденсация паров бензина из паровоздушной смеси происходит в поверхностном охладителе-конденсаторе путем охлаждения ПВС хладагентом, протекающим по оребренным трубкам. Конденсат, образующийся при охлаждении, собирается и откачивается в резервуар. Гексаны, пентаны и бутаны являются основными компонентами конденсата. По своему составу и свойствам он соответствует бензину с давлением насыщенного пара около 0,15 МПа. В ряде изобретений предложены одноступенчатые системы конденсации паров, но они различаются по конструкции. Недостатками таких систем являются низкая эффективность конденсации углеводородов и возможность попадания воздуха в резервуар через дыхательный клапан, что приводит к конденсации влаги с негативным влиянием на качество хранимого продукта и безопасность резервуара из-за возможности примерзания подвижных частей при низких температурах.

Компрессионные системы являются одной из наиболее перспективных областей разработки средств снижения потерь от испарения. УРП с использованием жидкостных газовых струйных установок, известны как струйно-компрессорные установки (СКУ). В таких системах сжатие ПВС осуществляется благодаря энергии высокоскоростных струй рабочей среды в различных агрегатных состояниях (жидкая, двухфазная газожидкостная смесь). Для улавливания легких фракций, в качестве рабочей среды, может использоваться продукт, поступающий в резервуар, а захваченные пары могут быть напрямую поданы в нефть. СКУ обладают высокой эффективностью снижения потерь, характеризуются небольшой металлоемкостью и капитальными затратами. Основной принцип работы установки показан на Рисунке 1.12. Однако из-за недостаточного понимания рабочих процессов в двухфазных струйных устройствах, которые являются

частью СКУ, такие установки не используются в промышленных операциях для улавливания легких фракций.

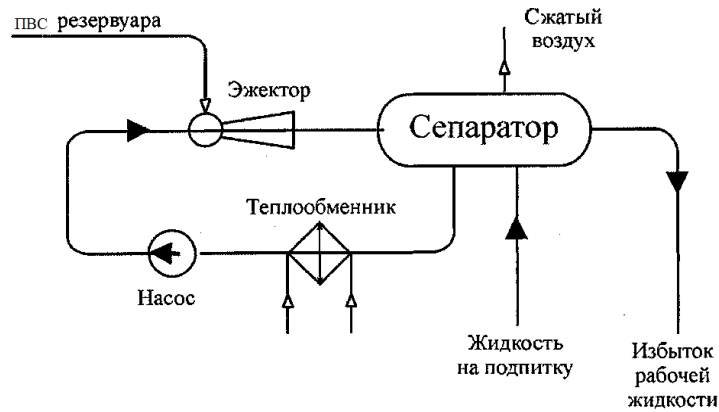
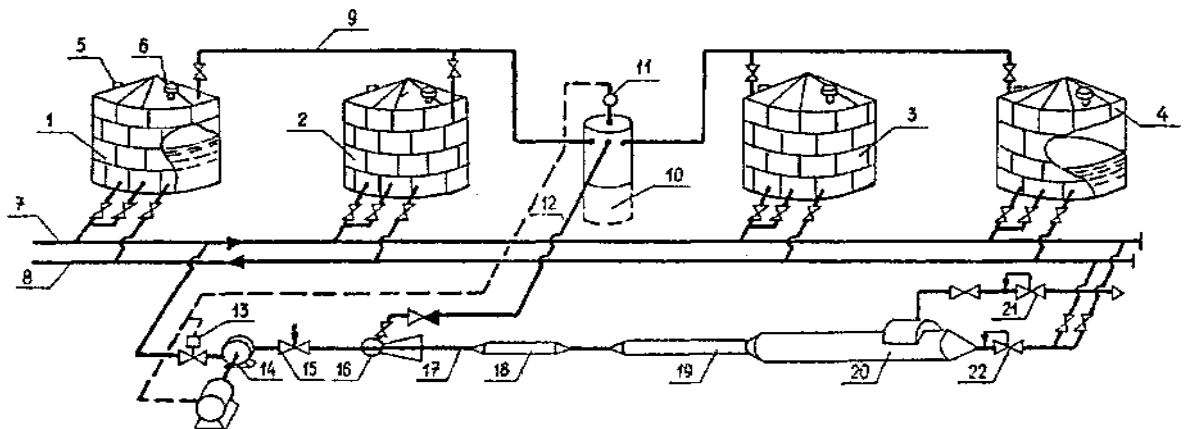


Рисунок 1.12 – Принципиальная схема СКУ для УРП [65]

На Рисунке 1.13 приведена схема эжекторной системы УРП, разработанной профессором А. А. Коршаком [65].



- 1,2,3,4 – резервуары с бензином; 5 – предохранительный клапан;
 6 – дыхательный клапан; 7 – подводящий трубопровод; 8 – отводящий трубопровод; 9 – газовая обвязка; 10 – газовый смеситель; 11 – манометр;
 12 – подводящий газопровод; 13 – отсечной клапан; 14 – насос;
 15 – клапан-отсекатель; 16 – жидкостно-газовый эжектор;
 17 – трубопровод; 18 – диспергатор; 19 – секция укрупнения пузырьков; 20 – трубный сепаратор; 21, 22 – регулятор давления типа «до себя»

Рисунок 1.13 - Технологическая схема эжекторной системы УЛФ [65]

Использование жидкостных газовых струйных устройств (эжекторов) в упомянутой СКУ связано с рядом трудностей: во-первых, рабочая жидкость и сжимаемые пары представляют собой смесь широкого фракционного состава, что затрудняет расчет таких эжекторов; во-вторых, в такой установке происходят взаимопараллельные процессы конденсации и поглощения в струйном аппарате, которые активно влияют на эффективность компрессорной установки такого типа.

Использование компрессионных УРП рекомендуется при высоких потоках ПВС. Создаваемое компрессорами давление довольно высокое. В то же время использование поршневых компрессоров требует значительных капитальных затрат, а винтовые компрессоры не всегда обладают достаточной эксплуатационной надежностью. Кроме того, в компрессионных системах УРП сжатие паров приводит к повышению их температуры, что требует обязательного охлаждения паров, чтобы обеспечить конденсацию углеводородов.

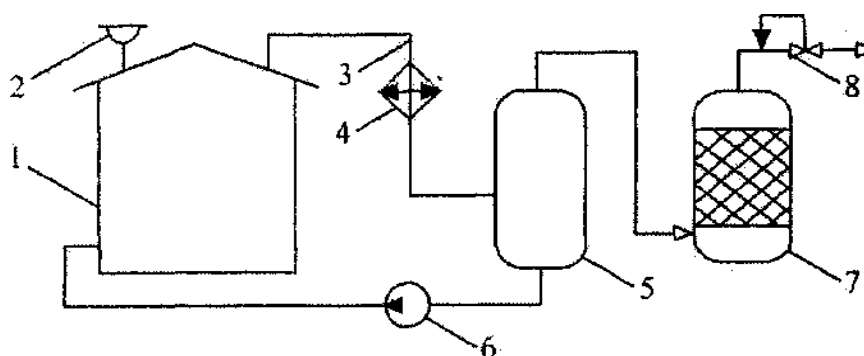
Для обеспечения безопасной работы компрессоров необходимо, чтобы воздух не попадал в ГП резервуаров. Охлаждение паров и создание их резервов для последующего заполнения ГП требуют дополнительных затрат.

УРП компрессионного типа нашли применение на промыслах в условиях наличия в непосредственной близости газопровода, в который отводится газообразная среда при заполнении резервуара, при этом воздух в ПВС, либо отсутствует, либо содержится в незначительном количестве, сконденсированная жидкая среда возвращается обратно в резервуар. Таким образом существенным ограничением для распространения за пределы промыслов действующих УРП компрессионного типа является отсутствие газопровода в непосредственной близости, либо необходимость значительного усложнения системы для увеличения сконденсированной, уловленной среды [74].

По результатам оценки в работе [75] при использовании керосина и

дизельного топлива в качестве рабочей жидкости эффективность извлечения паров бензина составляет 96 - 98%. Однако, согласно данным [45], эти цифры завышены, так как процесс поглощения углеводородов из паровоздушной смеси достаточно длительный. Низколетучий нефтепродукт, используемый в качестве рабочей жидкости, должен периодически регенерироваться. Блок регенерации требует довольно больших инвестиций и эксплуатационных расходов.

В абсорбционных системах УРП роль поглотителя паров бензина играет низколетучая углеводородная жидкость, выполняющая роль абсорбента. На Рисунке 1.14 показана принципиальная схема конденсационно-адсорбционной системы УРП.



1 – резервуар с бензином; 2 – дыхательный клапан; 3 – газовая обвязка;
4 – холодильник; 5 – емкость; 6 – насос; 7 – адсорбер; 8 – регулятор
давления типа «до себя».

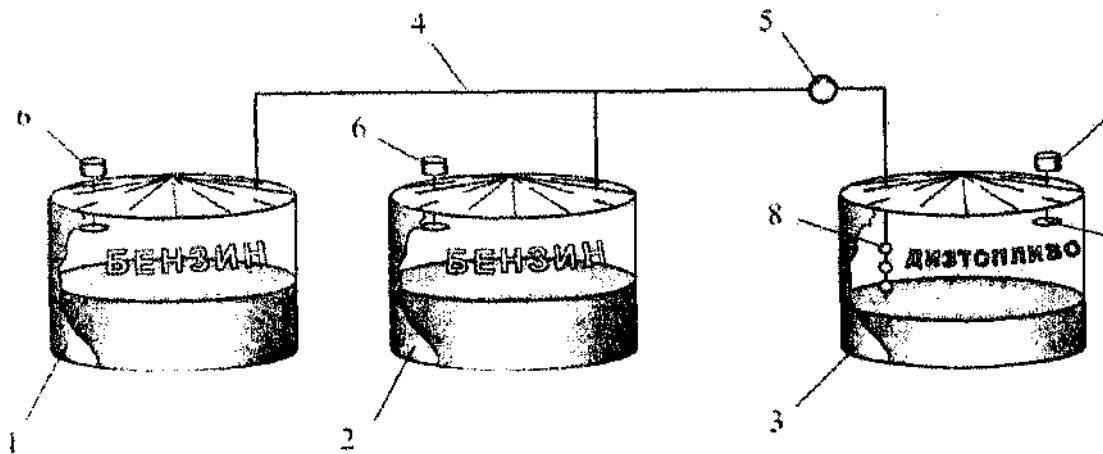
Рисунок 1.14 – Конденсационно-адсорбционная система УРП [65]

Все описанные выше системы УРП имеют один существенный недостаток – они относительно дороги. Причины этого:

- высокая стоимость компонентов;
- необходимость использования автоматического управления;
- наличие энергопотребляющего оборудования в их составе.

Стремление снизить стоимость системы УРП привело к созданию системы УРП с «транзитным» резервуаром (Рисунок. 1.15) [76]. Система

позволяет снизить концентрацию углеводородов в ПВС без уменьшения объема высвобождения паров из резервуара.



1,2– резервуары с бензином; 3 – резервуар с низколетучим светлым нефтепродуктом (дизтопливом); 4 – газовая обвязка; 5 –обратный клапан; 6 – дыхательный клапан; 7 – диск-отражатель; 8 – устройство ввода ПВС в «транзитный» резервуар.

Рисунок 1.15– Принципиальная схема системы УРП с «транзитным» Резервуаром [76]

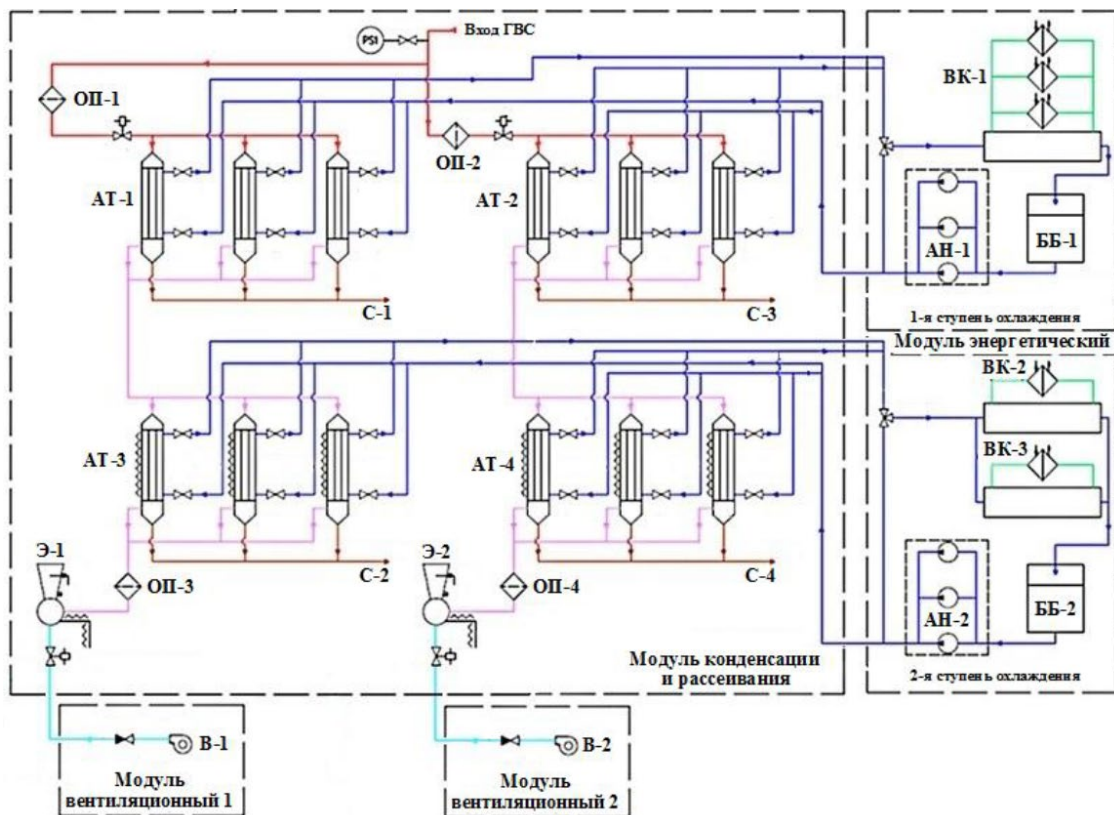
Система предназначена для снижения потерь бензина во время приема и хранения бензина в резервуарах, независимо от их формы.

Снижение потерь бензина, который она обеспечивает, около 95-99%, но в то же время качество низколетучего продукта может ухудшаться, а потери бензина остаются, уменьшается только объем их выброса в атмосферу.

Существенным ограничением для многих систем УРП является наличие в ПВС воздуха и влаги, исключение из ПВС воздуха и влаги могло бы существенно повысить потенциал применения систем УРП.

Описанные выше УРП не всегда обеспечивают необходимое сокращение выбросов паров углеводородов в атмосферу. Поэтому во многих изобретениях предполагается совмещать сразу несколько способов улавливания паров.

Оценивая эффективность действующих УРП, следует отметить применяемую в ООО «Новороссийский морской торговый порт», г. Новороссийск, УРП конденсационного типа «Комплекс конденсации и рассеивания-4000», производства ООО «Газспецтехника», устроенную по схеме на Рисунке 1.16.



АН – агрегат насосный; ББ – буферный бак; В – вентилятор; ВК – воздушный конденсатор; ОП – огнепреградитель; С – слив; Э – эжектор

Рисунок 1.16 – УРП «Комплекс конденсации и рассеивания» [77]

Из анализа эффективности данной УРП [77] следует, что степень очистки ПВС от паров бензина лишь 18,9% паров, что в 4 раза меньше заявленной производителем, это объясняется недостаточно низкой температурой конденсации. При этом на улавливание 1 т бензина затрачивается 18197 кВт·ч электроэнергии и 894,2 кг ингибитора, что свидетельствует о весьма низкой эффективности применения данного вида УРП [77].

1.5 Применение гибких оболочек в резервуарах

Одна из конструкций резервуара с гибкой оболочкой кратко упомянута в работе [59], к сожалению, кроме описания и схемы других данных не приведено. Для сокращения испарений и предотвращения смешивания паров нефтепродуктов с воздухом и влагой примечательна конструкция резервуара с мешком наполненным воздухом (Рисунок 1.17) [78].

Авторами предлагается использовать конструкцию для предотвращения потерь от «малых дыханий».

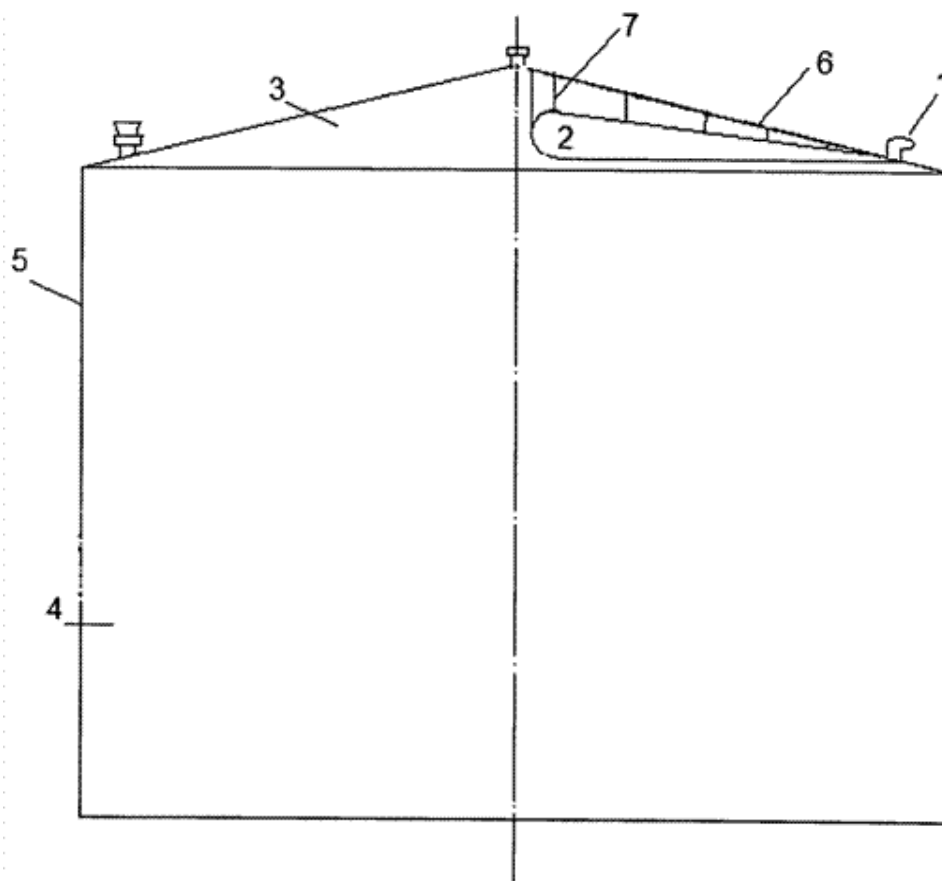


Рисунок 1.17 – Резервуар с воздушным мешком [78]

В ГУП ИПТЭР в виде дальнейшего развития гибкой ПК и синтетического понтона была предложена конструкция резервуара с защитной пленкой (Рисунок 1.18) [79].

К сожалению, данные об испытаниях подобной конструкции отсутствуют.

Большое количество вариантов исполнения резервуаров с гибкими оболочками предложено В.И. Паутовым. На Рисунке 1.19 представлена конструкция резервуара с эластичными оболочками для хранения двух различных продуктов в одном резервуаре [80].

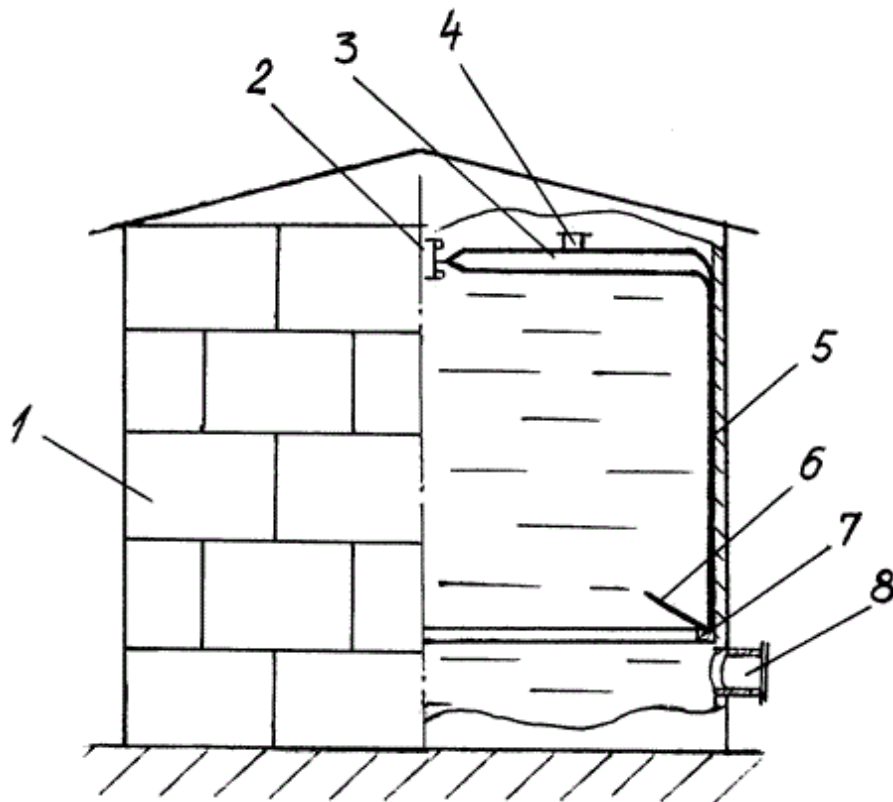


Рисунок 1.18 – Резервуар с защитной пленкой [79]

Конструкция представленного резервуара решает проблему хранения нескольких различных продуктов в одном резервуаре, но также отсутствуют данные об испытаниях данной конструкции и особенностях её эксплуатации.

Первые конструкции резервуаров с эластичными оболочками были представлены в обзоре Дж. Уиггинса в 1925 году [81]. Уровень развития эластомерных и полимерных материалов на тот момент не позволял применять подобные конструкции с необходимой надежностью. Также не достаточно были изучены устойчивость данных материалов к нефти и нефтепродуктам, степень их проницаемости, морозостойкость и срок службы.

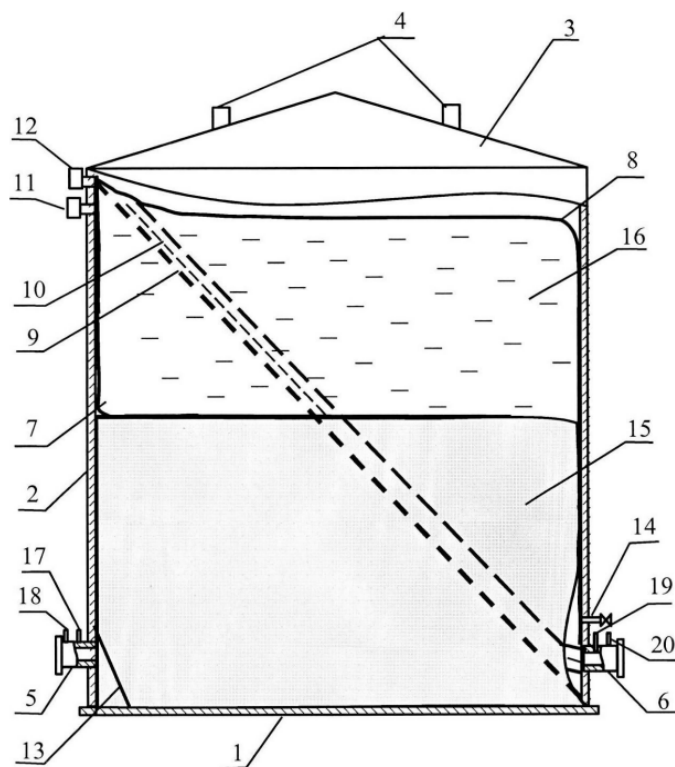


Рисунок 1.19 – Резервуар с эластичными оболочками для хранения двух различных продуктов [80]

В серии исследований мобильных складов нефтепродуктов, состоящих из эластичных резервуаров, обосновано применение термопластичного полиуретана (ТПУ) в виду его высокой механической прочности и малой проницаемости нефтепродуктами. Обоснован срок безопасной эксплуатации данных оболочек не менее 7 лет в полевых условиях. Обосновано применение полимерной пленки полиэтилен/полиамид и ТПУ так как коэффициент проницаемости для них ниже в зависимости от вида нефтепродукта соответственно в 231,0–554,5 и 3,2–27,9 раза [82].

До настоящего времени не проводились исследования резервуаров оснащенных гибкими оболочками во внутренней полости. На основании обзора исследований выявлена потенциальная возможность разработки и испытания конструкции с гибкой внутренней оболочкой из полимеров, для сокращения потерь от испарений нефти и нефтепродуктов в резервуарах различных форм.

1.6 Постановка задач исследований

1. По результатам обзора действующих методик расчета дыхательной арматуры в них выявлено отсутствие учета перетока при переключении резервуаров. В единственной методике, полноценно учитывающей переток, отсутствует учет других факторов, влияющих на производительность дыхательной арматуры. Сделан вывод о необходимости совершенствования расчета дыхательной арматуры с учетом перетока при переключении резервуаров и испаряемости продукта.

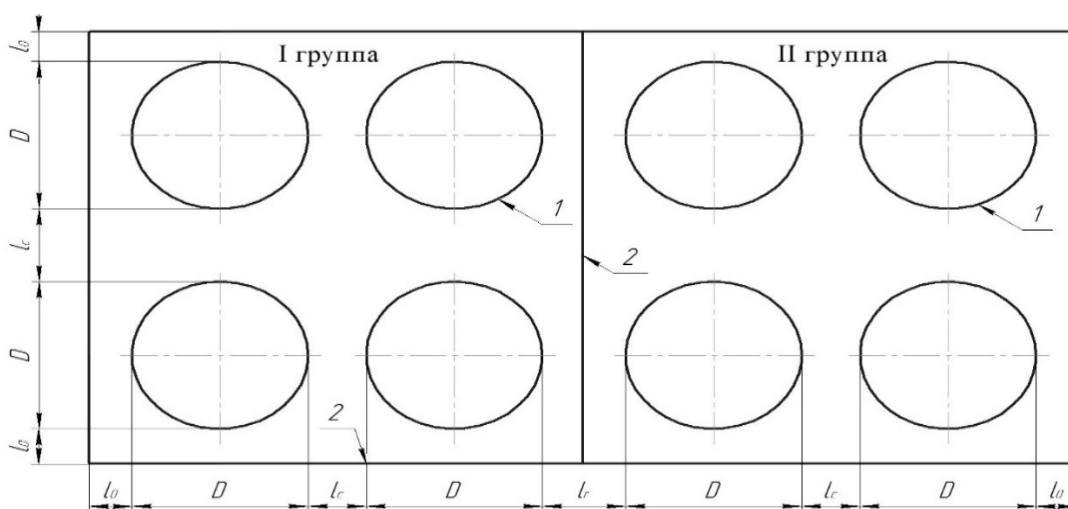
2. На основании обзора различных средств сокращения потерь жидких углеводородов от испарения при хранении в резервуарах, выявлено, что наибольшее внимание исследователи уделяют развитию понтонов, ПК и системам УЛФ, при этом альтернативные конструкции недостаточно исследованы.

3. Выявлена недостаточная исследованность возможности сокращения потерь от испарений путем применения гибких оболочек внутри резервуаров различных форм. Исследования по сокращения потерь от испарений путем применения гибких оболочек во внутренней полости резервуара на данный момент отсутствуют.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ДЫХАТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

2.1 Оценка производительности закачки и откачки с учетом перетока при переключении современных резервуаров

В работе [80] был повторно изучен процесс перетока с учетом действующих норм. Принципиальная схема расстановки резервуаров представлена на Рисунок 2.1.



1 – резервуары в группе; 2 – осевая линия ограждения;

l_c –минимальное расстояние между стенками резервуаров, располагаемых в одной группе; D –диаметр резервуара; l_r –минимальное расстояние между стенками резервуаров, расположенных в соседних группах;

l_0 –расстояние от стенок резервуаров до подошвы внутреннего откоса обвалования или ограждающей стенки.

Рисунок 2.1 – План-схема расположения резервуаров в группах и парке в целом

Для оценки влияния перетока на производительность заполнения (опорожнения) резервуаров выполнен расчет для нескольких типовых схем НПС, результаты расчета указаны в Таблицах 2.1, 2.2.

Таблица 2.1 – Количество резервуаров на НПС

DN	Тип резервуара	$D_{рез}, м$	Количество	Емкость резервуарного парка, тыс. $м^3$
700	PBC 10000	28,5	4	40
800	PBC 10000	28,5	4	40
1000	PBC 20000	40,0	4	80
1200	PBC 20000	40,0	6	120

Таблица 2.2 – Пропускная способность нефтепровода

DN	Производительность, млн т/год	Часовая производительность, т/ч	Производительность $м^3/ч$ (при $850кг/м^3$)
700	19	2262	2661
800	27	3214	3782
1000	50	5952	7000
1200	78	9286	10924

Исходные данные для расчета приведены в Таблице 2.3. Для резервуаров с понтоном, минимальное расстояние между стенками резервуаров, расположенных в одной группе составляет $0,65D_{рез}$, принимая расположение ПРП на центральной оси резервуаров, длину трубопровода l_{11} можно принять равной $1,65D_{рез}$.

Таблица 2.3 – Параметры обвязки резервуарного парка

Типы резервуаров	$D_{рез}, м$	$l_{11}, м$	$l_{12}, м$	$l_{2, м}$	$d_{11}, м$	$d_{12}, м$	$d_{2, м}$	ξ_{11}	ξ_{12}	ξ_2
PBC 5000	20,92	34,518	10	10	0,7	0,5	0,5	0,95	2	1,5
PBC 10000	28,5	47,025	10	10	0,8	0,7	0,7	0,71	2	1,5
PBC 20000	39,9	65,835	10	10	1,0	0,7	0,7	0,95	2	1,5

Результаты расчета откачки и закачки при переключении резервуаров с учётом перетока представлены в Таблицах 2.4, 2.5.

Таблица 2.4 – Результаты расчета откачки с учётом перетока

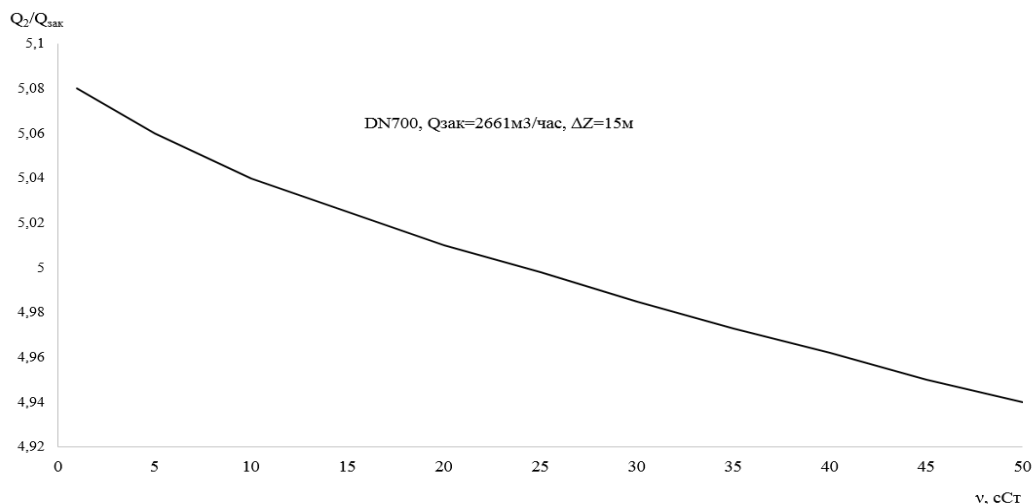
DN	Резервуары	$Q_{отк}, м^3/ч$	$\Delta H, м$	$\lambda_{11}, м$	$\lambda_{12}, м$	$\lambda_{2, м}$	$Q_1, м^3/ч$	$Q_2, м^3/ч$	$Q_1 / Q_{отк}$
700	PBC 5000	2661	13	0,0197	0,0192	0,0211	6088	3427	2,28
700	PBC 10000	2661	15	0,0179	0,0178	0,0185	11429	8767	4,29
800	PBC 10000	3782	15	0,0179	0,0178	0,0189	11567	7785	3,06
1000	PBC 20000	7000	15	0,0178	0,0174	0,0196	13338	6339	1,91
1200	PBC 20000	10924	15	0,0177	0,0174	0,0223	13655	2731	1,25

Таблица 2.5 – Результаты расчёта закачки с учётом перетока

Резервуары	$Q_{\text{зак}}, \text{м}^3/\text{ч}$	$\Delta H, \text{м}$	$\lambda_{11}, \text{м}$	$\lambda_{12}, \text{м}$	$\lambda_{23}, \text{м}$	$Q_1, \text{м}^3/\text{ч}$	$Q_2, \text{м}^3/\text{ч}$	$Q_2/Q_{\text{отк}}$
РВС 5000	2661	13	0,0205	0,0199	0,0187	4932	7593	2,85
РВС 10000	2661	15	0,0182	0,0180	0,0174	10566	13227	4,97
РВС 10000	3782	15	0,0182	0,0181	0,0173	10341	14123	3,73
РВС 20000	7000	15	0,0186	0,0180	0,0168	10559	17559	2,51
РВС 20000	10924	15	0,0191	0,0184	0,0165	9317	20241	1,85

По результатам расчетов в действующих резервуарных парках производительность перетока при откачке может превышать проектную производительность нефтепровода в 4,29 раз, а при закачке 4,97 раз. При этом наибольшее превышение производительности наблюдается в резервуарах объемом 10000 м³, так как для них отношение высоты налива к диаметру резервуара будет максимальным. Превышение производительности закачки над откачкой с учетом перетока, объясняется особенностью гидравлической схемы расчета, так для схемы закачки общие потери напора в трубопроводе 1 меньше, чем для схемы откачки (Рисунок 1.1).

При оценке влияния вязкости на Рисунке 2.2, следует отметить, что с изменением вязкости, интенсивность перетока снижается незначительно, следовательно, превышение проектной производительности трубопровода будет наблюдаться для резервуаров, предназначенных для всех типов нефти и нефтепродуктов.

Рисунок 2.2 – Зависимость $Q_2/Q_{\text{зак}}$ от вязкости продукта

Анализ зависимости интенсивности перетока от разностей уровня налива представлен на Рисунке 2.3.

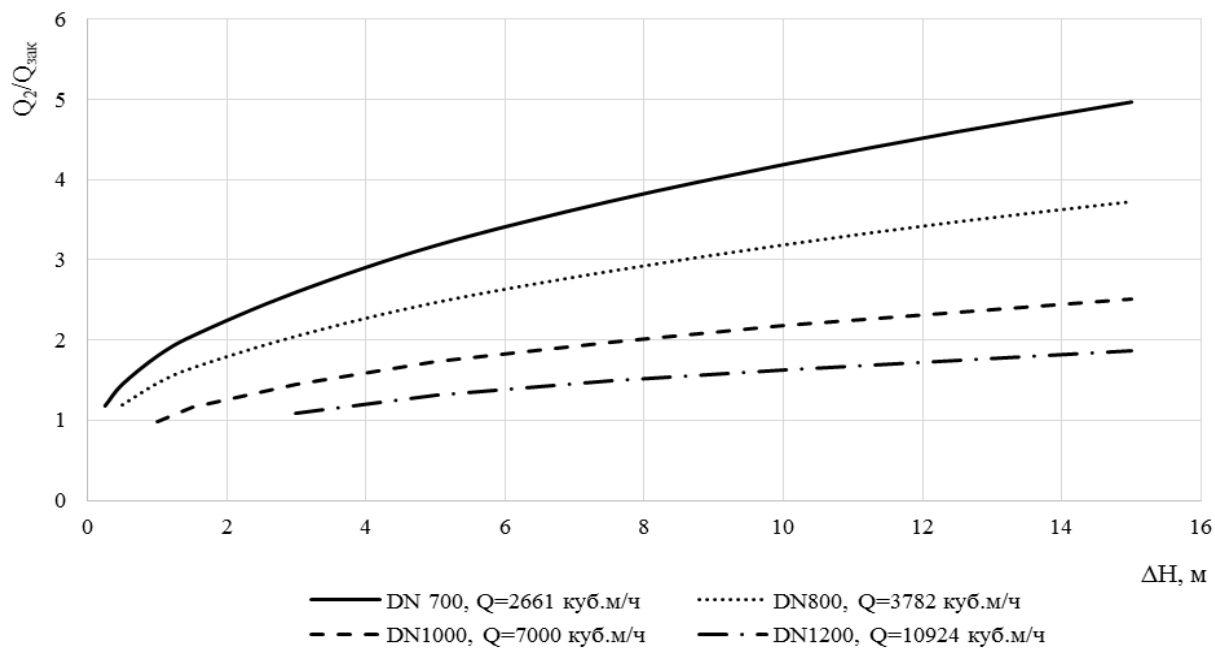


Рисунок 2.3 – Зависимость Q_2/Q_{zak} от разностей уровня налива в резервуарах

Разность уровней налива в резервуарах вносит очень существенное влияние на производительность трубопроводов с учетом перетока, особенно для трубопроводов меньших диаметров (Рисунок 2.4).

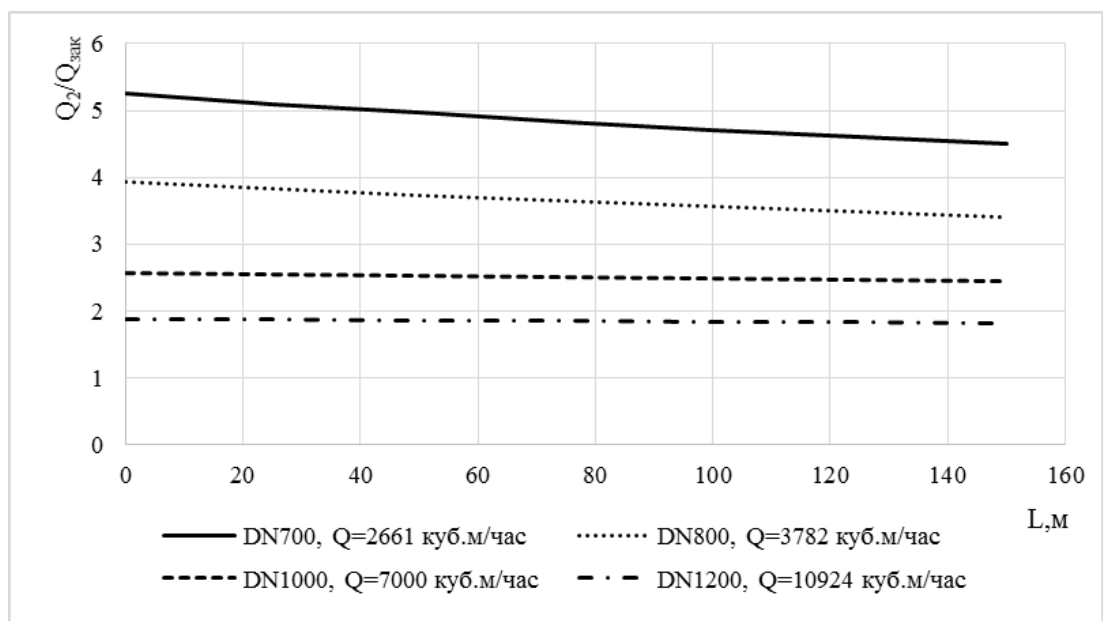


Рисунок 2.4 – Зависимость Q_2/Q_{zak} от расстояния между резервуарами

Увеличение расстояния между резервуарами способствует уменьшению интенсивности перетока в результате увеличения потерь напора по длине трубопровода (рисунок 2.5).

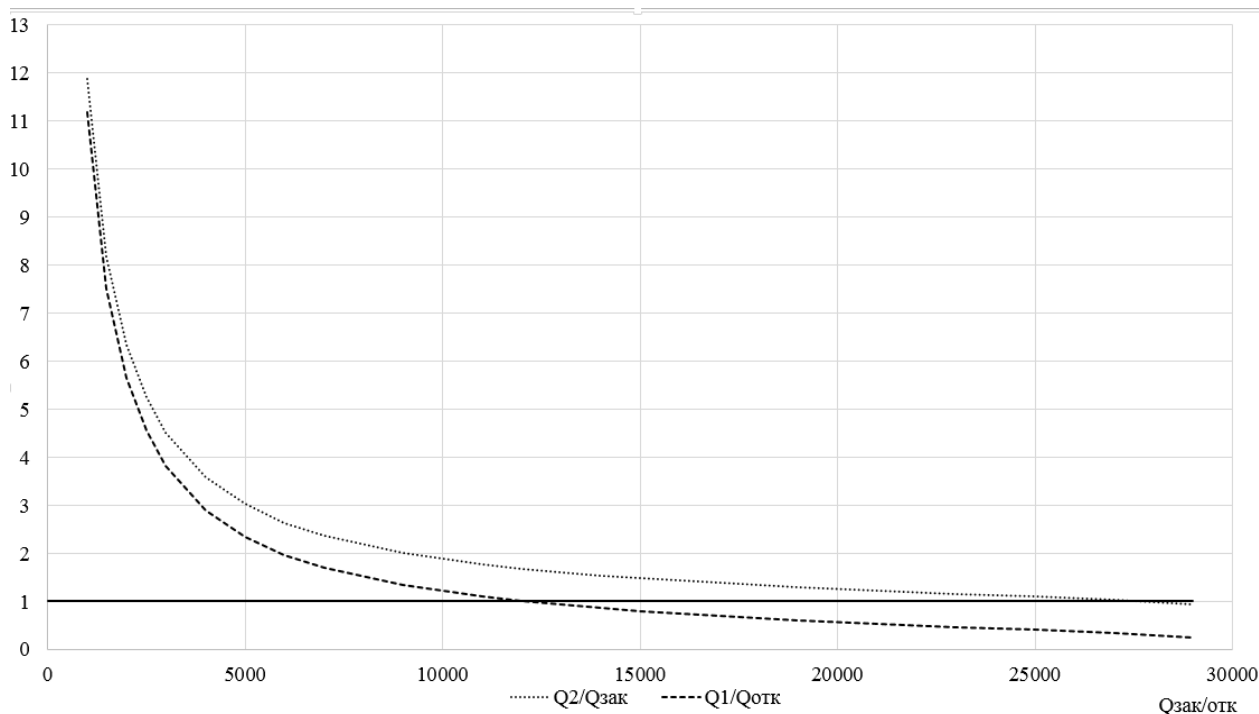


Рисунок 2.5 – Зависимость $Q_2/Q_{\text{зак}}$ и $Q_1/Q_{\text{отк}}$ от $Q_{\text{зак}}$ и $Q_{\text{отк}}$

При увеличении $Q_{\text{зак}}$ или $Q_{\text{отк}}$ резко уменьшается отношение $Q_2/Q_{\text{зак}}$, либо $Q_1/Q_{\text{отк}}$ в первую очередь за счёт увеличения значения знаменателя. Следует отметить, что при повышенных значениях производительности нефтепровода достигается равенство $Q_2=Q_{\text{зак}}$ и $Q_1=Q_{\text{отк}}$, при этих значениях переток из одного резервуара в другой отсутствует даже при открытых задвижках. При дальнейшем увеличении производительности нефтепровода наблюдается откачка/закачка одновременно в оба резервуара, при этом $Q_{\text{зак}}$, либо $Q_{\text{отк}}$ будут превышать Q_2 и Q_1 соответственно.

При большой производительности налива/откачки возможны следующие нежелательные последствия:

1. Превышение предельно-допустимого давления (вакуума), для резервуаров, работающих под давлением;

2. Превышение скорости движения понтона (плавающей крыши);
3. Возникновение заряда статического электричества на приемо-раздаточных патрубках при превышении скорости движения жидкости.

Максимально-допустимая производительность откачки/закачки для резервуаров РВСП и РВСПК меньше значений производительности магистрального нефтепровода. В этом случае расчетная производительность принимается равной производительности заполнения/опорожнения резервуара, имеющего минимальную производительность в группе. Таким образом следует руководствоваться ограничением скорости движения понтона (плавающей крыши) и пропускной способностью дыхательных патрубков. Допустимая скорость движения понтонов (ПК) для резервуаров объемом до 30000 м³ составляет 6 м/ч [28,32].

2.2 Оценка возможности образования предельно допустимого давления в газовом пространстве при переключении резервуаров

Оценка производительности дыхательной арматуры с учетом перетока рассматривалась в работах [84-86]. Для оценки влияния явления перетока на образование предельно допустимого давления выполнен расчет пропускной способности дыхательной арматуры согласно [32]. Пропускная способность клапанов по внутреннему давлению определяется по формуле (1.2).

Пропускная способность клапанов по вакууму определяется по формуле

$$Q = M_2 + 0,22V, \quad (2.1)$$

где M_2 – производительность слива продукта из резервуара, м³/ч;

V – полный объем резервуара, включая объем газового пространства под стационарной крышей, м³.

Пропускная способность вентиляционных патрубков определяется как наибольшее значения определяемое по формулам (2.1) или

$$Q = M_1 + 0,02V. \quad (2.2)$$

Выполним расчёт по указанным выше формулам. Для расчёта примем $M_1=M_2=Q_{\text{зак}}=Q_{\text{отк}}$. Размеры резервуаров примем согласно [32]. Принимается следующее допущение: полный объем резервуара, включая объем газового пространства под стационарной крышей, равен объему цилиндрической части резервуара без учета объема, занимаемого внутренним оборудованием. Результаты расчета приведены в Таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты расчёта проектной производительности дыхательных клапанов и вентиляционных патрубков

РВС	$Q_{\text{зак}}/Q_{\text{отк}},$ м³/ч	$D, \text{м}$	$H_{\text{ст}}, \text{м}$	$V, \text{м}^3$	Величина $Q_{\text{кл}}$ (м³/ч) по формулам		
					(1.2)	(2.1)	(2.2)
5000	2661	20,92	15	5156	7345	3795	2764
10000	2661	28,5	18	11483	7510	5187	2891
10000	3782	28,5	18	11483	10548	6308	4012
20000	7000	39,9	18	22507	19555	11951	7450
20000	10924	39,9	18	22507	30189	15875	11374

Так как для условий производимого расчёта значения, полученные по (2.1), превышают значения, полученные по (2.2), пропускная способность дыхательных патрубков (для РВСП) будет определяться значениями по (2.1).

Выполним подбор дыхательной арматуры для полученных значений. Учтем, что расход газовой смеси через все дыхательные клапаны резервуара не должен превышать 85 % от их максимальной пропускной способности, установленной разработчиком или изготовителем клапанов [32]. Количество предохранительных клапанов должно приниматься равным количеству дыхательных клапанов. Пропускная способность предохранительных клапанов должна быть равнозначной пропускной способности дыхательных клапанов [32]. Результаты подбора сведены в Таблицу 2.7.

Таблица 2.7 – Подбор дыхательной арматуры для резервуаров

Тип и объем резервуара	$Q_{\text{зак}}=Q_{\text{отк}}$, м³/ч	Расчётное значение $Q_{\text{кл}}, 0,8$ 5 м³/ч	Тип и количество дыхательных клапанов (вентиляционных патрубков)	Тип и количество предохранительных клапанов	Общая пропускная способность дыхательных клапанов/ вентиляционных патрубков (с учетом предохранительных клапанов) м³/ч
РВС 5000	2661	8641	3 шт. КДС – 3000/500	3 шт. КДС – 3000/500	9000 (18000)
РВСП 5000		4465	1шт. ПВ - 350 2шт. ПВ - 250	-	4500*
РВС 10000	2661	8835	3 шт. КДС – 3000/500	3 шт. КДС – 3000/500	9000 (18000)
РВСП 10000		6102	2шт. ПВ - 350 1шт. ПВ - 300	-	6400*
РВС 10000	3782	12409	4 шт. КДС – 3000/500 + КДС – 1500/150	4 шт. КДС – 3000/500 + КДС – 1500/150	13500 (27000)
РВСП 10000		7421	3 шт. ПВ - 350	-	7500*
РВС 20000	7000	23006	8 шт. КДС – 3000/500	8 шт. КДС – 3000/500	24000 (48000)
РВСП 20000		14060	4шт. ПВ – 500 1шт. ПВ - 50		14150*
РВС 20000	10924	35516	12 шт. КДС – 3000/500	12 шт. КДС – 3000/500	36000 (72000)
РВСП 20000		18676	8 ПВ - 350		20000*

*Пропускная способность вентиляционных патрубков указана при разряжении 250 Па.

Согласно [28] максимальная допустимая производительность заполнения/опорожнения каждого резервуара в группе рассчитывается:

а) для РВС без понтона по формуле (2.2)

б) Для РВС с понтоном

$$Q_{\text{макс. доп.}} = 2,75D^2, \quad (2.3)$$

где D – внутренний диаметр резервуара, м.

в) Для РВС с плавающей крышей (ПК)

$$Q_{\text{макс.доп.}} = 3,14D^2. \quad (2.4)$$

Выполнен расчёт максимальной производительности закачки/откачки для различных типоразмеров резервуаров по формулам (2.2),(2.3),(2.4). Сравним полученные значения с производительностью закачки/откачки с учетом перетока. Результаты расчёта представлены в Таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Результаты расчета максимально-допустимой производительности откачки/закачки

DN	РВС	$Q_{\text{зак}}/Q_{\text{отк}},$ м³/ч	D,м	$Q_{\text{макс.доп.}}$ РВС по ф. (2.2), м³/ч	$Q_{\text{макс.доп.}}$ РВСП по ф. (2.3), м³/ч	$Q_{\text{макс.доп.}}$ РВСПК по ф. (2.4), м³/ч	$Q_1,$ м³/ч	$Q_2,$ м³/ч
700	5000	2661	20,9	7650	1204	1374	6088	7593
700	10000	2661	28,5	7650	2234	2550	11429	13227
800	10000	3782	28,5	10582	2234	2550	11567	14123
1000	20000	7000	39,9	20400	4378	4999	13338	17559
1200	20000	10924	39,9	30600	4378	4999	13655	20241

Анализ производительностей закачки/откачки для РВСП и РВСПК показывает, что для всех резервуаров наблюдается превышение производительности закачки/откачки над пропускной способности вентиляционных патрубков, что недопустимо. Для резервуаров РВС 10000 м³ пропускной способности дыхательных клапанов недостаточно, возможно срабатывание предохранительных клапанов, что является нештатной ситуацией. Поправки и коэффициент, указанные в формулах (2.2) и (1.15) при расчете дыхательной арматуры, не учитывают явление перетока, тем самым при подборе дыхательной арматуры без учета процесса перетока повышается вероятность возникновения предельно-допустимого давления для резервуаров любых объемов, представленных в расчете. Для расчета дыхательной арматуры предлагается использовать поправочные коэффициенты, указанные в Таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Коэффициенты для учёта перетока при расчёте дыхательной арматуры

DN	Производительность м³/ч (при 850кг/м³)	Тип резервуара	Q _{отк} , м³/ч	Q _{зак} , м³/ч	Коэффициент для формулы (1.15)
700	2661	PBC 5000	6088	7593	0,35
700	2661	PBC 10000	11429	13227	0,20
800	3782	PBC 10000	11567	14123	0,26
1000	7000	PBC 20000	13338	17559	0,39
1200	10924	PBC 20000	13655	20241	0,53

2.3 Расчёт времени образования предельно допустимого давления в газовом пространстве

В работе [87] выполнена оценка возможности образования предельно-допустимого значения избыточного давления в газовом пространстве резервуара в процессе налива с учетом испаряемости хранимого продукта.

Воспользуемся уравнением состояния ПВС в дифференциальной форме:

$$\frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{V} + \frac{1}{P} \cdot \frac{dP}{dt} = \frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} + \frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (2.5)$$

где P – абсолютное давление в газовом пространстве резервуара, Па;

V – объем газового пространства, м³;

G – масса паровоздушной смеси в газовом пространстве резервуара, кг;

T – абсолютная температура паровоздушной смеси в резервуаре, К;

t – время, с.

Текущее значение объема газового пространства с учетом испарений в начальный момент времени будет определяться начальным объемом ПВС, с течением времени оно будет уменьшаться на величину производительности налива и увеличиваться на величину испарившейся жидкой фазы по формуле:

$$V = V_0 + (q_{исп} - q_n) \cdot t, \quad (2.6)$$

где q_n – производительность налива в резервуар, м³/с;

$q_{исп}$ – объем испарившейся нефти в единицу времени, м³/с.

Масса ПВС при условии работы дыхательного клапана на предельной пропускной способности будет определяться по формуле:

$$G = \rho_{пвс,ср} (V_0 - Q_{\max}^{кл} \cdot t) + G_u, \quad (2.7)$$

где $\rho_{пвс,ср}$ – средняя плотность ПВС в процессе закачки, кг/м³;

$Q_{\max}^{кл}$ – максимальная пропускная способность дыхательного клапана, м³/с;

G_u – масса испарившейся нефти, кг.

Из [33] известно, что масса испарившейся нефти за промежуток времени t рассчитывается по формуле:

$$G_u = J F_n t, \quad (2.8)$$

где J – плотность потока массы испаряющегося углеводорода, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$;

F_n – площадь «зеркала» испарения, м².

Безразмерный критерий подобия, характеризующий интенсивность испарения нефти или нефтепродукта K_t , определяется по формуле[88]:

$$K_t = \frac{J}{\rho_{звс} D_M} \sqrt[3]{\frac{\nu_{пвс,ср}^2 M_{пвс,ср} T_{\delta}}{g M_y T_{\epsilon}}}, \quad (2.9)$$

где D_M – коэффициент диффузии паров, м²/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

M_y – молярная масса испаряющейся жидкости, кг/моль;

$\nu_{пвс,ср}$ – средний кинематический коэффициент вязкости ПВС, м²/с;

$M_{пвс,ср}$ – молярная масса паровоздушной смеси, кг/моль;

T_{δ}, T_{ϵ} – абсолютные температуры воздуха и бензина, К.

Выразим из формулы (2.9) плотность потока массы испаряющегося углеводорода

$$J = K_t D_M \rho_{звс} \sqrt[3]{\frac{g M_y T_{\epsilon}}{\nu_{пвс,ср}^2 M_{пвс,ср} T_{\delta}}}. \quad (2.10)$$

Примем

$$A = K_t D_M \sqrt[3]{\frac{g M_y T_\theta}{v_{нвс.ср}^2 M_{нвс.ср} T_\theta}}. \quad (2.11)$$

Формула (2.10) с учетом формулы (2.11) имеет вид

$$J = \rho_{звс} A. \quad (2.12)$$

Формула (2.8) с учетом (2.12) примет вид

$$G_u = A \rho_{звс} F_n t. \quad (2.13)$$

Формула (2.7) после подстановки (2.13) имеет вид

$$G = \rho_{звс} (V_0 - Q_{\max \kappa \lambda} \cdot t) + A \rho_{звс} F_n t. \quad (2.14)$$

Массовый расход воздуха через дыхательный клапан

$$\frac{dG}{dt} = -\rho_{звс} Q_{\max \kappa \lambda} + \rho_{звс} A F_n. \quad (2.15)$$

Величина объема испарившегося продукта в единицу времени определяется по формуле:

$$q_{исп} = \frac{J F_n}{\rho_n} = \frac{\rho_{звс}}{\rho_n} A F_n, \quad (2.16)$$

где ρ_n – плотность хранимого продукта, кг/м³.

Формула (2.6) с учетом подстановки формулы (2.16) примет вид

$$V = V_0 + \left(\frac{\rho_{звс}}{\rho_n} A F_n - q_n \right) \cdot t. \quad (2.17)$$

Производная формулы имеет вид

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\rho_{звс}}{\rho_n} A F_n - q_n. \quad (2.18)$$

После подстановки в уравнение (2.5) формул (2.14), (2.15), (2.17) и (2.18) получим дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\frac{dP}{P} = \frac{q_n - \frac{\rho_{звс}}{\rho_n} A F_n}{V_0 + \left(\frac{\rho_{звс}}{\rho_n} A F_n - q_n \right) \cdot t} dt - \frac{Q_{\max}^{\kappa \lambda} - A F_n}{V_0 - Q_{\max}^{\kappa \lambda} \cdot t + A F_n t} dt. \quad (2.19)$$

После интегрирования уравнения при граничных условиях $t_0=0$, ΔP_0 и t , ΔP , получим уравнение зависимости давления в газовом пространстве от времени

$$\frac{P}{P_0} = \frac{V_0 - (Q_{\max.кл} - AF_n)t}{V_0 + \left(\frac{\rho_{\text{звс}}}{\rho_n} AF_n - q_n\right) \cdot t}. \quad (2.20)$$

Из формулы (2.20), получим формулу зависимости времени образования предельно допустимого давления в резервуаре при максимальной пропускной способности дыхательной арматуры с учетом испарения продукта:

$$t = \frac{V_0 \left(\frac{P}{P_0} - 1\right)}{\frac{P}{P_0} \left(q - \frac{\rho_{\text{звс}}}{\rho_n} AF_n\right) - Q_{\max.кл} + AF_n}. \quad (2.21)$$

В качестве примера произведем расчеты по следующим данным. Пусть резервуары РВС различных объемов [32] в начальный момент времени наполнены на 10 % емкости бензином плотностью $\rho_n = 760 \text{ кг/м}^3$, давление паров по Рейду $P_R = 66700 \text{ Па}$. Производится наполнение резервуара до 90% емкости. Исходные данные для расчета представлены в Таблице. 2.10. Расчет времени образования предельно-допустимого давления произведен для следующих параметров: $\Delta P = 5000 \text{ Па}$ – нормативное внутреннее избыточное давление для резервуаров типа РВС [32]; $\Delta P_0 = 2000 \text{ Па}$ – давление срабатывания клапанов типа КПП. Производительность налива принята равной суммарной пропускной способности клапанов. Температура ПВС принята постоянной и равной 283 К , температура начала кипения бензина 319 К . Исходные данные и промежуточные расчеты представлены в Таблице 2.10.

Результаты расчета времени образования предельно-допустимого давления (ПДД) в газовом пространстве с учетом испарения продукта для резервуаров типа РВС приведены в Таблице 2.11.

Таблица 2.10 – Исходные данные

РВС	Внутренний диаметр стенки D , м	Высота стенки H , м	Площадь поверхности продукта F_n , м ²	Объем ПВС V_0 , м ³	$Kt_{\text{зак}}$	A , м/с	AF_n , м ³ /ч	$Q_{\text{таккл}}=Q_{\text{зак}}$, м ³ /ч
1000	10,43	11,92	85,44	917	0,004379	0,00026	79,3	1800
2000	15,18	11,92	180,98	1942	0,004858	0,00029	186,4	6000
3000	18,98	11,92	282,93	3035	0,004461	0,00026	267,6	6000
5000	22,8	11,92	408,28	4380	0,00431	0,00025	373,1	5700
5000	20,92	14,9	343,73	4609	0,004296	0,00025	313,0	5700
10000	28,5	17,88	637,94	10266	0,003986	0,00023	539,1	12000
10000	34,2	11,92	918,63	9855	0,003997	0,00024	778,5	12000
20000	39,9	18	1 250,36	20256	0,004017	0,00024	1064,9	22500
20000	47,4	12	1 764,60	19058	0,004034	0,00024	1509,1	22500

Таблица 2.11 – Результаты расчета

РВС	Высота стенки H , м	Площадь поверхности продукта F_n , м ²	AF_n , м ³ /ч	$Q_{\text{таккл}}=q_n$, м ³ /ч	Время заполнения резервуара, с	Время образования ПДД с учётом испарений, с
1000	11,92	85,44	79,3	1800	1630	729
2000	11,92	180,98	186,4	6000	1035	563
3000	11,92	282,93	267,6	6000	1619	719
5000	11,92	408,28	373,1	5700	2459	851
5000	14,9	343,73	313,0	5700	2588	1008
10000	17,88	637,94	539,1	12000	2738	1211
10000	11,92	918,63	778,5	12000	2628	916
20000	18	1 250,36	1064,9	22500	2881	1234
20000	12	1 764,60	1509,1	22500	2710	923

Из анализа полученных результатов видно, что, несмотря на то, что процесс переключения задвижек непродолжительный и длится от 3 до 20 минут, при производительности налива не более максимальной пропускной способности клапанов при учете испаряемости продукта может возникать предельно-допустимое давление. Так же видно, что при равной емкости предельно-допустимое давление возникает в газовом пространстве раньше в

резервуарах, имеющих больший диаметр, чем в резервуарах, имеющих большую высоту. Таким образом требуется некоторый запас пропускной способности дыхательной арматуры. При условии равенства производительности закачки с производительностью дыхательной арматуры рассчитаны предлагаемые коэффициенты запаса пропускной способности дыхательной арматуры на испаряемость ($k_{\text{зап.исп}}$), для различных номинальных емкостей резервуаров в Таблице 2.12

Таблица 2.12 – Коэффициенты запаса пропускной способности дыхательной арматуры на испаряемость

РВС, м ³	Высота стенки Н, м	Площадь поверхности продукта, м ²	$Q_{\text{кл}} = Q_{\text{зак}}$, м ³ /ч	$Q_{\text{зап.исп}}$, м ³ /ч	$Q_{\text{зап.исп}}/Q_{\text{тахкл}}$, %	$k_{\text{зап.исп}}$
100	5,96	17,57	1400	30,3	2,2	1,022
200	5,96	34,52	1800	50,5	2,8	1,028
300	7,45	45,13	1400	55,5	4,0	1,040
400	7,45	57,15	1800	74,4	4,1	1,041
700	8,94	85,44	1800	109,3	6,1	1,061
1000	11,92	85,44	1800	79,3	4,4	1,044
2000	11,92	180,98	6000	186,4	3,1	1,031
3000	11,92	282,93	6000	267,6	4,5	1,045
5000	11,92	408,28	5700	373,1	6,5	1,065
5000	14,9	343,73	5700	313,0	5,5	1,055
10 000	17,88	637,94	12 000	539,1	4,5	1,045
10 000	11,92	918,63	12 000	778,5	6,5	1,065
20 000	18	1250,36	22 500	1064,9	4,7	1,047
20 000	12	1764,60	22 500	1509,1	6,7	1,067

Так как различные нефти и нефтепродукты обладают различной интенсивность испарения в Таблице 2.13 рассчитаны коэффициенты запаса пропускной способности на испаряемость при хранении различных продуктов в резервуаре РВС 5000 м³.

Таблица 2.13 – Коэффициенты запаса пропускной способности дыхательной арматуры на испаряемость при закачке различных продуктов для ПВС 5000 м³

Продукт	Давление насыщенных паров по Рейду, Па	$k_{\text{зан.исп}}$
Автобензин	93 300	1,087
Керосин ТС-1	70 000	1,069
Легкая нефть	45 000	1,029
Тяжелая нефть	25 000	1,019

2.4 Разработка методики учета процесса перетока при переключении резервуаров

Приведенные ранее расчёты выполняются для производительностей закачки/откачки в строго определенный момент времени, для постоянных значений степени открытия задвижек, уровней налива продукта в резервуаре. В действительности, в процессе переключения резервуаров непрерывно изменяются коэффициенты местных сопротивлений на задвижках и уровни налива продуктов в резервуарах, также испаряемость и коэффициент запаса зависит от начальных параметров ПВС, уровней налива и свойств конкретной нефти/нефтепродукта, что ранее не учитывалось при расчетах.

Изменение уровня налива в резервуаре будет определяется по формуле

$$\frac{dH_{\text{взл}}}{dt} = \frac{dV_{\text{np}}}{dt} / F_n, \quad (2.22)$$

где $H_{\text{взл}}$ – высота взлива нефти/нефтепродукта в резервуаре, м;

V_{np} – объем нефти/нефтепродукта в резервуаре.

Учитывая

$$F_n = \frac{\pi D_{\text{резервуара}}^2}{4}, \quad (2.23)$$

$$\frac{dV_{\text{np}}}{dt} = Q. \quad (2.24)$$

Получаем

$$dH_{\text{взл}} = \frac{4Q}{\pi D_{\text{резервуара}}^2} dt \quad (2.25)$$

Подставляя вместо Q , Q_1 и Q_2 по формулам (1.7), (1.8), (1.13) и (1.14), получим следующие уравнения изменения уровня взлива при перетоке в процессе переключения резервуаров:

Для откачки:

$$dH_{\text{взл1отк}} = \frac{4Q_{\text{отк}}}{\pi D_{\text{резервуара1}}^2} \frac{b + \sqrt{b^2 - a(b - \frac{2g\Delta Z}{Q_{\text{отк}}^2} + 2g \frac{P_{\text{кд}} + P_{\text{кв}}}{\gamma Q_{\text{отк}}^2})}}{a} dt, \quad (2.26)$$

$$dH_{\text{взл2отк}} = \frac{4Q_{\text{отк}}}{\pi D_{\text{резервуара2}}^2} \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - a(b_1 - \frac{2g\Delta Z}{Q_{\text{отк}}^2} + 2g \frac{P_{\text{кд}} + P_{\text{кв}}}{\gamma Q_{\text{отк}}^2})}}{a} dt. \quad (2.27)$$

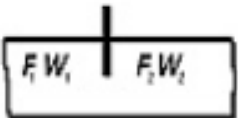
Для закачки:

$$dH_{\text{взл2зак}} = \frac{4Q_{\text{зак}}}{\pi D_{\text{резервуара2}}^2} \frac{b_1 + \sqrt{b_1^2 - a(b_1 - \frac{2g\Delta Z}{Q_{\text{зак}}^2} + 2g \frac{P_{\text{кд}} + P_{\text{кв}}}{\gamma Q_{\text{зак}}^2})}}{a} dt, \quad (2.28)$$

$$dH_{\text{взл1зак}} = \frac{4Q_{\text{зак}}}{\pi D_{\text{резервуара1}}^2} \frac{-b + \sqrt{b^2 - a(b - \frac{2g\Delta Z}{Q_{\text{зак}}^2} + 2g \frac{P_{\text{кд}} + P_{\text{кв}}}{\gamma Q_{\text{зак}}^2})}}{a} dt. \quad (2.29)$$

Коэффициенты местных сопротивлений на задвижках входят в сумму коэффициентов местных сопротивлений для коэффициентов b , b_1 (ф. (1.10), (1.11)). Для частично открытого шиберов или заслонки известны коэффициенты, указанные в Таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Коэффициенты местных сопротивлений для частично открытого шиберов или заслонки [89].

Частично открытый шибер или заслонка		Степень открытия (S), %	ξ
		10	230
		30	17
		50	4
		70	1
		90	0,2

Так как открытие/закрытие задвижки выполняется равномерно в течении процесса переключения, необходимо вывести функциональную зависимость коэффициента местных сопротивлений на задвижке от степени открытия задвижки.

Учитывая, что при закрытой задвижке коэффициент местного сопротивления $\xi = \infty$, по результатам подбора в соответствии с [90] наиболее точной функциональной зависимостью коэффициента местных сопротивлений от степени открытия задвижки является зависимость, определяемая по формуле

$$\xi_s = 54048 \cdot (S)^{-2.371} - 0.978 \quad (2.30)$$

Сравнение данных указанных в Таблице 2.14 и получаемых по формуле (2.30) представлено на Рисунке 2.6.

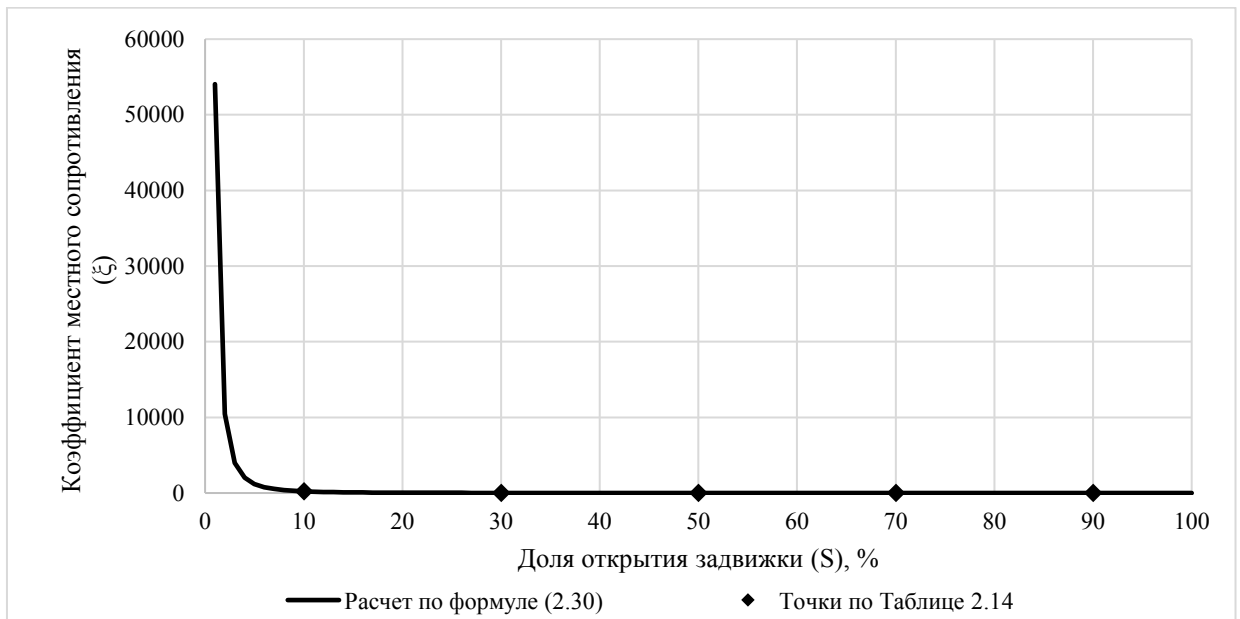


Рисунок 2.6 – Сравнение табличных значений коэффициента местных сопротивлений с функциональной зависимостью

Степень открытия задвижки (S) при равномерном открывании/закрывании задвижки будет рассчитываться по формулам:

- для закрывающейся задвижки

$$S_{откр} = \frac{t_v - t_i}{t_v} \cdot 100\%; \quad (2.31)$$

- для открывающейся задвижки

$$S_{закр} = \frac{t_i}{t_v} \cdot 100\% . \quad (2.32)$$

Выразим $\sum \zeta_2$ и $\sum \zeta_{12}$ через (2.30)

$$\sum \zeta_{12} = \sum \zeta_{12.м.с.} + \xi_3; \quad (2.33)$$

$$\sum \zeta_2 = \sum \zeta_{2.м.с.} + \xi_3, \quad (2.34)$$

Далее подставим (2.31) и (2.32), для случая заправки получаем

$$\sum \zeta_{12} = \sum \zeta_{12.м.с.} + 54048 \cdot \left(\frac{t}{t_v} \cdot 100\% \right)^{-2.371} - 0.978; \quad (2.35)$$

$$\sum \zeta_2 = \sum \zeta_{2.м.с.} + 54048 \cdot \left(\frac{t_v - t}{t_v} \cdot 100\% \right)^{-2.371} - 0.978, \quad (2.36)$$

где $\sum \zeta_{2.м.с.}$, $\sum \zeta_{12.м.с.}$ - сумма коэффициентов местных сопротивлений участков трубопроводов 2 и 1.2 соответственно, кроме местных сопротивлений задвижки;

$$\Delta Z = H_{взл1}(t) - H_{взл2}(t) + Z_{ур} \quad (2.37)$$

где $Z_{ур}$ – геодезическая разность нулевых отметок резервуаров, м.

Подставляя (2.35), (2.36) в (1.10) и (1.11), и затем (1.10), (1.11) и (2.37) в (2.29) получаем. Для уравнений (2.26), (2.27) и (2.28) подстановки аналогичны.

$$\begin{aligned}
& -4Q_{зак} \left(\frac{\lambda_2 \frac{l_2}{d_2} + \sum \zeta_{2.m.c} + 54048 \cdot \left(\frac{t_v - t}{t_v} \cdot 100\% \right)^{-2.371} - 0.978 - 1}{F_2^2} \right) + \\
& \left[\left(\frac{\lambda_2 \frac{l_2}{d_2} + \sum \zeta_{2.m.c} + 54048 \cdot \left(\frac{t_v - t}{t_v} \cdot 100\% \right)^{-2.371} - 1.978}{F_2^2} \right)^2 - \right. \\
& \left. - \left(\frac{\lambda_2 \frac{l_2}{d_2} + \sum \zeta_{2.m.c} + 54048 \cdot \left(\frac{t_v - t}{t_v} \cdot 100\% \right)^{-2.371} - 1.978}{F_2^2} \right) + \right. \\
& \left. + \frac{\lambda_{11} \frac{l_{11}}{d_{11}} + \lambda_{12} \frac{l_{12} F_{11}^2}{d_{12} F_{12}^2} + \sum \zeta_{12} + 54048 \cdot \left(\frac{t}{t_v} \cdot 100\% \right)^{-2.371} - 0.978}{F_{11}^2} \right) \cdot \\
& \cdot \left(\frac{\lambda_2 \frac{l_2}{d_2} + \sum \zeta_{2.m.c} + 54048 \cdot \left(\frac{t_v - t}{t_v} \cdot 100\% \right)^{-2.371} - 1.978}{F_2^2} - \right. \\
& \left. - \frac{2g(H_{взл1}(t) - H_{взл2}(t) + Z_{yp})}{Q_{зак}^2} \right) \\
dH_{взл1} = & \frac{\left[\frac{\lambda_2 \frac{l_2}{d_2} + \sum \zeta_{2.m.c} + 54048 \cdot \left(\frac{t_v - t}{t_v} \cdot 100\% \right)^{-2.371} - 1.978}{F_2^2} + \right. \\
& \frac{\lambda_{11} \frac{l_{11}}{d_{11}} + \lambda_{12} \frac{l_{12} F_{11}^2}{d_{12} F_{12}^2} + \sum \zeta_{12.m.c} + 54048 \cdot \left(\frac{t}{t_v} \cdot 100\% \right)^{-2.371} - 0.978 +}{F_{11}^2} + \\
& \left. + \frac{\sum \zeta_{11} \frac{F_{11}^2}{F_{12}^2} + 1}{F_{11}^2} \right] \pi D_{резервуара1}^2 dt}{\pi D_{резервуара1}^2} \quad (2.38)
\end{aligned}$$

Так как получить решение интеграла уравнения (2.38) в явном виде, а затем выполнить расчет в несколько приближений, для обеспечения необходимой точности (коэффициент гидравлического трения рассчитывается в несколько приближений) задача весьма трудоемкая, для её решения было принято решение разработать программу для ЭВМ.

2.5 Разработка программы для учета процесса перетока при переключении резервуаров

По предложенной на Рисунке 2.7 блок-схеме в среде PascalABC был написан программный код (Приложение А) [91], выполнено исследование процесса перетока при помощи разработанной программы [92,93].

Изменение давления в каждую секунду возможно оценить путем преобразования формулы (2.19)

$$\frac{dP}{dt} = P \frac{q_n - \frac{\rho_{звс}}{\rho_n} AF_n}{V_0 + (\frac{\rho_{звс}}{\rho_n} AF_n - q_n) \cdot t} - P \frac{Q_{\max}^{кл} - AF_n}{V_0 - Q_{\max}^{кл} \cdot t + AF_n t}. \quad (2.39)$$

При учете изменения пропускной способности клапана в соответствии с [85] в результате изменения давления в ГП формула (2.39) примет вид

$$\frac{dP}{dt} = P \frac{q_n - \frac{\rho_{звс}}{\rho_n} AF_n}{V_0 + (\frac{\rho_{звс}}{\rho_n} AF_n - q_n) \cdot t} - P \frac{\alpha \cdot \sqrt{P - P_{атм}} - AF_n}{V_0 - \alpha t \cdot \sqrt{P - P_{атм}} + AF_n t}, \quad (2.40)$$

где

$$\alpha = \frac{Q_{\max}^{кл}}{\sqrt{P_{кл}}}. \quad (2.41)$$

$P_{кл} = P_{кд}$ для расчета избыточного давления и $P_{кл} = P_{кв}$, для расчета вакуумметрического давления. Для резервуаров, оснащенных дыхательными патрубками, предлагается применять формулу (2.39), так как данные резервуары атмосферные и $P_{кд} = P_{кв} = 0$, значения $\alpha = \infty$ и по ф. (2.40) будут рассчитываться некорректные значения, для резервуаров, оснащенных дыхательными клапанами, допустимо применение ф. (2.40).

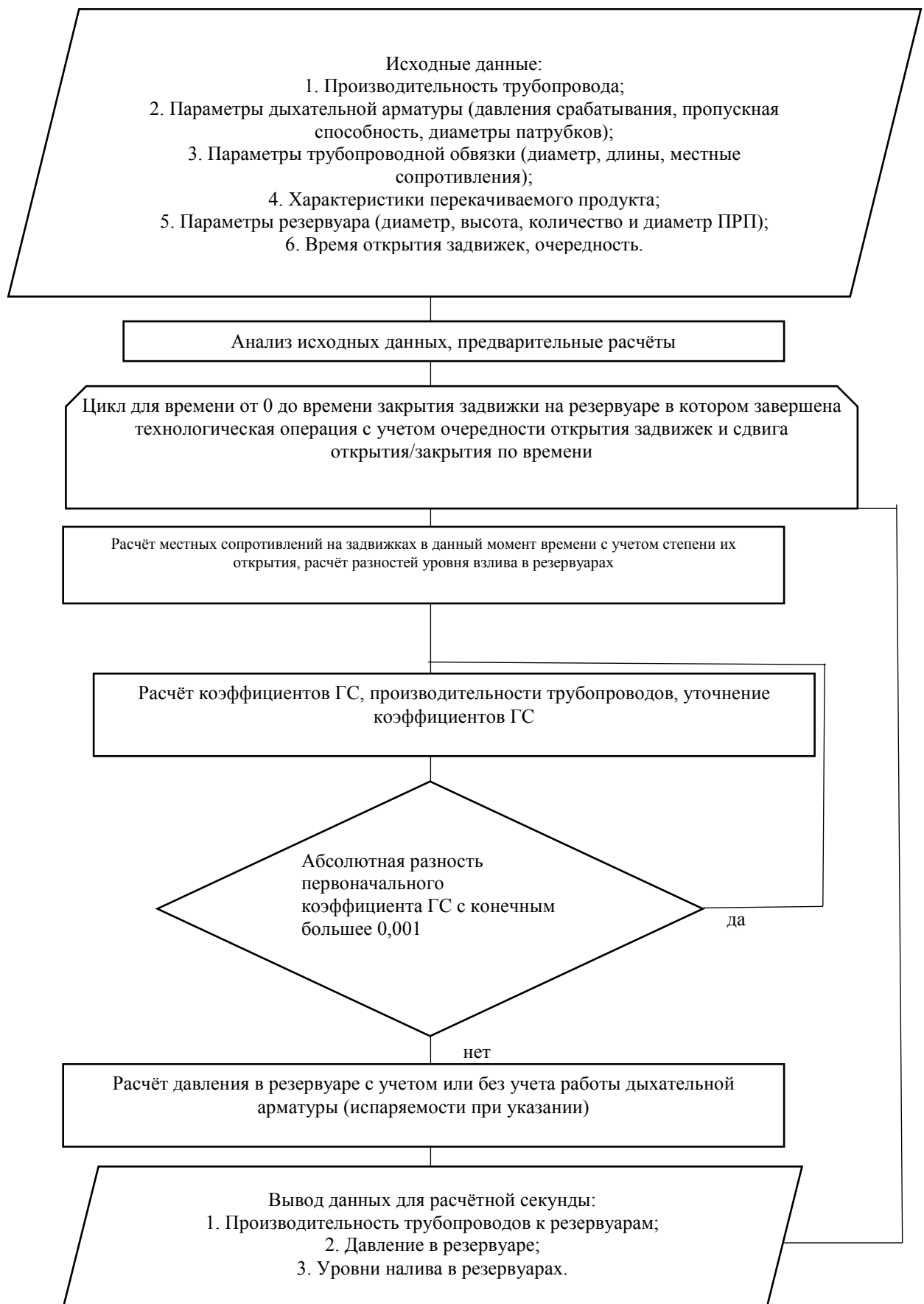
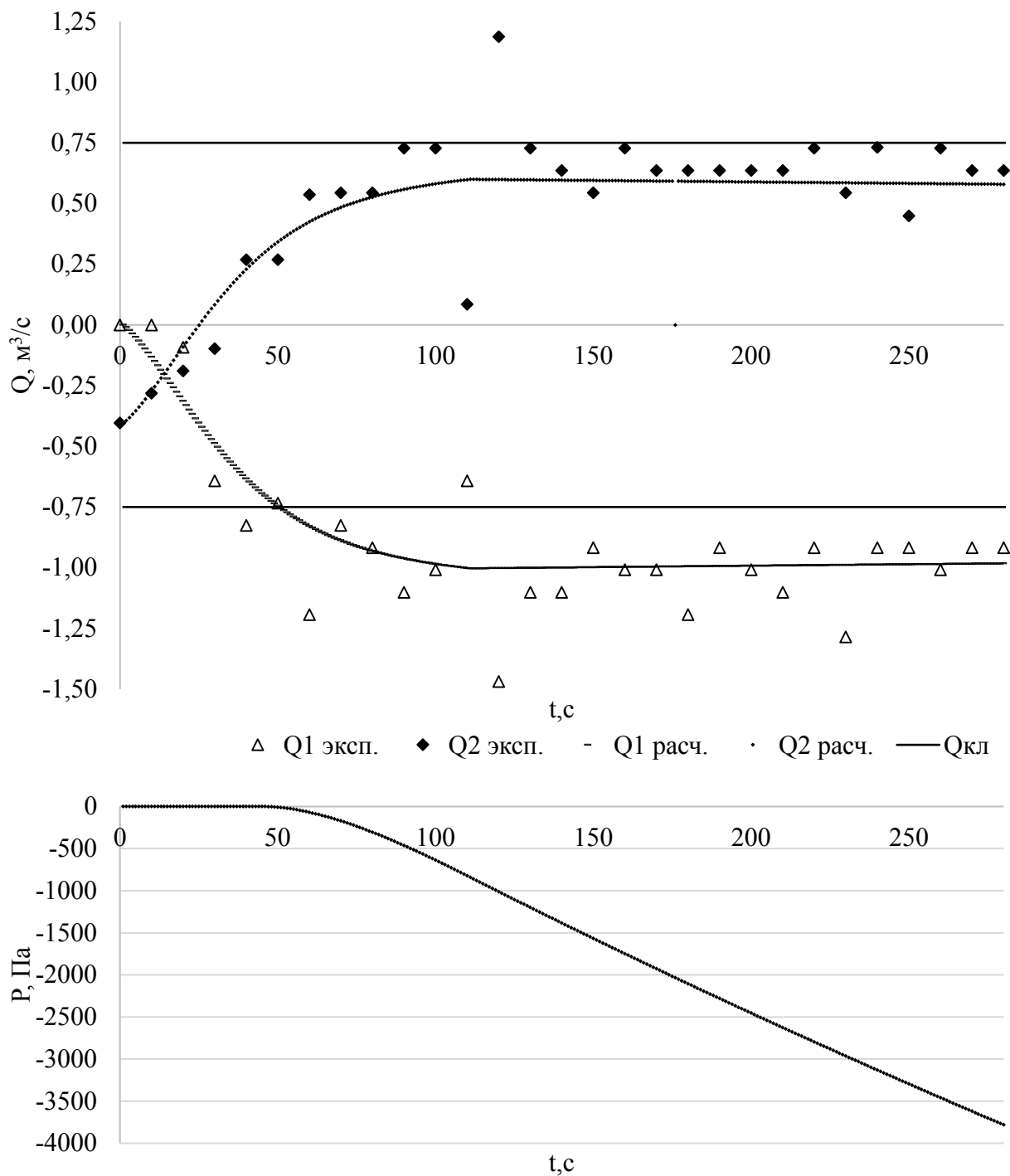


Рисунок 2.7 – Блок-схема расчёта

Для исходных данных опытов [26] выполнен расчёт в программе для ЭВМ (Рисунки 2.8-2.11) по расчетной схеме на Рисунке 1.1.



*Положительная производительность означает закачку в резервуар,
отрицательная – откачку

Рисунок 2.8 – Данные расчёта производительностей откачки/ закачки в резервуарах в процессе переключения по данным опыта №1 в программе для ЭВМ в виде графика

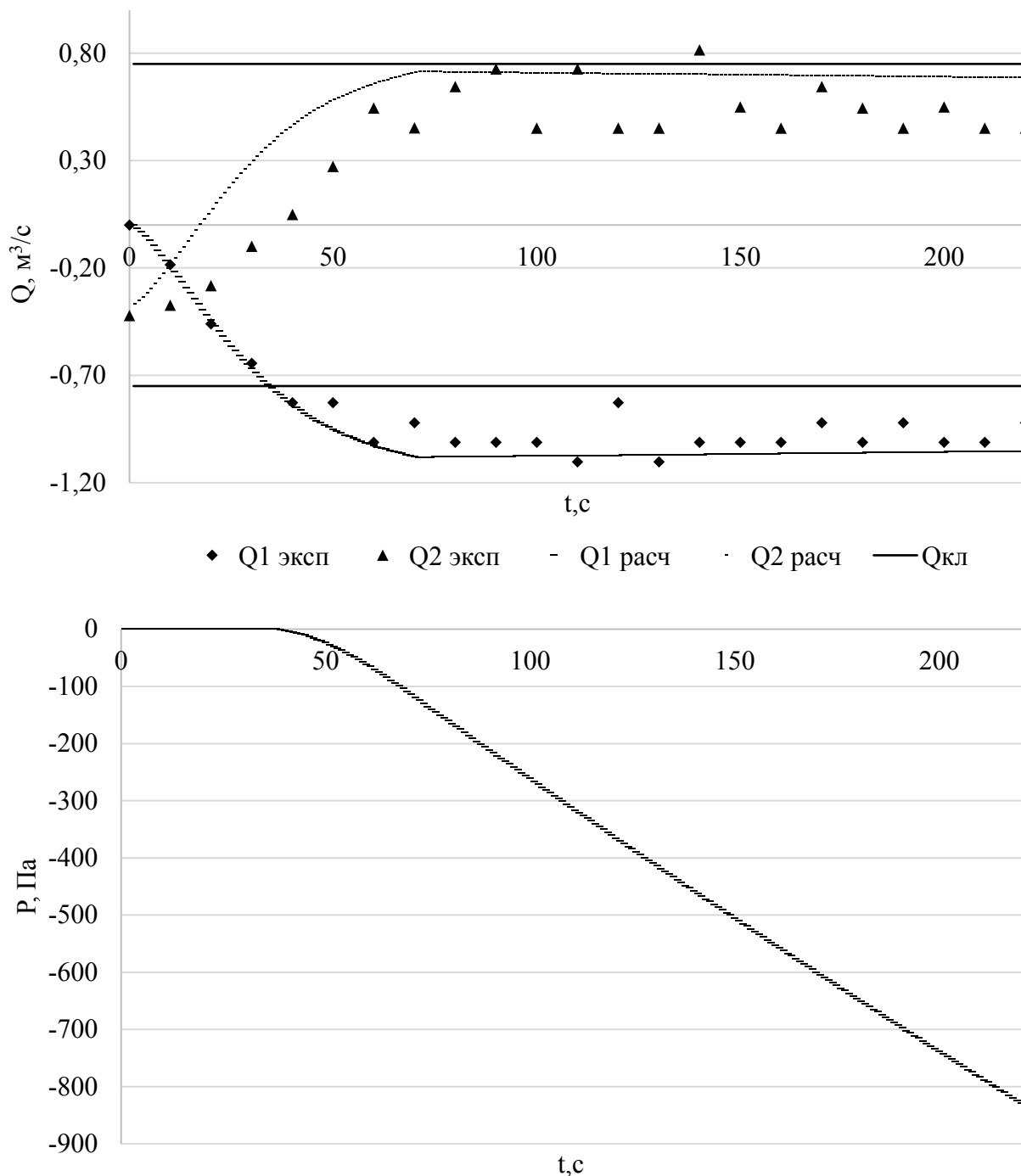


Рисунок 2.9 – Расчёт производительностей откачки/ закачки в резервуарах в процессе переключения по данным опыта №2

Характер зависимостей и значения, полученных по опытными данным [26] и программным расчётом удовлетворительно сходятся. Производительности трубопроводов рассчитаны в каждую секунду с учётом изменений уровней налива в резервуарах и степени открытия задвижек до

полного переключения резервуаров. Параллельно приводится расчёт вакуумметрического давления, в условиях опыта №1 наблюдается превышение предельно-допустимого давления.

В случае опыта №2, расстояние по трубе между резервуарами больше, меньше разность уровней налива и производительность откачки, также меньше время задержки между открытием и закрытием задвижек, что позволяет сократить продолжительность и интенсивность перетока, тем самым давление в опыте №2 имеет меньшие значения (Рисунок 2.9).

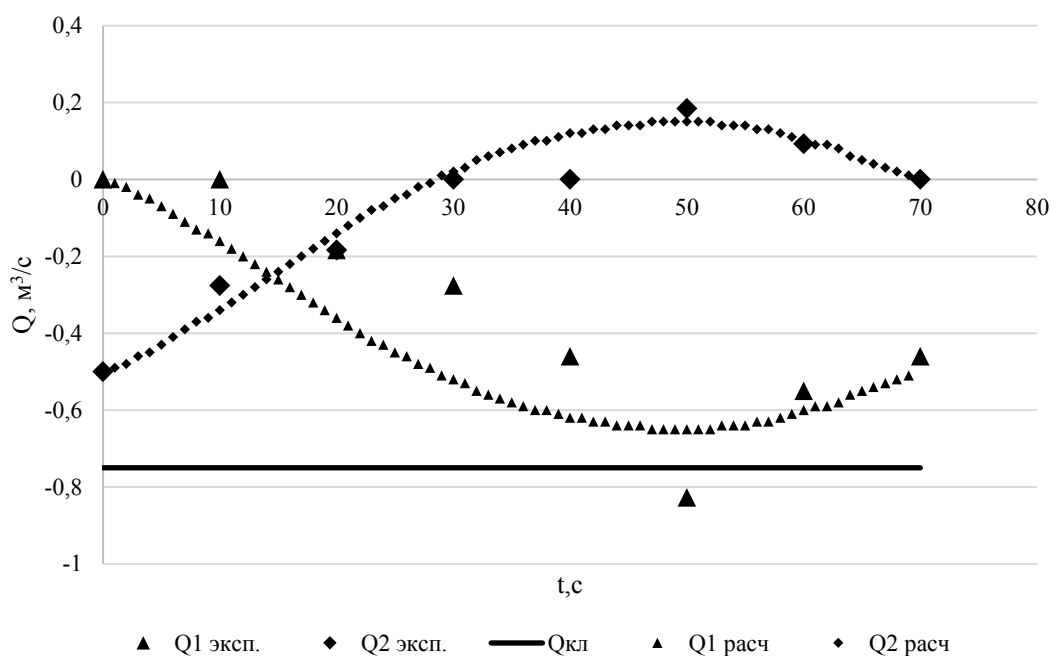


Рисунок 2.10 – Расчёт производительностей откачки/ закачки в резервуарах в процессе переключения по данным опыта №3 в виде графика в программе для ЭВМ

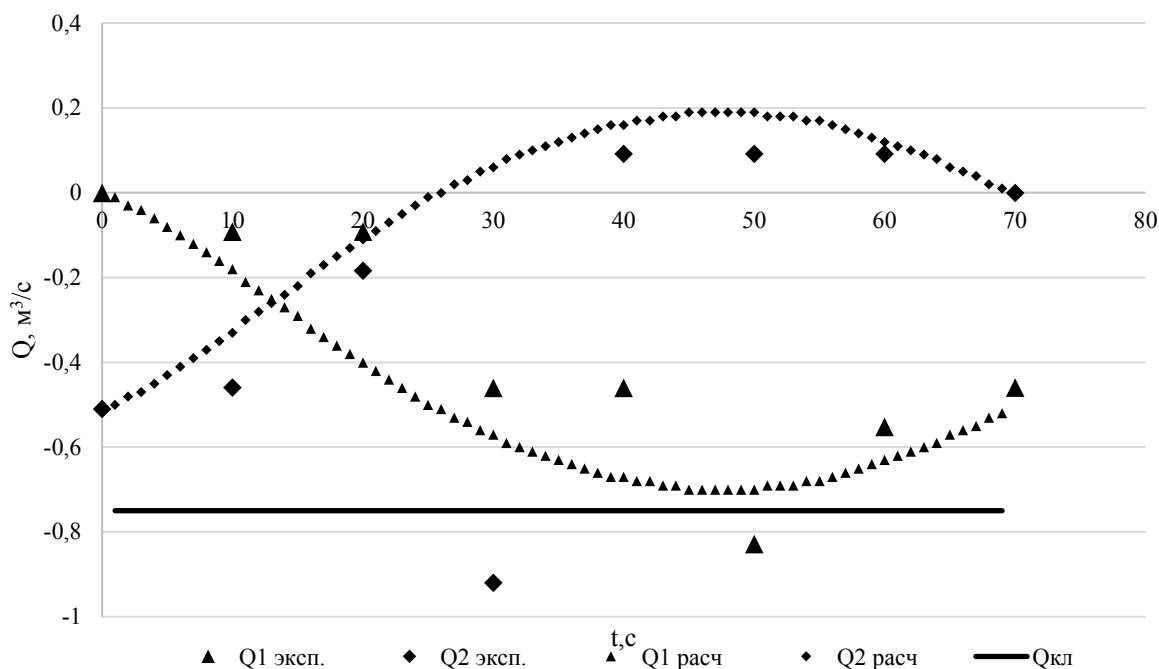


Рисунок 2.11 – Расчёт производительностей откачки/ закачки в резервуарах в процессе переключения по данным опыта №4 в виде графика в программе для ЭВМ

В случае одновременного открытия/закрытия задвижек (Рисунки 2.10, 2.11) продолжительность и интенсивность процесса перетока мала, превышений производительности дыхательной арматуры и образования вакуума в отключаемых резервуарах не наблюдается.

Выполним оценку погрешности значений, полученных программой для опыта №2. Так как алгоритм обработки результатов многократных измерений предполагает работу с установившимся значением величин, выполним обработку результатов после полного открытия с задвижек, с 70 секунды. Исходные данные измерений представлены в Таблице 2.15 [26].

$$\bar{q}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n q_{1i}}{n} = -0,93 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (2.42)$$

Таблица 2.15 – Данные экспериментальных измерений [26]

t, с	q ₁ , м ³ /с	$(q_{1i} - \bar{q}_1)^2$ · 10 ⁴ м ² /с ⁶	q _{2n} , м ³ /с	$(q_{2i} - \bar{q}_{2n})^2$ · 10 ⁴ м ² /с ⁶
0	0,00		-0,23	
10	-0,18		-0,18	
20	-0,46		-0,09	
30	-0,64		0,09	
40	-0,83		0,24	
50	-0,83		0,46	
60	-1,01		0,74	
70	-0,92	46,58	0,64	109,73
80	-1,01	5,18	0,84	76,13
90	-1,01	5,18	0,92	289,85
100	-1,01	5,18	0,64	111,83
110	-1,10	131,68	0,92	289,85
120	-0,83	260,02	0,64	111,83
130	-1,10	131,68	0,64	111,83
140	-1,01	5,18	1,01	666,93
150	-1,01	5,18	0,74	0,60
160	-1,01	5,18	0,64	111,83
170	-0,92	46,58	0,84	76,13
180	-1,01	5,18	0,84	76,13
190	-0,92	46,58	0,64	111,83
200	-1,01	5,18	0,74	0,60
210	-1,01	5,18	0,64	111,83
220	-0,92	46,58	0,64	111,83
	$\bar{q}_1 = -0,93$	$\Sigma (q_{1i} - \bar{q}_1)^2$ · 10 ⁴ = 756,27	$\bar{q}_{2n} = 0,75$	$\Sigma (q_{2ni} - \bar{q}_{2n})^2$ · 10 ⁴ = 157,92

Среднеквадратичное отклонение (СКО) результатов измерений

$$\sigma_1 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{1i} - \bar{q}_1)^2}}{n-1} = \frac{27,50}{15 \cdot 10^4} = 7,10 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}; \quad (2.43)$$

СКО результата измерения

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.44)$$

$$S_1 = \frac{7,10 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{16}} = 1,78 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с};$$

Доверительные границы случайной погрешности при коэффициенте Стьюдента $t_p=2,12$ при доверительной вероятности 0,95 при $n=16$

$$\varepsilon = t_p \cdot S, \quad (2.45)$$

$$\varepsilon_1 = 2,12 \cdot 1,78 \cdot 10^{-2} = 0,038 \text{ м}^3/\text{с};$$

Аналогично вычисляя получим

$$\varepsilon_{2n} = 0,066.$$

Для расчетных значений проверим условие соответствия доверительному интервалу ($-0,968 \leq q_{1\text{расч}} \leq -0,892$; $0,684 \leq q_{2\text{п.расч}} \leq 0,816$). Результаты проверки указаны в Таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Проверка соответствия расчетных значений для опыта №2 доверительному интервалу

t, с	$q_{1\text{расч}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$-0,968 \leq q_{1\text{расч}} \leq -0,892$	$q_{2\text{п.расч}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$0,684 \leq q_{2\text{п.расч}} \leq 0,816$
70	-0,961	ИСТИНА	0,731	ИСТИНА
80	-0,959	ИСТИНА	0,729	ИСТИНА
90	-0,958	ИСТИНА	0,728	ИСТИНА
100	-0,956	ИСТИНА	0,726	ИСТИНА
110	-0,955	ИСТИНА	0,725	ИСТИНА
120	-0,954	ИСТИНА	0,723	ИСТИНА
130	-0,952	ИСТИНА	0,722	ИСТИНА
140	-0,951	ИСТИНА	0,720	ИСТИНА
150	-0,949	ИСТИНА	0,719	ИСТИНА
160	-0,948	ИСТИНА	0,718	ИСТИНА
170	-0,946	ИСТИНА	0,716	ИСТИНА
180	-0,945	ИСТИНА	0,714	ИСТИНА
190	-0,943	ИСТИНА	0,713	ИСТИНА
200	-0,942	ИСТИНА	0,712	ИСТИНА
210	-0,940	ИСТИНА	0,710	ИСТИНА

Для данных опыта 1 доверительные интервалы будут составлять $-1,149 \leq q_{1\text{расч}} \leq -0,870$; $0,658 \leq q_{2\text{п.расч}} \leq 1,003$. Результаты проверки указаны в Таблице 2.17.

Данные расчёта в программе для ЭВМ на Рисунках 2.7, 2.8 хорошо согласуются с опытными данными Гареева М.М.[26]. Следует отметить что опыты проводились в 1975-1976 годах на резервуарах с высотой стенки в 12 метров. В настоящее время сооружаются резервуары с высотой стенки 18 метров, при этом скорость открытия/закрытия задвижек на действующих резервуарах может составлять от 3 до 20 минут. Так же из состава сооружений в настоящее время исключены хлопушки, исключавшие переток продукта при переключении закачки.

Таблица 2.17 – Проверка соответствия расчетных для опыта №1 значений доверительному интервалу

t, с	$q_{1\text{расч}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$-1,149 \leq q_{1\text{расч}} \leq -0,870$	$q_{2\text{расч}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$0,658 \leq q_{2\text{п.расч}} \leq 1,003$
70	-0,935	ИСТИНА	0,721	ИСТИНА
80	-0,965	ИСТИНА	0,751	ИСТИНА
90	-0,987	ИСТИНА	0,773	ИСТИНА
100	-1,004	ИСТИНА	0,789	ИСТИНА
110	-1,003	ИСТИНА	0,788	ИСТИНА
120	-1,001	ИСТИНА	0,787	ИСТИНА
130	-1,000	ИСТИНА	0,786	ИСТИНА
140	-0,999	ИСТИНА	0,785	ИСТИНА
150	-0,998	ИСТИНА	0,784	ИСТИНА
160	-0,996	ИСТИНА	0,782	ИСТИНА
170	-0,995	ИСТИНА	0,781	ИСТИНА
180	-0,994	ИСТИНА	0,780	ИСТИНА
190	-0,993	ИСТИНА	0,779	ИСТИНА
200	-0,991	ИСТИНА	0,778	ИСТИНА
210	-0,990	ИСТИНА	0,776	ИСТИНА
220	-0,989	ИСТИНА	0,775	ИСТИНА
230	-0,988	ИСТИНА	0,774	ИСТИНА
240	-0,987	ИСТИНА	0,773	ИСТИНА
250	-0,986	ИСТИНА	0,771	ИСТИНА
260	-0,984	ИСТИНА	0,770	ИСТИНА
270	-0,983	ИСТИНА	0,769	ИСТИНА
280	-0,982	ИСТИНА	0,768	ИСТИНА

Выполним расчёт для резервуаров по данным из Таблицы 2.5. Для резервуаров объемом 20000 м³. Переток при откачке из резервуаров опасности не представляет, но переток также возможен при переключении заправки из резервуаров в резервуар, переток при заправке исходя из расчётов более интенсивен, чем при откачке. На рисунке представлены данные расчёта заправки в программе для ЭВМ в виде графика для РВСП-20000м³ с пропускной способностью дыхательных патрубков 14150 м³/ч (Таблица 2.7). Задвижки открываются/закрываются по 5 минут, 2 минуты обе задвижки находятся в полностью открытом положении. Результаты расчета представлены на Рисунке 2.11.

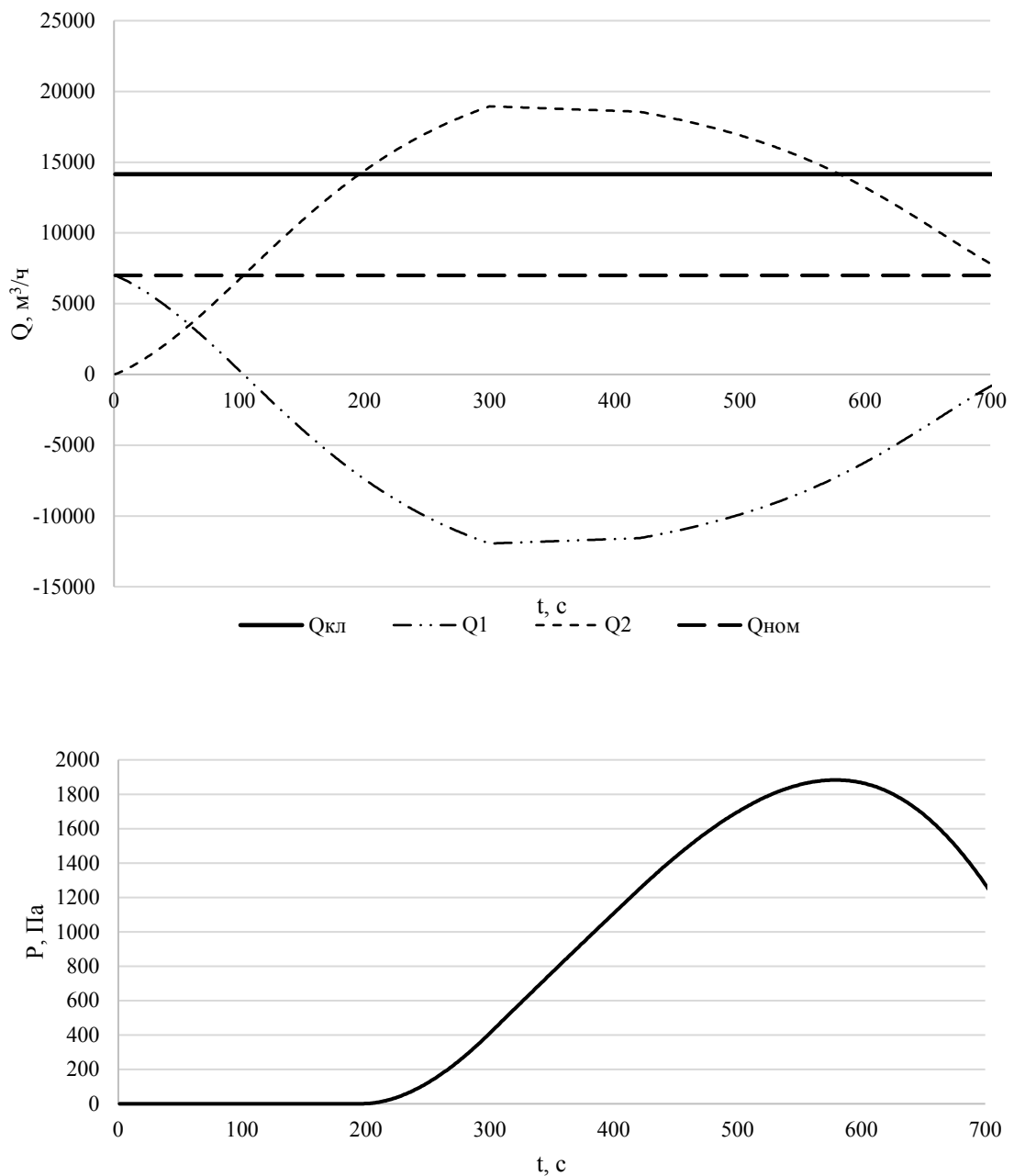
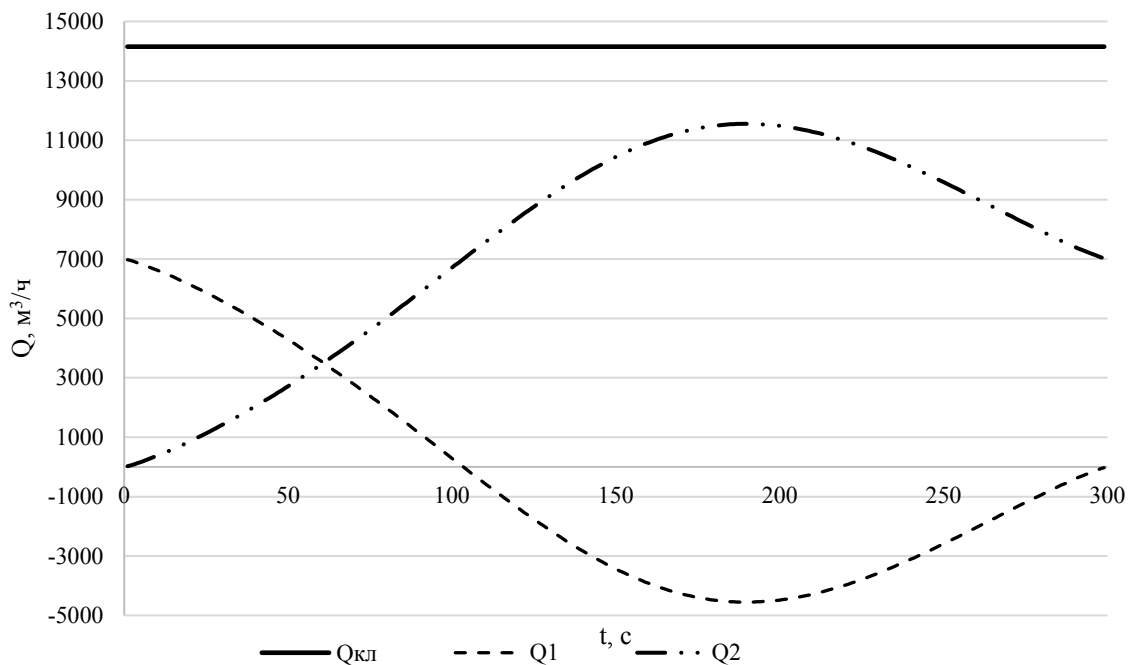


Рисунок 2.12 – Данные расчёта закачки в программе для ЭВМ в виде графика для РВСП-20000 м^3

Из расчёта на Рисунке 2.12 видно, что производительность закачки с учётом перетока превышает пропускную способность вентиляционных патрубков, происходит рост давления в газовом пространстве резервуара. В случае одновременного переключения задвижек на Рисунке 2.13, производительность закачки с учетом перетока, для тех же резервуаров, не превышает производительность вентиляционных патрубков.



$$*Q_{\text{от}} = Q_{\text{зак/отк}}$$

Рисунок 2.13 – Данные расчёта одновременного переключения заправки в программе для ЭВМ в виде графика для РВСП-20000м³

Наибольшую опасность переток представляет для резервуаров объемом 10 000м³ с высотой стенки 18 м, так как для них отношение диаметра резервуара к высоте стенки минимальное. Расчёт переключения откачки приведен на Рисунке 2.14.

Для РВСП 10 000м³ даже при кратковременном и одновременном переключении резервуаров (Рисунок 2.14) производительность откачки с учетом перетока превышает пропускную способность вентиляционных патрубков. Давление в резервуаре резко падает ниже допустимых пределов, что крайне опасно в условиях действующих резервуарных парков.

Резервуары без понтона оснащаются дыхательными и предохранительными клапанами, что снижает вероятность возникновения аварийной ситуации, но в условиях действующих норм проектирования возможна нештатная ситуация в виде срабатывания предохранительных клапанов.

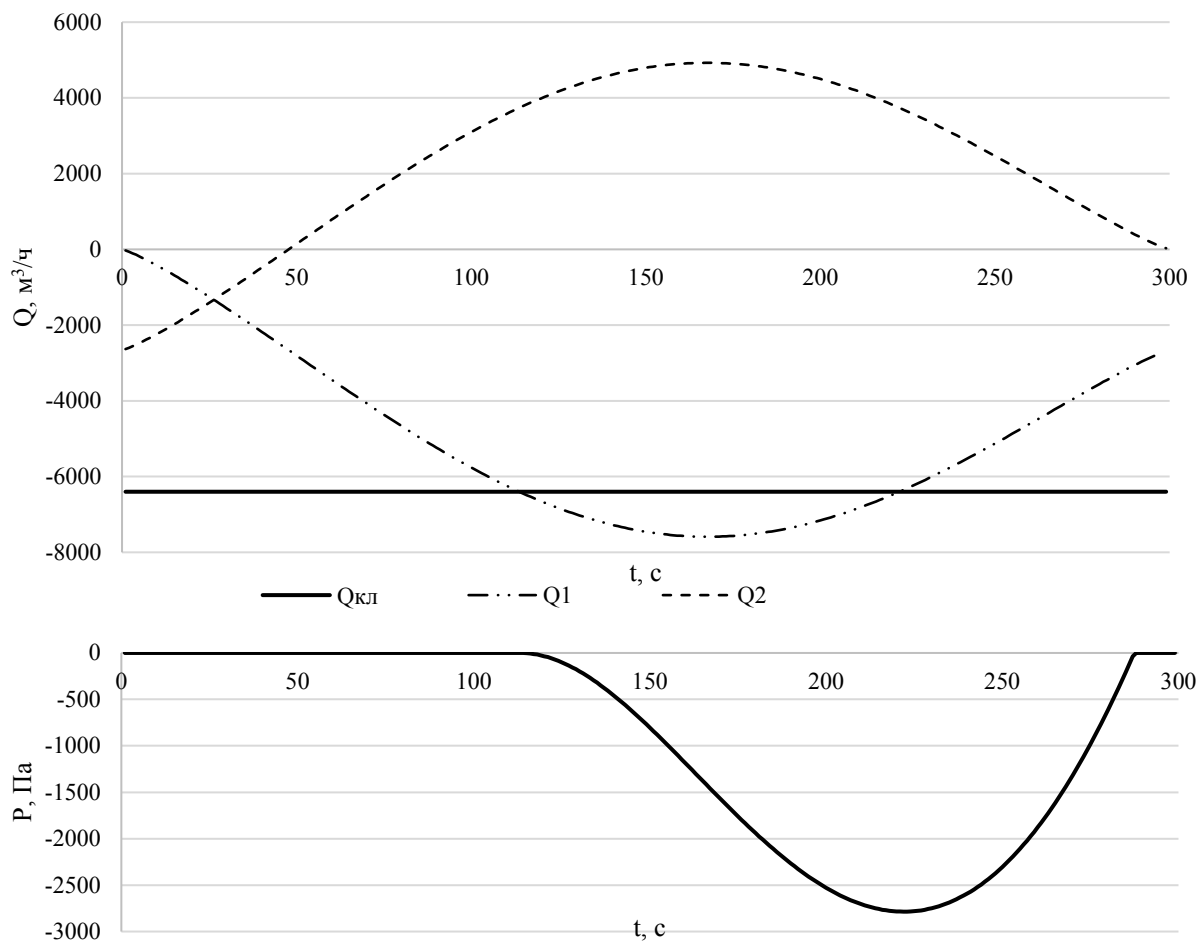


Рисунок 2.14 – Данные расчёта одновременного переключения откачки в программе для ЭВМ в виде графика для РВСП - 10 000 м^3

По результатам расчёта в программе для ЭВМ для последовательного переключения откачки РВС 10 000 м^3 представленной на Рисунке 2.15 производительность откачки превышает пропускную способность дыхательных клапанов, что влечет за собой срабатывание предохранительных клапанов. Аналогичная ситуация происходит и при переключении закачки на Рисунке 2.16.

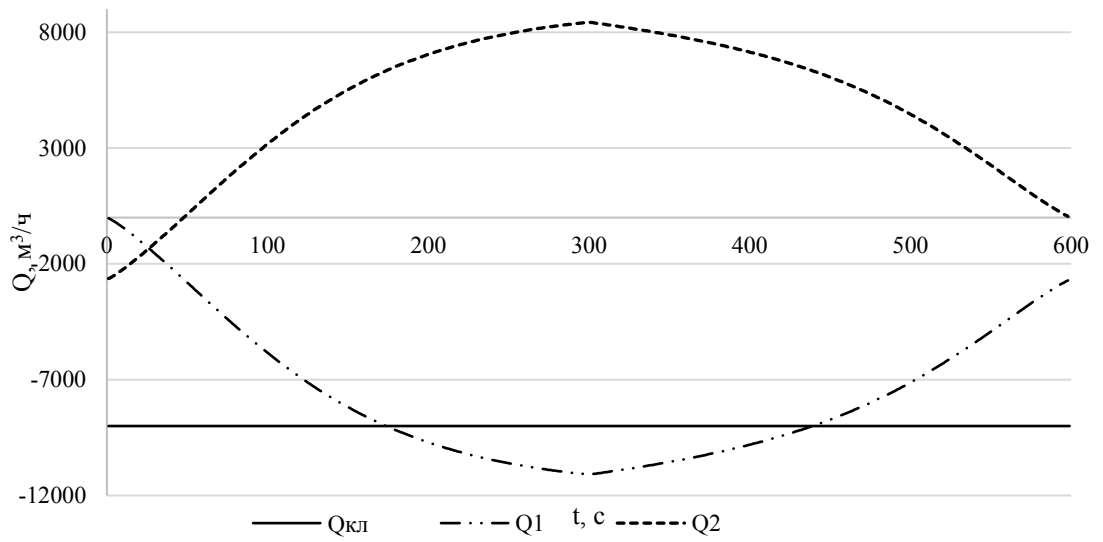


Рисунок 2.15 – Расчёт в программе для ЭВМ для последовательного переключения откачки РВС 10 000 м³

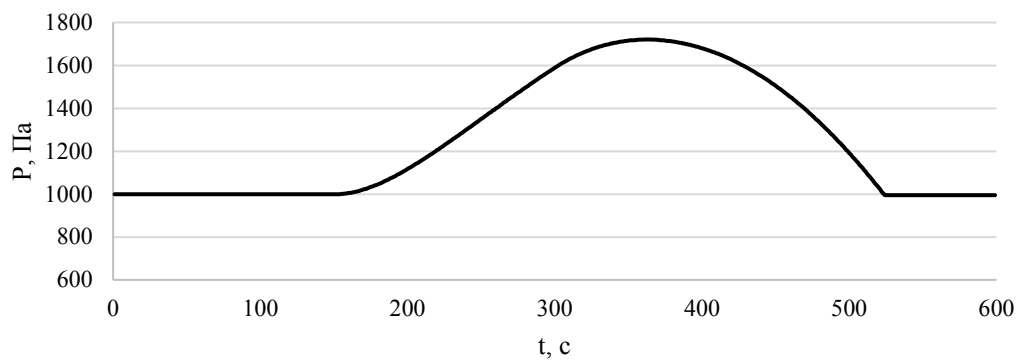
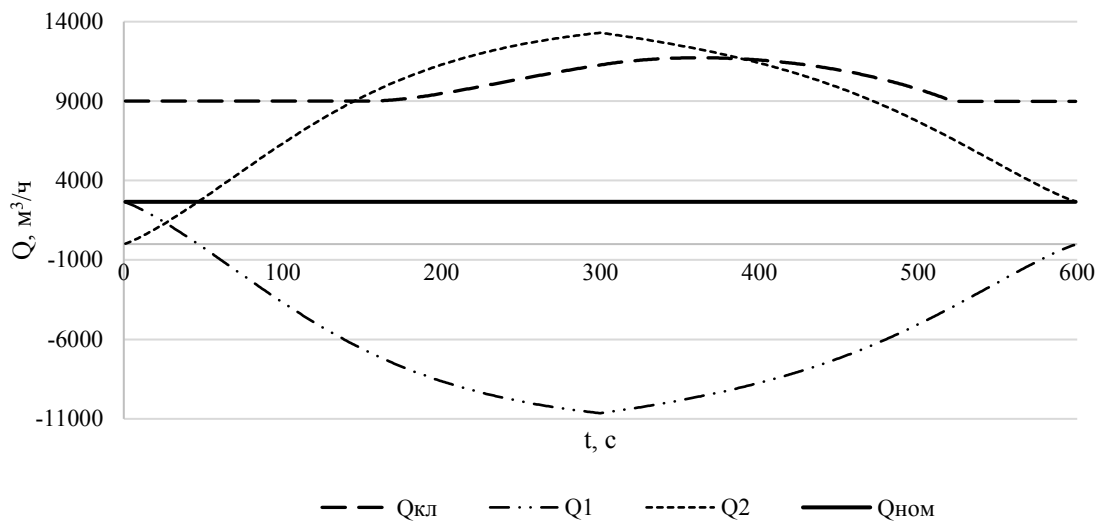


Рисунок 2.16 – Расчёт в программе для ЭВМ для последовательного переключения закачки РВС 10 000 м³

2.6 Способы ограничения перетока

Из анализа данных расчета (приложение Б) выявлено, что при переключении резервуаров с уровнем налива в заполненном резервуаре 17 м и в порожнем 2 м, в течении 12 минут, перетекает количество продукта, соответствующее 1,5 м уровня налива. При разности между верхним и нижним эксплуатационными уровнями налива в 15 м, недоиспользуется 10% полезной емкости для каждого резервуара, что при последовательном переключении резервуаров даёт 20% (10 % при подключении, 10 % при отключении) недоиспользования полезной емкости. Для резервуарного парка, содержащего 10 резервуаров РВС 10 000м³, недоиспользование такого объема полезной емкости будет эквивалентно недоиспользованию одного резервуара, что предполагает значительные капитальные затраты на сооружение дополнительного резервуара. Таким образом, кроме возникновения неблагоприятных явлений при эксплуатации отдельного резервуара, возникает существенное недоиспользование резервуарных емкостей всего резервуарного парка.

На основании вышеизложенного рекомендуется разработка методов и средств ограничения перетока при переключении резервуаров.

Как один из способов ограничения перетока, предлагается внедрение обратных клапанов в принципиальную схему обвязки резервуаров в соответствии со схемой на Рисунке 2.17.

При наливе в резервуар 1 открыты задвижка 1.2 и обратный клапан 1.4, задвижка 1.1 закрыта. В процессе переключения налива с резервуара 1 на резервуар 2 открывается задвижка 2.2 и обратный клапан 2.4 под давлением продукта. При возникновении явления перетока сменяется направления тока на клапане 1.4, клапан закрывается тем самым предотвращая явление перетока, далее закрывается задвижка 1.2, процесс переключения завершается.

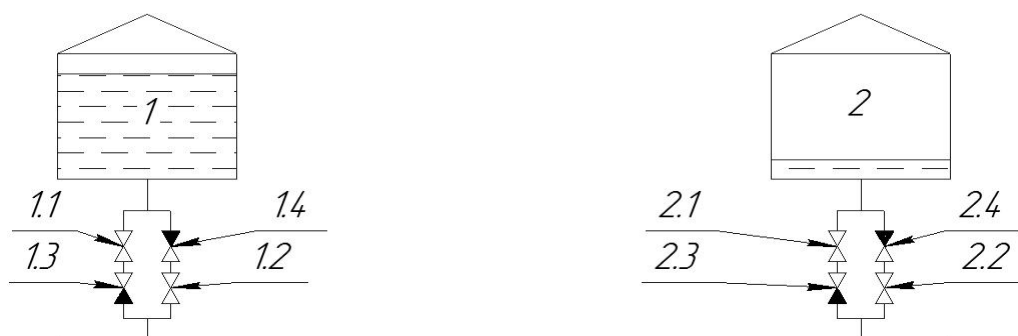


Рисунок 2.17 – Принциальная схема обвязки резервуаров предотвращающая переток при переключении резервуаров

При опорожнении резервуара 2, открыта задвижка 2.1 и обратный клапан 2.3, задвижка 2.2 закрыта. При переключении откачки с резервуара 2 на резервуар 1 открывается задвижка 1.1 и клапан 1.3. При возникновении явления перетока сменяется направление тока на клапане 2.3 и клапан закрывается предотвращая переток.

Для технологической схемы резервуаров на которых проводились экспериментальные исследования[26] внедрение обвязки предотвращающей переток будет заключаться в установке 8 обратных клапанов как указано на Рисунке 2.18.

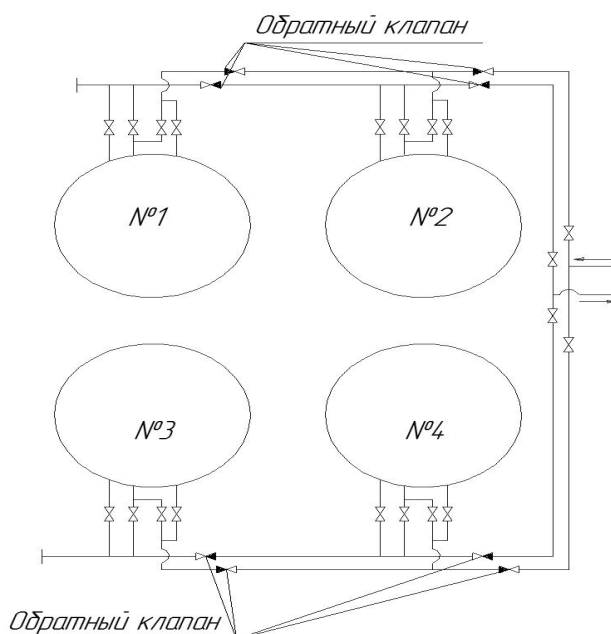


Рисунок 2.18 – Схема обвязки резервного парка, исключающая переток при переключении резервуаров

Внедрение обратных клапанов позволит исключить переток конструктивно.

Ещё одним способом конструктивно исключить переток будет являться внедрение комбинированного шарового крана-клапана, представленного на Рисунке 2.19 [94].

Полезная модель относится к трубопроводной арматуре и может быть использована в качестве запорной, предохранительной и изолирующей арматуры на трубопроводах. Комбинированный шаровой кран - клапан содержит корпус 1 шарового крана с центральным сквозным отверстием 2, связанный с фланцами 3, шаровую пробку 4 с центральным сквозным отверстием 5 в корпусе 6 шаровой пробки, фиксируемую внутри корпуса 1 шарового крана седлами 7, шток 8, рукоятку 9, в центральном сквозном отверстии 5 корпуса 6 шаровой пробки 4 установлен обратный клапан 10, корпус 1 шарового крана выполнен связанным с фланцами 3 с возможностью отсоединения, обратный клапан 10 выполнен в виде уплотнительной гильзы 11, установленной в корпусе 6 шаровой пробки 4, с захлопывающим элементом 12, снабженным рычагом 13, связанным с шарниром 14, закрепленным на корпусе 6 шаровой пробки 4. Корпус 1 шарового крана может быть связан с фланцами 3 стяжными шпильками 15, стяжные шпильки 15 могут быть снабжены гильзами 16, выполненными из электроизоляционного материала, шаровая пробка 4 может быть выполнена из трубной заготовки, между корпусом 1 шарового крана и фланцами 3 могут быть установлены электроизолирующие прокладки 17.

Для внедрения в резервуарные парки предлагается заменить фланцевые соединения на сварные, вместо рукоятки использовать электропривод обеспечивающий вращение шаровой пробки 4 на 180° - 360° . Использование крана-клапана обеспечивает перекрытие трубопровода в закрытом положении и течение жидкости только в одном направлении при открытых положениях.

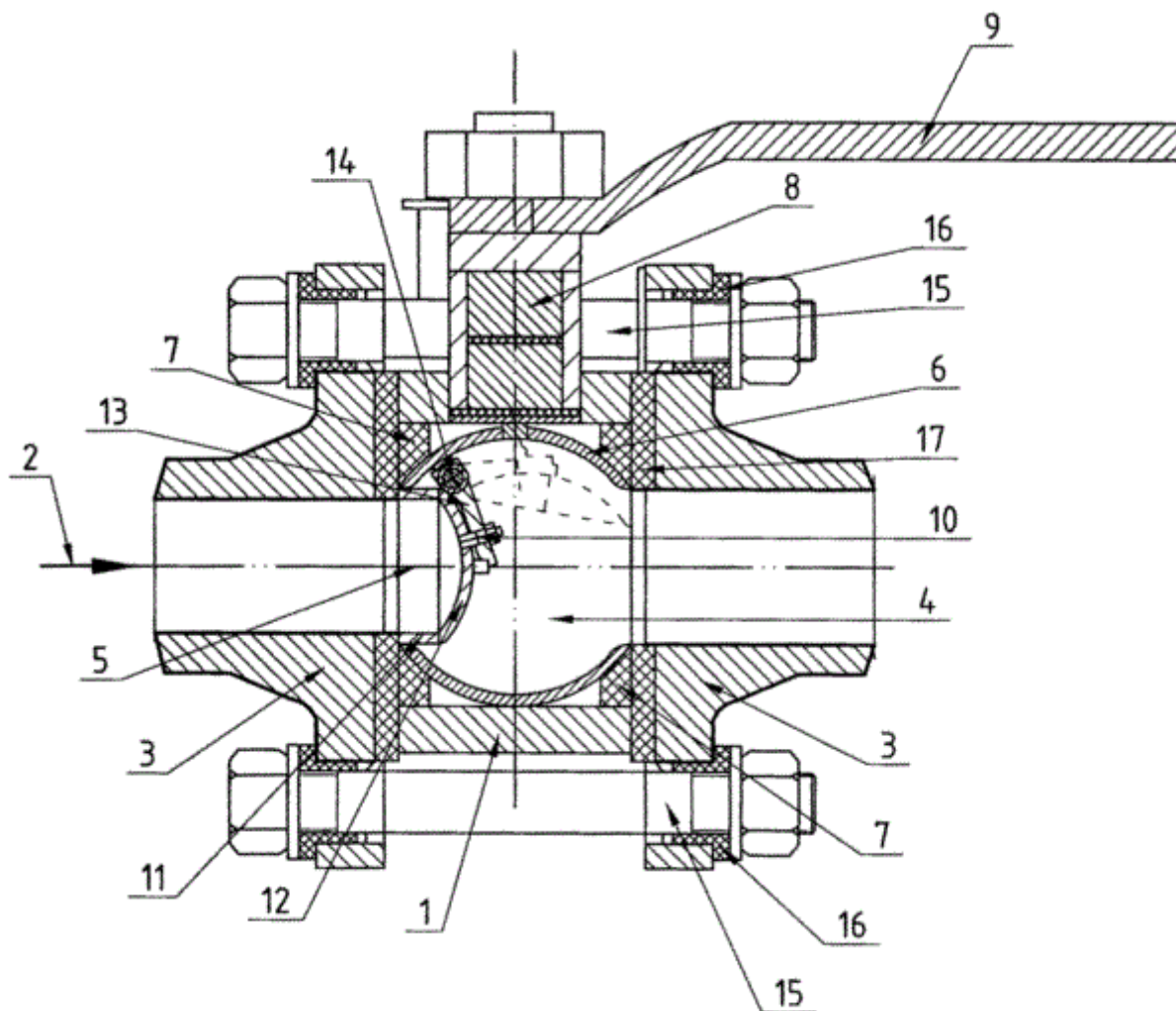


Рисунок 2.19 – Прототип крана-клапана

Из работы [26] известно, что переток отсутствует при выполнении условия в случае переключения откачки

$$2g(\Delta Z - \frac{P_{к0} + P_{кв}}{\gamma}) \leq q_0^2 b_1, \quad (2.46)$$

и условия в случае переключения закачки

$$2g(\Delta Z - \frac{P_{к0} + P_{кв}}{\gamma}) \leq q_3^2 b. \quad (2.47)$$

Величины q_0 и q_3 задаются исходя из производительности насосов и являются постоянными для каждого случая. В свою очередь коэффициенты b и b_1 характеризуют гидравлические сопротивления участков трубопроводов и в процессе открытия/закрытия задвижек меняют значения.

Выразим из условий (2.46), (2.47), суммы коэффициентов местных

сопротивлений с учетом формулы (1.11), для случая откачки

$$\frac{F_{12}^2}{Q_{отк}^2} (2g(\Delta Z - \frac{P_{кд} + P_{кв}}{\gamma}) - \lambda_{11} \frac{l_{11}}{d_{11}} - \lambda_{12} \frac{l_{12} F_{11}^2}{d_{12} F_{12}^2} - \sum \zeta_{11} - 1) \leq \sum \zeta_{12} \quad (2.48)$$

и с учетом (1.10) для случая заправки

$$2 \frac{g F_2^2}{Q_{зак}^2} (\Delta Z - \frac{P_{кд} + P_{кв}}{\gamma}) + 1 - \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \leq \sum \zeta_2. \quad (2.49)$$

Подставляя в условие (2.44) выражение по формуле (2.33) и выражая $\zeta_{1.2.зав.}$ получаем формулу коэффициента местных сопротивлений задвижки подключаемого для откачки (полного) резервуара соответствующую условию отсутствия перетока.

$$\zeta_{12.зав.} \geq \frac{F_{12}^2}{Q_{отк}^2} (2g(\Delta Z - \frac{P_{кд} + P_{кв}}{\gamma}) - \lambda_{11} \frac{l_{11}}{d_{11}} - \lambda_{12} \frac{l_{12} F_{11}^2}{d_{12} F_{12}^2} - \sum \zeta_{11} - 1) - \sum \zeta_{12.м.с.} \quad (2.50)$$

Аналогично для условия (2.48), подставив выражение (2.34), выразив $\sum \zeta_{2.м.с.}$, получаем формулу коэффициента местных сопротивлений задвижки, подключаемого для заправки (порожного) резервуара соответствующую условию отсутствия перетока

$$\zeta_{2.зав.} \geq 2 \frac{g F_2^2}{Q_{зак}^2} (\Delta Z - \frac{P_{кд} + P_{кв}}{\gamma}) + 1 - \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} - \sum \zeta_{2.м.с.} \quad (2.51)$$

Сопоставляя условия (2.50) и (2.51) с уравнением (2.30) получаем формулы необходимой степени открытия задвижек на подключаемые резервуары для предотвращения перетока:

$$S = \sqrt[{-2.371}]{\left[\frac{F_{12}^2}{Q_{отк}^2} (2g(\Delta Z - \frac{P_{кд} + P_{кв}}{\gamma}) - \lambda_{11} \frac{l_{11}}{d_{11}} - \lambda_{12} \frac{l_{12} F_{11}^2}{d_{12} F_{12}^2} - \sum \zeta_{11} - 1) \right] / 54048 ; \quad (2.52)}$$

$$S = \sqrt[{-2.371}]{\left[2 \frac{g F_2^2}{Q_{зак}^2} (\Delta Z - \frac{P_{кд} + P_{кв}}{\gamma}) + 1,978 - \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} - \sum \zeta_{2.м.с.} \right] / 54048. \quad (2.53)}$$

Исходя из полученных зависимостей, определим рекомендуемые значения степени открытия задвижек на подключаемый резервуар на которых

рекомендуется делать остановку открытия в целях предотвращения перетока. Результаты расчета указаны в Таблице 2.18.

Таблица 2.18 – Рекомендуемые степени промежуточного открытия задвижки на подключаемый резервуар

№	$Q_{отк}/Q_{за}$ к, м ³ /ч	$d_{11,м}$	$d_{12,м}$	$d_{2,м}$	$l_{11,м}$	$l_{12,м}$	$l_{2,м}$	$\sum \zeta_1$	$\sum \zeta_{12}$	$\sum \zeta_2$	v , с/ст	$S_{зак}$, %	$S_{отк}$, %
1	2661	0,7	0,5	0,5	1	10	10	0,95	1,5	2	36	27,5	28,7
2	3782	0,8	0,7	0,7	65	10	10	0,95	1,5	2	36	21,0	21,8
3	7000	0,8	0,7	0,7	65	10	10	0,95	1,5	2	60	35,1	41,1
4	10924	1,0	0,7	0,7	65	10	10	0,95	1,5	2	60	50,5	65,9

Как видно из результатов расчетов в таблице 2.18, для различных параметров обвязки резервуаров и вязкости хранимого продукта, получены существенно различающиеся значения степени открытия задвижки на подключаемый резервуар для предотвращения перетока, таким образом рекомендуется выполнять расчёт для каждого случая отдельно.

На Рисунке 2.20 представлен график изменения производительностей закачки/откачки с остановкой открытия задвижки на подключаемый резервуар при переключении откачки из условий таблицы 2.18 строки 1. При общей продолжительности переключения в 300 секунд открытие задвижки на 20,0% будет достигнуто к 50 с., открытие задвижки приостанавливается и продолжится с 300 с.

Из результатов расчета видно, что при остановке открытия задвижки в положении рассчитанном по формулам (2.52), (2.53) переток практически отсутствует. Для безопасности рекомендуется осуществлять остановку открытия задвижки на 5 секунд позже момента полученного по результатам расчета.

В результате отсутствия перетока повышается безопасность эксплуатации резервуаров, обеспечивается использование до 100% полезной емкости, так как при переключении часть продукта не перетекает в другой резервуар, повышается точность учёта поступившего продукта,

предотвращается превышение допустимой производительности трубопроводов, что обеспечивает безопасность процесса переключения, обеспечиваются нормативные скорости всплытия/опускания понтона и скорости продукта в приемо-раздаточных патрубках.

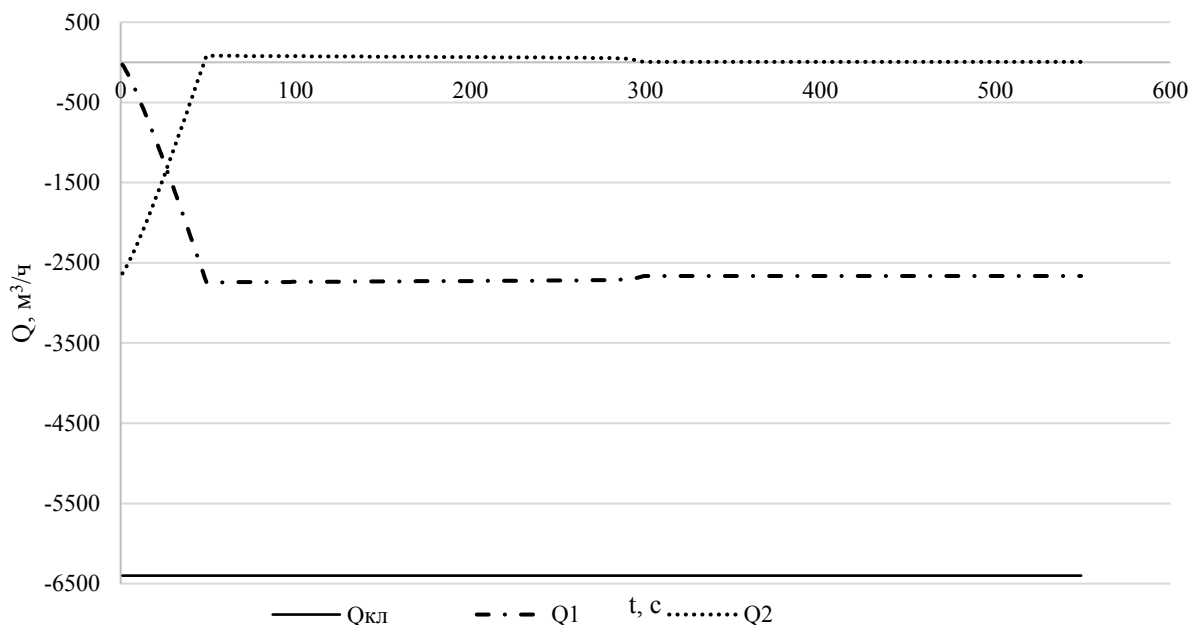


Рисунок 2.20 – График изменения производительностей закачки/откачки с остановкой открытия задвижки на подключаемый резервуар для одновременного переключения откачки с промежуточной остановкой открывания задвижки

Выводы по второй главе

1. Из анализа расчетов по действующей нормативной документации выявлена возможность превышения производительности закачки/откачки с учетом перетока при переключении резервуаров до 4,97 раз от заданной производительности нефтепровода.

2. По результатам расчётов производительности откачки/закачки в резервуары с учетом перетока подтверждается:

-возможность превышения допустимой скорости движения нефти в ПРП резервуара, что может повлечь накопление недопустимого заряда

статического электричества;

- возможность превышения допустимой скорости всплытия/опускания понтонов и ПК;

- возможность срабатывания предохранительных клапанов в резервуарах без понтонов в результате превышения производительности дыхательных клапанов, и возможность образования вакуума/избыточного давления в ГП резервуаров с понтонами в результате недостаточной пропускной способности вентиляционных патрубков.

3. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая анализировать переключение резервуаров с учетом перетока и анализом образования избыточного/вакуумметрического давления в резервуаре в течении всего процесса переключения резервуаров.

4. Выявлено, что возможен переток до 10 % объема хранимого продукта из резервуара в резервуар, что при последовательном переключении с резервуара на резервуар приводит к недоиспользованию до 20% полезной емкости резервуара (до 10% при подключении и 10% при отключении).

5. Предложены способы предотвращения перетока:

- применение шарового крана-клапана [94];
- разделение обвязки резервуаров на линию закачки и откачки с обратными клапанами;
- открытие задвижки на подключаемый резервуар с промежуточной остановкой при степени открытия задвижки рассчитанной по предлагаемой методике.

6. С учетом пунктов 2,3 предлагается разработка альтернативных средств уменьшения объема ГП резервуаров и интенсивности испарений.

3 ИСКЛЮЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА НА ВЕЛИЧИНУ ПОТЕРЬ ОТ ИСПАРЕНИЙ

По результатам анализа перетока при переключении резервуаров было выявлено увеличение внутрибазовых перекачек продукта в результате перетока, что увеличивает потери от испаряемости нефти и нефтепродуктов и требует большей производительности дыхательной арматуры. Нефть и нефтепродукты относятся к невозобновляемым ресурсам, и поэтому проблеме испарения во всем мире уделяется особое внимание. Стремление повысить рентабельность, технологичность и надежность конструкций объясняет разнообразие предлагаемых решений для предотвращения потерь от испарений.

Наиболее перспективным представляется не улавливание кажущихся потерь, а предотвращение появления этих потерь. Это можно сделать путем уменьшения объема ГП резервуара. Устройство понтонов является традиционным, эффективным, но достаточно дорогим и не всегда рациональным способом уменьшения потерь. К тому же это приводит к уменьшению полезной емкости резервуара, а в резервуарах отличных по форме от РВС это невозможно, поэтому используются другие средства, либо не применяются средства сокращения потерь.

Рассмотрим требования к новому устройству:

1. Минимальные инвестиционные затраты на внедрение устройства;
2. Простота конструкции;
3. Компактность устройства, не требующая дополнительного пространства на территории нефтебазы для его размещения;
4. Простота в использовании;
5. Отсутствие необходимости дополнительного обслуживания;
6. Полезная емкость резервуара не уменьшается.

3.1 Конструкция резервуара с гибкой оболочкой

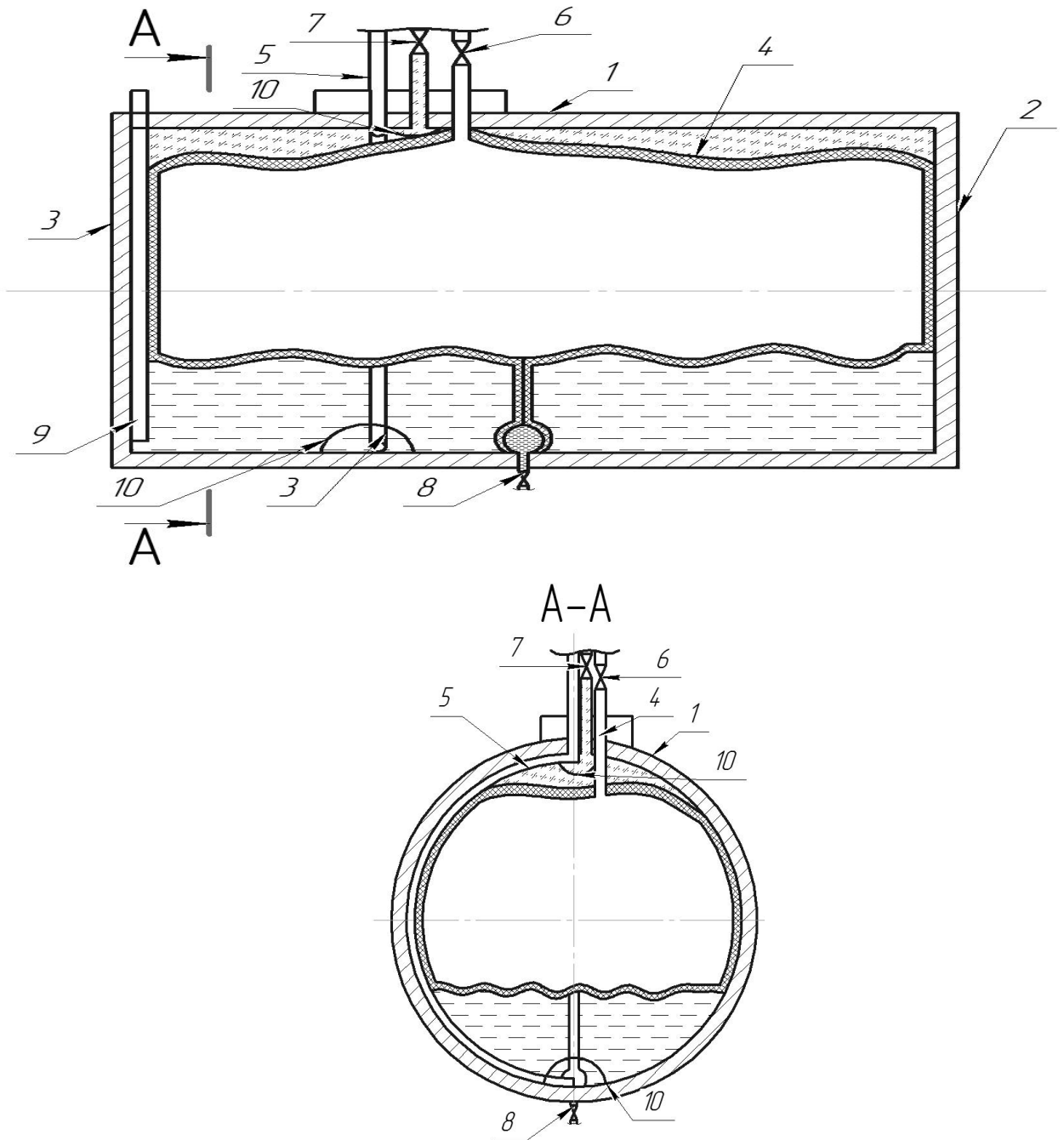
Для соответствия требованию об устройстве средства сокращения потерь без использования дополнительного пространства, следует размещать его в полости самого резервуара.

Устройство должно работать автономно, что не будет усложнять эксплуатацию, для этого можно использовать физические процессы, происходящие в резервуаре, например, изменения давления в ГП при сливо-наливных операциях.

Для исключения потерь от испарений разработано новое средство для сокращения потерь от испарений – гибкая оболочка[95-97]. Общий вид резервуара с гибкой оболочкой представлен на Рисунках. 3.1, 3.2.

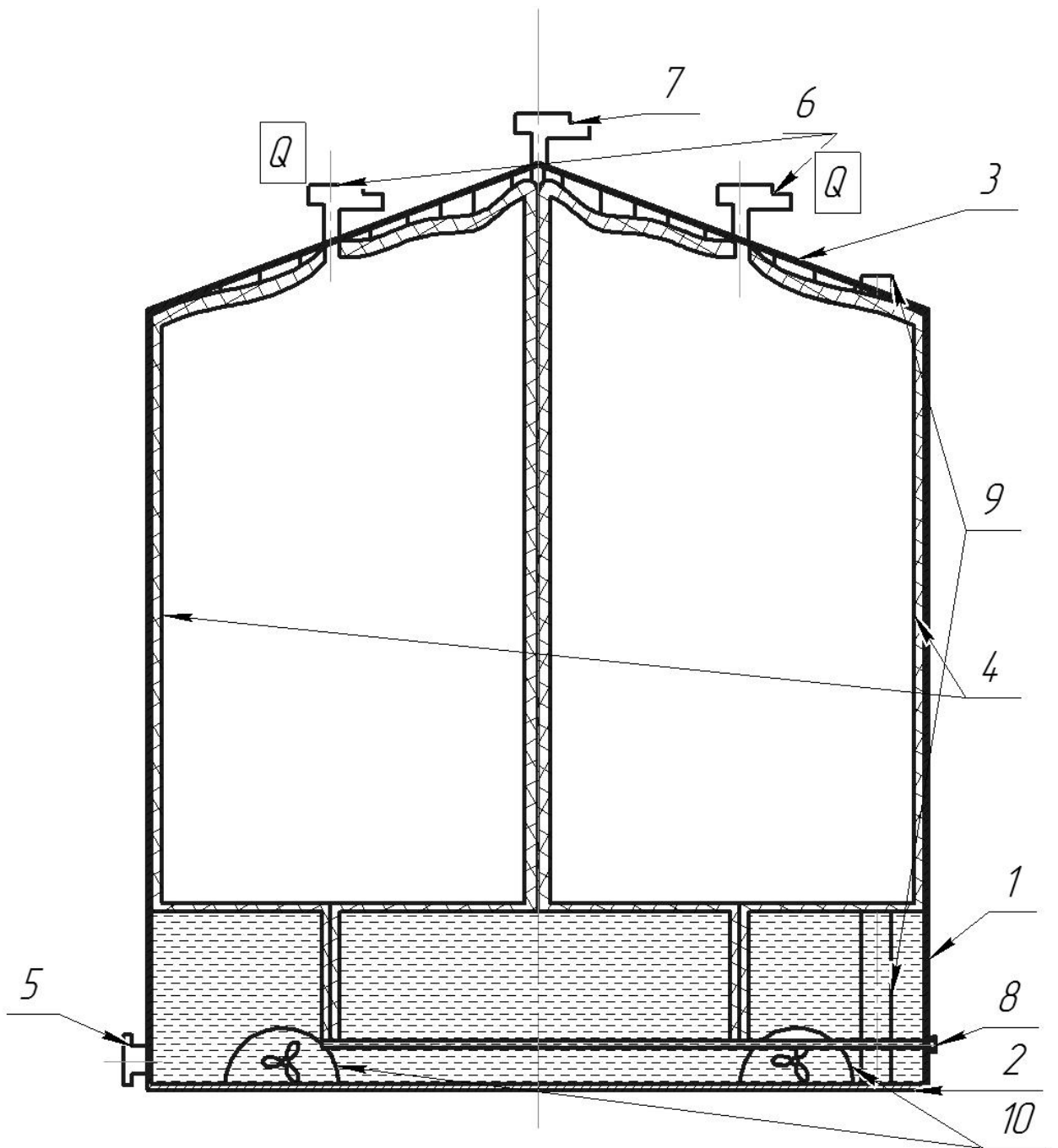
Гибкая оболочка размещается внутри резервуара, плавает на поверхности продукта. Оболочка сообщается с атмосферой через дыхательный клапан, тем самым при сливо-наливных операциях исключается контакт атмосферного воздуха с продуктом. Резервуар оснащается предохранительным клапаном, настроенным на большее давление чем дыхательный клапан гибкой оболочки. Для удаления конденсата из оболочки предусматривается патрубок для слива конденсата.

На основании схем на Рисунках 3.1, 3.2 создан рабочий макет представляющий собой герметичную емкость, гибкая оболочка выполнена из полиэтиленового мешка. В результате опытов оболочка сдувалась и надувалась в соответствии с наполнением самого резервуара [95].



1 – стенка резервуара; 2, 3 – днища; 4 – гибкая оболочка; 5 – приемораздаточный патрубок; 6 – дыхательный патрубок с клапаном; 7 – предохранительный клапан; 8 – патрубок с задвижкой для слива конденсата; 9 – труба уровнемера; 10 – защитные сетки.

Рисунок 3.1 – Резервуар горизонтальный с гибкой оболочкой

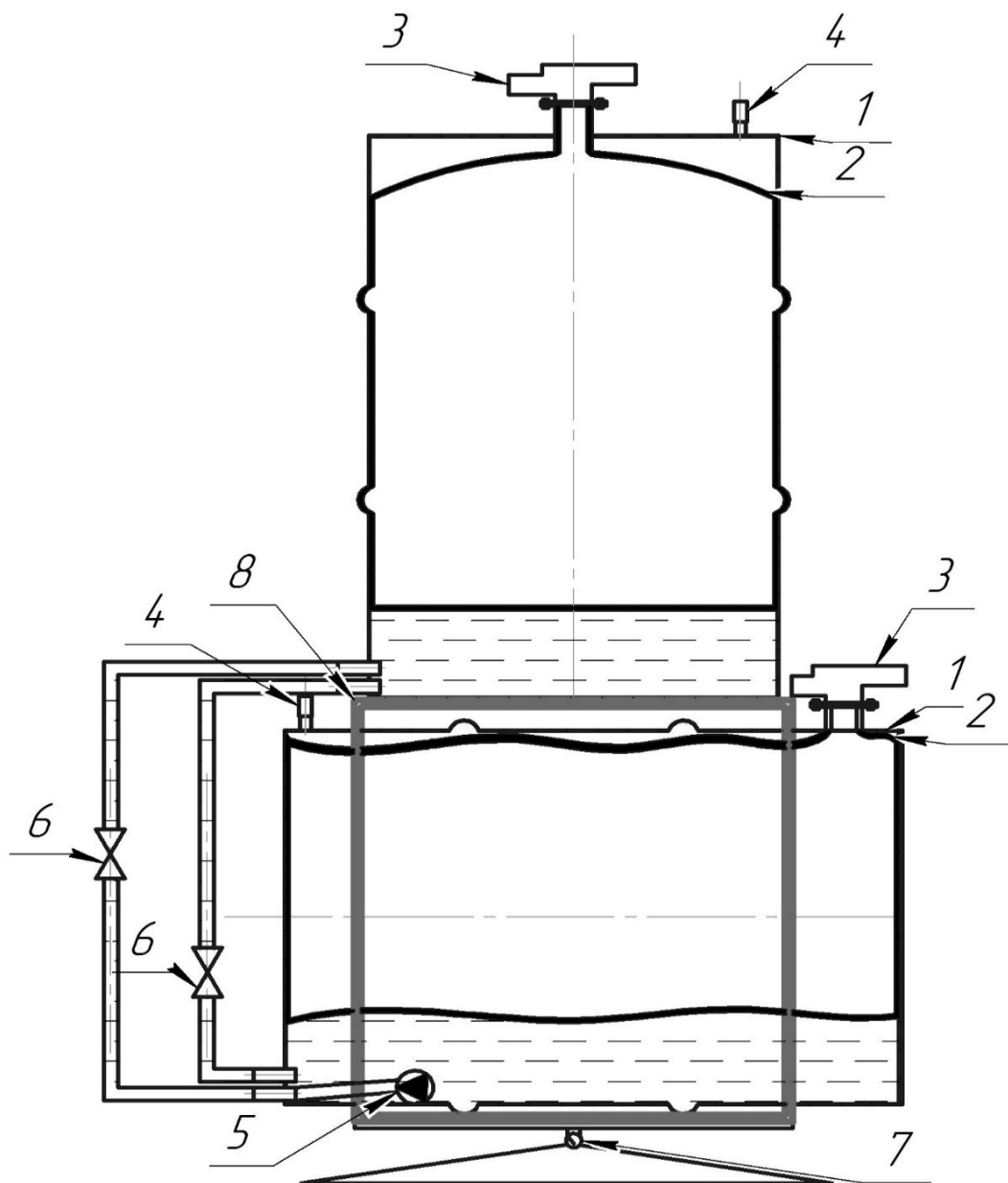


1 – стенка резервуара; 2 – днище; 3 – крыша; 4 – гибкая оболочка; 5 –
 приемо-раздаточный патрубок; 6 – дыхательный патрубок с клапаном; 7 –
 предохранительный клапан; 8 – патрубок с задвижкой для слива конденсата;
 9 – труба уровнемера; 10 – защитные сетки.

Рисунок 3.2 – Резервуар вертикальный с гибкими оболочками

3.2 Экспериментальное испытание резервуаров

Для определения степени сокращения потерь при эксплуатации резервуаров с гибкой оболочкой предложена схема экспериментальной установки, представленная на Рисунке 3.3 [98,99].



1 – емкости; 2 – гибкая оболочка; 3 – дыхательный клапан; 4 – предохранительный клапан; 5 – насос; 6 – шаровый кран; 7 — весы; 8 – опорная рама

Рисунок 3.3 – Схема экспериментальной установки

Для определения необходимых параметров емкостей и оптимального планирования экспериментов выполним расчёт потерь от испарений по методике [88]. Так как в предложенной экспериментальной установке ведется перекачка из одного резервуара в другой, потери от испарений будут происходить в двух резервуарах. В ходе экспериментов простои между перекачками из одного резервуара в другой непродолжительны, потери от «малых дыханий» будут пренебрежительно малы, потери от «обратного выдоха» учитываются при расчёте потерь от «больших дыханий». Таким образом было принято решение рассчитывать потери только от «больших дыханий».

Обосновано, что при построении критериев подобия массоотдачи использовать в качестве характерного линейного размера диаметр емкости нецелесообразно, особенно при проведении экспериментов на моделях. На основе метода анализа размерностей был предложен новый критерий подобия не содержащий линейного размера по ф. (2.9)[50].

Автором работы [50] были выведены эмпирические формулы критерия K_t , для откачки, простоя и закачки для резервуаров РВС, в работе [76] были получены формулы критерия K_t , для простоя и закачки для резервуаров РГС, представленные в дальнейшем расчете. Так как отсутствует необходимость принимать за характерный линейный размер диаметр емкости, то и нет необходимости осуществлять привязку диаметра модельной емкости к высоте, достаточно выбрать наиболее доступный вариант.

Предлагается использовать в качестве емкостей бочки объемом 209 литров, так как данные бочки широко используются в промышленности и хозяйстве, в качестве гибкой оболочки возможно применение полиэтиленовых мешков объемом 250 литров. Общий объем бензина в начале эксперимента в вертикальной емкости составляет 90 литров, в горизонтальной 20 литров. Перекачивается 70 литров бензина (52,6 кг).

Вычисляется среднее соотношение фаз при откачке:

$$\frac{V_{n.om\ cp}}{V_{ж.ом\ cp}} = \frac{[(209 - 90) + (209 - 20)] / 2}{(90 + 20) / 2} = \frac{154}{55} = 2,8. \quad (3.1)$$

Так как $V_n/V_{ж} < 4$, $F(V_n/V_{ж})$ определяется по формуле:

$$F(V_n/V_{ж}) = 1,41 - 0,25 (V_n/V_{ж})^{0,37}; \quad (3.2)$$

$$F(V_n/V_{ж}) = 1,41 - 0,25 (2,8)^{0,37} = 1,04.$$

При данном соотношении фаз и температуре T давление насыщенных паров вычисляется по формуле:

$$P_{s.om} = 1,22 \cdot P_R \cdot e^{-b_s(311-T)} \cdot F(V_n / V_{ж}), \quad (3.3)$$

где b_s – эмпирический коэффициент, для автомобильных бензинов $b_s = 0,0340$ 1/К;

P_R – давление насыщенных паров, согласно паспорту нефтепродукта, 69,1 кПа (Приложение В).

T – температура продукта, принята равной температуре воздуха, 288 К.

$$P_{s.om} = 1,22 \cdot 69100 \cdot e^{-0,0340(311-283)} \cdot 1,04 = 33972,11 \text{ Па.}$$

Концентрация насыщенных паров бензина в газовом пространстве при откачке:

$$C_{s.om} = \frac{P_s}{P_r - P_{вак}} = \frac{33972,11}{101325 - 100} = 0,335. \quad (3.4)$$

Начальная объемная концентрация углеводородов в газовом пространстве резервуара перед откачкой:

$$C_{o.om} = 0,9 \cdot C_{s.om} = 0,9 \cdot 0,335 = 0,302. \quad (3.5)$$

Молярная масса бензина

$$M_y = 60,9 - 0,306 T_{НК} + 0,001 T_{НК}^2 = 60,9 - 0,306 \cdot 306 + 0,001 \cdot 306^2 = 60,9 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}, \quad (3.6)$$

где $T_{НК}$ – температура начала кипения, для бензина АИ-92 $T_{НК} = 306 \text{ К}$.

Плотность паров бензина, воздуха и ПВС при температуре T при условиях откачки:

$$\rho = \frac{PM}{RT}; \quad (3.7)$$

$$\rho_{y.om} = \frac{(101325-100) \cdot 60,9}{8314 \cdot 283} = 2,62 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\epsilon} = \frac{(101325-100) \cdot 29}{8314 \times 283} = 1,25 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{ПВС } 0} = \rho_y \cdot C_s + \rho_B \cdot (1 - C_s) = 2,62 \cdot 0,335 + 1,25 \cdot (1 - 0,335) = 1,71 \text{ кг/м}^3. \quad (3.8)$$

Масса ПВС и паров бензина в ГП резервуара перед началом откачки:

$$m = \rho \cdot V; \quad (3.9)$$

$$m_{\text{ПВС от}} = 1,71 \cdot 0,154 = 0,26 \text{ кг};$$

$$m_{y \text{ от}} = 2,62 \cdot 0,302 \cdot 0,154 = 0,12 \text{ кг}.$$

Масса воздуха, подсасываемого в резервуар при его опорожнении,

$$\Delta m_B = \rho_B \cdot \Delta V_B = 1,25 \cdot 0,70 = 0,87 \text{ кг}. \quad (3.10)$$

Концентрация бензина к концу опорожнения, без учета донасыщения,

$$C_{cp \text{ от}}^{*(0)} \approx \frac{Co_{om} \cdot V_{n0}}{V_{n0} + \Delta V_{\epsilon}} \approx \frac{0,302 \cdot 0,119}{0,119 + 0,07} = 0,190. \quad (3.11)$$

Соответствующая средняя объемная концентрация составляла бы

$$C_{cp \text{ от}}^{(0)} \approx \frac{2 \cdot Co_{om} + C_{cp \text{ от}}^{*(0)}}{3} \approx \frac{2 \cdot 0,302 + 0,190}{3} = 0,264. \quad (3.12)$$

Поскольку в ходе опорожнения происходит донасыщение газового пространства парами бензина, то приближенно принимается $C_{cp \text{ от}} = 0,25$.

При этой концентрации вычисляется:

- молярная масса ПВС

$$M_{\text{пвс от}} = M_y \cdot C_{cp.om} + M_{\epsilon} \cdot (1 - C_{cp.om}), \quad (3.13)$$

$$M_{\text{пвс от}} = 60,9 \cdot 0,25 + 60,9 \cdot (1 - 0,25) = 37 \text{ кг/кмоль};$$

- плотность ПВС по формуле (3.7):

$$\rho_{\text{пвс.от}} = \frac{(101325-100) \cdot 37}{8314 \cdot 283} = 1,59 \text{ кг/м}^3;$$

-Кинематическая вязкость ПВС по формуле:

$$v_{\text{ПВС}} = \frac{10^{-6}}{\frac{1}{0,1 \cdot T - 14,1} + \frac{C_{\text{ср}}}{0,0225 \cdot T - 3,61}}; \quad (3.14)$$

$$v_{\text{ПВС}} = \frac{10^{-6}}{\frac{1}{0,1 \cdot 283 - 14,1} + \frac{0,25}{0,0225 \cdot 283 - 3,61}} = 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

Коэффициент диффузии паров (м²/ч), определяемый по формуле:

$$D_{\text{м}} = a_{\text{м}} + b_{\text{м}} \cdot T = -0,1170 + 0,000503 \cdot 283 = 0,0253 \text{ м}^2/\text{час}, \quad (3.15)$$

где $a_{\text{м}}, b_{\text{м}}$ – эмпирические коэффициенты, в соответствии с [88] для автомобильных бензинов $a_{\text{м}} = -0,1170 \text{ м}^2/\text{ч}$, $b_{\text{м}} = 0,000503 \text{ м}^2/(\text{ч} \cdot \text{град})$.

Число Шмидта по формуле

$$Sc = \frac{v_{\text{пвс}}}{D_{\text{м}}} = \frac{6,2 \cdot 10^{-6} \cdot 3600}{0,0253} = 0,88. \quad (3.16)$$

Модуль движущей силы процесса испарения по формуле

$$\Delta\pi = \frac{C_{\text{с}} - C_{\text{ср}}}{1 - C_{\text{с}}} = \frac{0,335 - 0,25}{1 - 0,335} = 0,129. \quad (3.17)$$

Для резервуаров РВС, $Kt_{\text{пр}}$ определяется по формуле

$$Kt_{\text{пр}} = 2,17 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta\pi^{0,403} \cdot Sc^{0,0932}; \quad (3.18)$$

$$Kt_{\text{пр}} = 2,17 \cdot 10^{-3} \cdot 0,129^{0,403} \cdot 0,88^{0,0932} = 9,39 \cdot 10^{-4}.$$

Производительность откачки по формуле:

$$Q_{\text{от}} = \frac{V_{\text{отк}}}{\tau_{\text{от}}} = \frac{0,07}{0,5} = 0,14 \text{ м}^3/\text{час}. \quad (3.19)$$

Скорость струи воздуха в монтажном патрубке дыхательного клапана, определяется по формуле:

$$U_0 = \frac{Q_{\text{от}}}{3600 \cdot \pi \cdot r_{\text{патр}}^2 \cdot N_{\text{к}}} = \frac{0,14}{3600 \cdot \pi \cdot 0,05^2 \cdot 1} = 0,0049 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (3.20)$$

где $r_{\text{патр}} = 0,05 \text{ м}$ – радиус монтажного патрубка СМДК-50;

$N_k=1$ – количество дыхательных клапанов, установленных на резервуаре.

Средняя высота газового пространства во время откачки в условиях данного процесса

$$H_z = \frac{4V_n}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 0,154}{\pi \cdot 0,56^2} = 0,63 \text{ м}. \quad (3.21)$$

Скорость струи воздуха у поверхности откачиваемой нефти

$$U = \frac{14,4 \cdot U_0}{3,56 + \frac{H_z}{r_{нап}}} = \frac{14,4 \cdot 0,0049}{3,56 + \frac{0,63}{0,05}} = 0,0025 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (3.22)$$

Диаметр круга, эквивалентного площади поверхности нефти, омываемой струей воздуха на входе в резервуар

$$d_s = 0,44 \cdot H_z \cdot \sqrt{N_k} = 0,44 \cdot 0,625 \cdot \sqrt{1} = 0,275 \text{ м}. \quad (3.23)$$

Среднее число Рейнольдса, характеризующее интенсивность омывания поверхности бензина воздухом

$$Re_{cp} = 0,788 \cdot \frac{U \cdot d_s}{v_{пвс\text{ ср}}} \cdot \sqrt{N_k} = 0,788 \cdot \frac{2,49 \cdot 10^{-3} \cdot 0,275}{6,21 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{1} = 87,5. \quad (3.24)$$

Величина Kt критерия при откачке по формуле

$$Kt_{om} = Kt_{np} \cdot (1 + 7,45 \cdot 10^{-3} \cdot Sc^{0,197} \cdot Re_{cp}^{0,569}); \quad (3.25)$$

$$Kt_{om} = 9,39 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 7,45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,88^{0,197} \cdot 87,5^{0,569}) = 1,02 \cdot 10^{-3}.$$

Плотность потока массы испаряющегося бензина по формуле (2.10)

$$J_{om} = 1,02 \cdot 10^{-3} \cdot 1,59 \cdot 0,025 \cdot \sqrt[3]{\frac{9,81 \cdot 60,9}{(6,21 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 37}} = 0,310 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}},$$

Площадь поверхности бензина в вертикальном резервуаре

$$F_n = \frac{\pi D_{вн}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,56^2}{4} = 0,246 \text{ м}^2. \quad (3.26)$$

Масса бензина, испарившегося во время откачки,

$$\Delta m_y = J \cdot F_n \cdot \tau = 0,310 \cdot 0,246 \cdot 0,5 = 0,038 \text{ кг}. \quad (3.27)$$

Массовая и объемная концентрации углеводородов в газовом

пространстве к моменту завершения откачки по формулам:

$$\overline{C}_{om}^* = \frac{m_{yo} + \Delta m_{y.om}}{m_{nec\ 0} + \Delta m_{y.om} + \Delta m_g} = \frac{0,122 + 0,038}{0,263 + 0,038 + 0,087} = 0,411. \quad (3.28)$$

$$C_{om}^* = \overline{C}_{om}^* \cdot \frac{M_{nec}}{M_y} = 0,411 \cdot \frac{37}{60,9} = 0,249. \quad (3.29)$$

Средняя расчётная объёмная концентрация углеводородов в газовом пространстве при откачке

$$C_{cp.om} = \frac{2C_{om} + C_{om}^*}{3} = \frac{2 \cdot 0,25 + 0,249}{3} = 0,250, \quad (3.30)$$

Проверим, каково расхождение ранее принятой и расчётной величин $C_{cp.ot}$:

$$\left| \frac{0,250 - 0,25}{0,25} \right| \cdot 100\% = 0,02\%.$$

Так как расхождение составляет менее 5%, то уточнять $C_{cp.ot}$ нет необходимости.

Объемы закачки и откачки равны, соответственно нет необходимости рассчитывать соотношение фаз и давление насыщенных паров при данном соотношении фаз повторно.

Концентрация насыщенных паров бензина в газовом пространстве при закачке по формуле:

$$C_{s\ зак} = \frac{P_s}{P_r + P_{изб}} = \frac{33972}{101325 + 1000} = 0,33. \quad (3.31)$$

Так как $C_{s.зак} > C_{cp.otк}$, то в процессе простоя резервуара будет происходить донасыщение газового пространства парами бензина.

Примем, что средняя концентрация углеводородов в газовом пространстве в процессе заполнения резервуара равна $C_{s\ зак} = 0,325$.

При этом концентрация вычисляется как для откачки. Молярная масса ПВС по формуле (3.13):

$$M_{nec\ зак} = 60,9 \cdot 0,325 + 29 \cdot (1 - 0,325) = 39,59 \text{ кг/кмоль}$$

Плотность ПВС по формуле (3.7):

$$\rho_{\text{пвс.от}} = \frac{(101325+1000) \cdot 39,59}{8314 \cdot 283} = 1,72 \text{ кг/м}^3.$$

Кинематическая вязкость ПВС по формуле (3.14):

$$\nu_{\text{ПВС}} = \frac{10^{-6}}{\frac{1}{0,1 \cdot 283 - 14,1} + \frac{0,325}{0,0225 \cdot 283 - 3,61}} = 5,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Число Шмидта по формуле (3.16):

$$Sc_{\text{зак}} = \frac{5,31 \cdot 10^{-6} \cdot 3600}{0,0253} = 0,75.$$

Модуль движущей силы процесса испарения (3.17):

$$\Delta\pi = \frac{0,332 - 0,325}{1 - 0,332} = 0,010.$$

Величина Kt – критерия при простое по формуле (3.18):

$$Kt_{\text{np}} = 2,17 \cdot 10^{-3} \cdot 0,010^{0,403} \cdot 0,754^{0,0932} = 3,37 \cdot 10^{-4}.$$

Скорость бензина в приемном патрубке резервуара по формуле:

$$W_{\text{зак}} = \frac{4 \cdot Q_{\text{зак}}}{\pi \cdot d_{\text{пат}}^2} = \frac{4 \cdot 0,14}{\pi \cdot 3600 \cdot 0,02^2} = 0,123 \text{ м/с}. \quad (3.32)$$

Средняя характерная скорость перемешивания бензина в резервуаре по формуле:

$$W_x = \frac{W_{\text{зак}}}{1 + \frac{\pi D_p^2 \cdot H_{\text{взл.сп}}}{4V_{\text{зак}}}} = \frac{0,123}{1 + \frac{\pi \cdot 0,56^2 \cdot 0,223}{4 \cdot 0,14}} = 0,089 \text{ м/с}. \quad (3.33)$$

Величина комплексного параметра $Fr \cdot Re$ по формуле:

$$Fr \cdot Re = \frac{W_x^3}{g \cdot \nu_{\text{пвс}}} = \frac{0,089^3}{9,81 \cdot 5,31 \cdot 10^{-6}} = 13,45. \quad (3.34)$$

Величина критерия $Kt_{\text{зак}}$, для условий заправки бензина в РВС указанная в [88] определяемая по формуле

$$Kt_3 = Kt_{\text{np}} (1 + 1,34 \cdot Sc^{0,087} \cdot \Delta\pi^{-0,655} \cdot (Fr \cdot Re)^{0,087}), \quad (3.35)$$

приводит к завышенным значениям потерь от «больших дыханий»,

практически при любых условиях расчета, итоговая средняя концентрация паров бензина за закачку стремится к значению, соответствующему давлению насыщенных паров, при этом, тем же автором в работе [50] приводится и обосновывается другая формула, которая позволяет получить адекватные значения.

$$Kt_3 = Kt_{np}(1 + 0,524(Fr \cdot Re)^{0,265} \cdot \Delta\pi^{-0,289} \cdot Sc^{0,422}), \quad (3.36)$$

$$Kt_3 = 3,37 \cdot 10^{-4} (1 + 0,524(13,45)^{0,265} \cdot 0,010^{-0,289} \cdot 0,75^{0,422}) = 1,50 \cdot 10^{-3}.$$

В целях обоснования подобия процессов испарения в экспериментальных емкостях реальным резервуарам в таблице 3.1 приведены условия, при которых достигается та же величина критериев подобия на реальных резервуарах.

Таблица 3.1 – Соответствие критериев подобия экспериментальных емкостей и реальных резервуаров

Критерии подобия	Значение в экспериментальных резервуарах	Влияющие величины	Величины в условиях РВС 5000 м ³ (D=22.8м)	Значение в РВС 5000 м ³
<i>Sc</i>	0,88; 0,75	$\nu_{пвс}, D_m$	то же (зависят от свойств бензина)	то же
<i>Re</i>	87,5	формула (3.24)	$Q_{от}=0,18 \text{ м}^3/\text{час};$ $r_{намп} = 0,15 \text{ м};$ $V_{п}=3000 \text{ м}^3; N_k=5$	85,2
<i>Fr · Re</i>	13,45	формула (3.34)	$H_{взл.сп}=7 \text{ м}; Q_{зак}=4,1$ $\text{м}^3/\text{час}; d_{нат}^2=0,5 \text{ м}$	13,9

Как видно из таблицы 3.1, значения критериев подобия в экспериментальных емкостях близки к значению критериев подобия в РВС 5000 м³ в условии работы резервуара в режиме «с подключенным резервуаром» (при малом расходе или подаче). Таким образом процесс испарения в экспериментальных емкостях сопоставим с процессом в реальных резервуарах.

Плотность потока массы бензина, испаряющегося в процессе закачки,

по формуле 2.10:

$$J_{\text{зак}} = 1,50 \cdot 10^{-3} \cdot 1,72 \cdot 0,025 \cdot \sqrt[3]{\frac{9,81 \cdot 60,9}{(5,31 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 39,59}} = 0,53 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}.$$

Масса бензина, испарившегося во время заправки по формуле (3.27):

$$\Delta m_{\text{у.зак}} = 0,53 \cdot 0,246 \cdot 0,5 = 0,066 \text{ кг}.$$

Массы углеводородов и ПВС в газовом пространстве резервуара на момент начала заправки по формуле (3.9):

$$m_{\text{у}_0} = 0,122 + 0,038 = 0,160 \text{ кг};$$

$$m_{\text{ПВС}_0} = 0,160 + 0,141 + 0,087 = 0,389 \text{ кг}.$$

Объем, закачиваемого бензина, и масса, вытесняемой в атмосферу, ПВС:

$$\Delta m_{\text{ПВС}} = 0,7 \cdot 1,72 = 0,12 \text{ кг}.$$

Средняя массовая концентрация углеводородов в газовом пространстве в процессе заполнения резервуара

$$\bar{C}_{\text{ср.зак}} = 0,325 \cdot \frac{60,9}{39,6} = 0,50.$$

Массовая и объемная концентрации углеводородов в газовом пространстве к моменту завершения откачки по формулам:

$$\bar{C}_{\text{зак}} = \frac{m_{\text{у}_0} + \Delta m_{\text{у.зак}} - \Delta m_{\text{пвс}} \cdot \bar{C}_{\text{ср.зак}}}{m_{\text{пвс}_0} + \Delta m_{\text{у.зак}} - \Delta m_{\text{пвс}}} = \frac{0,16 + 0,065 - 0,12 \cdot 0,50}{0,388 + 0,065 - 0,12} = 0,49. \quad (3.37)$$

Соответствующая объемная концентрация паров в газовом пространстве резервуара по формуле:

$$C_{\text{зак}}^* = 0,49 \cdot \frac{39,59}{60,9} = 0,322.$$

Средняя расчётная объемная концентрация углеводородов в газовом пространстве при заправке

$$C_{\text{ср.зак}} = \frac{2C_{\text{зак}} + C_{\text{зак}}^*}{3} = \frac{2 \cdot 0,325 + 0,322}{3} = 0,324. \quad (3.38)$$

Проверим, каково расхождение ранее принятой и расчётной величин $C_{\text{ср.зак}}$

$$\left| \frac{0,324 - 0,325}{0,325} \right| \cdot 100\% = 0,3\%.$$

Так как расхождение составляет менее 5%, то уточнять $C_{\text{ср.зак}}$ нет необходимости.

Расчёт потерь от испарений от «большого дыхания».

Абсолютное давление срабатывания клапанов вакуума и давления

$$P_1 = 101325 - 100 = 101225 \text{ Па};$$

$$P_2 = 101325 + 1000 = 102325 \text{ Па}.$$

Среднее парциальное давление паров бензина в газовом пространстве в процессе закачки

$$P_{\text{у.зак}} = 0,325 \cdot 102325 = 33154 \text{ Па};$$

Плотность паров бензина в процессе закачки по формуле (3.7):

$$\rho_y = \frac{102325 \cdot 60,9}{8314 \cdot 283} = 2,65 \text{ кг/м}^3.$$

Потери нефтепродукта от «большого дыхания» оцениваются по формуле В.И. Черникина:

$$G_{\text{б.д.}} = \left[V_n - V_z \left(\frac{P_2 - P_1}{P_2 - P_{\text{у.зак}}} \right) \right] \frac{P_{\text{у.зак}}}{P_2} \rho_y, \quad (3.39)$$

$$G_{\text{б.д.}} = \left[0,07 - 0,189 \left(\frac{102325 - 101225}{102325 - 33154} \right) \right] \frac{33154}{102325} \cdot 2,65 = 57,49 \cdot 10^{-3}.$$

По результатам расчётов за одно «большое дыхание» потери из вертикальной емкости составляют 57,49 г.

В случае горизонтальных резервуаров для расчета потерь бензинов при закачке за среднюю концентрацию паров бензина в ГП резервуара допустимо принять концентрацию, соответствующую давлению насыщенных паров. Таким образом:

$$P_{\text{у.зак ПГС}} = 0,36 \cdot 102325 = 35848,9 \text{ Па},$$

$$G_{\text{б.д. ПГС}} = \left[0,07 - 0,189 \left(\frac{102325 - 101225}{102325 - 35849} \right) \right] \frac{35849}{102325} \cdot 2,65 = 63,73 \text{ г}.$$

Погрешность результатов расчета по данным методикам составляет 5,6% для вертикальной емкости, и 29,8% для горизонтальной.

Таким образом величины $G_{\bar{o}.d.}$ и $G_{\bar{o}.d.PGC}$ можно записать следующим образом:

$$G_{\bar{o}.d.} = 57,49 \pm 3,21 \text{ г};$$

$$G_{\bar{o}.d.PGC} = 63,73 \pm 18,99 \text{ г}.$$

Итого за перекачку 70 литров бензина АИ-92 при температуре 15°C из одного резервуара в другой и обратно прогнозируемые потери составят

$$G_{\bar{o}.d.} + G_{\bar{o}.d.PGC} = 57,49 \pm 3,21 + 63,73 \pm 18,99 = 121,22 \pm 22,20 \text{ г}.$$

Эксперимент предполагается проводить путем взвешивания экспериментальной установки, наполненной заданным количеством бензина на весах до «больших дыханий» и после, таким образом определится объем потерь от «больших дыханий». Эксперимент проводится дважды, без применения гибкой оболочки, а затем с применением гибкой оболочки. Количество перекаченного бензина контролируется внешним уровнемером при помощи шкалы нанесенной на внешней поверхности вертикальной емкости с использованием рулетки. Характеристика используемых средств измерений приведена в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристика применяемых приборов

Замеряемый параметр	Характеристики используемого прибора				
	Тип	Марка	Диапазон измерения	Цена деления	Чувствительность
Масса	Весы	Гарант ВПН-300К2	0,1-300,0 кг	0,1 кг	100 грамм
Высота налива	Рулетка	Dexell	0,001-5.000м	1,0 мм	2,3мм на 10м (2 класс точности)

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа опытов и условий их проведения, необходимых для решения поставленной задачи с требуемой точностью [100]. Так как предлагаемый эксперимент несет качественный характер, его условия predetermined и не предполагается

установление каких-либо зависимостей и эмпирических коэффициентов, планирование экспериментов в соответствии с [100] неприменимо. Но при этом обеспечение требуемой точности необходимо и возможно. Так, при чувствительности весов 0,1 кг, для обеспечения погрешности измерений в 5% при расчётных потерях за две перекачки 0,125 кг необходимо выполнить перекачку из одного резервуара в другой и обратно 16 раз.

Экспериментальная установка по схеме на Рисунке 3.3 с резервуарами оснащёнными гибкими оболочками сооружена, фотография представлена на Рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Экспериментальная установка

Для измерения массы экспериментальной установки, из под опорной рамы убирались кирпичи. Установка опиралась на весы, после фиксации измерений установка заново выставлялась на кирпичи т.к. инструкцией по эксплуатации весов запрещено длительно оставлять весы под нагрузкой.

Выполнен замер порожней экспериментальной установки: масса опорной рамы – 24,1 кг; масса горизонтального резервуара 24,5 кг; масса вертикального резервуара – 23,3 кг. Выполнено наполнение резервуара 187 литрами бензина АИ-92 плотностью 0,752кг/м³. Предварительно выполнена серия замеров массы экспериментальной установки до начала перекачки и после перекачки 135 литров бензина (101,5кг) из резервуара в резервуар 20 раз (2 т продукта) с применением оболочек.

Общая масса бензина на момент начала эксперимента составляла 157,1 кг. Для обеспечения заданной точности перекачка 70 литров бензина выполнялась 20 раз из верхней бочки в нижнюю и обратно. Результаты измерений представлены в Таблице 3.2.

Шкала и уровнемер представлены на Рисунке 3.5.

Выполнена обработка измерений в соответствии с [101]. Грубые промахи в измерениях в Таблице 3.3 отсутствуют.

Оценка среднеквадратического отклонения (СКО) отдельных результатов измерений при $n < 20$ определяется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}. \quad (3.40)$$

Оценка СКО до начала перекачки

$$\sigma = \sqrt{\frac{5 \cdot 0,000156 + 2 \cdot 0,007656 + 0,012656}{(8-1)}} = 0,064 \text{ кг.}$$

Оценка СКО отдельных результатов измерений после перекачки

$$\sigma_{II} \sqrt{\frac{2 \cdot 0,01}{(8-1)}} = 0,053 \text{ кг.}$$



Рисунок 3.5 – Уровень налива в вертикальном резервуаре

Таблица 3.3 – Результаты экспериментальных измерений без применения гибкой оболочки

№	Время и дата измерений	Масса экспериментальной установки, кг	Среднее арифметическое значение, кг	Отклонения результатов, кг	Квадратичное отклонение, кг ²
Измерения до начала перекачки					
1	01.05.2021 10.01	158,1	158,11	-0,0125	0,000156
2	01.05.2021 10.03	158,1		-0,0125	0,000156
3	01.05.2021 10.05	158,2		0,0875	0,007656
4	01.05.2021 10.06	158,1		-0,0125	0,000156
5	01. 05.2021 10.07	158,2		0,0875	0,007656
6	01. 05.2021 10.08	158,0		-0,1125	0,012656
7	01. 05.2021 10.09	158,1		-0,0125	0,000156
8	01. 05.2021 10.10	158,1		-0,0125	0,000156
Измерения после перекачки					
9	01. 05.2021 17.34	155,2	155,2	0	0
10	01. 05.2021 17.35	155,2		0	0
11	01. 05.2021 17.36	155,2		0	0
12	01. 05.2021 17.37	155,2		0	0
13	01. 05.2021 17.38	155,3		0,1	0,01
14	01. 05.2021 17.39	155,2		0	0
15	01. 05.2021 17.40	155,1		-0,1	0,01
16	01. 05.2021 17.42	155,2		0	0

СКО окончательного результата измерения вычисляется по формуле:

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \quad (3.41)$$

$$S = \frac{0,064}{\sqrt{8}} = 0,023 \text{ кг};$$

$$S_{II} = \frac{0,053}{\sqrt{8}} = 0,019 \text{ кг}.$$

Доверительные границы случайной погрешности СКО результата измерения вычисляются по формуле:

$$\xi = t_p \cdot S, \quad (3.42)$$

где t_p – коэффициент Стьюдента, при доверительной вероятности измерений 0,95 и числе измерений 8 $t_p = 2,365$.

$$\xi = 2,365 \cdot 0,044 = 0,104;$$

$$\xi_{II} = 2,365 \cdot 0,040 = 0,094.$$

Границы суммарной неисключенной систематической погрешности (НСП), при менее трёх НСП определяют по формуле:

$$\theta = \pm \sum_{i=1}^m |\theta_i|, \quad (3.43)$$

где θ_i – граница i -ой неисключенной составляющей систематической погрешности, НСП принята равной 0,1 кг – погрешность средства измерения.

$$\theta = \pm 0,1 \text{ кг}.$$

Отношение НСП к случайной погрешности

$$\frac{\theta}{S} = \frac{0,1}{0,023} = 4,35 > 0,8;$$

$$\frac{\theta}{S_{II}} = \frac{0,1}{0,019} = 5,26 > 0,8.$$

Случайной погрешностью в обоих случаях можно пренебречь и принять границы погрешности $\Delta = \pm \theta$. Результаты измерений определенные в результате обработки можно записать как

$$m = 157,1 \pm 0,1 \text{ кг};$$

$$m_{II}=155,2\pm0,1 \text{ кг.}$$

Отклонения результатов испытаний в условиях сходимости определяются по формуле:

$$\sigma_{cx} = \sqrt{|(x_{\min} - \bar{x})(x_{\max} - \bar{x})|}; \quad (3.44)$$

$$\sigma_{cx} = \sqrt{|(157,0 - 157,11)(157,2 - 157,11)|} = 0,10 \text{ кг};$$

$$\sigma_{cxII} = \sqrt{|(156,1 - 156,2)(156,3 - 156,2)|} = 0,10 \text{ кг.}$$

Сходимость результатов измерений при доверительной вероятности $P=0,95$ определяется по формуле:

$$r=2,77 \cdot \sigma_{cx}. \quad (3.45)$$

$$r=2,77 \cdot 0,10=0,277 \text{ кг};$$

$$r_{II}=2,77 \cdot 0,10=0,277 \text{ кг.}$$

Отношение сходимости к результатам измерения в процентах по формуле:

$$r_{\text{отн}} = \frac{r}{x} \cdot 100\%; \quad (3.46)$$

$$r_{\text{отн}} = \frac{0,227}{157,11} \cdot 100\% = 0,14\%;$$

$$r_{\text{отнII}} = \frac{0,227}{156,2} \cdot 100\% = 0,15\%.$$

Относительная погрешность измерений определяется по формуле:

$$\delta_x = \frac{t_p S}{x \sqrt{n}} \cdot 100\%. \quad (3.47)$$

$$\delta_x = \frac{2,365 \cdot 0,023}{157,1 \sqrt{8}} \cdot 100\% = 0,012\%;$$

$$\delta_{xII} = \frac{2,365 \cdot 0,019}{156,20 \sqrt{8}} \cdot 100\% = 0,010\%.$$

Разность результатов измерений до и после составляет:

$$20(G_{\text{б.д.}} + G_{\text{б.д.РГС}})_{\text{эксн}} = 2,9 \pm 0,2 \text{ кг}; \quad (3.48)$$

$$20(G_{\text{б.д.}} + G_{\text{б.д.РГС}})_{\text{эксн}} \in [2,7 : 3,1] \text{ кг.} \quad (3.49)$$

При этом:

$$20(G_{\text{б.д.}} + G_{\text{б.д.РГС}})_{\text{расч}} = 2,424 \pm 0,444 \text{ кг}; \quad (3.50)$$

$$20(G_{\text{б.д.}} + G_{\text{б.д.РГС}})_{\text{расч}} \in [1,980 : 2,868] \text{ кг}. \quad (3.51)$$

Сопоставляя области значений (3.49) и (3.51) можно сделать вывод, что результаты, полученные на экспериментальной установке, пересекаются в пределах погрешности значений полученных по расчетным методикам

$$20(G_{\text{б.д.}} + G_{\text{б.д.РГС}})_{\text{действ}} \in [2,7 : 2,868] \text{ кг}. \quad (3.52)$$

Данные полученные экспериментальным путем соответствуют расчетным, что дает возможность выполнить опыты с другими условиями с требуемой точность.

В Таблице 3.4 приведены результаты испытаний, проводимых при проверке экспериментальной установки с гибкой оболочкой [98].

Таблица 3.4 – Результаты экспериментальных измерений с применением оболочек

№	Время и дата измерений	Масса экспериментальной установки, кг	Среднее арифметическое значение, кг	Отклонения результатов, кг	Квадратичное отклонение, кг ²
Измерения до начала перекачки					
1	18.09.2021 10.12	212,5	212,51	-0,0125	0,000156
2	18.09.2021 10.15	212,6		0,0875	0,007656
3	18.09.2021 10.18	212,3		-0,2125	0,045156
4	18.09.2021 10.21	212,6		0,0875	0,007656
5	18.09.2021 10.24	212,4		-0,1125	0,012656
6	18.09.2021 10.27	212,5		-0,0125	0,000156
7	18.09.2021 10.30	212,7		0,1875	0,035156
8	18.09.2021 10.33	212,5		-0,0125	0,000156
Измерения после перекачки					
9	18.09.2021 22.08	212,5	212,50	0,0125	0,000156
10	18.09.2021 22.11	212,4		-0,0875	0,007656
11	18.09.2021 22.13	212,5		0,0125	0,000156
12	18.09.2021 22.16	212,4		-0,0875	0,007656
13	18.09.2021 22.18	212,6		0,1125	0,012656
14	18.09.2021 22.21	212,3		-0,1875	0,035156
15	18.09.2021 22.24	212,6		0,1125	0,012656
16	18.09.2021 22.28	212,6		0,1125	0,012656

Для удобства фиксации замеров и массы, выполнялась перекачка 135

литров бензина 20 раз, что соответствует 101 кг при плотности 0,752 кг/л за 1 перекачку и 2,02 тонны соответственно при 20 перекачках. Обработка результатов измерений представлена далее.

Оценка СКО отдельных результатов измерений до перекачки по формуле (3.40)

$$\sigma = \sqrt{\frac{3 \cdot 0,000156 + 2 \cdot 0,007656 + 0,045156 + 0,012656 + 0,035156}{(8-1)}} = 0,124 \text{ кг.}$$

Оценка СКО отдельных результатов измерений после перекачки

$$\sigma_{II} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,000156 + 2 \cdot 0,007656 + 3 \cdot 0,012656 + 0,035156}{(8-1)}} = 0,113 \text{ кг.}$$

СКО окончательного результата измерения по формуле (3.41):

$$S = \frac{0,124}{\sqrt{8}} = 0,044 \text{ кг;}$$

$$S_{II} = \frac{0,113}{\sqrt{8}} = 0,040 \text{ кг.}$$

Доверительные границы случайной погрешности СКО результата измерения по формуле (3.42):

$$\xi = 2,365 \cdot 0,044 = 0,104;$$

$$\xi_{II} = 2,365 \cdot 0,040 = 0,094.$$

Границы суммарной НСП:

$$\theta = \pm 0,1 \text{ кг.}$$

Отношение НСП к случайной погрешности

$$\frac{\theta}{S} = \frac{0,1}{0,044} = 2,27 > 0,8;$$

$$\frac{\theta}{S_{II}} = \frac{0,1}{0,040} = 2,51 > 0,8.$$

т.е. случайной погрешностью в обоих случаях можно пренебречь и принять границы погрешности $\Delta = \pm \theta$. Результаты измерений определенные в результате обработки можно записать как

$$m = 212,5 \pm 0,1 \text{ кг;}$$

$$m_{II}=212,5\pm 0,1 \text{ кг.}$$

Отклонения результатов испытаний в условиях сходимости определяются по формуле (3.44)

$$\sigma_{cx} = \sqrt{|(212,3 - 212,51)(212,7 - 212,51)|} = 0,20 \text{ кг};$$

$$\sigma_{cxII} = \sqrt{|(212,3 - 212,50)(212,6 - 212,50)|} = 0,14 \text{ кг.}$$

Сходимость результатов измерений при доверительной вероятности $P=0,95$ определяется по формуле (3.45)

$$r=2,77 \cdot 0,20=0,554 \text{ кг};$$

$$r_{II}=2,77 \cdot 0,14=0,388 \text{ кг.}$$

Отношение сходимости к результатам измерения в процентах по формуле (3.46)

$$r_{отн} = \frac{0,554}{212,51} \cdot 100\% = 0,26\%;$$

$$r_{отнII} = \frac{0,388}{212,50} \cdot 100\% = 0,18\%.$$

Относительная погрешность измерений определяется по формуле (3.47)

$$\delta_x = \frac{2,365 \cdot 0,044}{212,51\sqrt{8}} \cdot 100\% = 0,02\%;$$

$$\delta_{xII} = \frac{2,365 \cdot 0,040}{212,50\sqrt{8}} \cdot 100\% = 0,02\%.$$

Величины отношений сходимостей к результатам измерений и относительной погрешности измерений менее 1%, что означает высокую точность и сходимость измерений.

Данные таблицы 3.3 были получены в ходе первичных испытаний и имеют удовлетворительное качество.

Измеренные значения массы до и после эксперимента находятся в пределах погрешности измерений ($m=m_{II}=212,5\pm 0,1$ кг). Таким образом при применении гибких оболочек в резервуарах различной формы достигается сокращение потерь от испарений бензина до 100%.

Выводы по 3 главе:

1. Разработана конструкция резервуара с гибкой оболочкой для сокращения потерь от испарений из резервуаров любой формы и объема.
2. По результатам экспериментов и моделирования на сооруженной экспериментальной установке получено соответствие фактических и расчетных потерь от «больших дыханий» при отсутствии средств сокращения потерь.
3. При экспериментах с гибкими оболочками, обосновано предотвращение потерь бензина на экспериментальной установке, что позволяет распространить данные результаты на реальные резервуары.

4 ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МОНТАЖА, ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИБКИХ ОБОЛОЧЕК В РЕЗЕРВУАРАХ

Учитывая положительные результаты испытаний на экспериментальной установке, предлагается применять гибкую оболочку в реальных резервуарах. Учитывая, что реальные резервуары крупнее экспериментальных в 25-250 000 раз требуется разработка и обоснование технологий монтажа, эксплуатации и методов расчета гибкой оболочки для реальных резервуаров.

4.1 Технология монтажа и введения в эксплуатацию гибкой оболочки

Введение гибкой оболочки в резервуар может происходить через люк-лаз расположенный на верхней образующей резервуара типа РГС или крыше РВС. Перед монтажом следует заменить треугольные диафрагмы, изображенные внутри резервуара РГС на Рисунке 4.1, установленные внутри резервуара в местах расположения опорных ложементов, на сплошные кольца таврового сечения, что допускается стандартом на изготовление резервуара типа РГС. При этом необходимо предусмотреть возможность слива остатков хранимого продукта из придонных секций резервуара [102]. Приемо-раздаточные патрубки, выполненные из прямых труб, заменить на патрубки, вальцованные по внутреннему радиусу резервуара. Трубку для замера уровня сместить к торцу резервуара. Так же следует создать дополнительное отверстие на верхней образующей резервуара для крепления дыхательного патрубка гибкой оболочки. При этом сама оболочка крепится к резервуару только за дыхательный патрубок и плавает на поверхности нефтепродукта.

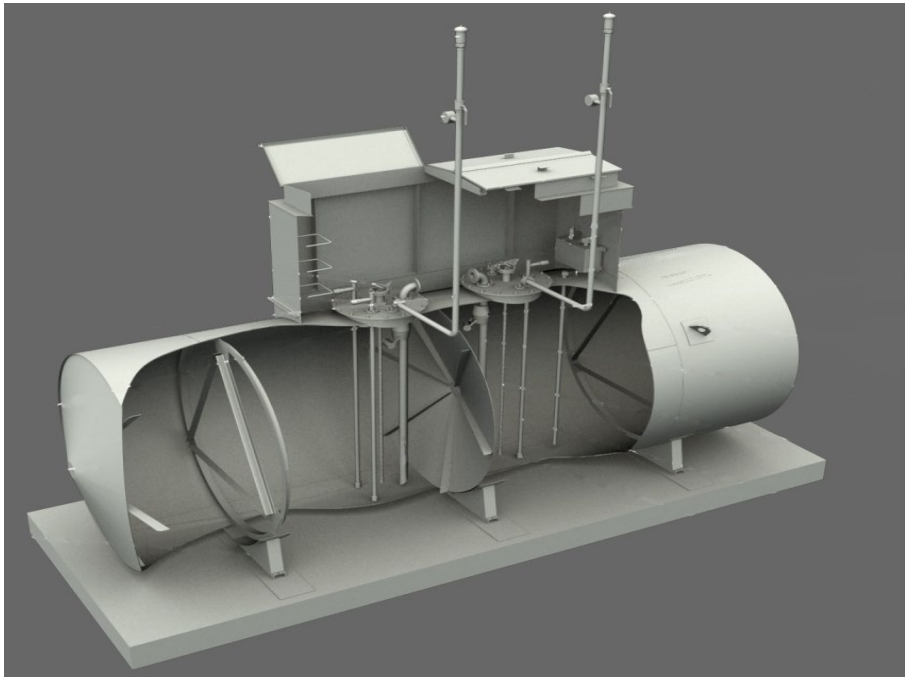


Рисунок 4.1 – Резервуар типа РГС в разрезе

Для РВС требуется лишь сместить положение направляющей трубы уровнемера максимально близко к стенке резервуара.

Монтаж и пуск в эксплуатацию гибкой оболочки производится в следующем порядке:

1. Резервуар выводится из эксплуатации и зачищается от остатков нефтепродукта;
2. Выполняются подготовительные работы:
 - 1) Кольцевые диафрагмы (при наличии) заменяются на сплошные кольца таврового сечения;
 - 2) Для упрощения сбора остатков нефтепродукта и газовой смеси, может предусматриваться уклон резервуара от края в котором планируется соединение дыхательного патрубка к другому краю резервуара, в котором расположены приемо-раздаточные патрубки;
 - 3) Создается отверстие для дыхательного патрубка гибкой оболочки;
 - 4) Внутренние поверхности резервуара обрабатываются шлифовальным инструментом для исключения появления порезов и надрывов на гибкой оболочке в процессе эксплуатации;

5) Стационарная лестница (при наличии) демонтируется. Для доступа в резервуар в последующем используются приставные лестницы;

3. Выполняется монтаж гибкой оболочки. Готовая гибкая оболочка, с прикрепленным к ней дыхательным клапаном, протаскивается в резервуар через люк-лаз и крепится к подготовленному для неё отверстию. При этом следует контролировать ориентацию гибкой оболочки в пространстве, чтобы исключить её скручивание;

4. Пуск в эксплуатацию производится в следующем порядке:

1) Компрессором накачивается воздух в гибкую оболочку для расправления её формы и контроля герметичности. При этом следует оставить открытым люк-лаз;

2) Производится контроль герметичности. В гибкой оболочке фиксируется избыточное давление, если в течении времени оно не уменьшается, результаты испытания считаются успешными. Давление не сбрасывается до окончания процедуры ввода в эксплуатацию;

3) Резервуар герметизируется, люк-лаз герметично закрывается, производится подключение трубопроводов резервуара к технологическим трубопроводам;

4) После подключения резервуара к технологической обвязке производится сброс давления из гибкой оболочки;

5) Резервуар наполняется продуктом и начинается эксплуатация.

При проведении ремонтных и диагностических работ, для обеспечения доступа в резервуар и к внутренней поверхности стенки резервуара, предлагается откачивать воздух из оболочки через монтажный патрубок дыхательного клапана. При этом необходимо предварительно открыть люк-лаз, для предотвращения образования вакуума. После откачки воздуха из оболочки, она примет вид сжатого мешка. Тем самым будет обеспечен доступ в резервуар и к внутренней поверхности стенки.

4.2 Расчёт образовавшегося конденсата

В работе [103] была разработана методика определения количества накопленного конденсата в полости гибкой оболочки.

Масса сконденсированной влаги из воздуха в определенном объеме пространства в результате падения температуры будет определяться формулой

$$m_{\text{вод}} = V_{\text{возд}} \cdot (\rho_{t_1} - \rho_{t_2}), \quad (4.1)$$

где $V_{\text{возд}}$ – объем паровоздушного пространства, охлаждаемого в рассматриваемом процессе, м³;

ρ_{t_1} – влагоемкость воздуха при температуре t_1 , кг/м³;

ρ_{t_2} – влагоемкость воздуха при температуре t_2 , кг/м³.

За температуру t_1 при расчете массы сконденсированной влаги следует принимать не начальную температуру воздуха, а температуру точки росы при достижении паровоздушной смесью 100% относительной влажности воздуха, за температуру t_2 предлагается принимать температуру в полости расчетного резервуара (принимается допущение: температура во всем объеме резервуара постоянна и не изменяется в процессе поступления нагретого воздуха).

Для оценки общей массы сконденсированной воды за промежутки времени необходимо последовательно сложить значения, полученные по формуле (4.1), исходя из объемов откачки продукта из резервуара и метеорологических параметров, для каждой откачки в отдельности по формуле

$$m_{\text{вод}\Sigma} = \sum_{i=1}^n m_{\text{вод}(i)}, \quad (4.2)$$

где $m_{\text{вод}(i)}$ – значение массы сконденсированной воды по формуле (4.2) рассчитанное для i -ой операции откачки в объеме и при условиях проведения операции, кг;

n – количество откачек из резервуара проведенных за расчетный период.

Пример расчета. При поступлении $V_{\text{возд}}=50 \text{ м}^3$ паровоздушной смеси в полость гибкой оболочки при 60% влажности воздуха при 29°C и охлаждении её до $t_2=5^\circ\text{C}$ для $n=30$ одинаковых циклов. При температуре воздуха 29°C и относительной влажности воздуха 60%, температура точки росы будет равна $t_1=20,4^\circ\text{C}$. Влагоемкость воздуха $\rho_{t_1}=0,0173 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{t_2}=0,0068 \text{ кг/м}^3$.

Масса сконденсированной влаги из воздуха за один цикл составит

$$m_{\text{вод}} = 50 \cdot (0,0173 - 0,0068) = 0,525 \text{ кг.}$$

Для 30 циклов откачки, произведенных при данных условиях, общая масса сконденсированной воды по формуле (4.2) составит

$$m_{\text{вод}} \Sigma = 30 \cdot 0,525 = 15,75 \text{ кг.}$$

Объем накопленной воды за 30 циклов составит $0,015 \text{ м}^3$ (при плотности воды 1000 кг/м^3), что составляет 0,03% от объема одной операции. Таким образом, при использовании гибкой оболочки достигается дополнительный эффект от снижения количества подтоварной воды в нефтепродукте.

4.3 Краткий обзор материалов для гибких оболочек

Для оболочек могут применяться гибкие материалы резинотканевые, полимерные, комбинированные. Оценить долговечность гибких оболочек, которые в настоящее время не производятся и не применяются предлагается по конструктивно похожими на гибкую оболочку эластичным резервуарам полевых складов нефти.

Опыт эксплуатации эластичных резервуаров показывает, что применение резинотканевых материалов в течении долгого времени

ненадежно, оболочка растрескивается и теряет герметичность после нескольких циклов наполнения [45], к тому же резино-технические изделия имеют довольно высокую проницаемость по отношению к нефтепродуктам. Производство эластичных резиноканевых резервуаров на территории России существовало на заводе «Ярославрезинотехника» г. Ярославль до 1993 г. Так как конструкция резервуаров на основе прорезиненной ткани морально устарела и имела множество недостатков (высокая проницаемость нефтепродуктами, ухудшение качества нефтепродуктов в результате вымывания нефтепродуктами составляющих из материала оболочки, ограниченная область применения (до -30°C), малый срок службы, высокая пожароопасность, высокая материалоемкость и масса), сотрудниками 25-го ГосНИИ Химмотологии была разработана линейка эластичных резервуаров типа ЭР нового поколения [104].

Эластичные резервуары типа ЭР представляют из себя оболочку, состоящую из следующих слоев различных видов полимеров [105]:

1. Топливостойкий слой (пленка полимерная многослойная ТУ 2245-001-52186250-2005)
2. Светозащитный слой (электропроводной антистатической саженаполненной полиэтиленовой пленки ГОСТ 10354-82)
3. Силовой слой (ткань полипропиленовая ТУ 8237-012-58584000-2005).

По данным испытаний [106] ресурс эксплуатации эластичного резервуара ЭР-50 в составе полевого склада горючего составляет 7,7 лет, что недостаточно для применения в резервуарах типа РВС и РГС. В дальнейшем исследовании [107], для применения в технических средствах новых поколений, рекомендуется применение ТПУ с рецептурной модификацией, которая позволяет увеличить срок эксплуатации эластичного резервуара до 10 лет и расширить температурный диапазон применения до -60°C . Следует отметить, что оценка срока службы в [108] проводилась по критерию достижения 30% увеличения коэффициента проницаемости оболочки

автомобильным бензином «Регуляр-92». Также, наряду с модифицированным ТПУ обосновано применение многослойной пленки «Полифуд» ТУ 2245-378-05761910-2005, производства ОАО «Пластик» состоящей из пленки полиэтилена низкой плотности толщиной 80мкм и пленки полиамида толщиной 40 мкм [108]. Учитывая, что гибкая оболочка внутри резервуара не нагружается гидростатическим давлением нефти/нефтепродукта, в отличии от эластичного резервуара, срок службы гибкой оболочки из данного материала по указанному выше критерию составит не менее срока службы эластичного резервуара.

В последующем из анализа проницаемости прорезиненной ткани МР 1015, пленки Полифуд и ТПУ на основе простого и сложного полиэфиров выявлено, что наибольшую проницаемость всеми типами нефтепродуктов имеет прорезиненная ткань МР 1015, по сравнению с прорезиненной тканью ТПУ имеет проницаемость 3,2-27,9 раз меньше в зависимости от нефтепродукта, а пленка Полифуд в 231,0-554,5 раз менее проницаема чем ткань МР1015 [82].

Применение пленки Полифуд наиболее эффективно, так как наименьшую проницаемость имеет пленка из полиамида, являющаяся одним из её слоев. При этом следует учесть, что применение пленки полиамида в отдельности ограничивается из-за снижения её механических свойств в результате сорбции водяного пара. Также выявлено, что не менее эффективным является применение пленки из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и комбинации ПЭТФ/полиэтилен высокого давления (ПЭВД) [109]. Учитывая, что вторичная переработка ПЭТФ является актуальной задачей, применение комбинации ПЭТФ/ПЭВД выглядит перспективным.

В качестве ещё одного направления повышения эффективности применения эластичных материалов для хранения нефтепродуктов предложено фторирование поверхности пленки ПВД 10204-003 смесью гелия и фтора в соотношении 90/10, что позволяет снизить проницаемость в ряду

ДТ-ТС1-АИ95-А80 в 100,150,300,400 раз соответственно по сравнению с базовой пленкой [110].

В диссертации [111] разработана методика оценки истирания полимерных материалов для средств хранения и транспортирования нефтепродуктов. Показано сравнение истираемости ТПУ, ПВХ и нитрильной резины на основе авторской методики. На основе проведенных испытаний и расчетов, автором [111] рекомендовано применение ТПУ 3290, так как уменьшение массы при истирании данного материала минимально, особенно при сравнении с резиной А-81.

Таким образом, для гибких оболочек рекомендуется применение пленок ТПУ, Полифуд, многослойных пленок ПЭТФ/ПЭВД, со сроком эксплуатации от 7,7 до 10 лет. При этом необходимо также применения антистатического слоя, аналогичного тому, что применяются в эластичных резервуарах.

4.4 Оценка объема оболочки в горизонтальном резервуаре

Для оценки пространства, занимаемого гибкой оболочкой в резервуаре, произведем расчёт емкости и массы оболочки из различных материалов с различной толщиной оболочки. Расчёты произведены для пленки полиэтиленовой марки плотностью $0,95 \text{ кг/м}^3$ толщиной 500 мкр сложенной в 8 слоев, для полиэфирной ткани баллистического плетения покрытой с двух сторон полиуретаном плотностью $1,2 \text{ кг/м}^3$, толщиной 7 мм.

Объем оболочки в надутом состоянии практически равен объему резервуара. При этом площадь поверхности оболочки равна площади внутренней поверхности резервуара

$$S_{об} = \pi D_p L_p + \frac{\pi D_p^2}{2}, \quad (4.3)$$

где D_p и L_p – диаметр и полная длина резервуара, определяемые по требованиям заказчика или техническим условиям завода изготовителя, м.

Объем занимаемый оболочкой в спущенном состоянии будет являться непосредственно тем объемом на который уменьшается емкость резервуара. Объем гибкой оболочки

$$V_{об} = S_{об} \cdot \delta_{об} , \quad (4.4)$$

где $\delta_{об}$ – толщина гибкой оболочки.

Для резервуара РГС 3м³

$$S_{об} = \pi \cdot 1,4 \cdot 2,06 + \frac{\pi \cdot 2,06^2}{2} = 12,14 \text{ м}^2 ,$$

$$V_{об} = 12,14 \cdot 0,004 = 0,05 \text{ м}^3 .$$

Результаты расчёта для других объемов резервуаров приведены в Таблице 4.1. По полученным результатам гибкие оболочки занимают менее 1% емкости резервуаров, с учётом требований [102] заполнение резервуаров допускается до 95% их емкости, следовательно, уменьшения полезной емкости резервуара с внедрением гибкой оболочки не последует.

Таблица 4.1 – Масса и объем гибких оболочек для горизонтальных резервуаров

РГС	$S_{ак}, \text{ м}^2$	Объем оболочки, м^3	масса, кг	Объем оболочки, м^3	масса, кг
		Резино-тканевая оболочка толщиной оболочки 3,5 мм		Полиэтиленовая оболочка толщиной 1,2 мм	
3	12,14	0,042	51,0	0,015	11,4
5	17,01	0,060	71,4	0,020	15,9
10	27,54	0,096	115,7	0,033	25,8
15	37,30	0,131	156,7	0,045	34,9
20	45,24	0,158	190,0	0,054	42,3
25	56,55	0,198	237,5	0,068	52,9
30	64,09	0,224	269,2	0,077	60,0
40	79,17	0,277	332,5	0,095	74,1
50	94,12	0,329	395,3	0,113	88,1
60	102,92	0,360	432,3	0,124	96,3
75	120,64	0,422	506,7	0,145	112,9
100	148,91	0,521	625,4	0,179	139,4

4.5 Расчет гибкости оболочки

В работе [112] была исследована гибкость оболочки. В процессе заполнения/опорожнения резервуара оболочка будет сминаться/расправляться соответственно, при смятии оболочки возможно образования чрезмерных загибов на подвижных частях подверженных изгибу, что в последующем приведет к сокращению срока службы оболочки.

Для расчета гибкости стержня известна формула Эйлера[113]

$$\lambda_{\text{сб}} = \frac{\mu_{\text{пр}} \cdot l}{i_{\text{min}}}, \quad (4.5)$$

где $\mu_{\text{пр}}$ -коэффициент приведения длины, в зависимости от условий закрепления;

l —длина стержня, м;

i_{min} — минимальный радиус инерции сечения, м.

Гибкость стержня — безразмерная величина, характеризующая отношение приведенной длины к наименьшему радиусу инерции поперечного сечения.

Радиус инерции — геометрическая характеристика сечения, связывающая момент инерции с площадью. Отражает отношение жесткости на изгиб и на сжатие.

Радиус инерции сечения определяется по формуле

$$i_{\text{min}} = \sqrt{\frac{I_{\text{min}}}{S_i}}, \quad (4.6)$$

где I_{min} — минимальный геометрический момент инерции сечения, м⁴;

S_i — площадь поперечного сечения элемента, м².

Для расчета допустим, что оболочка имеет форму полого цилиндра. Таким образом, при расчете гибкости за стержень принимается полый цилиндр, путем применения величин минимального геометрического

момента инерции сечения ($I_{\min}$) и площади поперечного сечения элемента (A) для полого цилиндра.

Условием предотвращения образования чрезмерных загибов будет являться работа материала оболочки в пределах упругих деформаций. Таким образом, гибкость, рассчитанная по формуле (4.5), должна быть более критического значения гибкости, рассчитанного по формуле [113]

$$\lambda_{кр} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{нц}}}, \quad (4.7)$$

где E – модуль Юнга, Па;

$\sigma_{нц}$ – предел пропорциональности материала оболочки, Па.

Расчет гибкости для различных маслбензостойких полимерных материалов представлен в Таблице 4.2. Учитывая, что механические свойства полимерных материалов задаются в широком диапазоне свойств при изготовлении и изменяются в зависимости от температуры, расчет ведется по наиболее неблагоприятному сочетанию свойств. Так как для полимеров отсутствуют данные о пределе пропорциональности, за предел пропорциональности принимается предел прочности уменьшенный в 2 раза.

Таблица 4.2 – Механические характеристики полимеров [114]

Материал	Модуль упругости, МПа		Предел прочности, МПа		$\frac{\sigma_{вр,ми}}{2}$, МПа	Гибкость критическая $\lambda_{кр}$	$\lambda_{зб}$ полой цилиндрической оболочки ($\mu_{пр}=1$) $l=10$ м, $R=7,5$
	$E_{\min}$	$E_{\max}$	$\sigma_{вр,ми}$	$\sigma_{вр,ма}$			
Нитриловая резина	4	7	9,8	12	3,8	4,9	$\lambda_{зб}=1,3333$ (при $\delta=1$ мм)
Фторкаучук СКФ-26	4	7	17,6	20,6	18,0	8,8	
Фторопласт Ф-246	80	490	30	47	26,1	15	$\lambda_{зб}=1,3318$ (при $\delta=35$ мм)
Термополиуретан	28	414	12	70	2,8	6	

Для полой цилиндрической оболочки высотой 10 м, радиусом 7,5 м,

при шарнирно закрепленных торцах ($\mu_{пр}=1$) при изменении толщины оболочки от 1 до 35 мм. гибкость уменьшится с 1,3333 до 1,3318. Т.е. толщина оболочки влияет на гибкость незначительно. При этом по данным в табл. 1 видно, что критическая гибкость материалов намного выше гибкости цилиндрической оболочки, это означает, что при сжатии оболочка будет испытывать пластические деформации. В данном случае формула Эйлера считается непригодной для расчета и рекомендуется руководствоваться эмпирической формулой Ф.С. Ясинского [113]

$$\sigma_{кр} = a - b \cdot \lambda_{сб} + c \cdot \lambda_{сб}^2, \quad (4.8)$$

где a, b и c – опытные коэффициенты, величина которых различна для разных материалов, МПа.

К сожалению, опытные коэффициенты для материалов, указанных в таблице 4.2 не приводятся в литературе. В связи с этим применить данную методику для расчета гибкости оболочки не представляется возможным.

Мягкими называют оболочки с весьма малой изгибной жесткостью, не воспринимающие заметных изгибающих моментов и сжимающих усилий [115]. Предлагается оценить жесткость оболочки из положения, что оболочка будет терять первоначальную форму (устойчивость) при заполнении резервуара в результате вытеснения воздуха из оболочки. Для расчета тонких оболочек при больших прогибах известна система дифференциальных уравнений Теодора фон Кармана, являющаяся системой из доработанного уравнения Софи Жермен и уравнения для определения усилий в срединной плоскости [116]

$$\begin{cases} \nabla^2 \nabla^2 F + E\delta \left[\frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] = 0 \\ D \nabla^2 \nabla^2 w - \frac{1}{R} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = q \end{cases} \quad (4.9)$$

где δ – толщина оболочки, м;

R – радиус оболочки, м;

$$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)} - \text{цилиндрическая жесткость} \quad (4.10)$$

μ - коэффициент Пуассона;

ω – функция прогиба пластины;

q – интенсивность внешней суммарной нагрузки, действующей на верхней и нижней поверхности оболочки, Н·м;

F – функция усилий (функция Эри). Она позволяет записать продольное усилие ($T_{1,0}$), кольцевое усилие ($T_{2,0}$) и сдвигающее усилие (S_0) в виде уравнений

$$T_1 = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}, \quad (4.11)$$

$$T_2 = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}, \quad (4.12)$$

$$S = \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}. \quad (4.13)$$

Изгиб при эксплуатации будет испытывать цилиндрическая часть оболочки. При заполнении резервуара цилиндрическая часть будет загибаться вовнутрь и перемещаться в положение над патрубком для удаления конденсата, далее оболочка будет сминаться и погружаться в нефть/нефтепродукт. Так как рассматривается цилиндрическая часть оболочки, принимается допущение, что оболочка является полым цилиндром и испытывает сжатие по схеме на Рисунке 4.2. Так как оболочка соединяется с атмосферой дыхательным патрубком, внутреннее давление принимается атмосферным. Прилегание оболочки к резервуару будет компенсироваться обратной реакцией от стенки резервуара.

Согласно схемы $T_{1,0} = -T_0$, $T_{2,0} = 0$, $S_0 = 0$, с учетом этого система (4.9) будет иметь вид

$$\begin{cases} \frac{d^4 F}{dx^4} + \frac{Eh}{R} \frac{d^2 w}{dx^2} = 0 \\ D \frac{d^4 w}{dx^4} - \frac{1}{R} \frac{d^2 F}{dx^2} + T_0 \frac{d^2 w}{dx^2} = 0 \end{cases} \quad (4.14)$$

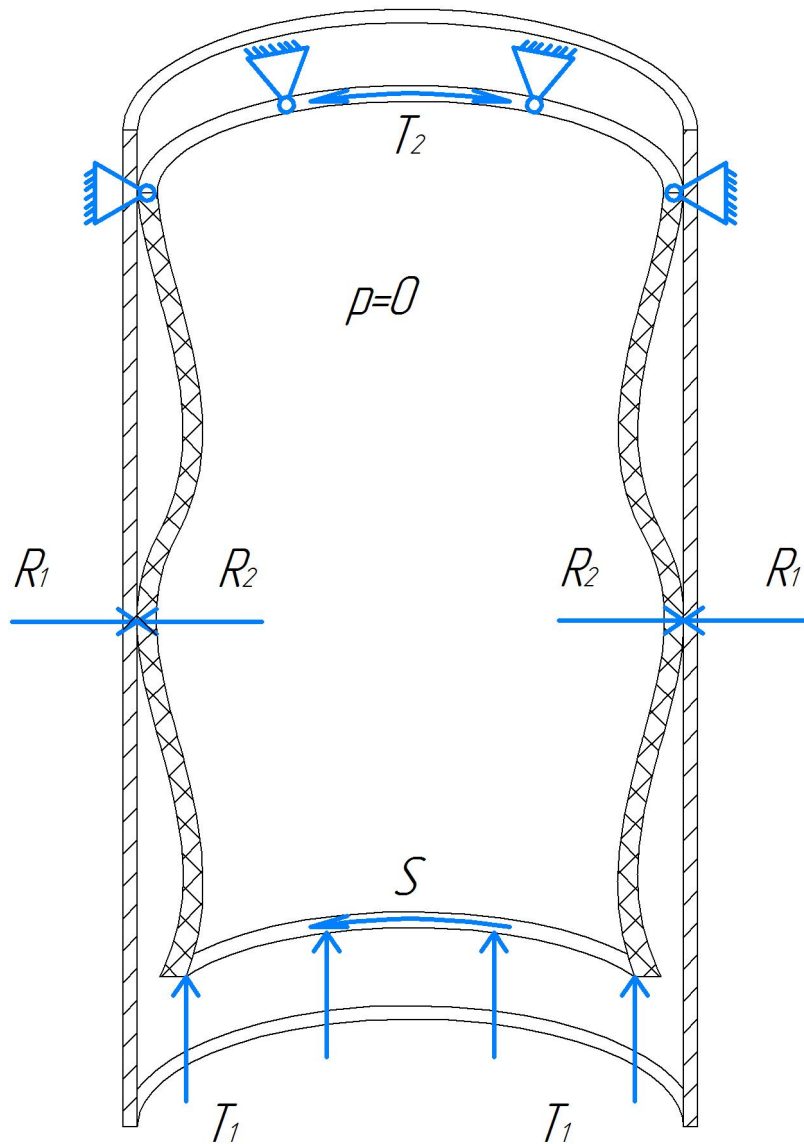


Рисунок 4.2— Осовое сжатие цилиндрической оболочки внутри жесткого цилиндра

Результатом интегрирования системы уравнений является формула Лоренца-Тимошенко предельного сжимающего напряжения при потере устойчивости оболочки [115]

$$\sigma_{пр.сж.} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \frac{E\delta}{R}. \quad (4.15)$$

При напряжениях, рассчитанных по формуле (4.15), цилиндрическая оболочка хлопком теряет устойчивость (форму) с образованием волн на боковой поверхности. После потери устойчивости оболочка не теряет несущих свойств и продолжает нести нагрузку, но при этом напряжения в оболочке уменьшаются. Максимальные напряжения в оболочке возникают в момент хлопка и определяются из уравнения (4.15). Так же следует отметить, что в формулу (4.15) не входит длина оболочки. При потере устойчивости реализуется локальная форма потери устойчивости и граничные условия в этой ситуации несущественны. Этим потеря устойчивости цилиндрической оболочки при сжатии отличается от потери устойчивости сжатого стержня.

При $\mu=0,3$ формула (4.15) примет вид

$$\sigma_{пр.сж.} = 0,605 \frac{E\delta}{R}. \quad (4.16)$$

Известно, что у реальных оболочек потеря устойчивости происходит при гораздо меньших напряжениях, чем определено по формуле (4.16) в связи с несовершенствами формы и неоднородностью толщины реальных оболочек. Так, в зависимости от соотношения толщины стенки к радиусу оболочки $\frac{\delta}{R}$, вместо коэффициента $k=0,605$ в формуле (4.16) рекомендуется применять коэффициенты указанные в Таблице 4.3 [117].

Таблица 4.3 – Рекомендуемые значения коэффициента k в зависимости от отношения радиуса к толщине оболочки [117]

R / δ	250	500	750	1000	1500
k	0,18	0,14	0,12	0,10	0,09

Для определения нужного коэффициента необходимо определить предполагаемую толщину оболочки. Так как монтаж оболочки предлагается

осуществлять путем ее протаскивания через монтажный люк-лаз. Необходимо перетащить в центральную часть резервуара верхнюю часть оболочки.

Через люк в центральной части крыши подается крюк грузоподъемного крана. Оболочка поднимается краном, при этом остальное полотнище будет подаваться через люк-лаз. После протаскивания верхней части оболочки через монтажный патрубок, она закрепляется по центру. Далее, через проушины в верхней части оболочки просовываются трубы подвесов, трубы крепятся к уторному уголку крыши (Рисунок 4.3).

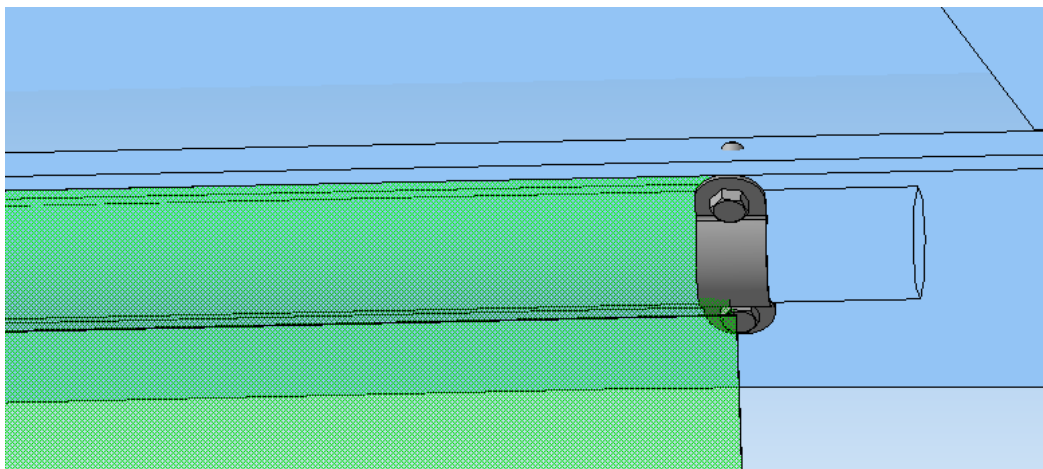


Рисунок 4.3 – Вид верхнего уторного узла изнутри

Оболочку предлагается изготавливать с вогнутыми проемами под трубу прободоотборника и уровнемера. Тем самым обеспечивается применение уровнемера и прободоотборника, что в свою очередь позволяет производить отбор проб по ГОСТ 2517 и дистанционно контролировать уровень налива в резервуаре, также предотвращается вращение оболочки в резервуаре. Крепление нижней части оболочки обеспечивается на патрубок для удаления конденсата. Герметичность оболочки контролируется при помощи стационарного газоанализатора в верхней части, который при нарушении герметичности зафиксирует пары нефтепродукта исходящие из полости оболочки.

Для определения точной формы оболочки и массово-габаритных характеристик была построена трехмерная модель резервуара с гибкой оболочкой Рисунки 4.3-4.4 [118].

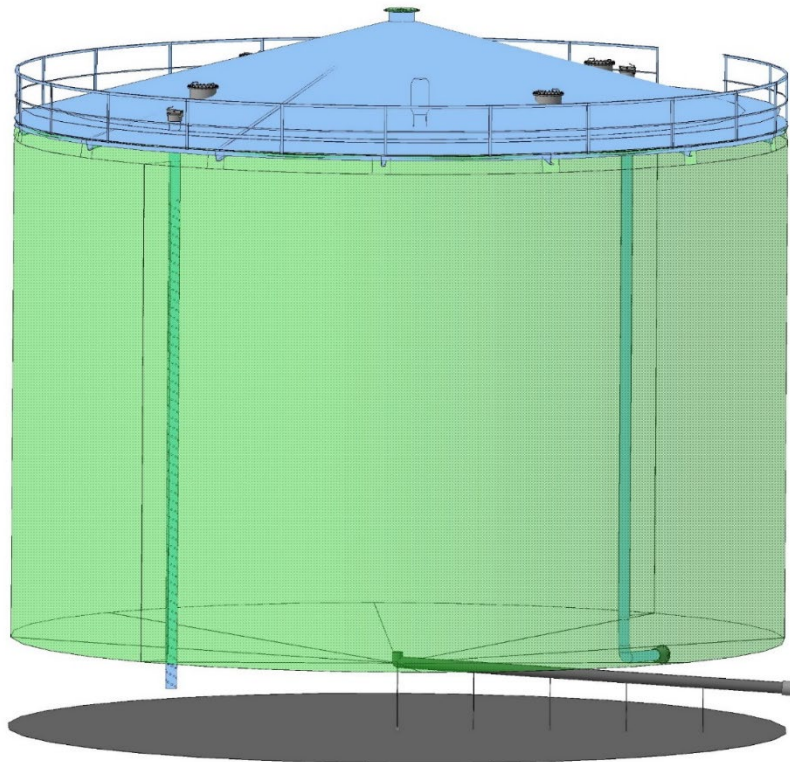


Рисунок 4.4 – Общий вид РВС-2000 м³ с оболочкой в порожнем состоянии (стенка резервуара скрыта)

При монтаже, как было отмечено ранее, оболочку предлагается поднимать за центральный патрубок и проушины, поэтому нужно определить минимальную толщину проушины и образующей оболочки из условия прочности на растяжение от собственного веса. Так минимально-допустимая толщина образующей будет определяться неравенством

$$\frac{mg}{2\pi R \cdot \frac{\sigma_{\text{вр, min}}}{2}} \leq \delta, \quad (4.17)$$

где m – масса оболочки, кг.

Получаемые значения толщины оболочки по формуле (4.17) для резервуаров по [32] имеют порядок 10^{-5} - 10^{-4} м. Учитывая, что минимальная

технологическая толщина 1 мм [119], больше полученной по расчету, рекомендуется использовать минимальную технологическую толщину. Так как в [32] наименьший радиус резервуара (для РВС 100 м³) составляет 2,365м, нетрудно вычислить, что отношение радиуса оболочки (приблизительно равен радиусу стенки резервуара) к толщине стенки будет более 1500 ($2,365/0,001 \geq 1500$). Таким образом в соответствии с таблицей 4.3 необходимо использовать коэффициент $\kappa=0,09$ для формулы (4.16), формула (4.16) примет вид

$$\sigma_{пр.сж.} = 0,09 \frac{E\delta}{R}. \quad (4.18)$$

Принимая предельные сжимающие напряжения равными пределу текучести $\sigma_{0,k} = [\sigma_T]$. Из уравнения (4.18) можно получить условие предельной толщины оболочки, выше которой будут возникать пластические деформации при сжатии оболочки в процессе заполнения резервуара.

$$\delta \leq \frac{[\sigma_T]R}{E} 0,09, \quad (4.19)$$

где $[\sigma_T]$ – предел текучести материала оболочки, Па.

Так как предел текучести для полимерных материалов не приводится в справочной литературе, для ориентировочных расчетов примем за предел текучести половину предела прочности $[\sigma_T] = \frac{\sigma_{сп, \min}}{2}$.

Объединяя условия (4.17) и (4.19), получим условие допустимого диапазона толщины оболочки [120]

$$\frac{mg}{2\pi R \cdot \frac{\sigma_{сп, \min}}{2}} \leq \delta \leq 0,09 \frac{\frac{\sigma_{сп, \min}}{2} R}{E}. \quad (4.20)$$

Масса оболочки для резервуара РВС 2000 м³, определенная из трехмерной модели в Компас 3D, составила 871,2 кг (при плотности материала 950 кг/м³). Выполним расчет по условию (4.20) для материалов,

указанных в табл. 1 при $R=7,5$ м. Результаты расчета указаны в Таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Допустимая толщина образующей оболочки для резервуара РВС 2 000 м³

Материал	Максимальная расчетная толщина, мм	Минимальная расчетная толщина, мм	Минимальная технологическая толщина, мм [119]	$\sigma_{пр.сж.}$ (при $\delta=1$ мм), Па
Нитриловая резина	473	0,037	1,0	84
Фторопласт Ф-246	21	0,012		5880
Термополиуретан	10	0,030		4968
Фторкаучук СКФ-26	849	0,021		84

Как видно из результатов расчета, максимально-допустимая толщина для предложенных материалов в 10 и более раз превышает минимальную технологическую, в зависимости от материала, и в 333 и более раз минимально-допустимую толщину, полученную по расчету, поэтому нет необходимости производить расчет максимально-допустимой толщины для представленных материалов.

Так как при монтаже оболочка подвешивается за проушины, определим их минимальную толщину из условия прочности на разрыв по условию

$$\frac{mg}{l \cdot \frac{\sigma_{ср, \min}}{2}} \leq \delta \quad (4.21)$$

где l – длина проушины, м.

Результаты расчета представлены в Таблице 4.5.

Учитывая, что проушины при эксплуатации резервуара не подвержены сжатию и складыванию, выполнять расчет на максимально-допустимую толщину не имеет необходимости. Достаточно руководствоваться минимальной толщиной, для обеспечения прочности от нагрузки от собственного веса.

Таблица 4.5 – Минимальные толщины проушин оболочки для резервуара РВС 2000 м³

Материал	Предел прочности, МПа		$\frac{\sigma_{вр, \min}}{2}$, МПа	Минимальная толщина, мм
	$\sigma_{вр, \min}$	$\sigma_{вр, \max}$		
Нитриловая резина	9,8	12	4,9	2,91
Фторопласт Ф-246	30	47	15	0,95
Термополиуретан	12	70	6	2,37
Фторкаучук СКФ-26	17,6	20,6	8,8	1,62

4.6 Эксплуатация гибких оболочек в осложненных условиях

При эксплуатации резервуаров с гибкими оболочками возможно возникновение следующих осложненных условий:

1. Примерзание оболочки к стенке резервуара и смерзание частей оболочки друг с другом в условиях низких температур.
2. Налипание асфальто-смолистых парафиновых отложений (АСПО) при хранении высокопарафинистых нефтей.

В отношении эксплуатации оболочки при хранении высокопарафинистых нефтей следует оценить адгезию материала оболочки с АСПО.

При закачке в резервуар, в результате примерзания/прилипания оболочки к стенке резервуара оболочка будет испытывать натяжение, будет образовываться дополнительное давление в объеме жидкости согласно схеме на Рисунке 4.5. Давление будет возрастать до момента отрыва оболочки от стенки в результате разрыва области смерзания (льда).

Выполним оценку дополнительно-возникающего давления согласно расчетной схемы на Рисунке 4.5.

Оболочка под воздействием дополнительно-возникающего давления ($p_{дон}$), будет испытывать кольцевые напряжения с образованием поверхности в виде усеченного тора (дуги в сечении) в результате упругого растяжения оболочки под воздействием растягивающих усилий от

кольцевого напряжения ($T_{кц}$). Область примерзания/прилипания будет являться конечной частью дуги, которая также испытывает кольцевое напряжение, и будет испытывать возрастающее кольцевое усилие до момента разрыва льда/АСПО.

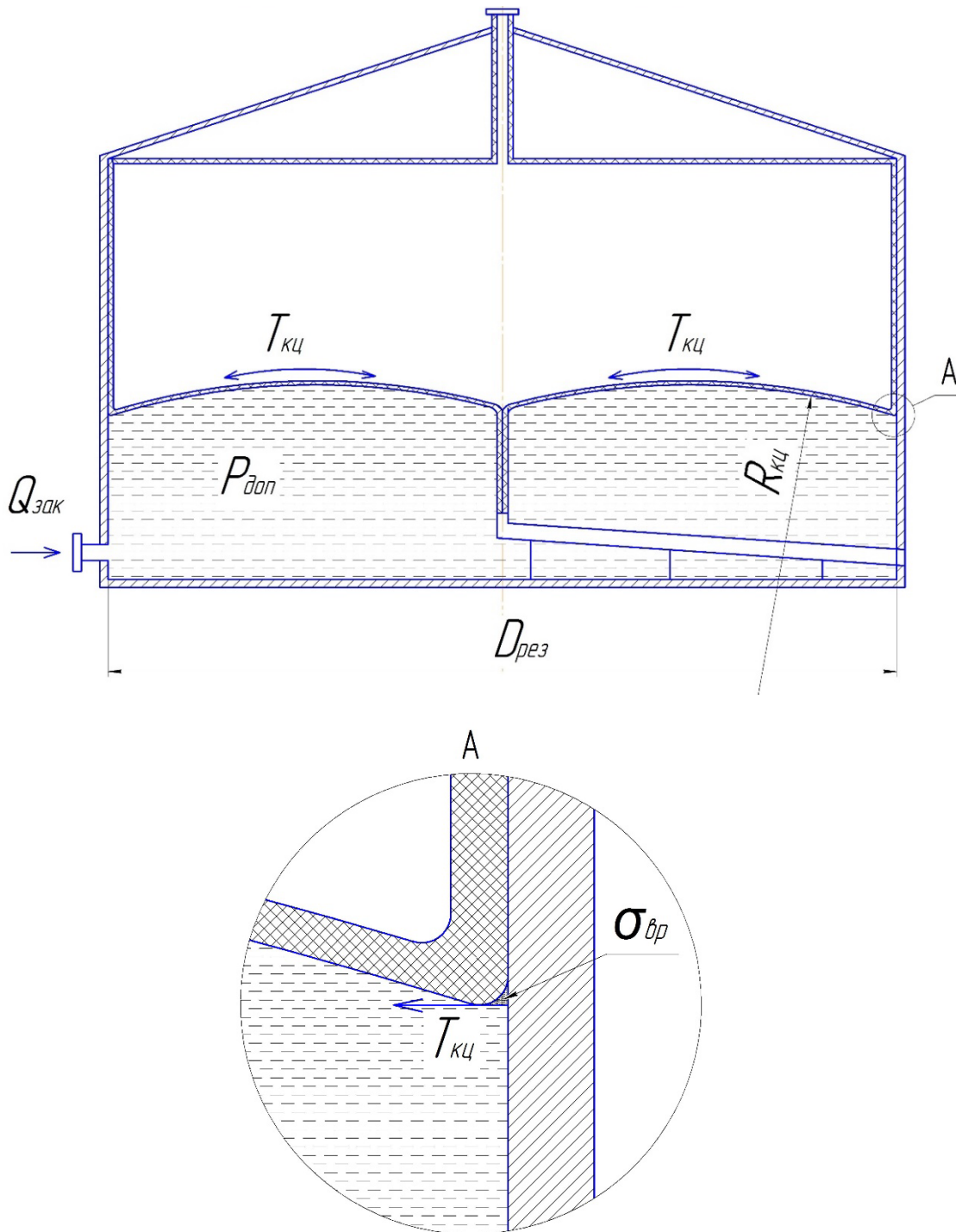


Рисунок 4.5 – Расчетная схема дополнительного давления в результате прилипания/примерзания оболочки

Таким образом, условием разрыва будет являться достижение кольцевыми напряжениями предела прочности на разрыв льда при примерзании или АСПО при прилипании ($\sigma_{кц} = \sigma_{ер}$). Кольцевые напряжения определяются по формуле

$$\sigma_{кц} = \frac{p_{дон} D}{2h} = \frac{p_{дон} R_{кц}}{h} = \frac{T_{кц}}{h}, \quad (4.22)$$

где h – высота слоя примерзания/прилипания, м.

Выражая $p_{дон}$ из уравнения (4.22), получим

$$p_{дон} = \frac{\sigma_{кц} h}{R_{кц}} = \frac{\sigma_{ер} h}{R_{кц}}. \quad (4.23)$$

Учитывая, что отрыв оболочки происходит не по всей поверхности в один момент, а плавно в процессе налива в резервуар, возьмем производную по времени от уравнения (4.23)

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\sigma_{ер}}{R_{кц}} \frac{dh}{dt}, \quad (4.24)$$

где $\frac{dh}{dt} = V_{взл}$ – скорость подъема уровня жидкости в резервуаре, м/с.

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\sigma_{ер}}{R_{кц}} V_{взл} \Leftrightarrow dp = \frac{\sigma_{ер}}{R_{кц}} V_{взл} dt. \quad (4.25)$$

$$\int dp = \int \frac{\sigma_{ер}}{R_{кц}} V_{взл} dt. \quad (4.26)$$

При интегрировании (4.26), отметим, что первая производная от пути по времени является скорость, так при интегрировании по времени получим первоначальную формулу (4.23) с константой интегрирования

$$p_{дон} = \frac{\sigma_{ер}}{R_{кц}} h + C, \quad (4.27)$$

где h – будет является длиной отрыва оболочки от стенки за одну секунду и численно будет равен скорости подъёма уровня налива, м.

C – константа интегрирования будет соответствовать гидростатическому

давлению жидкости и давлению от изгиба оболочки, рассмотренному в предыдущем разделе. При расчетах дополнительно возникающего давления допустимо принять $C=0$.

Так как $R_{\kappa\zeta}$ величина неизвестная, учитывая, что поверхность оболочки без воздействия давления имеет прямую форму в сечении, а под давлением получит форму дуги, пренебрегая собственным весом оболочки, справедливо предположить, что удлинение прямой в сечении поверхности до дуги будет происходить по закону Гука (при напряжениях не превышающих предел упругости материала оболочки). Так, растяжение оболочки под действием напряжений определяется зависимостью, определяемой по формуле

$$\sigma_{\kappa\zeta} = E \frac{\Delta l}{l} = E \frac{L_2 - l}{l} = E \left(\frac{L_2}{l} - 1 \right). \quad (4.28)$$

При этом соотношение дуги к хорде определится согласно обозначениям на Рисунке 4.6 по формуле [121]

$$S = 2R \arcsin \frac{c}{2R}. \quad (4.29)$$

Переходя к обозначениям в формуле (4.27), формула (4.29) примет вид

$$L_2 = 2R_{\kappa\zeta} \arcsin \frac{D_{\text{рез}}}{4R_{\kappa\zeta}}. \quad (4.30)$$

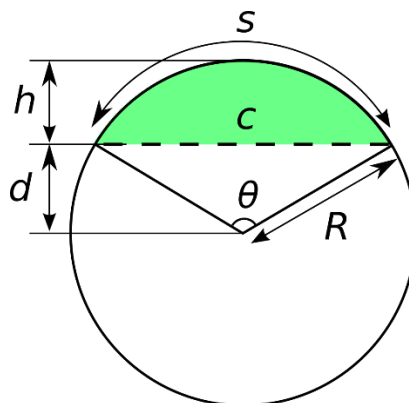


Рисунок 4.6 – Схема к определению соотношений элементов окружности

Подставляя формулу (4.30) в формулу (4.28) получим

$$\sigma_{\kappa\zeta} = E \left(\frac{2R_{\kappa\zeta}}{l} \arcsin \frac{D_{\text{рез}}}{4R_{\kappa\zeta}} - 1 \right). \quad (4.31)$$

Учитывая, что полученная формула показывает кольцевые напряжения в материале оболочки, а усилие разрыва необходимо оценить в области примерзания/прилипания, перейдем к усилиям путем умножения обеих сторон уравнения на толщину оболочки

$$T_{\kappa\zeta} = \delta E \left(\frac{2R_{\kappa\zeta}}{l} \arcsin \frac{D_{\text{рез}}}{4R_{\kappa\zeta}} - 1 \right). \quad (4.32)$$

Слагаемое $\sigma_{\text{вр}} h = T_{\kappa\zeta}$ в уравнении (4.27) будет определять усилия в материале примерзания/прилипания. Так как усилия воздействия на материал оболочки и материал примерзания/прилипания в момент разрыва будут равны, уравнение (4.32) примет вид

$$\sigma_{\text{вр}} h = \delta E \left(\frac{2R_{\kappa\zeta}}{l} \arcsin \frac{D_{\text{рез}}}{4R_{\kappa\zeta}} - 1 \right). \quad (4.33)$$

Так как в уравнении (4.33) все величины, кроме $R_{\kappa\zeta}$ известны, но невозможно выразить $R_{\kappa\zeta}$ в явном виде, будем определять $R_{\kappa\zeta}$ методом последовательных приближений.

Для случая примерзания выполним расчет для резервуара диаметром 10м при различных скоростях подъема уровня жидкости. Для льда характерен широкий разброс прочности на растяжение (от 0,7 до 3,0 МПа) [122]. Для расчета примем наибольшее значение $\sigma=3,0$ МПа. $D_{\text{рез}}=10$ м; $\delta=1$ мм; $E=28$ МПа. Результаты расчета представлены в Таблице 4.6.

Как видно из результатов расчета, при допустимых скоростях подъема жидкости в резервуаре упомянутых во второй главе, дополнительно возникающее давление незначительно и входит в значения допустимые в соответствии с действующими нормативными документами [32] и нормами расчета [28].

Таблица 4.6 – Результаты расчета давления дополнительно возникающего в объеме жидкости в результате примерзания

V , м/ч	p , Па
1	136
2	272
3	407
4	543
5	679
6	815
7	950
8	1086

Так как расчетная схема давления дополнительно возникающего в результате налипания оболочки к стенке за счет АСПО не будет отличаться от схемы на рисунке 4.5, допустимо будет использовать для данного расчета ту же формулу (4.27). Отличие будут заключаться лишь в использовании для расчета вместо прочности льда – адгезии (когезии) АСПО. Напряжения сдвига и сила прилипания АСПО представлены в Таблице 4.7 [123].

Таблица 4.7 – Результаты опытов по оценке напряжения сдвига парафина к различным материалам [123]

Материал	Напряжение сдвига F при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, Г/см ²	Сила прилипания p_v , Г/см ²	Коэффициент трения, p
Стекло	578	997	0,65
Фторопласт	890	-	-
Орг. стекло	955	2650	0,36
Полиэтилен	1250	2650	0,48
Сталь	1760	6000	0,29

Так как адгезия АСПО менее прочности льда на растяжение, достаточным будет выполнять расчет только для случая примерзания.

4.7 Расчёт экономической эффективности и определение области рационального применения гибкой оболочки

Оценку эффективности от выполнения инвестиционного проекта

принято проводить по величине чистого дисконтированного дохода (ЧДД). Для случая расчета в базовых ценах или при отсутствии инфляционного изменения цен при постоянной норме дисконта ЧДД определяется по формуле

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^{t_c} \frac{P_t - Z_t}{(1 + E)^t}, \quad (4.34)$$

где t_c – срок службы проекта;

P_t – результаты за t -ый год, руб;

Z_t – затраты за t -ый год, руб;

E – коэффициент дисконтирования (принят равным сумме ставки Центрального банка России 21% [124] и премии на риск 5%).

Наиболее эффективно сравнение средств сокращения потерь от испарений рекомендуется проводить по безразмерному критерию Ka , определяемому по формуле [75]

$$Ka = \frac{\text{ЧДД}}{\sigma_n^* \cdot G_{II}}, \quad (4.35)$$

где σ_n^* – обобщенная цена 1 тонны нефти/нефтепродукта (для бензина по данным на 30.10.2024 $\sigma_n^* = 66500$ руб/тонна), руб/тонна;

G_{II} – потери нефти от испарения за год без внедрения средств сокращения потерь от испарений, кг.

Годовые потери и эффективность сокращения потерь от испарений при использовании понтонов определим по данным (Таблица 4.8) [125]. Эффективность сокращения потерь при использовании гибких оболочек примем равной 100% по результатам выполненных ранее исследований.

Стоимость оболочки и понтона принята в соответствии с коммерческими предложениями в Приложении Г (Таблица Г.1, Г.2, Рисунок Г.1), сокращение потерь данные представлены в таблице 4.9. Ставка за выбросы загрязняющих веществ составляет 163 руб/т для предельных

углеводородов C_1-C_5 [126]. Исходные данные в таблице 4.9 приведены для срока эксплуатации 10 лет.

Таблица 4.8 – Нормы естественной убыли при хранении нефтепродуктов 1 группы в климатической группе (подгруппе) 2(3) [125]

	РВС 100 м ³		РВС 1000 м ³		РВС 10000 м ³	
норма убыли в кг на 1 тонну принятого продукта	без понтона	с понтоном	без понтона	с понтоном	без понтона	с понтоном
в осенне-зимний период	0,19	0,06	0,19	0,04	0,19	0,02
в весенне-летний период	0,81	0,18	0,59	0,10	0,28	0,07
в среднем за об., кг	50,35	11,90	366,50	71,50	1765,00	415,00

Результаты расчета K_a критерия в зависимости от коэффициента оборачиваемости при внедрении понтонов и оболочек в резервуары РВС 100м³, РВС 1000м³, РВС 10 000м³, представлены на Рисунках 4.7-4.9 соответственно.

Таблица 4.9 – Затраты на приобретение понтона и оболочки для резервуаров РВС

Объем РВС, м ³	100		1000		10000	
Средство сокращения потерь	оболочка	понтон	оболочка	понтон	оболочка	понтон
Эффективность, %	100	76,4	100	80,5	100	76,5
Затраты, тыс.руб	672,0	1320,6	3054,0	1896,8	13140,0	6800,4
Сокращение потерь за оборот, кг/об	50,35	38,45	366,50	295,00	1765,00	1350,00
Экономия за сокращение выбросов за 10 лет, дисконтированное руб/об	3613,62	2759,55	26303,68	21172,13	126673,93	96889,41
Сокращение потерь, руб/об	3348,28	2556,93	24372,25	19617,50	117372,50	89775,00
Сокращение потерь дисконтированное за 10 лет, тыс.руб/об	147,43	112,6	1073,1	863,8	5168,0	3952,9

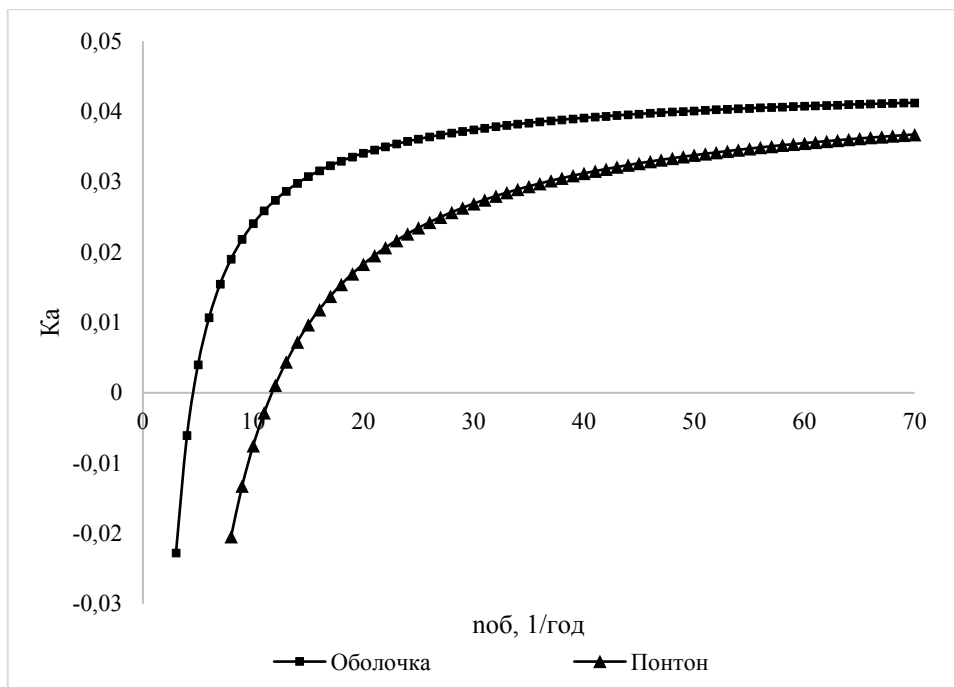


Рисунок 4.7 – Расчет K_a критерия для РВС-100м³

Как видно из Рисунка 4.7, внедрение оболочки в РВС 100м³ выгоднее понтона при любом коэффициенте оборачиваемости в результате более низкой стоимости, и экономически эффективно при $n_{об} \geq 5$ год⁻¹, тогда как внедрение понтона эффективно только при $n_{об} \geq 12$ год⁻¹ [127].

Для РВС 1000м³ внедрение понтона и оболочки эффективно при $n_{об} \geq 2$ год⁻¹, но для понтона K_a критерий незначительно выше за счет более высокой стоимости оболочки, при этом при $n_{об} > 40$ год⁻¹ за счет более высокой эффективности K_a критерий для оболочки и понтона практически сравниваются (Рисунок 4.8).

Для РВС 10 000 м³ применение оболочек выгодно $n_{об} \geq 3$, а понтонов при $n_{об} \geq 2$, в остальном характер зависимостей на Рисунке 4.9, аналогичен зависимостям для РВС-1000м³ [127].

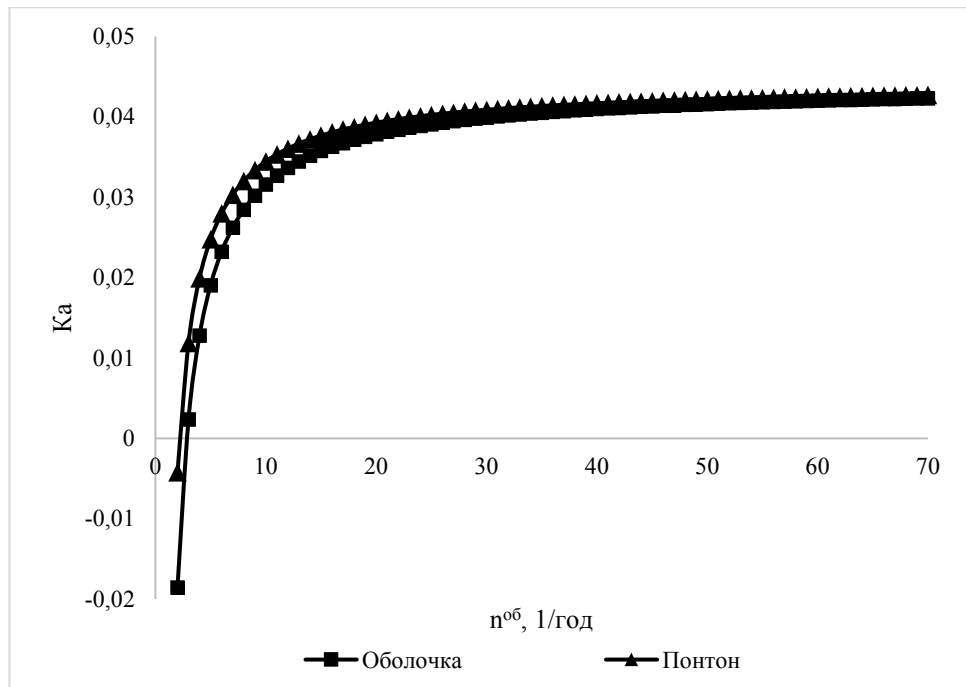


Рисунок 4.8 – Расчет Ka критерия для РВС-1000м³

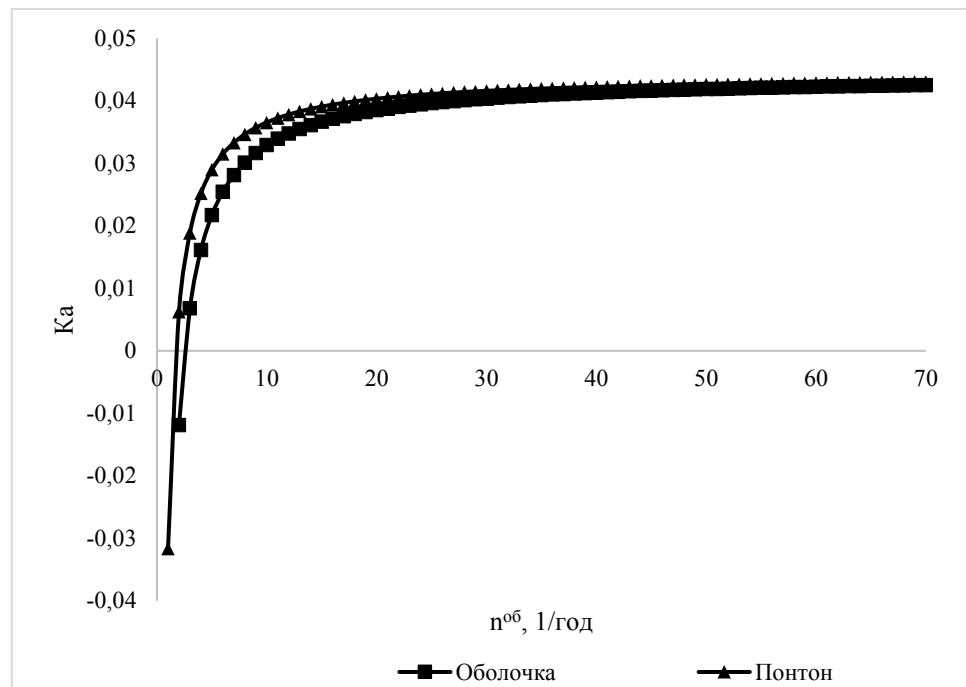


Рисунок 4.9 – Расчет Ka критерия для РВС-10 000м³

Выполнен расчет Ka критерия для резервуаров типа РГС подземного и наземного расположения (Рисунки 4.10-4.12) по исходным данным таблицы.

Таблица 4.10 – Нормы естественной убыли при хранении нефтепродуктов 1 группы в резервуарах автозаправочных станций в климатической группе 2 (подгруппе 3), в килограммах на 1 тонну хранимого нефтепродукта [125]

	РГС 5м ³		РГС 10 м ³		РГС 100 м ³	
	наземн.	подземн.	наземн.	подземн.	наземн.	подземн.
в осенне-зимний период	0,16	0,04	0,16	0,04	0,16	0,04
в весенне-летний период	0,27	0,06	0,27	0,06	0,27	0,06
в среднем за оборачиваемость, кг	1,07	0,25	2,13	0,50	21,30	4,95

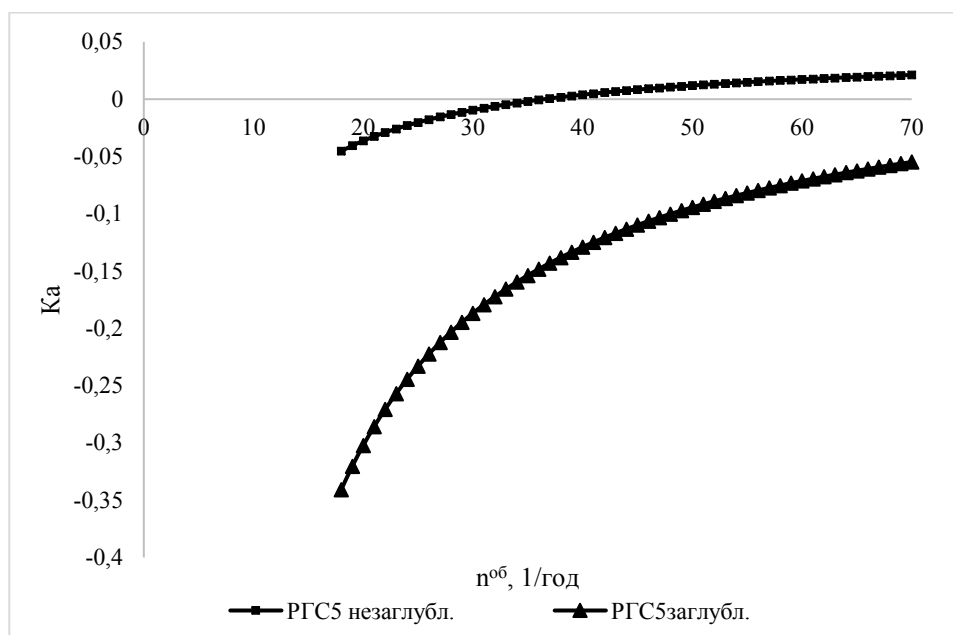
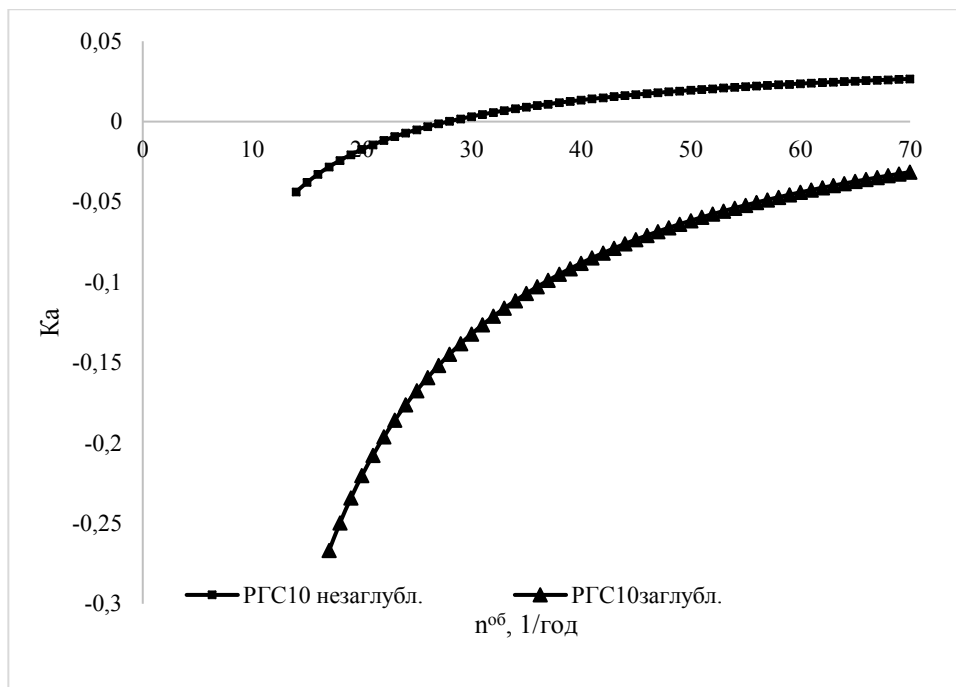
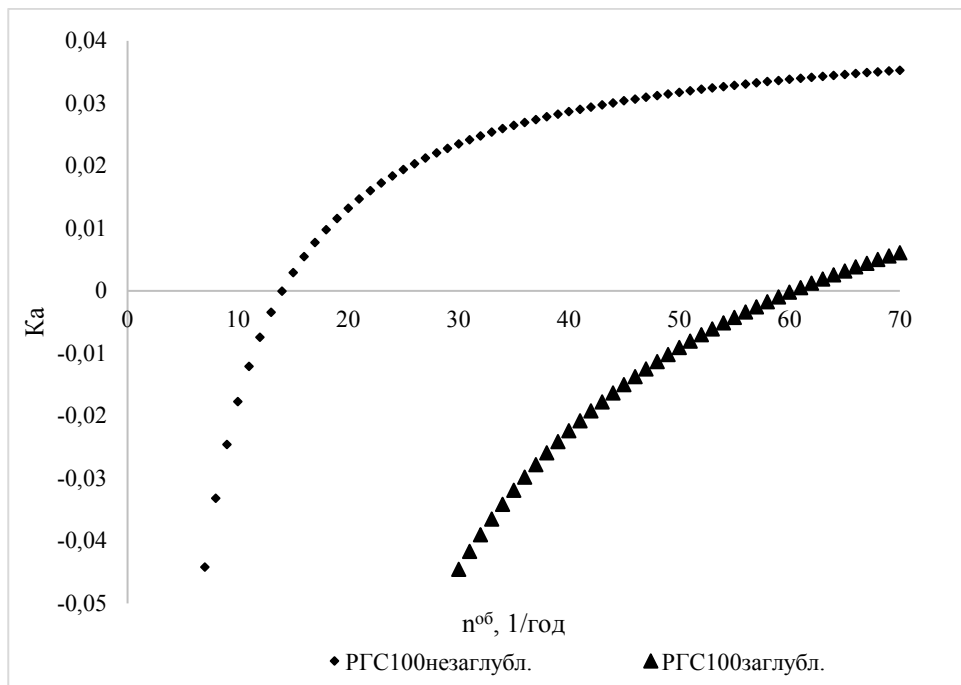


Рисунок 4.10 – Расчет K_a критерия для РГС-5м³

Для резервуаров подземного расположения, применение оболочек экономически неэффективно в результате изначально низкого объема потерь. При этом, для резервуаров наземного исполнения при высоких коэффициентах оборачиваемости (для РГС-5м³ при $n_{об} \geq 38$ год⁻¹, для РГС-10м³ при $n_{об} \geq 28$ год⁻¹, для РГС-100м³ при $n_{об} \geq 12$ год⁻¹) применение оболочек будет эффективно [127].

Рисунок 4.11 – Расчет K_a критерия для РГС-10м³Рисунок 4.12 – Расчет K_a критерия для РГС-100м³

Следует отметить, что за стоимость оболочек принималась цена ремонтных вкладышей для резервуаров, имеющих довольно сложную форму, заведомо больший расход материала, что в свою очередь увеличивает конечную цену. Логично предположить, что при промышленном

изготовлении гибких оболочек для резервуаров, их цена будет ниже, что позволит расширить их область рационального применения.

Выводы по четвертой главе:

1. Для гибкой оболочки, предложенной в 3 главе, разработана технология монтажа для резервуаров РГС и РВС, рассчитаны основные массово-габаритные характеристики.
2. Обосновано применение термополиуретана и предложены альтернативные материалы для изготовления гибких оболочек.
3. На основании системы уравнений Кармана предложено условие для определения максимальной толщины материала гибкой оболочки с целью предотвращения образования недопустимых деформаций в процессе эксплуатации оболочки.
4. На основании предложенной технологии монтажа гибкой оболочки, предложено условие минимальной толщины гибкой оболочки с учетом нагрузки от собственного веса в процессе монтажа
5. Из полученных результатов выявлено, что достаточно выполнить расчет на прочность для нагрузки от собственного веса, ввиду незначительности напряжений от деформаций при изменении формы.
6. Разработана формула расчета дополнительно возникающего давления в результате примерзания/прилипания оболочки к стенке резервуара.
7. Определена область рационального применения гибких оболочек. Для наземного исполнения РГС-5м³ при $n_{об} \geq 38$ год⁻¹, для РГС-10м³ при $n_{об} \geq 28$ год⁻¹, для РГС-100м³ при $n_{об} \geq 12$ год⁻¹. Для РВС 100м³ при $n_{об} \geq 5$ год⁻¹; для РВС1000м³ при $n_{об} > 2$ год⁻¹; для РВС10 000м³ при $n_{об} > 3$ год⁻¹.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации была решена научно-практическая задача - повышение эффективности эксплуатации резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов путем совершенствования расчета дыхательной арматуры и внедрения гибких оболочек внутрь резервуаров. Основные практические рекомендации и научные результаты заключаются в следующем:

1. Из анализа методик расчета дыхательной арматуры, сделан вывод об отсутствии методики, учитывающей переток и совместно с ним другие факторы, влияющие на объем паровоздушной смеси, проходящей через дыхательный клапан. На основе обзора литературных и патентных источников сделан вывод об отсутствии технологий и исследований по сокращению потерь от испарений в стальных резервуарах путем применения гибких внутренних оболочек.

2. На основе разработанной методики расчета дыхательной арматуры показана возможность превышения производительности закачки/откачки нефти и нефтепродуктов при переключении резервуаров за счет перетока продукта до 4,97 раз от номинальной пропускной способности трубопровода, что влечет за собой возможность накопления недопустимого заряда статического электричества, заклинивания, перекоса или потопления плавающих крыш и понтонов, превышения допустимой производительности дыхательной арматуры. Актуальность решения данной задачи увеличивается для резервуаров с высотой стенки 18 м. При помощи разработанной программы рассчитана производительность закачки/откачки в процессе переключения резервуара с учетом перетока в каждую секунду переключения, представлена возможность прогнозирования возможности образования предельно-допустимого давления (вакуума) в газовом пространстве резервуаров, выявлена возможность перетока до 10% объема хранимого продукта из резервуара в резервуар и снижения до 20% полезной

емкости резервуара. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2021616646). Предложены технические решения, позволяющие исключить переток при переключении резервуаров.

3. Разработана конструкция резервуара с гибкой внутренней оболочкой (Патент РФ № 202016), для сокращения потерь от испарений нефти и нефтепродуктов. В ходе исследований на разработанной экспериментальной установке получено соответствие фактических и расчетных потерь от «больших дыханий». Обосновано предотвращение потерь при применении гибких оболочек на экспериментальной установке, что позволяет рекомендовать внедрение гибких оболочек на реальные резервуары.

4. Разработана технология монтажа гибкой оболочки для резервуаров РГС и РВС, рассчитаны основные массово-габаритные характеристики. Обосновано применение термополиуретана и предложены альтернативные материалы для изготовления гибких оболочек. Предложено условие (4.20) для определения максимальной и минимальной толщины материала гибкой оболочки с учетом предотвращения образования недопустимых деформаций в процессе эксплуатации оболочки. Получена формула (4.27) для расчета дополнительно возникающего давления в результате примерзания/прилипания оболочки к стенке резервуара; расчетами показано, что давление, возникающее в результате примерзания/прилипания оболочки, не превышает допустимых значений. Определена область рационального применения гибких оболочек. Для наземного исполнения РГС-5м³ при $n_{об} \geq 38$ год⁻¹, для РГС-10м³ при $n_{об} \geq 28$ год⁻¹, для РГС-100м³ при $n_{об} \geq 12$ год⁻¹. Для РВС 100м³ при $n_{об} \geq 5$ год⁻¹; для РВС1000м³ при $n_{об} > 2$ год⁻¹; для РВС10 000м³ при $n_{об} > 3$ год⁻¹.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Кандаков, Г. П. К вопросу о проведении и работы по анализу технического состояния резервуарных парков АК “Транснефть”, к прогнозированию сроков безопасной эксплуатации резервуаров / Г.П. Кандаков // Трубопроводный транспорт нефти. – 1994. – № 8, С 15–16.
- 2 Кондрашова, О. Г. Причинно-следственный анализ аварий вертикальньк стальных резервуаров /О.Г. Кондрашова, М.Н. Назарова // Нефтегазовое дело – 2004. – № 2. – С. 8.
- 3 Котляровский, В. А. Аварии и катастрофы. в 4 кн. / В.А. Котляровский, А.В. Забегаев. – М.: АСВ, 1998. – 4 кн.
- 4 Денисова, А. П. Конструкции плавающих крыш для вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. / А.П. Денисова, А.Р. Муртазин, А.А. Землянский – Саратов : Сар. гос. тех. ун-т, 2001. – 58 с.
- 5 Савватеев, Н. Ю. Сокращение потерь углеводородов при промысловой подготовке нефти к магистральному транспорту: дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Савватеев Николай Юрьевич. – Тюмень, 2002. – 172 с.
- 6 Земенков, Ю. Д. Резервуары для хранения нефтей и нефтепродуктов: Курс лекций. / Ю.Д. Земенков. – Тюмень : ТюмГНГУ, 1998. – 95 с.
- 7 Зоря, Е. И. Сохранение качества при обороте нефтепродуктов. Практическое пособие. /Е.И. Зоря, О.В. Лощенкова, Ю.Н. Киташов. – М.: «НЕФТЬ И ГАЗ», 2009. – 492 с.
- 8 Несговоров, А. М. Совершенствование систем, методов и способов измерения количества и качества нефтепродуктов: дис. ... канд. техн. наук : 05.15.13 / Несговоров Алексей Михайлович. – Уфа, 1994. – 214 с.
- 9 Прохоров, В.А. Оценка параметров риска эксплуатации резеервуаров для хранения нефтепродуктов в условиях Севера: дис. ... док. техн. наук : 01.02.06 / Прохоров Валерий Афанасьевич. – Якутск, 1999. – 337 с.

- 10 Буслаева, И. И. Исследование причин отказов резервуаров: сб. трудов межд., конференции./ И.И. Буслаева, В.А. Прохоров – т. 2. – Донецк - Макеевка : ДГАСА, 1996. – С. 49– 50.
- 11 Васильев, Г. Г. Хранение нефти и нефтепродуктов: учеб. пособие./ Г.Г. Васильев, А.Д. Прохоров, Ю.Д. Земенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Тюмень : «Вектор Бук», 2003. – 536 с.
- 12 ГОСТ Р 58623-2019 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные. Правила технической эксплуатации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169168> (дата обращения 19.06.2023).
- 13 Hou, Y. Numerical simulation of gasoline evaporation in refueling process./ Y. Hou, J.Q. Chen, L. Zhu et al.// Advances in Mechanical Engineering. – 2017.- №9. – P.1– 8
- 14 Huang, W.Q. Experimental determination and numerical simulation of vapor diffusion and emission in loading gasoline into tank / W.Q. Huang, Z.L. Wang, H. Ji, et al.// CIESC Journal – 2016. – Vol. 67 №12. – P. 4994– 5005
- 15 Wang, Z.L. Numerical simulation of vapor diffusion and emission in loading gasoline into dome roof tank / Z.L. Wang, W.Q. Huang, H. Ji, et al.// Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section) – 2017. – Vol.33 №2. – P.26– 33
- 16 Weiqiu, H. Numerical simulation and applications of equivalent film thickness in oil evaporation loss evaluation of internal floating-roof tank / H. Weiqiu, F. Jie, Li Fei, Ji Hong, W. Hongning // Process Safety and Environmental Protection – 2019. – Vol.129 №1. – P.74-88
- 17 Weiqiu, H. calculation method for the numerical simulation of oil products evaporation and vapor diffusion in an internal floating-roof tank under the unsteady operating state / H. Weiqiu, H. Fengyu, F. Jie, Fu Lipei// Journal of Petroleum Science and Engineering – 2020. – Vol.18 №9.
- 18 Zinke, R. Long-term emission measurements at a floating roof tank for gasoline

- storage / R. Zinke, F. Kuhler, U. Krause// Journal of Loss Prevention in the Process Industries – 2018. – №55. – P.152-161.
- 19 Zinke, R. Quantitative risk assessment of emissions from external floating roof tanks during normal operation and in case of damages using Bayesian networks / R. Zinke, J. Melnychuk, F. Kuhler, U. Krause// Reliability Engineering & System Safety – 2020. – Vol.197 №4
 - 20 Zinke, R. Experimental measurement of initial evaporation mass flows from gasoline spills and comparison with empirical models/ R. Zinke, N. Virothi, F. Köhler, A. Klippel, S. Schalau, U. Krause// Process Safety Progress – 2019. – Vol.39 №3
 - 21 Ronald Zinke, Florian Köhler, Andrea Klippel, Ulrich Krause, Bernd Leitl, Emissions of volatile hydrocarbons from floating roof tanks and their local dispersion: Considerations for normal operation and incase of damage / R. Zinke, F. Köhler, A. Klippel, U. Krause, B. Leith//, Journal of Loss Prevention in the Process Industries – 2020. – Vol. 66
 - 22 Yamada, H. Contribution of evaporative emissions from gasoline vehicles toward total VOC emissions in Japan / H. Jamada // Science of the Total Environment – 2013. – Vol.449 P. 143-149.
 - 23 Yamada, H. Evaporative emissions in three-day diurnal breathing loss tests on passenger cars for the Japanese market / H.Yamada, S. Inomata, H. Tanimoto// Atmospheric Environment – 2015. – Vol.107 P. 166-173.
 - 24 Yamada, H. Refueling emissions from cars in Japan: compositions, temperature dependence and effect of vapor liquefied collection system / H.Yamada, S. Inomata, H. Tanimoto// Atmospheric Environment – 2015. – Vol. 120 P.445–462.
 - 25 Мастобаев, Б.Н. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов : Справочное пособие / Б. Н. Мастобаев, А. М. Нечваль, М. М. Гареев [и др.] ; Под общей редакцией Ю.В. Лисина. Том 2. – М.:Недра, 2017. – 519 с
 - 26 Гареев М.М. Расчет производительности и дыхательной арматуры нефтяных

резервуаров // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов, 1976. № 12. С. 34

- 27 American Petroleum Institute Standard 2000, Venting Atmospheric and Low-Pressure Storage Tank, seventh ed., 2014. [Электронный ресурс]
URL: <https://www.api.org/~media/files/publications/whats%20new/2000%20e7%20ра.pdf> (дата обращения 27.11.2024)
- 28 ОР-23.020.00-КТН-079-14 Расчет емкости (полезной) для товарных операций и разработки технологических карт на резервуары и резервуарные парки. М.: Транснефть, 2014. 34 с.
- 29 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности складов нефти и нефтепродуктов» [Электронный ресурс] : утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.12.2020 №529
URL: https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/acts/oil_objects/Приказ%20Ростехнадзора%20от%2015.12.2020%20№%20529.pdf (дата обращения 27.11.2024)
- 30 EN 14015: 2004, Specification for the Design and Manufacture of Site Built, Vertical, Cylindrical, Flat-bottomed, Above-ground, Welded, Steel Tanks for the Storage of Liquids at Ambient Temperature and above. [Электронный ресурс]
URL: http://files.engineering.com/download.aspx?folder=85708300-a32c-4f4b-bfc3-454836888e7e&file=EN14015_excerpt.pdf (дата обращения 27.11.2024)
- 31 G. Britton, Laurence. Static Hazards of the VAST /Laurence G. Britton, Jack A. Smith // Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 25, Issue 2, March 2012, Pages 309-328 <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.11.012>
- 32 ГОСТ 31385-2023 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. [Электронный ресурс]
URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200138636> (дата обращения 27.11.2024).
- 33 Коршак А.А. Прогнозирование потерь нефти и нефтепродуктов от испарения. Новосибирск: Академиздат, 2022. 252с.

- 34 Коршак, А. А. Оценка вклада превышения объема паровоздушной смеси над объемом закачки в потерях нефти и нефтепродуктов от испарения / А. А. Коршак, А. А. Коршак // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 452-459. – DOI 10.28999/2541-9595-2021-11-4-452-459.
- 35 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023689245 Российская Федерация. Автоматизированная система мониторинга за безопасной и эффективной работой резервуаров для нефти и нефтепродуктов : № 2023688078 : заявл. 12.12.2023 : опубл. 27.12.2023 / Р. Е. Левитин, С. А. Леонтьев, К. Г. Сахуков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет».
- 36 Абузова, Ф. Ф. Анализ эффективности использования резервуаров с плавающей крышей./ Ф.Ф. Абузова, Р.А. Молчанова. – М.: Нефтяное хозяйство. – 1982. – № 6. – С. 55-57.
- 37 Абузова, Ф. Ф. Борьба с потерями нефти и нефтепродуктов при их транспортировке и хранении. / Ф.Ф. Абузова, И.С. Бронштейн, В.Ф. Новоселов, В.А. Юфин. – М.: Недра, 1981. – 248 с.
- 38 Гиззатов, М. А. Сокращение потерь бензинов от испарения на автозаправочных станциях нефтебаз: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19/ Гиззатов Марат Аузахович. – Уфа, 1987. – 244 с.
- 39 Коваленко, В. П. Опыт борьбы с потерями нефтепродуктов при хранении, транспортировании и выдаче / В.П. Коваленко, В.Е. Турчанинов. -сер. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1985. – 57 с.
- 40 Фатхиев, Н. М. К расчету нестационарного испарения нефти в резервуаре с плавающей крышей / Н.М. Фатхиев. – Трубопроводный транспорт нефти северных месторождений. Уфа : УНИ, 1984. – С. 92-979.

- 41 Махов, А. Ф. Температурный режим нефтепродукта в резервуарах с плавающей крышей / А.Ф. Махов, Г.Д. Теляшева, Л.Р. Хакимьянова, Ф.М. Хафизов. - Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. М.: ЦНИИТЭнефтехим, – 1994. – № 5.
- 42 Абрамов, Ю. А. Способы предотвращения потерь бензина при эксплуатации резервуарных парков. / Ю.А. Абрамов. – Проблемы пожарной безопасности. Выпуск 14. Харьков: «Фолио», 2003. – С. 3 – 12.
- 43 Хафизов, Ф. М. Сокращение потерь от испарения бензинов из резервуаров уменьшением взаимодействия воздуха с испаряющейся поверхностью: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19/ Хафизов Флюр Мугалимович. – Уфа, 1988. – 179 с.
- 44 Каравайченко, М. Г. Резервуары с плавающими крышами. / М.Г. Каравайченко, Л.А. Бабин, Р.М. Усманов. – М.: Недра, 1992. - 236 с.
- 45 Коршак, А. А. Ресурсосберегающие методы и технологии транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов. / А.А. Коршак. – Уфа : ДизайнПолиграфСервис, 2006. – 196 с.
- 46 Емельянов, В. Ю. Обзор действующих систем улавливания паров нефтепродуктов / В.Ю. Емельянов, А.А. Александров, И.А. Архаров - Современная АЗС. – 2005. – №№10, 11, 12. – 83 с.
- 47 Щурова, Е. В. Развитие и совершенствование конструктивных и технико-технологических решений по обеспечению герметичности стальных вертикальных резервуаров : дис. ... канд. техн. наук: 5.6.6. / Щурова Елена Владимировна, 2022. – 149 с.
- 48 Мастобаев, Б.Н. Развитие системы нефтепродуктообеспечения в России / Б.Н. Мастобаев, Н.Г. Муталлапов, А.Д. Прохоров, Дмитриева Т.В. и др.– СанктПетербург: «Недра», 2006.– 320 с.
- 49 Моряков, В. С. Потери нефти и нефтепродуктов при эксплуатации резервуаров на НПЗ / В.С. Моряков – Химия и технология топлив и масел.

М.; Химия, 1979. – №4. – С. 8-10.

- 50 Коршак, С.А. Совершенствование методов расчета потерь бензинов от испарения из резервуаров типов РВС и РВСП: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19/ Коршак Сергей Алексеевич. – Уфа, 2003. – 174 с.
- 51 Лысый, И. В. Опыт эксплуатации и результаты обследования резервуара вместимостью 20 тыс. с понтоном / И.В. Лысый, В.Г. Зайцев. – Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. –1981. – №1. – С. 34-36.
- 52 Мартин, Р. Крытые резервуары с плавающей крышей / Р. Мартин - Инженер-нефтяник. – 1965. – №9. – С. 52-56.
- 53 Молчанова, Р. А Эффективность типовых резервуаров с понтонами / Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. / Р.А. Молчанова, Л.Р. Хакимьянова - М.: ВНИИОЭНГ, – 1982. – №6. – С. 28-29.
- 54 Бронштейн, И. С. Понтоны из синтетических материалов / И.С. Бронштейн - НТО. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. М.: ЦНИИТЭнефтегаз, 1967. - №1. - С. 33-36.
- 55 Душин, В.А. Определение качества затвора понтонов в наземных металлических резервуарах / В.А. Душин - Проектирование, строительство и эксплуатация магистральных газонефтепроводов и нефтебаз. Уфа – 1974. – С. 201-205.
- 56 Розенштейн, И. М. Аварии и надёжность резервуаров. / И.М. Розенштейн –М.: Недра, 1995. – 253 с.
- 57 Бронштейн, И. С. Исследование испарения нефти и нефтепродуктов через щели затвора понтона в емкости / И.С. Бронштейн, Н.Н. Хазиев, Л.И. Савельева Л. И. - Сбор, подготовка и транспорт нефти и нефтепродуктов. Уфа: ВНИИСПТнефть. – 1973. – № XI. – С. 100-109.
- 58 Сафарян, М. К. Металлические резервуары и газгольдеры. / М.К. Сафарян – М.: Недра, 1987. – 200 с.
- 59 Ткачев, О. А. Сокращение потерь нефти при транспорте и хранении. / О.А.

Ткачев, П.И. Тугунов. – М.: Недра, 1988. - 118 с.

- 60 Землянский, А. А. Резервуаростроение в новом веке / А.А. Землянский - Совершенствование управления науч.-технич, прогрессом в современных условиях: сб. науч. тр. Пенза : ПГАСА, 2004. – 224 с.
- 61 Землянский, А. А. Принципы конструирования и экспериментально-теоретические исследования крупногабаритных резервуаров нового поколения: дис. ... докт. техн, наук.: 05.23.01, 05.23.02/ Землянский Анатолий Андреевич. – Саратов: СГГУ, 2005. –320 с.
- 62 Казубов, А. И. Понтоны из синтетических материалов для резервуаров / А.И. Казубов – Транспорт и хранение нефти, нефтепродуктов и углеводородного сырья. М.: ВНИИОЭНГ, 1975. – 70 с.
- 63 Кузнецов, В. А. Совершенствование конструкций уплотнений плавающих крыш (понтонов) резервуаров / В.А. Кузнецов, О.А. Макаренко, А.В. Кузнецова - Проблемы и перспективы развития акционерного общества «Уфимский нефтеперерабатывающий завод». Уфа : 1995. – С. 75.
- 64 Шаммазов, А. М. Основы нефтепродуктообеспечения (нефтебазы и АЗС). / А.М. Шаммазов, А.А. Коршак, Г.Е. Коробков – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2001. – 232 с.
- 65 Коршак, А. А. 50 вопросов и ответов о том, как сократить выбросы паров бензина из резервуаров в атмосферу. / А.А. Коршак – Уфа : ДизайнПолиграфСервис, 2008. – 87 с.
- 66 Пархоменко, В.В. Обоснование параметров универсальной управляемой камеры. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / Пархоменко Виктор Викторович. Ставрополь: 2010. – 136 с.
- 67 Левин, С.Н. Экспериментальное исследование эффективности защитных покрытий из гранулированного пеностекла в резервуарах для нефтепродуктов малой емкости дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / Левин Семен Наумович. М.: 2021. – 91 с.

- 68 Хакимьянова, Л. Р. Сокращение потерь от испарения бензинов в промышленных резервуарах : дис. ... канд. техн. наук.: 25.00.19 / Хакимьянова Лилия Ралифовна - Уфа : УНИ, 1985. – 250 с.
- 69 Яковлев, В. С. Хранение нефтепродуктов. Проблемы защиты окружающей среды. / В.С. Яковлев - М.: Химия, 1987. – 152 с.
- 70 Пат. 2427676 США, Spherical tank / Horton G.T. №2427476 заявл. 01.03.1945; опубл. 23.09.1947
- 71 Едигаров, С. Г. Проектирование и эксплуатация нефте- и газохранилищ. / С.Г. Едигаров, С.А. Бобрицкий – М.: Недра, 1973. – 180 с.
- 72 Левитин, Р. Е. Подземное хранение нефтепродуктов в горизонтальных стальных резервуарах с использованием инертных газов. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / Левитин Роман Евгеньевич. – Тюмень, 2008. – 16 с.
- 73 Временные экологические требования при проектировании, строительстве и эксплуатации автозаправочных станций на территории г. Москвы : [закон г. Москвы: принят Распоряжением премьера правительства Москвы от 24.05.1999 г. N 457-РП, Утратило силу: Постановлением Правительства Москвы от 28.07.2009 № 693-ПП]. [Электронный ресурс] URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?doc_itself=&backlink=1&nd=120021832&page=1&rdk=1#I0
- 74 Галеев, В. Б. Потери нефтепродуктов от испарения и борьба с ними. / В.Б. Галеев – М.: ЦНИИТЭМС, 1970. – 54 с.
- 75 Щепин, С. Л. Улавливание паров бензина из резервуаров с использованием жидкостно-газовых эжекторов: дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19/ Щепин Сергей Леонидович – Уфа, 2007. – 145 с.
- 76 Кулагин, А.В. Прогнозирование и сокращение потерь бензинов от испарения из горизонтальных подземных резервуаров АЗС: дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19/ Кулагин Андрей Владимирович. – Уфа, 2003. - 163 с.
- 77 Коршак, А. А. Результаты промышленных испытаний конденсационной

установки рекуперации паров на морском Нефтетерминале / А. А. Коршак, М. Т. Гайсин, А. А. Коршак // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – № 4(144). – С. 85-98. – DOI 10.17122/ntj-oil-2023-4-85-98.

- 78 Пат. 2520043 С2 Российская федерация МПК В65D 88/36 Устройство для ограничения испарения нефтепродуктов при длительном хранении / Гогин Д. Ю., Уланов В.Л., Уланин С. Е., Астафьев С.Н., Бакланов К.В. заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение научно-исследовательский институт проблем хранения Федерального агентства по государственным резервам, № 2012132669/12; заявл. 31.07.2012; опубл. 20.06.2014, бюл. №17. – 7с. : ил.
- 79 Пат. № 2256594 С2 Российская Федерация, МПК В65D 88/00, В65D 88/34, Е04Н 7/02. Резервуар для хранения нефтепродуктов : заявл. 07.05.2003 : опубл. 20.07.2005 / А. Г. Гумеров, В. Г. Карамышев, А. М. Акбердин [и др.] ; заявитель и патентообладатель: Государственное унитарное предприятие "Институт проблем транспорта энергоресурсов, №2003113470/12, заявл. 07.05.2003; опубл.: 10.05.2005. бюл. №20. – 4с. : ил.
- 80 Пат. 2502660 С1 Российская Федерация, МПК В65D 88/34. Резервуар для хранения жидких углеводородов / В. И. Паутов, М. М. Старостин; заявитель и патентообладатель: В. И. Паутов, М. М. Старостин № 2012149061/12 : заявл. 20.11.2012; опубл. 27.12.2013. бюл. №20. – 4с. : ил.
- 81 Уиггинс, Дж. Потери нефти и нефтяных продуктов от испарения при хранении и транспорте. М.-Л.: Изд. Совета нефт. промышленности, 1924. 134с.
- 82 Рыбаков, Ю.Н. Прогнозирование кинетики потерь топлива при хранении в полимерных резервуарах / Ю. Н. Рыбаков, С. Н. Волгин, С. В. Ларионов, А. В. Дедов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 142-146. DOI: 10.28999/2541-9595-

2018-8-2-142-146.

- 83 Гареев, М. М. Оценка безопасности эксплуатации резервуарного парка нефтеперекачивающих станций при использовании схемы "через резервуары" с учетом явления перетока / М. М. Гареев, Р. Р. Габдинуров // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2020. – № 3. – С. 54-63. – DOI 10.24411/0131-4270-2020-10310.
- 84 Гареев, М. М. Возможность образования предельно-допустимого вакуума в газовом пространстве переключаемых резервуаров с учетом явления перетока жидкости / М. М. Гареев, Р. М. Гареев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2010. – № 1. – С. 22-26.
- 85 Гареев, Р.М. Оценка возможности образования предельно-допустимого избыточного давления в газовом пространстве в процессе переключения резервуаров. / Тез. докл. 62-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. С. 30-32.
- 86 Хафизова И.С., Гареев М.М. Новая методика расчета дыхательного оборудования резервуаров с учетом явления перетока во время переключения / Мат. XI Межд. науч.-практ. конф. «Трубопроводный транспорт – 2016», Уфа: Изд-ва УГНТУ, 2016. С.160-161.
- 87 Габдинуров, Р. Р. Оценка влияния испаряемости нефти и нефтепродуктов на образование предельно допустимого избыточного давления в газовом пространстве в процессе переключения резервуаров / Р. Р. Габдинуров, М. М. Гареев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2020. – № 2. – С. 5-11. – DOI 10.24411/0131-4270-2020-10201.
- 88 Тугунов, П.И. Типовые расчёты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов. учеб. пособие для ВУЗов, П.И. Тугунов, В.Ф. Новосёлов, А.А. Коршак, А.М. Шаммазов. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2002. – 658 с.
- 89 Альтшуль, А.Д. Гидравлика и Аэродинамика / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев.

– М.: Изд.-во литературы по строительству, 1965. 276 с.

- 90 Львовский, Е.Н., Статические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие для ВТУЗов. / Е.Н. Львовский. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк.:1988. – 239 с.
- 91 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616646 Российская Федерация. Расчёт производительности откачки/закачки в резервуары типа РВС с учетом перетока при переключении задвижек : № 2021615397 : заявл. 12.04.2021 : опубл. 23.04.2021 / Р. Р. Габдинуров, М. М. Гареев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».
- 92 Ruslan Gabdinurov, Mursalim Gareev; Assessment of filling rate and maximum allowable pressure formation in the gas space of tank taking into account crossflow during tanks switching. AIP Conf. Proc. 6 October 2023; 2833 (1): 020001. <https://doi.org/10.1063/5.0151678>
- 93 Габдинуров, Р. Р. Программное моделирование процесса перетока при переключении резервуаров / Р. Р. Габдинуров, М. М. Гареев // Трубопроводный транспорт - 2021 : Тезисы докладов XVI Международной учебно-научно-практической конференции, Уфа, 17–18 ноября 2021 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2021. – С. 44-46.
- 94 Пат. 177797U1, Российская Федерация, МПК F16K 11/10 (2006.01), F16K 15/03 (2006.01), F16K 5/06 (2006.01), Комбинированный шаровой кран-клапан / Глодрыга А.В.; заявитель и патентообладатель Глодрыга А.В.; заявл. 16.05.2017, опубл. 13.03.2018 Бюл. № 8.
- 95 Габдинуров, Р. Р. Универсальный способ сокращения потерь нефти нефтепродуктов от испарения / Р. Р. Габдинуров, М. А. Иляева // Нефтегазовый терминал : Сборник научных трудов международной научно-

технической конференции магистрантов им. профессора Н.А. Малюшина, Тюмень, 10 марта 2018 года / Под общей редакцией М.А. Александрова. Том Выпуск 14. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2018. – С. 97-100.

- 96 Патент на полезную модель № 202016 U1 Российская Федерация, МПК В65D 88/54, В65D 90/00. емкость для хранения нефти и нефтепродуктов : № 2020133543 : заявл. 12.10.2020 : опубл. 27.01.2021 / Р. Р. Габдинуров, М. М. Гареев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский государственный нефтяной технический университет".
- 97 Габдинуров, Р.Р. Сокращение потерь от испарений при эксплуатации резервуаров и транспортных емкостей / Р.Р. Габдинуров, М.А. Иляева // Материалы 69-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных УГНТУ. В 2т./ Уфа: – Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2018. – Том 1 С.555.
- 98 Габдинуров, Р. Р. Применение мягких оболочек внутри резервуара для предотвращения потерь от испарений нефти и нефтепродуктов / Р. Р. Габдинуров, М. М. Гареев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2021. – № 4. – С. 39-44. – DOI 10.24412/0131-4270-2021-4-39-44.
- 99 Габдинуров, Р. Р. Предотвращение потерь от испарений жидких углеводородов путем применения мягких оболочек внутри резервуара / Р. Р. Габдинуров, М. М. Гареев // Трубопроводный транспорт - 2021 : Тезисы докладов XVI Международной учебно-научно-практической конференции, Уфа, 17–18 ноября 2021 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2021. – С. 42-44.
- 100 Ермаков С. М. Математическая теория планирования эксперимента. — М.: Наука, 1983. — 392 с.

- 101 ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. [Электронный ресурс] URL: <https://www.expertnk.ru/docs/libs/gost-r-8.736-2011.pdf> (дата обращения: 22.03.2022)
- 102 ГОСТ 17032-2010 Резервуары стальные горизонтальные для нефтепродуктов. Технические условия. [Электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-17032-2010> (дата обращения: 22.03.2022)
- 103 Габдинуров, Р.Р. Методика определения количества конденсата в полости атмосферной камеры / Р. Р. Габдинуров, М. М. Гареев // Трубопроводный транспорт - 2020 : Тезисы докладов XV Международной учебно-научно-практической конференции, Уфа, 18–19 ноября 2020 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2020. – С. 29-30.
- 104 Рыбаков, Ю.Н. Эластичные резервуары для нефтепродуктов / Ю.Н. Рыбаков, Н. Ванчугов // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2011. – № 4. – С. 114-116
- 105 Пат. 2304553 С1 Российская Федерация, МПК В65D 88/16, В65D 88/22. мобильный эластичный резервуар для нефтепродуктов : № 2006111348/11 : заявл. 07.04.2006 : опубл. 20.08.2007 / Ю. Н. Рыбаков, О. Д. Харламова, М. Д. Абрамов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие "25 Государственный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации (по применению топлив, масел, смазок и специальных жидкостей - ГосНИИ по химмотологии)", Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственная Фирма "Политехника". Бюл. № 23 19с. ил.
- 106 Рыбаков, Ю. Н. Оценка долговечности и прогнозирование остаточного ресурса технических средств полевого склада горючего ПСГ-600 / Ю. Н. Рыбаков, Р. И. Кюннап, С. И. Чириков // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2016. –

№ 225(3). – С. 39-44.

- 107 Рыбаков, Ю.Н. Оценка эффективности технологий модификации полимерных материалов для технических средств нефтепродуктообеспечения / Ю. Н. Рыбаков, С. И. Чириков, А. В. Дедов, С. В. Ларионов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – Т. 7, № 3. – С. 58-65.
- 108 Рыбаков, Ю. Н. Влияние полимерного резервуара на качество топлива при хранении / Ю. Н. Рыбаков, Д. В. Колотилин, А. В. Дедов // Пластические массы. – 2017. – № 11-12. – С. 58-60.
- 109 Рыбаков, Ю. Н. Проницаемость полимерных материалов для технических средств хранения нефтепродуктов / Ю. Н. Рыбаков, А. В. Дедов, С. В. Ларионов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – Т. 9, № 4. – С. 440-443. – DOI 10.28999/2541-9595-2019-9-4-440-443
- 110 Рыбаков, Ю. Н. Исследование проницаемости фторированного полиэтилена высокого давления для складов временного хранения топлива / Ю. Н. Рыбаков, А. В. Дедов, Р. И. Кюннап, С. В. Ларионов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 65-69. – DOI: 10.28999/2541-9595-2021-11-1-65-69.
- 111 Колесников, А. А. Разработка методики оценки истирания полимерных материалов для средств хранения и транспортирования нефтепродуктов: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.11 / Колесников Александр Алексеевич. – М., 2024. – 165 с.
- 112 Габдинуров, Р. Р. Определение толщины материалов мягкой оболочки для сокращения потерь от испарений в нефтяных резервуарах / Р. Р. Габдинуров, М. М. Гареев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2024. – № 5-6. – С. 53-57. – DOI 10.24412/0131-4270-2024-5-6-53-57.
- 113 Писаренко, Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко,

- А.П. Яковлев, В.В. Матвеев; Отв. ред. Писаренко Г.С. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
- 114 Барвинский, И. А. Справочник по литыеым термопластичным материалам. / И. А. Барвинский, И. Е. Барвинская [Электронный ресурс] // Барвинский И.А., Барвинская И.Е. 2000-2020. – URL: <http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials.htm> (дата обращения: 26.07.2024).
- 115 Саченков, А.А. Цикл лекций по теории пластин и оболочек: учеб. пособие / А.А. Саченков. – Казань: Казан. ун-т, 2018. – 136 с.
- 116 Черных, К.Ф. Нелинейная теория упругости в машиностроительных расчетах / К.Ф. Черных. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 336 с., ил.
- 117 Григолюк, Э.И. Устойчивость оболочек / Э.И. Григолюк, В.В. Кабанов. – М.:Наука, 1978. – 360 с.
- 118 Габдинуров, Р.Р. Определение толщины мягкой оболочки для сокращения потерь от испарений в резервуарах // Материалы 75-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. В 2 т. / отв. ред. И.Г. Ибрагимов. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ» Том.1 С. 237, 2024.
- 119 ГОСТР 54927— 2012 Лист полимерный композитный специального назначения. Общие технические требования М. Стандартиформ 2014
- 120 Габдинуров Р.Р., Гареев М.М. Технологии монтажа и эксплуатации мягких оболочек в нефтяных резервуарах // Трубопроводный транспорт– 2023: тезисы докладов XVIII Международной научно-практической конференции / редкол: Р.Н. Бахтизин, С.М. Султанмагомедов и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2023.– 506 с. С.52-53.
- 121 Сегмент круга. [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сегмент_круга (дата обращения: 22.10.2024)
- 122 Войтковский, К.Ф. Механические свойства льда / К.Ф. Войтковский ; Акад. наук СССР, Сев.-Вост. отд-ние Ин-та мерзлотоведения им. В.А. Обручева М.:

Изд-во АН СССР, 1960. - 100с.

- 123 Борьба с отложениями парафина/под ред. Г.А. Бабаляна.-М.:Недра,1965.340с.
- 124 Ключевая ставка банка России. [Электронный ресурс] URL: https://cbr.ru/hd_base/KeyRate/ (дата обращения: 29.01.2025)
- 125 Нормы естественной убыли нефтепродуктов при хранении. (с изменениями на 14 сентября 2023 года). [Электронный ресурс]: Утверждены приказом Минэнерго России от 16 апреля 2018 года N 281 URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minenergo-rossii-ot-16042018-n-281-ob-utverzhdanii/> (дата обращения: 16.05.2024)
- 126 Об утверждении ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду в 2025 году [Распоряжение правительства Российской Федерации от 10 июля 2025 года № 1852-р, Электронный ресурс]: URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202507110043?index=1> (дата обращения: 16.09.2025)
- 127 Габдинуров, Р. Р. Область применения гибких оболочек в нефтяных резервуарах / Р. Р. Габдинуров // Трубопроводный транспорт - 2022, Уфа, 17–18 ноября 2022 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2022. – С. 68-69.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – ПРОГРАММНЫЙ КОД

А.1 Исходный код расчёта производительности закачки в резервуары типа РВС с учетом перетока при переключении задвижек

```

var
b:array [1..45] of real;
ly,Re,ly2:array [1..3,1..2] of real;
kotn,d,l,ksi,F:array [1..3] of real;
q1,q2,b1,b2,a,h,Ps,cs:array [1..2] of real;
bsr: string;
p,qmt,pkd,pkv,gamma,dH,Dr,Fr,kabs,Re1,Re2,nu,m,max,c,dksi,dksi3,qkl,hst,vgvs,
dp,pa,alpha,fvpvg,isp,Pr,temp,mpvs,Popvs,ny,my,tnk,am,bm,dm,sc,csr,dpi,ktpr,k
tz,frre,wx,dpat,aisp,jisp,produkt,ddpat,kdpat: real;
j,z,i,tv,t,k,dt,kc: integer;
Begin
Writeln('Считывание файла');
i:=1;
foreach var s in ReadAllLines('id.txt') do begin
Writeln(s);
j:=1;
bsr:='';
k:=0;
while (s[j]>='0') and (s[j]<='9') or (s[j]='.') do begin
if s[j]='.' then
k:=j else
bsr:=bsr+s[j];
j:=j+1;
end;
Val(bsr,p,z);
if z=1 then writeln('Error') else
// Writeln('число в введенном тексте ',p);
if k=0 then
b[i]:=p else
b[i]:=p/exp(ln(10)*(j-k-1));
i:=i+1;
end;
qmt:=b[1]/3600;
pkd:=b[2];
pkv:=b[3];
d[1]:=b[4]/1000;
d[2]:=b[5]/1000;
d[3]:=b[6]/1000;
l[1]:=b[7];
l[2]:=b[8];
l[3]:=b[9];
ksi[1]:=b[10];
ksi[2]:=b[11];
ksi[3]:=b[12];
gamma:=b[13];
h[1]:=b[14];
kabs:=b[15]/1000;
nu:=b[16]/1000000;
tv:=round(b[17]);
h[2]:=b[18];
Dr:=b[19];
Fr:=pi*sqr(Dr)/4;
k:=round(b[20]);
qkl:=b[21]/3600;
hst:=b[22];

```

```

pa:=b[23];
isp:=b[24];
Pr:=b[25];
temp:=b[26];
tnk:=b[27];
am:=-b[28];
bm:=b[29];
dpat:=b[30]/1000;
produkt:=b[31];
ddpat:=b[32];
kdpatt:=b[33];
dt:=round(b[34]);
p:=pkd+pa;
vgvs:=pi*sqr(Dr)/4*(hst-h[2]);
if pkd>0 then
alpha:=qkl/sqrt(pkd) else
alpha:=0;
//Writeln('vgvs=',vgvs,'Pa');
My:=0.0043*exp(ln(Tnk-61)*1.7);
dm:=am+bm*temp;
for i:=1 to 2 do begin
if produkt=0 then begin
fvpvg:=1.41-0.25*exp(ln((hst-h[i])/h[i])*0.37);
Ps[i]:=1.22*Pr*exp(-0.034*(311-temp))*fvpvg; end
else begin
fvpvg:=1.70-0.35*sqrt((hst-h[i])/h[i]);
Ps[i]:=1.22*Pr*exp(-0.025*(311-temp))*fvpvg;
end;
Cs[i]:=Ps[i]/P;
end;
dpi:=(Cs[1]-Cs[2])/(1-Cs[1]);
Csr:=(Cs[2]+Cs[1])/2;
Mpvvs:=My*Csr+29*(1-Csr);
Popvs:=P*Mpvvs/8314/temp;
Ny:=0.000001/(1/(0.1*temp-14.1)+Csr/(0.0225*temp-3.61));
Sc:=Ny*3600/dm;
if produkt=0 then
ktpr:=0.00217*exp(ln(dpi)*0.403)*exp(ln(sc)*0.0932) else
ktpr:=3.065/100000000000*exp(ln(dpi)*0.303)*exp(ln(sc)*3.44)*exp(ln(gamma/100
0-0.7)*(-8.42));
for i:=1 to 3 do begin
kotn[i]:=kabs/d[i];
Rel:=17.5/kotn[i];
Re2:=560/kotn[i];
for j:=1 to 2 do
ly2[i,j]:=0;
F[i]:=pi*sqr(d[i])/4;
end;
dksi:=ksi[2];
for t:=1 to tv*k-1+dt do begin
if t<=tv then
dksi3:=ksi[3]+54048*exp((-2.371)*ln(t/(tv)*100))-0.978;
if t>=tv*k-tv+dt then
dksi:=ksi[2]+54048*exp(-2.371*ln(100*(tv*k+dt-t)/(tv)))-0.978;
//Writeln('dksi=',dksi,' dksi3=',dksi3);
dH:=h[1]-h[2];
c:=0;
repeat
m:=0;
c:=c+1;
//Writeln('Вычисление коэффициентов гидравлического сопротивления в ',c,'
приближении');

```

```

i:=2;
for j:=1 to 3 do
  ly[j,i]:=ly2[j,i];
  b1[i]:=(ly[1,i]*l[1]/d[1]+(ly[2,i]*l[2]/d[2]+dksi)*sqr(F[1]/F[2])+ksi[1]+1)/sqr(F[1]);
  b2[i]:=(ly[3,i]*l[3]/d[3]+dksi3-1)/sqr(F[3]);
  a[i]:=b1[i]+b2[i];
  max:=sqrt((2*9.81*dH*a[i])/(a[i]*b2[i]-sqr(b2[i]))); //
  для проверки предельного значения
  //writeln('a[' ,i, ']=' ,a[i], ' b1[' ,i, ']=' ,b1[i], ' b2[' ,i, ']=' ,b2[i], '
  max=' ,max );
  if max<=qmt then
  begin
  Writeln('Введенное значение производительности нефтепровода превышает
  допустимое значение программы =' ,max*3600, ' , введите значение меньше');
  exit;
  end;
  q1[1]:=((b2[1]+sqrt(sqr(b2[1])-a[1]*(b2[1]-
  2*9.81*dH/sqr(qmt))+2*9.81*(pkd+pkv)/(gamma*sqr(qmt)))))/a[1]*qmt;
  q2[1]:=(-b1[1]+sqrt(sqr(b1[1])-a[1]*(b1[1]-
  2*9.81*dH/sqr(qmt))+2*9.81*(pkd+pkv)/(gamma*sqr(qmt)))))/a[1]*qmt;
  q1[2]:=(-b2[2]+sqrt(sqr(b2[2])-a[2]*(b2[2]-
  2*9.81*dH/sqr(qmt))+2*9.81*(pkd+pkv)/(gamma*sqr(qmt)))))/a[2]*qmt;
  q2[2]:=(b1[2]+sqrt(sqr(b1[2])-a[2]*(b1[2]-
  2*9.81*dH/sqr(qmt))+2*9.81*(pkd+pkv)/(gamma*sqr(qmt)))))/a[2]*qmt;
  //Writeln('q1[1]=' ,q1[1], ' q2[1]=' ,q2[1], ' q1[2]=' ,q1[2], ' q2[2]=' ,q2[2]);
  for i:=1 to 3 do begin
  j:=2;
  ly2[i,j]:=ly[i,j];
  if i<3 then
  Re[i,j]:=4*q1[j]/pi/d[i]/nu
  else
  Re[i,j]:=4*q2[j]/pi/d[i]/nu;
  //Writeln('Re[' ,i, ' ,j, ']=' ,Re[i,j]);
  if Re[i,j]<Re1 then ly2[i,j]:=0.3164/sqrt(sqrt(abs((Re[i,j])))) else
  if Re[i,j]<Re2 then ly2[i,j]:=0.11*sqrt(sqrt(abs(kotn[i]+68/Re[i,j]))) else
  if Re[i,j]>=Re2 then ly2[i,j]:=0.11*sqrt(sqrt(kotn[i])) else Writeln('Error');
  if m<(ABS(ly2[i,j]-ly[i,j])) then m:=(ABS(ly2[i,j]-ly[i,j]));
  //Write('ly2[' ,i, ' ,j, ']=' ,ly2[i,j], ' ' ly[' ,i, ' ,j, ']=' ,ly[i,j], ' m=' ,m, '
  ');
  //Writeln;
  end;
  //Writeln('Работает');
  until m<=0.01;
  h[1]:=((h[1]*pi*sqr(dr)/4-q1[2])/(pi*sqr(dr)/4));
  h[2]:=((h[2]*pi*sqr(dr)/4+q2[2])/(pi*sqr(dr)/4));
  vgvs:=pi*sqr(Dr)/4*(hst-h[2]);
  //Испарения:
  if isp>0 then begin
  wx:=q2[2]/(pi*sqr(dpat)/4)/(1+pi*sqr(Dr)*h[2]/(4*q2[2]*3600));
  frre:=wx*sqr(wx)/9.81/ny;
  if produkt=0 then
  ktz:=ktpr*(1+1.34*(exp(ln(sc)*1.327))*(exp(ln(dpi)*(-
  0.655)))*(exp(ln(frre)*0.087))) else
  ktz:=ktpr*(1+2*1000000*(exp(ln(dpi)*(-0.45)))*(exp(ln(sc)*-
  2.84))*exp(ln(gamma/1000-0.7)*(7.25))*(exp(ln(frre)*0.182)));
  aisp:=ktz*dm*exp(ln(9.81*My/sqr(ny)/mpvs)*(1/3))/3600;
  //writeln(aisp, ' ',Fr, ' ', aisp*Fr);
  jisp:=aisp*Popvs;
  //writeln('t=' ,t, ' ny=' ,ny, ' dm=' ,dm, ' ktpr=' ,ktpr, ' sc=' ,sc, ' frre=' ,frre, '
  dpi=' ,dpi, ' ktz=' ,ktz, ' aisp=' ,aisp, ' jisp=' ,jisp);
  end

```

```

    else aisp:=0;
  if alpha>0 then begin
    if ((-alpha*sqrt(p-pa)+aisp*Fr)/(vgvs-(alpha*sqrt(p-pa)-aisp*Fr))+(q2[2]-
    Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs-(q2[2]-Popvs/gamma*aisp*Fr)))>0 ) then begin
      //Writeln(q2[2], ' ', qkl);
      dP:=P*(-alpha*sqrt(p-pa)+aisp*Fr)/(vgvs-(alpha*sqrt(p-pa)-aisp*Fr))+(q2[2]-
      Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs-(q2[2]-Popvs/gamma*aisp*Fr));
      P:=p+dp;
    end
    else if (P>pa+pkd) then begin
      //dP:=(q2[2]/(vgvs-q2[2])-qkl/(vgvs-qkl))*p;
      dP:=P*(-alpha*sqrt(p-pa)+aisp*Fr)/(vgvs-(alpha*sqrt(p-pa)-aisp*Fr))+(q2[2]-
      Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs-(q2[2]-Popvs/gamma*aisp*Fr));
      p:=p+dp;
    end;
  end else
    if ((q2[2]-Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(Popvs/gamma*aisp*Fr-q2[2]))-(qkl-
    aisp*Fr)/(vgvs-qkl+aisp*Fr))*p>0 then begin
      dP:=(q2[2]-Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(Popvs/gamma*aisp*Fr-q2[2]))-(qkl-
      aisp*Fr)/(vgvs-qkl+aisp*Fr))*p;
      P:=p+dp;
    end
    else if P>pa then begin
      dP:=(q2[2]-Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(Popvs/gamma*aisp*Fr-q2[2]))-(qkl-
      aisp*Fr)/(vgvs-qkl+aisp*Fr))*p;
      P:=p+dp;
    end;
  Str(P:6:0,bsr);
  for i:=1 to length(bsr) do
    if bsr[i]='.' then bsr[i]:=', ';
  Writeln(bsr);
  //Writeln('Вмоментвремени ',t,'с, q1=',round(q1[2]*3600),'куб.м/ч
  q2=',round(q2[2]*3600),'куб.м/ч H1=',round(h[1]*100)/100,'м
  h2=',round(h[2]*100)/100,'м P=',round(P)/1000,'кПа');
end;
end.

```

А.2 Исходный код для вывода графика расчёта производительности закачки в резервуары типа РВС с учетом перетока при переключении задвигжек

```

uses
  GraphABC;
var
  b:array [1..45] of real;
  ly,Re,ly2:array [1..3,1..2] of real;
  kotn,d,l,ksi,F:array [1..3] of real;
  q1,q2,b1,b2,a,h,Ps,cs:array [1..2] of real;
  str: string;
  p,qmt,pkd,pkv,gamma,dH,Dr,kabs,Re1,Re2,nu,m,produkt,Fr,max,c,dksi,dksi3,qkl,h
  st,vgvs,dp,pa,alpha,fvpvg,isp,Pr,temp,mpvs,Popvs,ny,my,tnk,am,bm,dm,sc,csr,dp
  i,ktpr,ktz,frre,wx,dpat,aisp,jisp,pmax,qmax,ddpat,kdpat: real;
  j,z,i,tv,t,k,tpmax,tqmax,tpdop,dt:integer;
Begin
  i:=1;
  foreach var s in ReadAllLines('id.txt') do begin
    j:=1;
    str:='';

```

```

k:=0;
while (s[j]>='0') and (s[j]<='9') or (s[j]='.') do begin
if s[j]='.' then
k:=j else
str:=str+s[j];
j:=j+1;
end;
Val(str,p,z);
if z=1 then writeln('Error') else
// Writeln ('число в введенном тексте ',p);
if k=0 then
b[i]:=p else
b[i]:=p/exp(ln(10)*(j-k-1));
i:=i+1;
end;
qmt:=b[1]/3600;
pkd:=b[2];
pkv:=b[3];
d[1]:=b[4]/1000;
d[2]:=b[5]/1000;
d[3]:=b[6]/1000;
l[1]:=b[7];
l[2]:=b[8];
l[3]:=b[9];
ksi[1]:=b[10];
ksi[2]:=b[11];
ksi[3]:=b[12];
gamma:=b[13];
h[1]:=b[14];
kabs:=b[15]/1000;
nu:=b[16]/1000000;
tv:=round(b[17]);
h[2]:=b[18];
Dr:=b[19];
Fr:=pi*sqr(Dr)/4;
k:=round(b[20]);
qkl:=b[21]/3600;
hst:=b[22];
pa:=b[23];
isp:=b[24];
Pr:=b[25];
temp:=b[26];
tnk:=b[27];
am:=-b[28];
bm:=b[29];
dpat:=b[30]/1000;
produkt:=b[31];
ddpat:=b[32];
kdpat:=b[33];
dt:=round(b[34]);
p:=pkd+pa;
vgvs:=pi*sqr(Dr)/4*(hst-h[2]);
if pkd>0 then
alpha:=qkl/sqrt(pkd) else
alpha:=0;
My:=0.0043*exp(ln(Tnk-61)*1.7);
dm:=am+bm*temp;
for i:=1 to 2 do begin
if produkt=0 then begin
fvpvg:=1.41-0.25*exp(ln((hst-h[i])/h[i])*0.37);
Ps[i]:=1.22*Pr*exp(-0.034*(311-temp))*fvpvg; end
else begin

```

```

fvpvg:=1.70-0.35*sqrt((hst-h[i])/h[i]);
Ps[i]:=1.22*Pr*exp(-0.025*(311-temp))*fvpvg;
end;
Cs[i]:=Ps[i]/P;
end;
dpi:=(Cs[1]-Cs[2])/(1-Cs[1]);
Csr:=(Cs[2]+Cs[1])/2;
MpvS:=My*Csr+29*(1-Csr);
Popvs:=P*MpvS/8314/temp;
Ny:=0.000001/(1/(0.1*temp-14.1)+Csr/(0.0225*temp-3.61));
Sc:=Ny*3600/dm;
if produkt=0 then
ktpr:=0.00217*exp(ln(dpi)*0.403)*exp(ln(sc)*0.0932) else
ktpr:=3.065/100000000000*exp(ln(dpi)*0.303)*exp(ln(sc)*3.44)*exp(ln(gamma/100
0-0.7)*(-8.42));
for i:=1 to 3 do begin
kotn[i]:=kabs/d[i];
Re1:=17.5/kotn[i];
Re2:=560/kotn[i];
for j:=1 to 2 do
ly2[i,j]:=0;
F[i]:=pi*sqr(d[i])/4;
end;
dksi:=ksi[2];
qmax:=0;
pmax:=0;
InitWindow(0,0,1200,1200,clWhite); // задали нужные нам размеры и цвет окна
Coordinate.SetMathematic; // установили привычную ориентацию осей, как в
математике
Coordinate.SetTransform(100,500,0,1,1); //сместили центр координат в центр
экрана
for t:=1 to tv*k-1+dt do begin
if t<=tv then
dksi3:=ksi[3]+54048*exp((-2.371)*ln(t/(tv)*100))-0.978;
if t>=(tv*k+dt)-tv then
dksi:=ksi[2]+54048*exp(-2.371*ln(100*(tv*k+dt-t)/(tv)))-0.978;
//Writeln('dksi=',dksi,' dksi3=',dksi3);
dH:=h[1]-h[2];
c:=0;
repeat
m:=0;
c:=c+1;
//Writeln('Вычисление коэффициентов гидравлического сопротивления в ',c,'
приближении');
for i:=1 to 2 do begin
for j:=1 to 3 do
ly[j,i]:=ly2[j,i];
b1[i]:=(ly[1,i]*l[1]/d[1]+(ly[2,i]*l[2]/d[2]+dksi)*sqr(F[1]/F[2])+ksi[1]+1)/s
qr(F[1]);
b2[i]:=(ly[3,i]*l[3]/d[3]+dksi3-1)/sqr(F[3]);
a[i]:=b1[i]+b2[i];
max:=sqrt((2*9.81*dH*a[i])/(a[i]*b2[i]-sqr(b2[i])));
//writeln('a[' ,i ,']=',a[i], ' b1[' ,i ,']=',b1[i], ' b2[' ,i ,']=',b2[i], '
max=',max );
if max<=qmt then
begin
Writeln('Введенное значение производительности нефтепровода превышает
допустимое значение программы =' ,max*3600, ' , введите значение меньше');
exit;
end;
end;
end;

```

```

q1[1]:=(b2[1]+sqrt(sqr(b2[1])-a[1]*(b2[1]-
2*9.81*dH/sqr(qmt))+2*9.81*(pkd+pkv)/(gamma*sqr(qmt))))/a[1]*qmt;
q2[1]:=(-b1[1]+sqrt(sqr(b1[1])-a[1]*(b1[1]-
2*9.81*dH/sqr(qmt))+2*9.81*(pkd+pkv)/(gamma*sqr(qmt))))/a[1]*qmt;
q1[2]:=(-b2[2]+sqrt(sqr(b2[2])-a[2]*(b2[2]-
2*9.81*dH/sqr(qmt))+2*9.81*(pkd+pkv)/(gamma*sqr(qmt))))/a[2]*qmt;
q2[2]:=(b1[2]+sqrt(sqr(b1[2])-a[2]*(b1[2]-
2*9.81*dH/sqr(qmt))+2*9.81*(pkd+pkv)/(gamma*sqr(qmt))))/a[2]*qmt;
//Writeln('q1[1]=' ,q1[1], ' q2[1]=' ,q2[1], ' q1[2]=' ,q1[2], ' ' q2[2]=' ,q2[2]);
for i:=1 to 3 do begin
j:=2;
ly2[i,j]:=ly[i,j];
if i<3 then
Re[i,j]:=4*q1[j]/pi/d[i]/nu
else
Re[i,j]:=4*q2[j]/pi/d[i]/nu;
//Writeln('Re[' ,i ,',',j ,']=',Re[i,j]);
if Re[i,j]<Re1 then ly2[i,j]:=0.3164/sqrt(sqrt(abs((Re[i,j])))) else
if Re[i,j]<Re2 then ly2[i,j]:=0.11*sqrt(sqrt(abs(kotn[i]+68/Re[i,j]))) else
if Re[i,j]>=Re2 then ly2[i,j]:=0.11*sqrt(sqrt(kotn[i])) else Writeln('Error');
if m<(ABS(ly2[i,j]-ly[i,j])) then m:=(ABS(ly2[i,j]-ly[i,j]));
//Write('ly2[' ,i ,',',j ,']=',ly2[i,j], ' ' ly[' ,i ,',',j ,']=',ly[i,j], ' m=',m, '
');
//Writeln;
end;
until m<=0.01;
if qmax<q2[2] then begin
qmax:=q2[2];
tqmax:=t;
end;
h[1]:=(h[1]*pi*sqr(dr)/4-q1[2])/(pi*sqr(dr)/4);
h[2]:=(h[2]*pi*sqr(dr)/4+q2[2])/(pi*sqr(dr)/4);
vgvs:=pi*sqr(Dr)/4*(hst-h[2]);
//Испарения:
if isp>0 then begin
wx:=q2[2]/(pi*sqr(dpat)/4)/(1+pi*sqr(Dr)*h[2]/(4*q2[2]*3600));
frre:=wx*sqr(wx)/9.81/ny;
if produkt=0 then
ktz:=ktpr*(1+1.34*(exp(ln(sc)*1.327))*(exp(ln(dpi)*(-
0.655))))*(exp(ln(frre)*0.087)) else
ktz:=ktpr*(1+2*1000000*(exp(ln(dpi)*(-0.45)))*(exp(ln(sc)*-
2.84))*exp(ln(gamma/1000-0.7)*(7.25))*(exp(ln(frre)*0.182)));
aisp:=ktz*dm*exp(ln(9.81*My/sqr(ny)/mpvs)*(1/3))/3600;
jisp:=aisp*Popvs;
//writeln('t=',t, ' ny=',ny, ' dm=',dm, ' ktpr=',ktpr, ' sc=',sc, ' frre=',frre, '
dpi=',dpi, ' ktz=',ktz, ' aisp=',aisp, ' jisp=',jisp);
end
else aisp:=0;
if alpha>0 then begin
if (((-alpha*sqrt(p-pa)+aisp*Fr)/(vgvs-(alpha*sqrt(p-pa)-aisp*Fr)))+(q2[2]-
Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs-(q2[2]-Popvs/gamma*aisp*Fr)))>0 ) then begin
//Writeln(q2[2], ' ',qkl);
dP:=P*((-alpha*sqrt(p-pa)+aisp*Fr)/(vgvs-(alpha*sqrt(p-pa)-aisp*Fr)))+(q2[2]-
Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs-(q2[2]-Popvs/gamma*aisp*Fr));
P:=p+dp;
if pmax<p then begin
pmax:=p;
tpmax:=t;
end;
end
else if (P>pa+pkd) then begin
//dP:=(q2[2]/(vgvs-q2[2])-qkl/(vgvs-qkl))*p;

```

```

dP:=P*((-alpha*sqrt(p-pa)+aisp*Fr)/(vgvs-(alpha*sqrt(p-pa)-aisp*Fr))+(q2[2]-
Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs-(q2[2]-Popvs/gamma*aisp*Fr)));
p:=p+dp;
end;
end else
if ((q2[2]-Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(Popvs/gamma*aisp*Fr-q2[2]))-(qkl-
aisp*Fr)/(vgvs-qkl+aisp*Fr))*p>0 then begin
dP:=((q2[2]-Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(Popvs/gamma*aisp*Fr-q2[2]))-(qkl-
aisp*Fr)/(vgvs-qkl+aisp*Fr))*p;
P:=p+dp;
if pmax<p then begin
pmax:=p;
tpmax:=t;
end;
end else
if P>pa then begin
dP:=((q2[2]-Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(Popvs/gamma*aisp*Fr-q2[2]))-(qkl-
aisp*Fr)/(vgvs-qkl+aisp*Fr))*p;
P:=p+dp;
end;
Putpixel(t,round(q2[2]*120),clgreen);
Putpixel(t,-round(q1[2]*120),clblue);
Putpixel(t,round((p-pa)/15)-430,clDarkOrange);
if alpha>0 then
Putpixel(t,round(alpha*sqrt(p-pa)*120),clRed)
else
Putpixel(t,round(qkl*120),clRed);
end;
if (pmax-pa)/15>qmax*120 then
Line(0,0,0,round((pmax-pa)/15))
else
Line(0,0,0,round(qmax*120));
Line(0,0,t,0);
Line(round(tqmax),0,round(tqmax),round(qmax*120));
//Line(0,round(5000/15)-430,tv*k+dt,round(5000/15)-430);
Line(0,round(qmt*120),tv*k+dt,round(qmt*120));
Line(0,-430,tv*k+dt,-430);
Line(0,-430,0,-430+round((pmax-pa)/15));
Line(tpmax,-430,tpmax,-430+round((pmax-pa)/15));
str:='Qmt='+qmt*3600+'м.куб/ч';
Coordinate.SetStandard; // установили привычную ориентацию осей, как в
математике
Textout(-10,-round((pmax-pa)/15)+430,'P');
Textout(-10,-round(qmax*120),'Q');
Textout(-100,-round(qmt*120)-18,str);
TextOut(t,-round(q2[2]*120)-15,'Q2=Qmt');
TextOut(t,-round(q1[2]*120)-15,'Q1=0');
str:='Ризб='+round(pkd)+'Па';
TextOut(-85,-round((pkd)/15)+430,str);
str:='QкЛРВС№2='+qkl*3600+'м.куб/ч';
TextOut(-100,-round(qkl*120)-18,str);
str:='Q2max='+round(qmax*3600)+'м.куб/ч';
TextOut(tqmax-100,-round(qmax*120)-25,str);
str:='Рmax РВС№2 = '+round(pmax-pa)/1000+'кПа';
TextOut(tpmax,-round((pmax-pa)/15)+410,str);
TextOut(-50,410,'Ризб=0');
TextOut(-50,0,'Q2=0');
TextOut(0,5,'t=0');
str:=' '+tqmax;
Textout(tqmax-10,5,str);
str:='tv*k+dt+ ' c';
Textout(tv*k+dt,5,str);

```

```

str:=tpmax+' c';
Textout(tpmax,435,str);
//Textout(3,-round((5000)/15)+410,'Р предельное 5 кПа');
setfontsize(16);
//Textout(0,-round((qmax*120))-75,'Расчёт производительности закачки и
давления в резервуаре при переключении задвижек');
End.

```

А.3 Исходный код расчёта производительности откачки в резервуары типа РВС с учетом перетока при переключении задвижек

```

var
b:array [1..40] of real;
ly,Re,ly2:array [1..3,1..2] of real;
kotn,d,l,ksi,F:array [1..3] of real;
q1,q2,b1,b2,a,h,Ps,cs:array [1..2] of real;
bsr: string;
p,qmt,pkd,pkv,gamma,dH,Dr,kabs,Re1,Re2,nu,m,produkt,Fr,max,c,dksi,dksi3,qk1,h
st,vgvs,dp,pa,alpha,fvpvg,isp,Pr,temp,mpvs,Popvs,ny,my,tnk,am,bm,dm,sc,csr,dp
i,ktp,ktz,frre,wx,dp,at,aisp,jisp,pmax,qmax,ddpat,kdpat: real;
j,z,i,tv,t,k,tpmax,tqmax,tpdop,dt,st1,st2,stt1,stt2:integer;
Begin
i:=1;
foreach var s in ReadAllLines('id.txt') do begin
j:=1;
bsr:='';
k:=0;
while (s[j]>='0') and (s[j]<='9') or (s[j]='.') do begin
if s[j]='.' then
k:=j else
bsr:=bsr+s[j];
j:=j+1;
end;
Val(bsr,p,z);
if z=1 then writeln('Error') else
//Writeln('число в введенном тексте ',p);
if k=0 then
b[i]:=p else
b[i]:=p/exp(ln(10)*(j-k-1));
i:=i+1;
end;
qmt:=b[1]/3600;
pkd:=b[2];
pkv:=b[3];
d[1]:=b[4]/1000;
d[2]:=b[5]/1000;
d[3]:=b[6]/1000;
l[1]:=b[7];
l[2]:=b[8];
l[3]:=b[9];
ksi[1]:=b[10];
ksi[2]:=b[11];
ksi[3]:=b[12];
gamma:=b[13];
h[1]:=b[14];
kabs:=b[15]/1000;
nu:=b[16]/1000000;
tv:=round(b[17]);

```

```

h[2]:=b[18];
Dr:=b[19];
Fr:=pi*sqr(Dr)/4;
k:=round(b[20]);
qkl:=b[21]/3600;
hst:=b[22];
pa:=b[23];
isp:=b[24];
Pr:=b[25];
temp:=b[26];
tnk:=b[27];
am:=-b[28];
bm:=b[29];
dpat:=b[30]/1000;
produkt:=b[31];
ddpat:=b[32];
kdpatt:=b[33];
dt:=round(b[34]);
st1:=round(b[35]);
st2:=round(b[36]);
stt1:=round(b[37]);
stt2:=round(b[38]);
p:=pa-pkv;
vgvs:=pi*sqr(Dr)/4*(hst-h[1]);
if pkv>0 then
alpha:=qkl/sqrt(pkv) else
alpha:=0;
My:=0.0043*exp(ln(Tnk-61)*1.7);
dm:=am+bm*temp;
for i:=1 to 2 do begin
  if produkt=0 then begin
fvpvg:=1.41-0.25*exp(ln((hst-h[i])/h[i])*0.37);
Ps[i]:=1.22*Pr*exp(-0.034*(311-temp))*fvpvg; end
  else begin
fvpvg:=1.70-0.35*sqrt((hst-h[i])/h[i]);
Ps[i]:=1.22*Pr*exp(-0.025*(311-temp))*fvpvg;
end;
Cs[i]:=Ps[i]/P;
end;
dpi:=(Cs[1]-Cs[2])/(1-Cs[1]);
Csr:=(Cs[2]+Cs[1])/2;
Mpv:=My*Csr+29*(1-Csr);
Popvs:=P*Mpv/8314/temp;
Ny:=0.000001/(1/(0.1*temp-14.1)+Csr/(0.0225*temp-3.61));
Sc:=Ny*3600/dm;
if produkt=0 then
ktpr:=0.00217*exp(ln(dpi)*0.403)*exp(ln(sc)*0.0932)
else ktpr:=3.065/100000000000*exp(ln(dpi)*0.303)*exp(ln(sc)*3.44)*exp(ln(gamma
/1000-0.7)*(-8.42));
for i:=1 to 3 do begin
kotn[i]:=kabs/d[i];
Re1:=17.5/kotn[i];
Re2:=560/kotn[i];
for j:=1 to 2 do
ly2[i,j]:=0;
F[i]:=pi*sqr(d[i])/4;
end;
dksi:=ksi[2];
dksi3:=ksi[3];
qmax:=0;
pmax:=0;
z:=0;

```

```

for t:=1 to tv*k-1+dt+st1+st2 do begin
if t<=tv then
    if (t>=stt1) and (t<=st1+stt1) then
        z:=st1 else
        dksi:=ksi[2]+54048*exp((-2.371)*ln((t-z)/(tv)*100))-0.978;
    if t>(tv*k+dt-1) then
        b[1]:=1 else
        if t>=tv*k-tv+dt then
            dksi3:=ksi[3]+54048*exp(-2.371*ln(100*(tv*k+dt-t)/(tv)))-0.978;
        //Writeln('dksi=',dksi,' dksi3=',dksi3);
        dH:=h[1]-h[2];
        c:=0;
        repeat
            m:=0;
            c:=c+1;
            //Writeln('Вычисление коэффициентов гидравлического сопротивления в ',c,'
приближении');
            i:=1;
            for j:=1 to 3 do
                ly[j,i]:=ly2[j,i];
            b1[i]:=(ly[1,i]*l[1]/d[1]+(ly[2,i]*l[2]/d[2]+dksi)*sqr(F[1]/F[2])+ksi[1]+1)/s
qr(F[1]);
            b2[i]:=(ly[3,i]*l[3]/d[3]+dksi3-1)/sqr(F[3]);
            a[i]:=b1[i]+b2[i];
            max:=sqrt(abs((2*9.81*dH*a[i])/(a[i]*b2[i]-sqr(b2[i]))));
            //writeln('a['',i,'']=','a[i], ' b1['',i,'']=','b1[i], ' b2['',i,'']=','b2[i], '
max=',max );
            if max<=qmt then
                begin
                    Writeln('Введенное значение производительности нефтепровода превышает
допустимое значение программы =',max*3600,' , введите значение меньше');
                    exit;
                end;
            q1[1]:=((b2[1]+sqrt(sqr(b2[1])-a[1]*(b2[1]-
2*9.81*dH/sqr(qmt))+2*9.81*(pkd+pkv)/(gamma*sqr(qmt))))/a[1]*qmt;
            q2[1]:=(-b1[1]+sqrt(sqr(b1[1])-a[1]*(b1[1]-
2*9.81*dH/sqr(qmt))+2*9.81*(pkd+pkv)/(gamma*sqr(qmt))))/a[1]*qmt;
            //q1[1]:=q2[1]+qmt;
            //Writeln('q1[1]='',q1[1], ' q2[1]='',q2[1], ' q1[2]='',q1[2], ' ' q2[2]='',q2[2]);
            for i:=1 to 3 do begin
                j:=1;
                ly2[i,j]:=ly[i,j];
                if i<3 then
                    Re[i,j]:=4*q1[j]/pi/d[i]/nu
                else
                    Re[i,j]:=4*q2[j]/pi/d[i]/nu;
                //Writeln('Re['',i,'',''',j,'']=','Re[i,j]);
                if Re[i,j]<Re1 then ly2[i,j]:=0.3164/sqrt(sqrt(abs((Re[i,j])))) else
                if Re[i,j]<Re2 then ly2[i,j]:=0.11*sqrt(sqrt(abs(kotn[i]+68/Re[i,j]))) else
                if Re[i,j]>=Re2 then ly2[i,j]:=0.11*sqrt(sqrt(kotn[i])) else Writeln('Error');
                if m<(ABS(ly2[i,j]-ly[i,j])) then m:=(ABS(ly2[i,j]-ly[i,j]));
                //Write('ly2['',i,'',''',j,'']=','ly2[i,j], ' ' ly['',i,'',''',j,'']=','ly[i,j], ' m=',m, '
');
                //Writeln;
            end;
            until m<=0.01;
            if qmax<q1[1] then begin
                qmax:=q1[1];
                tqmax:=t;
            end;
            h[1]:=((h[1]*pi*sqr(dr)/4-q1[1])/(pi*sqr(dr)/4));
            h[2]:=((h[2]*pi*sqr(dr)/4+q2[1])/(pi*sqr(dr)/4));

```

```

vgvs:=pi*sqr(Dr)/4*(hst-h[1]);
//Испарения:
if isp>0 then begin
wx:=q1[1]/(pi*sqr(dpat)/4)/(1+pi*sqr(Dr)*h[2]/(4*q1[1]*3600));
//U=14.4*(q1[1]/(pi*sqr(ddpat/2)*kdpdpat))/(3.56+hst/2/(ddpat/2))
//dэ=0,44*hst/2*sqr(kdpdpat);
frre:=0.788*14.4*(q1[1]/(pi*sqr(ddpat/2)*kdpdpat))/(3.56+hst/2/(ddpat/2))*0.44*
hst/2*sqr(kdpdpat)/ny*sqr(kdpdpat);//длязакачки frre применяется вместо Реср
if produkt=0 then
ktz:=ktpr*(1+7.45/1000*(exp(ln(sc)*0.197))*(exp(ln(frre)*0.569))) else
ktz:=ktpr*(1+1.104*1000000*(exp(ln(dpi)*(-0.708))*(exp(ln(sc)*-
2.75))*(exp(ln(frre)*(-1.35)))));
aisp:=ktz*dm*exp(ln(9.81*My/sqr(ny)/mpvs)*(1/3))/3600;
jisp:=aisp*Popvs;
//writeln('t=',t,' ny=',ny,' dm=',dm,' ktpr=',ktpr,' sc=',sc,' frre=',frre,'
dpi=',dpi,' ktz=',ktz,' aisp=',aisp,' jisp=',jisp);
end
else aisp:=0;
if alpha>0 then begin
if ((alpha*sqr(abs(p-pa))+aisp*Fr)/(vgvs+(alpha*sqr(abs(p-pa))+aisp*Fr))-
(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)))<0 then begin
//writeln(q1[1],' ',qkl);
dP:=P*((alpha*sqr(abs(p-pa))+aisp*Fr)/(vgvs+(alpha*sqr(abs(p-
pa))+aisp*Fr))-
(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr))));
P:=p+dp;
if pmax>p then begin
pmax:=p;
tpmax:=t;
end;
end
else if (P<pa-pkv) then begin
//dP:=(q2[2]/(vgvs-q2[2])-qkl/(vgvs-qkl))*p;
dP:=P*((alpha*sqr(abs(p-pa))+aisp*Fr)/(vgvs+(alpha*sqr(abs(p-
pa))+aisp*Fr))-
(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr))));
p:=p+dp;
end;
end else
if ((qkl+aisp*Fr)/(vgvs+(qkl+aisp*Fr))-
(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)))<0 then
begin
dP:=(qkl+aisp*Fr)/(vgvs+(qkl+aisp*Fr))-
(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr))*p;
P:=p+dp;
if pmax<p then begin
pmax:=p;
tpmax:=t;
end;
end else
if P<pa then begin
dP:=(qkl+aisp*Fr)/(vgvs+(qkl+aisp*Fr))-
(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr))*p;
P:=p+dp;
end;
//writeln('Вмоментвремени ',t,' c 1=',Popvs,'
2=',(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+({}q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr));
//writeln('Вмоментвремени ',t,' c 1=',(qkl+aisp*Fr)/(vgvs+(qkl+aisp*Fr)),',
2=',(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)));
//writeln('t=',t,' q[1]=' ,q1[1], ' dP=',dP,' aisp=',aisp,'
aisp/3600*pi*sqr(dr)/4=',aisp/3600*pi*sqr(dr)/4);

```

```
//writeln('a['',1,']=',a[1], ' b1['',1,']=',b1[1], ' b2['',1,']=',b2[1], '
max=',max );
//Writeln('Вмоментвремени ',t,'с, q1=',round(q1[1]*3600),'куб.м/ч
q2=',round(q2[1]*3600),'куб.м/ч H1=',round(h[1]*100)/100,'м
h2=',round(h[2]*100)/100,'м P=',round(P-Pa),'Па');
Str(h[2]:6:2,bsr);
for i:=1 to length(bsr) do
  if bsr[i]='.' then bsr[i]:=', ';
Writeln(bsr);
end;
End.
```

А.4 Исходный код для вывода графика расчёта производительности откачки в резервуары типа РВС с учетом перетока при переключении задвижек

```
uses
GraphABC;
var
b:array [1..38] of real;
ly,Re,ly2:array [1..3,1..2] of real;
kotn,d,l,ksi,F:array [1..3] of real;
q1,q2,b1,b2,a,h,Ps,cs:array [1..2] of real;
str: string;
p,qmt,pkd,pkv,gamma,dH,Dr,kabs,Re1,Re2,nu,m,produkt,Fr,max,c,dksi,dksi3,qk1,h
st,vgvs,dp,pa,alpha,fvpvg,isp,Pr,temp,mpvs,Popvs,ny,my,tnk,am,bm,dm,sc,csr,dp
i,ktp,ktz,frre,wx,dpat,aisp,jisp,pmax,qmax,ddpat,kdpat: real;
j,z,i,tv,t,k,tpmax,tqmax,tpdop,dt,st1,st2,stt1,stt2:integer;
Begin
i:=1;
foreach var s in ReadAllLines('id.txt') do begin
j:=1;
str:='';
k:=0;
while (s[j]>='0') and (s[j]<='9') or (s[j]='.') do begin
if s[j]='.' then
k:=j else
str:=str+s[j];
j:=j+1;
end;
Val(str,p,z);
if z=1 then writeln('Error') else
// Writeln ('число в введенном тексте ',p);
if k=0 then
b[i]:=p else
b[i]:=p/exp(ln(10)*(j-k-1));
i:=i+1;
end;
qmt:=b[1]/3600;
pkd:=b[2];
pkv:=b[3];
d[1]:=b[4]/1000;
d[2]:=b[5]/1000;
d[3]:=b[6]/1000;
l[1]:=b[7];
l[2]:=b[8];
l[3]:=b[9];
ksi[1]:=b[10];
```

```

ksi[2]:=b[11];
ksi[3]:=b[12];
gamma:=b[13];
h[1]:=b[14];
kabs:=b[15]/1000;
nu:=b[16]/1000000;
tv:=round(b[17]);
h[2]:=b[18];
Dr:=b[19];
Fr:=pi*sqr(Dr)/4;
k:=round(b[20]);
qkl:=b[21]/3600;
hst:=b[22];
pa:=b[23];
isp:=b[24];
Pr:=b[25];
temp:=b[26];
tnk:=b[27];
am:=-b[28];
bm:=b[29];
dpat:=b[30]/1000;
produkt:=b[31];
ddpat:=b[32];
kdpat:=b[33];
dt:=round(b[34]);
st1:=round(b[35]);
st2:=round(b[36]);
stt1:=round(b[37]);
stt2:=round(b[38]);
p:=pa-pkv;
vgvs:=pi*sqr(Dr)/4*(hst-h[1]);
if pkv>0 then
alpha:=qkl/sqrt(pkv) else
alpha:=0;
My:=0.0043*exp(ln(Tnk-61)*1.7);
dm:=am+bm*temp;
for i:=1 to 2 do begin
  if produkt=0 then begin
fvpvg:=1.41-0.25*exp(ln((hst-h[i])/h[i])*0.37);
Ps[i]:=1.22*Pr*exp(-0.034*(311-temp))*fvpvg; end
  else begin
fvpvg:=1.70-0.35*sqrt((hst-h[i])/h[i]);
Ps[i]:=1.22*Pr*exp(-0.025*(311-temp))*fvpvg;
end;
Cs[i]:=Ps[i]/P;
end;
dpi:=(Cs[1]-Cs[2])/(1-Cs[1]);
Csr:=(Cs[2]+Cs[1])/2;
Mpvvs:=My*Csr+29*(1-Csr);
Popvs:=P*Mpvvs/8314/temp;
Ny:=0.000001/(1/(0.1*temp-14.1)+Csr/(0.0225*temp-3.61));
Sc:=Ny*3600/dm;
if produkt=0 then
ktpr:=0.00217*exp(ln(dpi)*0.403)*exp(ln(sc)*0.0932)
elsektpr:=3.065/1000000000000*exp(ln(dpi)*0.303)*exp(ln(sc)*3.44)*exp(ln(gamma
/1000-0.7)*(-8.42));
for i:=1 to 3 do begin
kotn[i]:=kabs/d[i];
Re1:=17.5/kotn[i];
Re2:=560/kotn[i];
for j:=1 to 2 do
ly2[i,j]:=0;

```

```

F[i]:=pi*sqr(d[i])/4;
end;
dksi3:=ksi[3];
dksi:=ksi[2];
qmax:=0;
pmax:=1000000;
z:=0;
InitWindow(0,0,1200,1000,clWhite); // задали нужные нам размеры и цвет окна
Coordinate.SetMathematic; // установили привычную ориентацию осей, как в
математике
Coordinate.SetTransform(100,500,0,1,1); //сместили центр координат в центр
экрана
for t:=1 to tv*k-1+dt+st1+st2 do begin
if t<=tv then
if (t>=stt1) and (t<=st1+stt1) then // условия остановки открывания задвижки
z:=st1 else // переменная для учета разности между степенью открытия и
временем простоя открытия, изначально = 0
dksi:=ksi[2]+54048*exp((-2.371)*ln((t-z)/(tv)*100))-0.978;
if t>(tv*k+dt-1) then
b[1]:=1 else
if t>=tv*k-tv+dt then
dksi3:=ksi[3]+54048*exp(-2.371*ln(100*(tv*k+dt-t)/(tv)))-0.978;
//Writeln('dksi=',dksi,' dksi3=',dksi3);
dH:=h[1]-h[2];
c:=0;
repeat
m:=0;
c:=c+1;
//Writeln('Вычисление коэффициентов гидравлического сопротивления в ',c,'
приближении');
for i:=1 to 2 do begin
for j:=1 to 3 do
ly[j,i]:=ly2[j,i];
b1[i]:=(ly[1,i]*l[1]/d[1]+(ly[2,i]*l[2]/d[2]+dksi)*sqr(F[1]/F[2])+ksi[1]+1)/s
qr(F[1]);
b2[i]:=(ly[3,i]*l[3]/d[3]+dksi3-1)/sqr(F[3]);
a[i]:=b1[i]+b2[i];
max:=sqrt((2*9.81*dH*a[i])/(a[i]*b2[i]-sqr(b2[i])));
//writeln('a[' ,i, ']=' ,a[i], ' b1[' ,i, ']=' ,b1[i], ' b2[' ,i, ']=' ,b2[i], '
max=' ,max );
if max<=qmt then
begin
Writeln('Введенное значение производительности нефтепровода превышает
допустимое значение программы =' ,max*3600, ' , введите значение меньше');
exit;
end;
end;
end;
//q1[1]:=((b2[1]+sqrt(sqr(b2[1])-a[1]*(b2[1]-
2*9.81*dH/sqr(qmt))+2*9.81*(pkd+pkv)/(gamma*sqr(qmt))))/a[1]*qmt;
//if t>(tv*k+dt-1) then
// q2[1]:=0 else
q2[1]:=(-b1[1]+sqrt(sqr(b1[1])-a[1]*(b1[1]-
2*9.81*dH/sqr(qmt)+2*9.81*(pkd+pkv)/(gamma*sqr(qmt))))/a[1]*qmt;
q1[1]:=q2[1]+qmt;
//Writeln('q1[1]=' ,q1[1], ' q2[1]=' ,q2[1], ' q1[2]=' ,q1[2], ' ' q2[2]=' ,q2[2]);
for i:=1 to 3 do begin
j:=1;
ly2[i,j]:=ly[i,j];
if i<3 then
Re[i,j]:=4*q1[j]/pi/d[i]/nu
else
Re[i,j]:=4*q2[j]/pi/d[i]/nu;

```

```

//Writeln('Re[' ,i ,',',j ,']=',Re[i,j]);
if Re[i,j]<Re1 then ly2[i,j]:=0.3164/sqrt(sqrt(abs((Re[i,j])))) else
if Re[i,j]<Re2 then ly2[i,j]:=0.11*sqrt(sqrt(abs(kotn[i]+68/Re[i,j])))) else
if Re[i,j]>=Re2 then ly2[i,j]:=0.11*sqrt(sqrt(kotn[i])) else Writeln('Error');
if m<(ABS(ly2[i,j]-ly[i,j])) then m:=(ABS(ly2[i,j]-ly[i,j]));
//Write('ly2[' ,i ,',',j ,']=',ly2[i,j], ' 'ly[' ,i ,',',j ,']=',ly[i,j], ' m=',m, '
');
//Writeln;
end;
until m<=0.01;
if qmax<q1[1] then begin
qmax:=q1[1];
tqmax:=t;
end;
h[1]:=(h[1]*pi*sqr(dr)/4-q1[1])/(pi*sqr(dr)/4);
h[2]:=(h[2]*pi*sqr(dr)/4+q2[1])/(pi*sqr(dr)/4);
vgvs:=pi*sqr(Dr)/4*(hst-h[1]);
//Испарения:
if isp>0 then begin
wx:=q1[1]/(pi*sqr(dpat)/4)/(1+pi*sqr(Dr)*h[2]/(4*q1[1]*3600));
//U=14.4*(q1[1]/(pi*sqr(ddpat/2)*kdpat))/(3.56+hst/2/(ddpat/2))
//dэ=0,44*hst/2*sqrt(kdpat);
frre:=0.788*14.4*(q1[1]/(pi*sqr(ddpat/2)*kdpat))/(3.56+hst/2/(ddpat/2))*0.44*
hst/2*sqrt(kdpat)/ny*sqrt(kdpat);//длязакачки frre применяетсявместо Rеср
if produkt=0 then
ktz:=ktpr*(1+7.45/1000*(exp(ln(sc)*0.197))*(exp(ln(frre)*0.569))) else
ktz:=ktpr*(1+1.104*1000000*(exp(ln(dpi)*(-0.708))*(exp(ln(sc)*-
2.75))*(exp(ln(frre)*(-1.35)))));
aisp:=ktz*dm*exp(ln(9.81*My/sqr(ny)/mpvs)*(1/3))/3600;
jisp:=aisp*Popvs;
//writeln('t=',t,' ny=',ny,' dm=',dm,' ktpr=',ktpr,' sc=',sc,' frre=',frre,'
dpi=',dpi,' ktz=',ktz,' aisp=',aisp,' jisp=',jisp);
end
else aisp:=0;
if alpha>0 then begin
if ((alpha*sqrt(abs(p-pa))+aisp*Fr)/(vgvs+(alpha*sqrt(abs(p-pa))+aisp*Fr))-
(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)))<0 ) then begin
//Writeln(q1[1], ' ',qkl);
dP:=P*((alpha*sqrt(abs(p-pa))+aisp*Fr)/(vgvs+(alpha*sqrt(abs(p-
pa))+aisp*Fr))-
(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr))));
P:=p+dp;
if pmax>p then begin
pmax:=p;
tpmax:=t;
end;
end
else if (P<pa-pkv) then begin
//dP:=(q2[2]/(vgvs-q2[2])-qkl/(vgvs-qkl))*p;
dP:=P*((alpha*sqrt(abs(p-pa))+aisp*Fr)/(vgvs+(alpha*sqrt(abs(p-
pa))+aisp*Fr))-
(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr))));
p:=p+dp;
end;
end else
if ((qkl+aisp*Fr)/(vgvs+(qkl+aisp*Fr))-
(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)))<0 ) then
begin
dP:=((qkl+aisp*Fr)/(vgvs+(qkl+aisp*Fr))-
(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)/(vgvs+(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr)))*p;
P:=p+dp;
if pmax>p then begin

```

```

pmax:=p;
  tpmax:=t;
end;
end else
  if P<pa then begin
dP:=( (qkl+aisp*Fr) / (vgvs+(qkl+aisp*Fr)) -
(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr) / (vgvs+(q1[1]+Popvs/gamma*aisp*Fr))) *p;
P:=p+dp;
end;
Putpixel(t,round(q2[1]*120)+100,clgreen);
Putpixel(t,round(-q1[1]*120+100),clblue);
//Putpixel(t,round((p-pa)/10)-70,clDarkOrange);
if alpha>0 then
Putpixel(t,round(-alpha*sqrt(abs(p-pa))*120+100),clRed)
else
Putpixel(t,round(-qkl*120+100),clRed);
end;
Line(0,round(qmt*120)+100,0,-round(qmax*120)+100);
//Line(0,-70,0,-round(abs(pmax-pa)/10)-70);
Line(0,100,t,100);
//Line(0,-70,t,-70);
Line(round(tqmax),100,round(tqmax),-round(qmax*120)+100);
//Line(round(tpmax),-70,round(tpmax),-round(abs(pmax-pa)/10)-70);
//Line(0,round(-500/10-70),tv*k+dt,round(-500/10-70));
Line(0,-round(qmt*120)+100,tv*k+dt,-round(qmt*120)+100);
str:='Q1=Qmt='+qmt*3600+'м.куб/ч';
Coordinate.SetStandard; // установили привычную ориентацию осей, как в
математике
Textout(-40,-110,'Q1=0');
Textout(-15,-round(qmt*120)-110,'Q');
Textout(-35,round(qmt*120)-110,'Qmt');
//Textout(-10,round(abs(pmax-pa)/10)+70,'P');
TextOut(t,-round(q2[1]*120)-15-100,'Q2=0');
TextOut(t,round(q1[1]*120)-15-100,str);
str:='Рвак'+round(pkv)+'Па';
//TextOut(-80,round((pkv)/10)+60,str);
str:='QклPBCN#1='+qkl*3600+'м.куб/ч';
TextOut(t,round(qkl*120)-18-100,str);
str:='Q1max='+round(qmax*3600)+'м.куб/ч';
TextOut(tqmax-100,round(qmax*120)-70,str);
str:='Pmax PBCN#1 = '+round(pmax-pa)+'Па';
//TextOut(tpmax,round(-(pmax-pa)/10+70),str);
//TextOut(-50,60,'Ризб=0');
TextOut(0,5,'t=0');
str:=' '+tqmax;
Textout(tqmax-10,5,str);
str:=tv*k+dt+stl+' c';
Textout(tv*k+dt+stl,5,str);
str:=tpmax+' c';
//Textout(tpmax,50,str);
//Textout(-100,round((500)/10)+55,'Рвак.пр. 500Па');
setfontsize(16);
Textout(0,-round((qmax*120))-300,'Расчёт производительности откачки и
давления в резервуаре при переключении задвижек');
End.

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – РАСЧЁТ В ПРОГРАММЕ ДЛЯ ЭВМ

Исходные данные для расчёта:

1. Производительность нефтепровода : 2661 м³/ч;
2. 1000 Па - настройка клапана давления;
3. 250 Па - настройка клапана вакуума;
4. 800 мм - диаметр трубопровода 11;
5. 700 мм - диаметр трубопровода 12;
6. 700 мм - диаметр трубопровода 2;
7. 65 м - длина трубопровода 11;
8. 10 м - длина трубопровода 12;
9. 10 м - длина трубопровода 2;
10. 0,95 сумма местных сопротивлений трубопровода 11;
11. 2 сумма местных сопротивлений трубопровода 12
12. 1,5 сумма местных сопротивлений трубопровода 2
13. 850 кг/м³ объемный вес нефти;
14. 17 м Уровень налива в полном резервуаре
15. 0,4 мм абсолютная шорховатость труб
16. 36 сСт кинематическая вязкость нефти
17. 360 с время открытия/закрытия задвижек
18. 2 м Уровень налива в порожнем резервуаре
19. 28,5 м Диаметр резервуаров
20. переключение задвижек происходит последовательно
21. 6000 м³/ч максимальная производительность дыхательной арматуры
22. 18,0 м высота стенки резервуара
23. 101325 Па - атмосферное давление
24. Учитывать испарения: да
25. 30000 Па давление насыщенных паров нефти по Рейду
26. 298 К - Температура окружающая

27. 320 К - Температура начала кипения продукта
28. -0,0111 м.кв/ч коэффициент αm , для расчёта коэффициента диффузии паров
29. 0,000139 м.кв/ч*град коэффициент βm , для расчёта коэффициента диффузии паров
30. 700 мм - диаметр ПРП
31. Вид продукта: Нефть
32. 200 мм диаметр дыхательного патрубка;
33. 3 количество дыхательных патрубков
34. 0 с Задержка времени закрытия задвижки
35. 0 с Продолжительность Остановки открытия задвижки 1
36. 0 с Продолжительность Остановки открытия задвижки 2
37. 0 с Время Остановки открытия задвижки 1
38. 0 с Время Остановки открытия задвижки 2

Исходные данные для откачки те же что и для закачки, за исключением учета испаряемости, испарения продукта при откачке не учитываются.

Таблица Б.1 – Расчёт переключения закачки/откачки в программе для ЭВМ

t, с	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
	закачка					откачка				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-2640	21	17,00	2,00	1000	22	-2640	17,00	2,00	-250
2	-2614	47	17,00	2,00	1000	51	-2613	17,00	2,00	-250
3	-2585	76	17,00	2,00	1000	82	-2583	17,00	2,00	-250
4	-2554	107	17,00	2,00	1000	115	-2552	17,00	2,00	-250
5	-2522	139	17,01	2,00	1000	150	-2518	17,00	1,99	-250
6	-2488	173	17,01	2,00	1000	186	-2484	17,00	1,99	-250
7	-2453	208	17,01	2,00	1000	224	-2448	17,00	1,99	-250
8	-2417	244	17,01	2,00	1000	262	-2412	17,00	1,99	-250
9	-2381	280	17,01	2,00	1000	302	-2375	17,00	1,99	-250
10	-2343	318	17,01	2,00	1000	342	-2337	17,00	1,99	-250
11	-2305	356	17,01	2,00	1000	383	-2298	17,00	1,99	-250
12	-2266	395	17,01	2,00	1000	424	-2258	17,00	1,99	-250
13	-2226	435	17,01	2,00	1000	467	-2218	17,00	1,99	-250
14	-2186	475	17,01	2,00	1000	509	-2177	17,00	1,99	-250

продолжение таблицы Б.1

t, c	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	закачка					откачка				
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
15	-2145	516	17,02	2,00	1000	553	-2136	17,00	1,98	-250
16	-2103	558	17,02	2,00	1000	597	-2094	17,00	1,98	-250
17	-2061	600	17,02	2,00	1000	641	-2052	17,00	1,98	-250
18	-2019	642	17,02	2,00	1000	686	-2010	17,00	1,98	-250
19	-1976	685	17,02	2,00	1000	731	-1967	17,00	1,98	-250
20	-1932	729	17,02	2,00	1000	777	-1923	17,00	1,98	-250
21	-1888	773	17,02	2,00	1000	823	-1879	17,00	1,98	-250
22	-1843	818	17,02	2,00	1000	870	-1835	17,00	1,98	-250
23	-1799	862	17,02	2,00	1000	917	-1790	17,00	1,98	-250
24	-1753	908	17,02	2,00	1000	964	-1746	17,00	1,98	-250
25	-1708	953	17,02	2,00	1000	1012	-1700	16,99	1,98	-250
26	-1661	1000	17,02	2,01	1000	1060	-1655	16,99	1,98	-250
27	-1615	1046	17,03	2,01	1000	1108	-1609	16,99	1,97	-250
28	-1568	1093	17,03	2,01	1000	1157	-1563	16,99	1,97	-250
29	-1521	1140	17,03	2,01	1000	1205	-1517	16,99	1,97	-250
30	-1473	1188	17,03	2,01	1000	1254	-1470	16,99	1,97	-250
31	-1425	1236	17,03	2,01	1000	1304	-1423	16,99	1,97	-250
32	-1377	1284	17,03	2,01	1000	1353	-1376	16,99	1,97	-250
33	-1329	1332	17,03	2,01	1000	1403	-1329	16,99	1,97	-250
34	-1280	1381	17,03	2,01	1000	1453	-1281	16,99	1,97	-250
35	-1231	1430	17,03	2,01	1000	1503	-1234	16,99	1,97	-250
36	-1181	1480	17,03	2,01	1000	1554	-1186	16,99	1,97	-250
37	-1132	1529	17,03	2,01	1000	1604	-1138	16,99	1,97	-250
38	-1082	1579	17,03	2,01	1000	1655	-1089	16,99	1,97	-250
39	-1031	1630	17,03	2,01	1000	1706	-1041	16,99	1,97	-250
40	-981	1680	17,03	2,01	1000	1757	-993	16,99	1,97	-250
41	-930	1731	17,03	2,01	1000	1808	-944	16,98	1,97	-250
42	-879	1782	17,03	2,02	1000	1860	-895	16,98	1,97	-250
43	-828	1833	17,03	2,02	1000	1911	-846	16,98	1,97	-250
44	-777	1884	17,03	2,02	1000	1963	-797	16,98	1,97	-250
45	-725	1936	17,03	2,02	1000	2015	-748	16,98	1,97	-250
46	-673	1988	17,03	2,02	1000	2067	-699	16,98	1,97	-250
47	-621	2040	17,04	2,02	1000	2118	-649	16,98	1,96	-250
48	-569	2092	17,04	2,02	1000	2171	-600	16,98	1,96	-250
49	-517	2144	17,04	2,02	1000	2223	-550	16,98	1,96	-250
50	-464	2197	17,04	2,02	1000	2275	-501	16,98	1,96	-250
51	-411	2250	17,04	2,02	1000	2327	-451	16,98	1,96	-250
52	-359	2302	17,04	2,02	1000	2379	-402	16,97	1,96	-250
53	-306	2355	17,04	2,03	1000	2432	-352	16,97	1,96	-250
54	-252	2409	17,04	2,03	1000	2484	-302	16,97	1,96	-250
55	-199	2462	17,04	2,03	1000	2536	-252	16,97	1,96	-250

продолжение таблицы Б.1

t, с	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
56	-146	2515	17,04	2,03	1000	2588	-203	16,97	1,96	-250
57	-92	2569	17,04	2,03	1000	2640	-154	16,97	1,96	-250
58	-38	2623	17,04	2,03	1000	2693	-104	16,97	1,96	-250
59	15	2676	17,04	2,03	1000	2745	-54	16,97	1,96	-250
60	69	2730	17,04	2,03	1000	2798	-4	16,97	1,96	-250
61	123	2784	17,04	2,03	1000	2850	46	16,96	1,96	-250
62	177	2838	17,04	2,04	1000	2903	96	16,96	1,96	-250
63	231	2892	17,04	2,04	1000	2955	145	16,96	1,96	-250
64	285	2946	17,04	2,04	1000	3007	195	16,96	1,96	-250
65	339	3000	17,04	2,04	1000	3060	245	16,96	1,96	-250
66	393	3054	17,04	2,04	1000	3112	294	16,96	1,96	-250
67	447	3108	17,04	2,04	1000	3164	344	16,96	1,96	-250
68	502	3163	17,04	2,04	1000	3216	393	16,95	1,96	-250
69	556	3217	17,04	2,04	1000	3268	443	16,95	1,96	-250
70	610	3271	17,03	2,05	1000	3321	492	16,95	1,96	-250
71	665	3326	17,03	2,05	1000	3373	542	16,95	1,96	-250
72	719	3380	17,03	2,05	1000	3424	591	16,95	1,96	-250
73	773	3434	17,03	2,05	1000	3476	640	16,95	1,97	-250
74	828	3489	17,03	2,05	1000	3528	690	16,95	1,97	-250
75	882	3543	17,03	2,05	1000	3580	739	16,94	1,97	-250
76	936	3597	17,03	2,06	1000	3631	788	16,94	1,97	-250
77	991	3652	17,03	2,06	1000	3683	836	16,94	1,97	-250
78	1045	3706	17,03	2,06	1000	3734	885	16,94	1,97	-250
79	1099	3760	17,03	2,06	1000	3785	934	16,94	1,97	-250
80	1154	3815	17,03	2,06	1000	3837	982	16,94	1,97	-250
81	1208	3869	17,03	2,06	1000	3888	1031	16,93	1,97	-250
82	1262	3923	17,03	2,07	1000	3938	1079	16,93	1,97	-250
83	1316	3977	17,03	2,07	1000	3989	1127	16,93	1,97	-250
84	1371	4032	17,03	2,07	1000	4040	1176	16,93	1,97	-250
85	1425	4086	17,03	2,07	1000	4090	1224	16,93	1,97	-250
86	1479	4140	17,03	2,07	1000	4141	1271	16,93	1,97	-250
87	1533	4194	17,03	2,07	1000	4191	1319	16,92	1,97	-250
88	1586	4247	17,03	2,08	1000	4241	1367	16,92	1,97	-250
89	1640	4301	17,03	2,08	1000	4291	1414	16,92	1,97	-250
90	1694	4355	17,02	2,08	1000	4341	1461	16,92	1,97	-250
91	1748	4409	17,02	2,08	1000	4390	1508	16,92	1,97	-250
92	1801	4462	17,02	2,08	1000	4440	1555	16,91	1,97	-250
93	1855	4516	17,02	2,09	1000	4489	1602	16,91	1,98	-250
94	1908	4569	17,02	2,09	1000	4538	1648	16,91	1,98	-250
95	1961	4622	17,02	2,09	1000	4587	1695	16,91	1,98	-250
96	2014	4675	17,02	2,09	1000	4636	1741	16,91	1,98	-250

продолжение таблицы Б.1

t, c	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
97	2067	4728	17,02	2,09	1000	4684	1787	16,90	1,98	-250
98	2120	4781	17,02	2,10	1000	4732	1833	16,90	1,98	-250
99	2173	4834	17,02	2,10	1000	4781	1879	16,90	1,98	-250
100	2226	4887	17,02	2,10	1000	4829	1924	16,90	1,98	-250
101	2278	4939	17,02	2,10	1000	4876	1969	16,90	1,98	-250
102	2330	4991	17,01	2,10	1000	4924	2015	16,89	1,98	-250
103	2382	5043	17,01	2,11	1000	4971	2060	16,89	1,98	-250
104	2434	5095	17,01	2,11	1000	5018	2104	16,89	1,98	-250
105	2486	5147	17,01	2,11	1000	5065	2149	16,89	1,99	-250
106	2538	5199	17,01	2,11	1000	5112	2193	16,89	1,99	-250
107	2588	5249	17,01	2,12	1000	5158	2237	16,88	1,99	-250
108	2639	5300	17,01	2,12	1001	5204	2281	16,88	1,99	-250
109	2690	5351	17,01	2,12	1001	5250	2324	16,88	1,99	-250
110	2741	5402	17,01	2,12	1002	5296	2368	16,88	1,99	-250
111	2792	5453	17,00	2,12	1002	5342	2411	16,87	1,99	-250
112	2843	5504	17,00	2,13	1003	5387	2454	16,87	1,99	-250
113	2893	5554	17,00	2,13	1004	5432	2497	16,87	1,99	-250
114	2944	5605	17,00	2,13	1006	5477	2539	16,87	1,99	-250
115	2994	5655	17,00	2,13	1007	5522	2582	16,86	2,00	-250
116	3043	5704	17,00	2,14	1009	5566	2624	16,86	2,00	-250
117	3093	5754	17,00	2,14	1010	5610	2666	16,86	2,00	-250
118	3143	5804	16,99	2,14	1012	5654	2707	16,86	2,00	-250
119	3192	5853	16,99	2,14	1014	5698	2749	16,85	2,00	-250
120	3241	5902	16,99	2,15	1016	5741	2790	16,85	2,00	-250
121	3290	5951	16,99	2,15	1018	5785	2831	16,85	2,00	-250
122	3339	6000	16,99	2,15	1020	5828	2872	16,85	2,00	-250
123	3387	6048	16,99	2,15	1023	5870	2912	16,84	2,01	-250
124	3435	6096	16,99	2,16	1026	5913	2953	16,84	2,01	-250
125	3483	6144	16,98	2,16	1028	5955	2993	16,84	2,01	-250
126	3531	6192	16,98	2,16	1031	5997	3032	16,84	2,01	-250
127	3579	6240	16,98	2,17	1034	6039	3072	16,83	2,01	-251
128	3626	6287	16,98	2,17	1037	6080	3111	16,83	2,01	-254
129	3673	6334	16,98	2,17	1040	6122	3150	16,83	2,01	-257
130	3720	6381	16,98	2,17	1044	6162	3189	16,83	2,01	-260
131	3767	6428	16,98	2,18	1047	6203	3228	16,82	2,02	-263
132	3813	6474	16,97	2,18	1051	6244	3266	16,82	2,02	-266
133	3860	6521	16,97	2,18	1054	6284	3304	16,82	2,02	-270
134	3906	6567	16,97	2,18	1058	6324	3342	16,82	2,02	-273
135	3951	6612	16,97	2,19	1062	6363	3379	16,81	2,02	-277
136	3997	6658	16,97	2,19	1066	6403	3417	16,81	2,02	-280
137	4042	6703	16,97	2,19	1070	6442	3454	16,81	2,02	-283

продолжение таблицы Б.1

t, с	Q ₁ , м ³ /ч закачка	Q ₂ , м ³ /ч откачка	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
138	4087	6748	16,96	2,20	1074	6481	3491	16,80	2,03	-287
139	4132	6793	16,96	2,20	1079	6519	3527	16,80	2,03	-290
140	4176	6837	16,96	2,20	1083	6558	3564	16,80	2,03	-294
141	4221	6882	16,96	2,21	1088	6596	3600	16,80	2,03	-297
142	4265	6926	16,96	2,21	1092	6634	3635	16,79	2,03	-300
143	4308	6969	16,95	2,21	1097	6671	3671	16,79	2,03	-304
144	4352	7013	16,95	2,21	1102	6709	3706	16,79	2,04	-307
145	4395	7056	16,95	2,22	1107	6746	3741	16,78	2,04	-311
146	4438	7099	16,95	2,22	1112	6783	3776	16,78	2,04	-314
147	4481	7142	16,95	2,22	1117	6819	3811	16,78	2,04	-317
148	4523	7184	16,95	2,23	1122	6855	3845	16,77	2,04	-321
149	4566	7227	16,94	2,23	1127	6891	3879	16,77	2,04	-324
150	4608	7269	16,94	2,23	1132	6927	3913	16,77	2,05	-328
151	4649	7310	16,94	2,24	1138	6963	3947	16,77	2,05	-331
152	4691	7352	16,94	2,24	1143	6998	3980	16,76	2,05	-334
153	4732	7393	16,94	2,24	1149	7033	4013	16,76	2,05	-338
154	4773	7434	16,93	2,25	1155	7067	4046	16,76	2,05	-341
155	4814	7475	16,93	2,25	1160	7102	4078	16,75	2,05	-344
156	4854	7515	16,93	2,25	1166	7136	4111	16,75	2,06	-348
157	4894	7555	16,93	2,26	1172	7170	4143	16,75	2,06	-351
158	4934	7595	16,92	2,26	1178	7204	4174	16,74	2,06	-354
159	4974	7635	16,92	2,26	1184	7237	4206	16,74	2,06	-358
160	5013	7674	16,92	2,26	1191	7270	4237	16,74	2,06	-361
161	5052	7713	16,92	2,27	1197	7303	4268	16,73	2,07	-364
162	5091	7752	16,92	2,27	1203	7336	4299	16,73	2,07	-367
163	5130	7791	16,91	2,27	1209	7368	4330	16,73	2,07	-371
164	5168	7829	16,91	2,28	1216	7400	4360	16,73	2,07	-374
165	5206	7867	16,91	2,28	1222	7432	4390	16,72	2,07	-377
166	5244	7905	16,91	2,29	1229	7463	4420	16,72	2,07	-380
167	5281	7942	16,91	2,29	1236	7495	4450	16,72	2,08	-384
168	5319	7980	16,90	2,29	1242	7526	4479	16,71	2,08	-387
169	5356	8017	16,90	2,30	1249	7557	4508	16,71	2,08	-390
170	5392	8053	16,90	2,30	1256	7587	4537	16,71	2,08	-393
171	5429	8090	16,90	2,30	1263	7618	4566	16,70	2,08	-396
172	5465	8126	16,89	2,31	1270	7648	4594	16,70	2,09	-399
173	5501	8162	16,89	2,31	1277	7678	4622	16,70	2,09	-403
174	5537	8198	16,89	2,31	1284	7707	4650	16,69	2,09	-406
175	5572	8233	16,89	2,32	1291	7737	4678	16,69	2,09	-409
176	5607	8268	16,88	2,32	1298	7766	4705	16,69	2,09	-412
177	5642	8303	16,88	2,32	1306	7794	4732	16,68	2,10	-415
178	5677	8338	16,88	2,33	1313	7823	4759	16,68	2,10	-418

продолжение таблицы Б.1

t, c	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
179	5711	8372	16,88	2,33	1320	7851	4786	16,68	2,10	-421
180	5745	8406	16,87	2,33	1328	7880	4813	16,67	2,10	-424
181	5779	8440	16,87	2,34	1335	7907	4839	16,67	2,11	-427
182	5813	8474	16,87	2,34	1343	7935	4865	16,66	2,11	-430
183	5846	8507	16,87	2,35	1350	7963	4891	16,66	2,11	-433
184	5879	8540	16,86	2,35	1358	7990	4917	16,66	2,11	-436
185	5912	8573	16,86	2,35	1365	8017	4942	16,65	2,11	-439
186	5945	8606	16,86	2,36	1373	8043	4967	16,65	2,12	-442
187	5977	8638	16,86	2,36	1381	8070	4992	16,65	2,12	-445
188	6009	8670	16,85	2,36	1389	8096	5017	16,64	2,12	-448
189	6041	8702	16,85	2,37	1397	8122	5041	16,64	2,12	-451
190	6073	8734	16,85	2,37	1404	8148	5066	16,64	2,12	-454
191	6104	8765	16,85	2,37	1412	8173	5090	16,63	2,13	-457
192	6135	8796	16,84	2,38	1420	8199	5113	16,63	2,13	-460
193	6166	8827	16,84	2,38	1428	8224	5137	16,63	2,13	-462
194	6197	8858	16,84	2,39	1436	8249	5160	16,62	2,13	-465
195	6227	8888	16,84	2,39	1444	8273	5184	16,62	2,14	-468
196	6257	8918	16,83	2,39	1453	8298	5207	16,62	2,14	-471
197	6287	8948	16,83	2,40	1461	8322	5229	16,61	2,14	-474
198	6316	8977	16,83	2,40	1469	8346	5252	16,61	2,14	-476
199	6346	9007	16,83	2,41	1477	8370	5274	16,60	2,14	-479
200	6375	9036	16,82	2,41	1485	8393	5297	16,60	2,15	-482
201	6404	9065	16,82	2,41	1494	8417	5318	16,60	2,15	-485
202	6432	9093	16,82	2,42	1502	8440	5340	16,59	2,15	-487
203	6461	9122	16,81	2,42	1510	8463	5362	16,59	2,15	-490
204	6489	9150	16,81	2,42	1519	8485	5383	16,59	2,16	-493
205	6517	9178	16,81	2,43	1527	8508	5404	16,58	2,16	-495
206	6545	9206	16,81	2,43	1536	8530	5425	16,58	2,16	-498
207	6572	9233	16,80	2,44	1544	8552	5446	16,57	2,16	-500
208	6599	9260	16,80	2,44	1553	8574	5466	16,57	2,17	-503
209	6626	9287	16,80	2,44	1561	8596	5487	16,57	2,17	-506
210	6653	9314	16,80	2,45	1570	8617	5507	16,56	2,17	-508
211	6680	9341	16,79	2,45	1578	8639	5527	16,56	2,17	-511
212	6706	9367	16,79	2,46	1587	8660	5547	16,56	2,18	-513
213	6732	9393	16,79	2,46	1595	8681	5566	16,55	2,18	-516
214	6758	9419	16,78	2,46	1604	8701	5586	16,55	2,18	-518
215	6784	9445	16,78	2,47	1613	8722	5605	16,54	2,18	-521
216	6809	9470	16,78	2,47	1622	8742	5624	16,54	2,19	-523
217	6834	9495	16,78	2,48	1630	8762	5643	16,54	2,19	-526
218	6859	9520	16,77	2,48	1639	8782	5661	16,53	2,19	-528
219	6884	9545	16,77	2,48	1648	8802	5680	16,53	2,19	-531
220	6908	9569	16,77	2,49	1657	8821	5698	16,53	2,20	-533

продолжение таблицы Б.1

t, c	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
221	6933	9594	16,76	2,49	1665	8841	5716	16,52	2,20	-535
222	6957	9618	16,76	2,50	1674	8860	5734	16,52	2,20	-538
223	6981	9642	16,76	2,50	1683	8879	5752	16,51	2,20	-540
224	7004	9665	16,75	2,50	1692	8898	5770	16,51	2,21	-542
225	7028	9689	16,75	2,51	1701	8916	5787	16,51	2,21	-545
226	7051	9712	16,75	2,51	1710	8935	5804	16,50	2,21	-547
227	7074	9735	16,75	2,52	1719	8953	5821	16,50	2,21	-549
228	7097	9758	16,74	2,52	1727	8971	5838	16,49	2,22	-551
229	7120	9781	16,74	2,53	1736	8989	5855	16,49	2,22	-554
230	7142	9803	16,74	2,53	1745	9006	5871	16,49	2,22	-556
231	7164	9825	16,73	2,53	1754	9024	5888	16,48	2,22	-558
232	7186	9847	16,73	2,54	1763	9041	5904	16,48	2,23	-560
233	7208	9869	16,73	2,54	1772	9059	5920	16,47	2,23	-562
234	7230	9891	16,72	2,55	1781	9076	5936	16,47	2,23	-565
235	7251	9912	16,72	2,55	1790	9092	5952	16,47	2,23	-567
236	7272	9933	16,72	2,55	1799	9109	5967	16,46	2,24	-569
237	7293	9954	16,72	2,56	1808	9126	5983	16,46	2,24	-571
238	7314	9975	16,71	2,56	1817	9142	5998	16,46	2,24	-573
239	7335	9996	16,71	2,57	1826	9158	6013	16,45	2,24	-575
240	7355	10016	16,71	2,57	1835	9174	6028	16,45	2,25	-577
241	7375	10036	16,70	2,58	1844	9190	6043	16,44	2,25	-579
242	7395	10056	16,70	2,58	1854	9206	6058	16,44	2,25	-581
243	7415	10076	16,70	2,58	1863	9221	6072	16,44	2,25	-583
244	7435	10096	16,69	2,59	1872	9237	6086	16,43	2,26	-585
245	7455	10116	16,69	2,59	1881	9252	6101	16,43	2,26	-587
246	7474	10135	16,69	2,60	1890	9267	6115	16,42	2,26	-589
247	7493	10154	16,68	2,60	1899	9282	6129	16,42	2,27	-591
248	7512	10173	16,68	2,61	1908	9297	6142	16,41	2,27	-593
249	7531	10192	16,68	2,61	1917	9311	6156	16,41	2,27	-595
250	7549	10210	16,68	2,61	1926	9326	6169	16,41	2,27	-597
251	7568	10229	16,67	2,62	1935	9340	6183	16,40	2,28	-599
252	7586	10247	16,67	2,62	1945	9355	6196	16,40	2,28	-601
253	7604	10265	16,67	2,63	1954	9369	6209	16,39	2,28	-603
254	7622	10283	16,66	2,63	1963	9382	6222	16,39	2,28	-604
255	7640	10301	16,66	2,64	1972	9396	6235	16,39	2,29	-606
256	7657	10318	16,66	2,64	1981	9410	6247	16,38	2,29	-608
257	7675	10336	16,65	2,64	1990	9423	6260	16,38	2,29	-610
258	7692	10353	16,65	2,65	1999	9437	6272	16,37	2,29	-612
259	7709	10370	16,65	2,65	2008	9450	6284	16,37	2,30	-613
260	7726	10387	16,64	2,66	2017	9463	6297	16,37	2,30	-615
261	7742	10403	16,64	2,66	2027	9476	6309	16,36	2,30	-617
262	7759	10420	16,64	2,67	2036	9489	6320	16,36	2,31	-618

продолжение таблицы Б.1

t, с	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
263	7775	10436	16,63	2,67	2045	9501	6332	16,35	2,31	-620
264	7792	10453	16,63	2,68	2054	9514	6344	16,35	2,31	-622
265	7808	10469	16,63	2,68	2063	9526	6355	16,35	2,31	-624
266	7824	10485	16,62	2,68	2072	9539	6367	16,34	2,32	-625
267	7839	10500	16,62	2,69	2081	9551	6378	16,34	2,32	-627
268	7855	10516	16,62	2,69	2090	9563	6389	16,33	2,32	-628
269	7870	10531	16,61	2,70	2099	9575	6400	16,33	2,33	-630
270	7886	10547	16,61	2,70	2109	9586	6411	16,32	2,33	-632
271	7901	10562	16,61	2,71	2118	9598	6421	16,32	2,33	-633
272	7916	10577	16,60	2,71	2127	9609	6432	16,32	2,33	-635
273	7931	10592	16,60	2,72	2136	9621	6443	16,31	2,34	-636
274	7945	10606	16,60	2,72	2145	9632	6453	16,31	2,34	-638
275	7960	10621	16,59	2,72	2154	9643	6463	16,30	2,34	-639
276	7974	10635	16,59	2,73	2163	9654	6473	16,30	2,34	-641
277	7989	10650	16,59	2,73	2172	9665	6483	16,29	2,35	-642
278	8003	10664	16,58	2,74	2181	9676	6493	16,29	2,35	-644
279	8017	10678	16,58	2,74	2190	9687	6503	16,29	2,35	-645
280	8030	10691	16,58	2,75	2199	9697	6513	16,28	2,36	-647
281	8044	10705	16,57	2,75	2208	9708	6523	16,28	2,36	-648
282	8058	10719	16,57	2,76	2217	9718	6532	16,27	2,36	-650
283	8071	10732	16,57	2,76	2226	9728	6541	16,27	2,36	-651
284	8084	10745	16,56	2,77	2235	9738	6551	16,27	2,37	-652
285	8097	10758	16,56	2,77	2244	9748	6560	16,26	2,37	-654
286	8110	10771	16,56	2,77	2253	9758	6569	16,26	2,37	-655
287	8123	10784	16,55	2,78	2262	9768	6578	16,25	2,38	-657
288	8136	10797	16,55	2,78	2271	9778	6587	16,25	2,38	-658
289	8149	10810	16,55	2,79	2280	9787	6596	16,24	2,38	-659
290	8161	10822	16,54	2,79	2289	9797	6604	16,24	2,38	-661
291	8173	10834	16,54	2,80	2298	9806	6613	16,24	2,39	-662
292	8186	10847	16,54	2,80	2307	9815	6621	16,23	2,39	-663
293	8198	10859	16,53	2,81	2316	9824	6630	16,23	2,39	-664
294	8210	10871	16,53	2,81	2325	9834	6638	16,22	2,40	-666
295	8221	10882	16,53	2,82	2334	9842	6646	16,22	2,40	-667
296	8233	10894	16,52	2,82	2343	9851	6654	16,21	2,40	-668
297	8245	10906	16,52	2,82	2351	9860	6662	16,21	2,40	-669
298	8256	10917	16,52	2,83	2360	9869	6670	16,21	2,41	-671
299	8267	10928	16,51	2,83	2369	9877	6678	16,20	2,41	-672
300	8279	10940	16,51	2,84	2378	9886	6686	16,20	2,41	-673
301	8290	10951	16,51	2,84	2387	9894	6693	16,19	2,42	-674
302	8301	10962	16,50	2,85	2396	9902	6701	16,19	2,42	-675
303	8311	10972	16,50	2,85	2404	9911	6708	16,18	2,42	-677
304	8322	10983	16,50	2,86	2413	9919	6716	16,18	2,43	-678

продолжение таблицы Б.1

t, c	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
305	8333	10994	16,49	2,86	2422	9927	6723	16,18	2,43	-679
306	8343	11004	16,49	2,87	2431	9935	6730	16,17	2,43	-680
307	8354	11015	16,48	2,87	2439	9942	6737	16,17	2,43	-681
308	8364	11025	16,48	2,88	2448	9950	6744	16,16	2,44	-682
309	8374	11035	16,48	2,88	2457	9958	6751	16,16	2,44	-683
310	8384	11045	16,47	2,88	2466	9965	6758	16,15	2,44	-684
311	8394	11055	16,47	2,89	2474	9973	6765	16,15	2,45	-685
312	8404	11065	16,47	2,89	2483	9980	6771	16,15	2,45	-687
313	8414	11075	16,46	2,90	2492	9987	6778	16,14	2,45	-688
314	8423	11084	16,46	2,90	2500	9995	6784	16,14	2,45	-689
315	8433	11094	16,46	2,91	2509	10002	6791	16,13	2,46	-690
316	8442	11103	16,45	2,91	2517	10009	6797	16,13	2,46	-691
317	8452	11113	16,45	2,92	2526	10016	6803	16,12	2,46	-692
318	8461	11122	16,45	2,92	2535	10022	6809	16,12	2,47	-693
319	8470	11131	16,44	2,93	2543	10029	6816	16,11	2,47	-694
320	8479	11140	16,44	2,93	2552	10036	6822	16,11	2,47	-695
321	8488	11149	16,44	2,94	2560	10043	6828	16,11	2,48	-696
322	8496	11157	16,43	2,94	2569	10049	6833	16,10	2,48	-696
323	8505	11166	16,43	2,95	2577	10056	6839	16,10	2,48	-697
324	8514	11175	16,43	2,95	2586	10062	6845	16,09	2,48	-698
325	8522	11183	16,42	2,95	2594	10068	6851	16,09	2,49	-699
326	8531	11192	16,42	2,96	2603	10075	6856	16,08	2,49	-700
327	8539	11200	16,41	2,96	2611	10081	6862	16,08	2,49	-701
328	8547	11208	16,41	2,97	2619	10087	6867	16,08	2,50	-702
329	8555	11216	16,41	2,97	2628	10093	6872	16,07	2,50	-703
330	8563	11224	16,40	2,98	2636	10099	6878	16,07	2,50	-704
331	8571	11232	16,40	2,98	2644	10105	6883	16,06	2,51	-705
332	8579	11240	16,40	2,99	2653	10110	6888	16,06	2,51	-705
333	8587	11248	16,39	2,99	2661	10116	6893	16,05	2,51	-706
334	8594	11255	16,39	3,00	2669	10122	6898	16,05	2,51	-707
335	8602	11263	16,39	3,00	2678	10127	6903	16,04	2,52	-708
336	8609	11270	16,38	3,01	2686	10133	6908	16,04	2,52	-709
337	8617	11278	16,38	3,01	2694	10138	6913	16,04	2,52	-710
338	8624	11285	16,38	3,02	2702	10144	6918	16,03	2,53	-710
339	8631	11292	16,37	3,02	2710	10149	6922	16,03	2,53	-711
340	8638	11299	16,37	3,03	2719	10154	6927	16,02	2,53	-712
341	8645	11306	16,36	3,03	2727	10159	6931	16,02	2,54	-713
342	8652	11313	16,36	3,04	2735	10164	6936	16,01	2,54	-713
343	8659	11320	16,36	3,04	2743	10169	6940	16,01	2,54	-714
344	8666	11327	16,35	3,04	2751	10174	6945	16,00	2,54	-715
345	8673	11334	16,35	3,05	2759	10179	6949	16,00	2,55	-716
346	8679	11340	16,35	3,05	2767	10184	6953	16,00	2,55	-716

продолжение таблицы Б.1

t, с	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
347	8686	11347	16,34	3,06	2775	10189	6957	15,99	2,55	-717
348	8692	11353	16,34	3,06	2783	10194	6962	15,99	2,56	-718
349	8699	11360	16,34	3,07	2791	10198	6966	15,98	2,56	-718
350	8705	11366	16,33	3,07	2799	10203	6970	15,98	2,56	-719
351	8711	11372	16,33	3,08	2807	10207	6974	15,97	2,57	-720
352	8717	11378	16,33	3,08	2815	10212	6978	15,97	2,57	-720
353	8723	11384	16,32	3,09	2823	10216	6981	15,96	2,57	-721
354	8729	11390	16,32	3,09	2831	10221	6985	15,96	2,57	-722
355	8735	11396	16,31	3,10	2839	10225	6989	15,96	2,58	-722
356	8741	11402	16,31	3,10	2847	10229	6992	15,95	2,58	-723
357	8747	11408	16,31	3,11	2855	10233	6996	15,95	2,58	-724
358	8752	11413	16,30	3,11	2862	10237	7000	15,94	2,59	-724
359	8758	11419	16,30	3,12	2870	10241	7003	15,94	2,59	-725
360	8763	11424	16,30	3,12	2878	10245	7006	15,93	2,59	-725
361	8754	11415	16,29	3,13	2886	10238	7000	15,93	2,60	-726
362	8745	11406	16,29	3,13	2893	10232	6993	15,92	2,60	-726
363	8736	11397	16,29	3,14	2901	10225	6987	15,92	2,60	-726
364	8727	11388	16,28	3,14	2908	10219	6981	15,92	2,61	-726
365	8718	11379	16,28	3,14	2916	10212	6974	15,91	2,61	-726
366	8709	11370	16,27	3,15	2923	10205	6968	15,91	2,61	-725
367	8700	11361	16,27	3,15	2930	10198	6961	15,90	2,61	-725
368	8691	11352	16,27	3,16	2938	10192	6954	15,90	2,62	-724
369	8682	11343	16,26	3,16	2945	10185	6948	15,89	2,62	-724
370	8672	11333	16,26	3,17	2952	10178	6941	15,89	2,62	-723
371	8663	11324	16,26	3,17	2959	10171	6935	15,88	2,63	-722
372	8654	11315	16,25	3,18	2966	10164	6928	15,88	2,63	-722
373	8645	11306	16,25	3,18	2973	10157	6921	15,88	2,63	-721
374	8635	11296	16,25	3,19	2980	10150	6915	15,87	2,64	-720
375	8626	11287	16,24	3,19	2986	10144	6908	15,87	2,64	-719
376	8616	11277	16,24	3,20	2993	10137	6901	15,86	2,64	-718
377	8607	11268	16,23	3,20	3000	10130	6894	15,86	2,64	-718
378	8597	11258	16,23	3,21	3006	10122	6888	15,85	2,65	-717
379	8588	11249	16,23	3,21	3013	10115	6881	15,85	2,65	-716
380	8578	11239	16,22	3,22	3019	10108	6874	15,84	2,65	-715
381	8569	11230	16,22	3,22	3025	10101	6867	15,84	2,66	-714
382	8559	11220	16,22	3,23	3032	10094	6860	15,84	2,66	-713
383	8549	11210	16,21	3,23	3038	10087	6853	15,83	2,66	-712
384	8539	11200	16,21	3,23	3044	10080	6846	15,83	2,67	-711
385	8530	11191	16,21	3,24	3050	10072	6839	15,82	2,67	-710
386	8520	11181	16,20	3,24	3056	10065	6832	15,82	2,67	-709
387	8510	11171	16,20	3,25	3062	10058	6825	15,81	2,67	-708

продолжение таблицы Б.1

t, с	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
388	8500	11161	16,20	3,25	3068	10050	6818	15,81	2,68	-707
389	8490	11151	16,19	3,26	3074	10043	6811	15,81	2,68	-706
390	8480	11141	16,19	3,26	3080	10036	6804	15,80	2,68	-705
391	8470	11131	16,19	3,27	3086	10028	6797	15,80	2,69	-704
392	8460	11121	16,18	3,27	3091	10021	6790	15,79	2,69	-703
393	8450	11111	16,18	3,28	3097	10013	6783	15,79	2,69	-702
394	8439	11100	16,17	3,28	3103	10006	6775	15,78	2,70	-701
395	8429	11090	16,17	3,29	3108	9998	6768	15,78	2,70	-700
396	8419	11080	16,17	3,29	3114	9991	6761	15,77	2,70	-699
397	8409	11070	16,16	3,30	3119	9983	6754	15,77	2,70	-698
398	8398	11059	16,16	3,30	3124	9975	6746	15,77	2,71	-697
399	8388	11049	16,16	3,30	3129	9968	6739	15,76	2,71	-696
400	8377	11038	16,15	3,31	3135	9960	6731	15,76	2,71	-695
401	8367	11028	16,15	3,31	3140	9952	6724	15,75	2,72	-694
402	8356	11017	16,15	3,32	3145	9944	6716	15,75	2,72	-693
403	8346	11007	16,14	3,32	3150	9936	6709	15,74	2,72	-692
404	8335	10996	16,14	3,33	3155	9928	6701	15,74	2,72	-691
405	8324	10985	16,14	3,33	3160	9921	6694	15,74	2,73	-690
406	8313	10974	16,13	3,34	3165	9913	6686	15,73	2,73	-689
407	8303	10964	16,13	3,34	3169	9905	6679	15,73	2,73	-688
408	8292	10953	16,13	3,35	3174	9897	6671	15,72	2,74	-687
409	8281	10942	16,12	3,35	3179	9888	6663	15,72	2,74	-686
410	8270	10931	16,12	3,36	3183	9880	6655	15,71	2,74	-685
411	8259	10920	16,12	3,36	3188	9872	6648	15,71	2,74	-684
412	8248	10909	16,11	3,37	3192	9864	6640	15,71	2,75	-682
413	8237	10898	16,11	3,37	3197	9856	6632	15,70	2,75	-681
414	8225	10886	16,11	3,37	3201	9848	6624	15,70	2,75	-680
415	8214	10875	16,10	3,38	3205	9839	6616	15,69	2,76	-679
416	8203	10864	16,10	3,38	3209	9831	6608	15,69	2,76	-678
417	8192	10853	16,10	3,39	3214	9822	6600	15,68	2,76	-677
418	8180	10841	16,09	3,39	3218	9814	6592	15,68	2,76	-676
419	8169	10830	16,09	3,40	3222	9806	6584	15,68	2,77	-675
420	8157	10818	16,09	3,40	3226	9797	6576	15,67	2,77	-674
421	8146	10807	16,08	3,41	3230	9788	6568	15,67	2,77	-672
422	8134	10795	16,08	3,41	3234	9780	6560	15,66	2,78	-671
423	8122	10783	16,07	3,42	3237	9771	6552	15,66	2,78	-670
424	8111	10772	16,07	3,42	3241	9762	6543	15,65	2,78	-669
425	8099	10760	16,07	3,42	3245	9754	6535	15,65	2,78	-668
426	8087	10748	16,06	3,43	3249	9745	6527	15,65	2,79	-667
427	8075	10736	16,06	3,43	3252	9736	6518	15,64	2,79	-666
428	8063	10724	16,06	3,44	3256	9727	6510	15,64	2,79	-664

продолжение таблицы Б.1

t,с	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м³/ч	Q ₂ , м³/ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
429	8051	10712	16,05	3,44	3259	9718	6501	15,63	2,80	-663
430	8039	10700	16,05	3,45	3263	9709	6493	15,63	2,80	-662
431	8027	10688	16,05	3,45	3266	9700	6484	15,62	2,80	-661
432	8014	10675	16,04	3,46	3269	9691	6476	15,62	2,80	-660
433	8002	10663	16,04	3,46	3272	9682	6467	15,62	2,81	-659
434	7990	10651	16,04	3,46	3276	9673	6459	15,61	2,81	-657
435	7977	10638	16,03	3,47	3279	9664	6450	15,61	2,81	-656
436	7965	10626	16,03	3,47	3282	9654	6441	15,60	2,82	-655
437	7952	10613	16,03	3,48	3285	9645	6432	15,60	2,82	-654
438	7940	10601	16,02	3,48	3288	9636	6423	15,60	2,82	-653
439	7927	10588	16,02	3,49	3291	9626	6414	15,59	2,82	-651
440	7914	10575	16,02	3,49	3293	9617	6406	15,59	2,83	-650
441	7901	10562	16,01	3,50	3296	9607	6397	15,58	2,83	-649
442	7888	10549	16,01	3,50	3299	9598	6388	15,58	2,83	-648
443	7875	10536	16,01	3,51	3302	9588	6378	15,57	2,84	-646
444	7862	10523	16,00	3,51	3304	9578	6369	15,57	2,84	-645
445	7849	10510	16,00	3,51	3307	9569	6360	15,57	2,84	-644
446	7836	10497	16,00	3,52	3309	9559	6351	15,56	2,84	-643
447	7823	10484	16,00	3,52	3312	9549	6342	15,56	2,85	-641
448	7809	10470	15,99	3,53	3314	9539	6332	15,55	2,85	-640
449	7796	10457	15,99	3,53	3316	9529	6323	15,55	2,85	-639
450	7782	10443	15,99	3,54	3319	9519	6313	15,55	2,85	-638
451	7769	10430	15,98	3,54	3321	9509	6304	15,54	2,86	-636
452	7755	10416	15,98	3,54	3323	9499	6294	15,54	2,86	-635
453	7741	10402	15,98	3,55	3325	9489	6285	15,53	2,86	-634
454	7728	10389	15,97	3,55	3327	9478	6275	15,53	2,87	-632
455	7714	10375	15,97	3,56	3329	9468	6265	15,52	2,87	-631
456	7700	10361	15,97	3,56	3331	9458	6256	15,52	2,87	-630
457	7686	10347	15,96	3,57	3333	9447	6246	15,52	2,87	-628
458	7672	10333	15,96	3,57	3335	9437	6236	15,51	2,88	-627
459	7657	10318	15,96	3,58	3336	9426	6226	15,51	2,88	-626
460	7643	10304	15,95	3,58	3338	9415	6216	15,50	2,88	-624
461	7629	10290	15,95	3,58	3340	9405	6206	15,50	2,88	-623
462	7614	10275	15,95	3,59	3341	9394	6196	15,50	2,89	-622
463	7600	10261	15,94	3,59	3343	9383	6186	15,49	2,89	-620
464	7585	10246	15,94	3,60	3344	9372	6176	15,49	2,89	-619
465	7571	10232	15,94	3,60	3346	9361	6165	15,48	2,90	-618
466	7556	10217	15,93	3,61	3347	9350	6155	15,48	2,90	-616
467	7541	10202	15,93	3,61	3348	9339	6145	15,48	2,90	-615
468	7526	10187	15,93	3,61	3349	9328	6134	15,47	2,90	-613
469	7511	10172	15,92	3,62	3351	9317	6124	15,47	2,91	-612

продолжение таблицы Б.1

t, c	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
470	7496	10157	15,92	3,62	3352	9305	6113	15,46	2,91	-611
471	7480	10141	15,92	3,63	3353	9294	6102	15,46	2,91	-609
472	7465	10126	15,92	3,63	3354	9282	6092	15,46	2,91	-608
473	7450	10111	15,91	3,64	3355	9271	6081	15,45	2,92	-606
474	7434	10095	15,91	3,64	3355	9259	6070	15,45	2,92	-605
475	7419	10080	15,91	3,64	3356	9248	6059	15,44	2,92	-603
476	7403	10064	15,90	3,65	3357	9236	6048	15,44	2,92	-602
477	7387	10048	15,90	3,65	3358	9224	6037	15,44	2,93	-600
478	7371	10032	15,90	3,66	3358	9212	6026	15,43	2,93	-599
479	7355	10016	15,89	3,66	3359	9200	6015	15,43	2,93	-597
480	7339	10000	15,89	3,67	3359	9188	6004	15,42	2,94	-596
481	7323	9984	15,89	3,67	3360	9176	5992	15,42	2,94	-594
482	7307	9968	15,88	3,67	3360	9164	5981	15,42	2,94	-593
483	7290	9951	15,88	3,68	3361	9151	5970	15,41	2,94	-591
484	7274	9935	15,88	3,68	3361	9139	5958	15,41	2,95	-590
485	7257	9918	15,87	3,69	3361	9126	5946	15,40	2,95	-588
486	7241	9902	15,87	3,69	3361	9114	5935	15,40	2,95	-587
487	7224	9885	15,87	3,70	3361	9101	5923	15,40	2,95	-585
488	7207	9868	15,87	3,70	3361	9088	5911	15,39	2,96	-584
489	7190	9851	15,86	3,70	3361	9076	5899	15,39	2,96	-582
490	7173	9834	15,86	3,71	3361	9063	5887	15,38	2,96	-581
491	7156	9817	15,86	3,71	3361	9050	5875	15,38	2,96	-579
492	7138	9799	15,85	3,72	3361	9037	5863	15,38	2,97	-578
493	7121	9782	15,85	3,72	3361	9023	5851	15,37	2,97	-576
494	7103	9764	15,85	3,72	3361	9010	5839	15,37	2,97	-574
495	7086	9747	15,84	3,73	3360	8997	5826	15,36	2,97	-573
496	7068	9729	15,84	3,73	3360	8983	5814	15,36	2,98	-571
497	7050	9711	15,84	3,74	3359	8970	5801	15,36	2,98	-569
498	7032	9693	15,84	3,74	3359	8956	5789	15,35	2,98	-568
499	7014	9675	15,83	3,75	3358	8943	5776	15,35	2,98	-566
500	6996	9657	15,83	3,75	3357	8929	5763	15,34	2,99	-565
501	6978	9639	15,83	3,75	3357	8915	5750	15,34	2,99	-563
502	6959	9620	15,82	3,76	3356	8901	5737	15,34	2,99	-561
503	6941	9602	15,82	3,76	3355	8887	5724	15,33	2,99	-559
504	6922	9583	15,82	3,77	3354	8873	5711	15,33	3,00	-558
505	6903	9564	15,82	3,77	3353	8858	5698	15,32	3,00	-556
506	6884	9545	15,81	3,77	3352	8844	5684	15,32	3,00	-554
507	6865	9526	15,81	3,78	3351	8829	5671	15,32	3,00	-553
508	6846	9507	15,81	3,78	3350	8815	5658	15,31	3,01	-551
509	6827	9488	15,80	3,79	3349	8800	5644	15,31	3,01	-549
510	6807	9468	15,80	3,79	3347	8785	5630	15,31	3,01	-547
511	6788	9449	15,80	3,79	3346	8770	5616	15,30	3,01	-546

продолжение таблицы Б.1

t, c	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
512	6768	9429	15,80	3,80	3345	8755	5603	15,30	3,02	-544
513	6748	9409	15,79	3,80	3343	8740	5589	15,29	3,02	-542
514	6729	9390	15,79	3,81	3342	8725	5575	15,29	3,02	-540
515	6709	9370	15,79	3,81	3340	8709	5560	15,29	3,02	-539
516	6688	9349	15,78	3,81	3339	8694	5546	15,28	3,03	-537
517	6668	9329	15,78	3,82	3337	8678	5532	15,28	3,03	-535
518	6648	9309	15,78	3,82	3335	8663	5517	15,28	3,03	-533
519	6627	9288	15,78	3,83	3333	8647	5503	15,27	3,03	-531
520	6606	9267	15,77	3,83	3331	8631	5488	15,27	3,04	-529
521	6586	9247	15,77	3,83	3329	8615	5473	15,26	3,04	-528
522	6565	9226	15,77	3,84	3327	8599	5458	15,26	3,04	-526
523	6544	9205	15,76	3,84	3325	8583	5443	15,26	3,04	-524
524	6522	9183	15,76	3,85	3323	8566	5428	15,25	3,04	-522
525	6501	9162	15,76	3,85	3321	8550	5413	15,25	3,05	-520
526	6479	9140	15,76	3,85	3319	8533	5398	15,25	3,05	-518
527	6458	9119	15,75	3,86	3316	8516	5382	15,24	3,05	-516
528	6436	9097	15,75	3,86	3314	8499	5367	15,24	3,05	-514
529	6414	9075	15,75	3,87	3311	8482	5351	15,23	3,06	-512
530	6392	9053	15,75	3,87	3309	8465	5335	15,23	3,06	-510
531	6370	9031	15,74	3,87	3306	8448	5320	15,23	3,06	-508
532	6347	9008	15,74	3,88	3303	8431	5304	15,22	3,06	-506
533	6325	8986	15,74	3,88	3301	8413	5287	15,22	3,07	-504
534	6302	8963	15,73	3,88	3298	8395	5271	15,22	3,07	-502
535	6279	8940	15,73	3,89	3295	8378	5255	15,21	3,07	-500
536	6256	8917	15,73	3,89	3292	8360	5238	15,21	3,07	-498
537	6233	8894	15,73	3,90	3289	8342	5222	15,20	3,08	-496
538	6210	8871	15,72	3,90	3286	8324	5205	15,20	3,08	-494
539	6187	8848	15,72	3,90	3283	8305	5188	15,20	3,08	-492
540	6163	8824	15,72	3,91	3280	8287	5171	15,19	3,08	-490
541	6139	8800	15,72	3,91	3276	8268	5154	15,19	3,08	-488
542	6116	8777	15,71	3,91	3273	8250	5137	15,19	3,09	-486
543	6092	8753	15,71	3,92	3270	8231	5120	15,18	3,09	-484
544	6067	8728	15,71	3,92	3266	8212	5102	15,18	3,09	-482
545	6043	8704	15,71	3,93	3263	8193	5085	15,18	3,09	-480
546	6019	8680	15,70	3,93	3259	8173	5067	15,17	3,10	-478
547	5994	8655	15,70	3,93	3255	8154	5049	15,17	3,10	-475
548	5969	8630	15,70	3,94	3252	8134	5031	15,17	3,10	-473
549	5944	8605	15,70	3,94	3248	8115	5013	15,16	3,10	-471
550	5919	8580	15,69	3,94	3244	8095	4995	15,16	3,10	-469
551	5894	8555	15,69	3,95	3240	8075	4977	15,15	3,11	-467
552	5868	8529	15,69	3,95	3236	8054	4958	15,15	3,11	-464
553	5843	8504	15,69	3,96	3232	8034	4940	15,15	3,11	-462

продолжение таблицы Б.1

t, с	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
554	5817	8478	15,68	3,96	3228	8014	4921	15,14	3,11	-460
555	5791	8452	15,68	3,96	3224	7993	4902	15,14	3,11	-458
556	5765	8426	15,68	3,97	3219	7972	4883	15,14	3,12	-456
557	5739	8400	15,68	3,97	3215	7951	4864	15,13	3,12	-453
558	5712	8373	15,67	3,97	3210	7930	4844	15,13	3,12	-451
559	5686	8347	15,67	3,98	3206	7909	4825	15,13	3,12	-449
560	5659	8320	15,67	3,98	3201	7888	4805	15,12	3,13	-446
561	5632	8293	15,67	3,98	3197	7866	4786	15,12	3,13	-444
562	5605	8266	15,66	3,99	3192	7844	4766	15,12	3,13	-442
563	5578	8239	15,66	3,99	3187	7822	4746	15,11	3,13	-439
564	5550	8211	15,66	3,99	3182	7800	4725	15,11	3,13	-437
565	5523	8184	15,66	4,00	3177	7778	4705	15,11	3,14	-435
566	5495	8156	15,65	4,00	3172	7756	4685	15,10	3,14	-432
567	5467	8128	15,65	4,01	3167	7733	4664	15,10	3,14	-430
568	5439	8100	15,65	4,01	3162	7711	4643	15,10	3,14	-428
569	5411	8072	15,65	4,01	3157	7688	4622	15,09	3,14	-425
570	5382	8043	15,64	4,02	3152	7665	4601	15,09	3,15	-423
571	5354	8015	15,64	4,02	3146	7641	4580	15,09	3,15	-420
572	5325	7986	15,64	4,02	3141	7618	4559	15,08	3,15	-418
573	5296	7957	15,64	4,03	3135	7594	4537	15,08	3,15	-415
574	5267	7928	15,64	4,03	3130	7571	4515	15,08	3,15	-413
575	5238	7899	15,63	4,03	3124	7547	4493	15,07	3,16	-411
576	5208	7869	15,63	4,04	3118	7523	4471	15,07	3,16	-408
577	5179	7840	15,63	4,04	3112	7499	4449	15,07	3,16	-406
578	5149	7810	15,63	4,04	3106	7474	4427	15,06	3,16	-403
579	5119	7780	15,62	4,05	3101	7449	4404	15,06	3,16	-401
580	5089	7750	15,62	4,05	3094	7425	4382	15,06	3,17	-398
581	5058	7719	15,62	4,05	3088	7400	4359	15,05	3,17	-395
582	5028	7689	15,62	4,06	3082	7375	4336	15,05	3,17	-393
583	4997	7658	15,62	4,06	3076	7349	4313	15,05	3,17	-390
584	4966	7627	15,61	4,06	3070	7324	4289	15,04	3,17	-388
585	4935	7596	15,61	4,07	3063	7298	4266	15,04	3,17	-385
586	4904	7565	15,61	4,07	3057	7272	4242	15,04	3,18	-383
587	4873	7534	15,61	4,07	3050	7246	4218	15,03	3,18	-380
588	4841	7502	15,61	4,08	3043	7220	4194	15,03	3,18	-377
589	4809	7470	15,60	4,08	3037	7193	4170	15,03	3,18	-375
590	4777	7438	15,60	4,08	3030	7167	4146	15,03	3,18	-372
591	4745	7406	15,60	4,09	3023	7140	4121	15,02	3,19	-369
592	4713	7374	15,60	4,09	3016	7113	4097	15,02	3,19	-367
593	4681	7342	15,60	4,09	3009	7086	4072	15,02	3,19	-364
594	4648	7309	15,59	4,10	3002	7059	4047	15,01	3,19	-361
595	4615	7276	15,59	4,10	2995	7031	4022	15,01	3,19	-359

продолжение таблицы Б.1

t, с	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
596	4582	7243	15,59	4,10	2987	7003	3996	15,01	3,19	-356
597	4549	7210	15,59	4,10	2980	6975	3971	15,00	3,20	-353
598	4516	7177	15,59	4,11	2973	6947	3945	15,00	3,20	-351
599	4483	7144	15,58	4,11	2965	6919	3919	15,00	3,20	-348
600	4449	7110	15,58	4,11	2957	6891	3893	14,99	3,20	-345
601	4415	7076	15,58	4,12	2950	6862	3867	14,99	3,20	-342
602	4381	7042	15,58	4,12	2942	6833	3840	14,99	3,20	-340
603	4347	7008	15,58	4,12	2934	6804	3814	14,99	3,21	-337
604	4313	6974	15,57	4,13	2926	6775	3787	14,98	3,21	-334
605	4279	6940	15,57	4,13	2918	6745	3760	14,98	3,21	-331
606	4244	6905	15,57	4,13	2910	6716	3733	14,98	3,21	-329
607	4209	6870	15,57	4,13	2902	6686	3706	14,97	3,21	-326
608	4174	6835	15,57	4,14	2894	6656	3678	14,97	3,21	-323
609	4139	6800	15,56	4,14	2886	6626	3651	14,97	3,22	-320
610	4104	6765	15,56	4,14	2877	6595	3623	14,97	3,22	-317
611	4069	6730	15,56	4,15	2869	6565	3595	14,96	3,22	-315
612	4033	6694	15,56	4,15	2860	6534	3567	14,96	3,22	-312
613	3997	6658	15,56	4,15	2852	6503	3539	14,96	3,22	-309
614	3962	6623	15,56	4,16	2843	6472	3510	14,95	3,22	-306
615	3926	6587	15,55	4,16	2834	6441	3481	14,95	3,23	-303
616	3889	6550	15,55	4,16	2825	6409	3453	14,95	3,23	-300
617	3853	6514	15,55	4,16	2816	6378	3424	14,95	3,23	-297
618	3817	6478	15,55	4,17	2807	6346	3394	14,94	3,23	-295
619	3780	6441	15,55	4,17	2798	6314	3365	14,94	3,23	-292
620	3743	6404	15,55	4,17	2789	6281	3336	14,94	3,23	-289
621	3706	6367	15,54	4,18	2780	6249	3306	14,93	3,23	-286
622	3669	6330	15,54	4,18	2770	6216	3276	14,93	3,24	-283
623	3632	6293	15,54	4,18	2761	6184	3246	14,93	3,24	-280
624	3595	6256	15,54	4,18	2752	6151	3216	14,93	3,24	-277
625	3557	6218	15,54	4,19	2742	6117	3185	14,92	3,24	-274
626	3520	6181	15,54	4,19	2732	6084	3155	14,92	3,24	-272
627	3482	6143	15,54	4,19	2723	6050	3124	14,92	3,24	-269
628	3444	6105	15,53	4,19	2713	6017	3093	14,92	3,24	-266
629	3406	6067	15,53	4,20	2703	5983	3062	14,91	3,25	-263
630	3368	6029	15,53	4,20	2693	5949	3031	14,91	3,25	-260
631	3330	5991	15,53	4,20	2683	5915	3000	14,91	3,25	-257
632	3292	5953	15,53	4,20	2673	5880	2968	14,91	3,25	-254
633	3253	5914	15,53	4,21	2662	5846	2936	14,90	3,25	-251
634	3215	5876	15,53	4,21	2652	5811	2905	14,90	3,25	-248
635	3176	5837	15,52	4,21	2642	5776	2873	14,90	3,25	-248
636	3137	5798	15,52	4,21	2631	5741	2840	14,90	3,25	-248
637	3099	5760	15,52	4,22	2621	5706	2808	14,89	3,26	-248

продолжение таблицы Б.1

t, с	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
638	3060	5721	15,52	4,22	2610	5670	2776	14,89	3,26	-248
639	3021	5682	15,52	4,22	2600	5635	2743	14,89	3,26	-248
640	2981	5642	15,52	4,22	2589	5599	2710	14,89	3,26	-248
641	2942	5603	15,52	4,23	2578	5563	2677	14,88	3,26	-248
642	2903	5564	15,51	4,23	2567	5527	2644	14,88	3,26	-248
643	2863	5524	15,51	4,23	2556	5491	2611	14,88	3,26	-248
644	2824	5485	15,51	4,23	2545	5455	2578	14,88	3,26	-248
645	2784	5445	15,51	4,24	2534	5418	2544	14,87	3,26	-248
646	2745	5406	15,51	4,24	2523	5381	2511	14,87	3,27	-248
647	2705	5366	15,51	4,24	2511	5345	2477	14,87	3,27	-248
648	2665	5326	15,51	4,24	2500	5308	2443	14,87	3,27	-248
649	2625	5286	15,51	4,25	2489	5271	2409	14,86	3,27	-248
650	2585	5246	15,51	4,25	2477	5234	2375	14,86	3,27	-248
651	2545	5206	15,50	4,25	2465	5196	2340	14,86	3,27	-248
652	2505	5166	15,50	4,25	2454	5159	2306	14,86	3,27	-248
653	2465	5126	15,50	4,25	2442	5121	2272	14,86	3,27	-248
654	2426	5087	15,50	4,26	2430	5084	2237	14,85	3,27	-248
655	2386	5047	15,50	4,26	2418	5046	2202	14,85	3,27	-248
656	2345	5006	15,50	4,26	2406	5008	2167	14,85	3,28	-248
657	2305	4966	15,50	4,26	2394	4970	2133	14,85	3,28	-248
658	2265	4926	15,50	4,27	2382	4932	2098	14,84	3,28	-248
659	2224	4885	15,50	4,27	2370	4894	2062	14,84	3,28	-248
660	2184	4845	15,49	4,27	2358	4855	2027	14,84	3,28	-248
661	2143	4804	15,49	4,27	2346	4817	1992	14,84	3,28	-248
662	2103	4764	15,49	4,27	2333	4778	1956	14,84	3,28	-248
663	2063	4724	15,49	4,28	2321	4740	1921	14,83	3,28	-248
664	2022	4683	15,49	4,28	2308	4701	1885	14,83	3,28	-248
665	1982	4643	15,49	4,28	2296	4662	1850	14,83	3,28	-248
666	1941	4602	15,49	4,28	2283	4624	1814	14,83	3,28	-248
667	1901	4562	15,49	4,28	2270	4585	1778	14,83	3,29	-248
668	1860	4521	15,49	4,29	2258	4546	1742	14,82	3,29	-248
669	1820	4481	15,49	4,29	2245	4507	1706	14,82	3,29	-248
670	1780	4441	15,49	4,29	2232	4467	1670	14,82	3,29	-248
671	1739	4400	15,49	4,29	2219	4428	1634	14,82	3,29	-248
672	1699	4360	15,48	4,29	2206	4389	1598	14,82	3,29	-248
673	1659	4320	15,48	4,30	2193	4350	1562	14,81	3,29	-248
674	1619	4280	15,48	4,30	2180	4311	1526	14,81	3,29	-248
675	1578	4239	15,48	4,30	2167	4271	1489	14,81	3,29	-248
676	1538	4199	15,48	4,30	2153	4232	1453	14,81	3,29	-248
677	1498	4159	15,48	4,30	2140	4193	1417	14,81	3,29	-248
678	1458	4119	15,48	4,31	2127	4153	1381	14,81	3,29	-248
679	1419	4080	15,48	4,31	2113	4114	1344	14,80	3,29	-248

продолжение таблицы Б.1

t, с	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па	Q ₁ , м ³ /ч	Q ₂ , м ³ /ч	H ₁ , м	H ₂ , м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
680	1379	4040	15,48	4,31	2100	4075	1308	14,80	3,29	-248
681	1339	4000	15,48	4,31	2086	4035	1272	14,80	3,29	-248
682	1300	3961	15,48	4,31	2073	3996	1235	14,80	3,29	-248
683	1260	3921	15,48	4,31	2059	3957	1199	14,80	3,30	-248
684	1221	3882	15,48	4,32	2045	3918	1163	14,79	3,30	-248
685	1182	3843	15,48	4,32	2032	3879	1127	14,79	3,30	-248
686	1142	3803	15,48	4,32	2018	3839	1091	14,79	3,30	-248
687	1104	3765	15,48	4,32	2004	3800	1055	14,79	3,30	-248
688	1065	3726	15,48	4,32	1990	3761	1019	14,79	3,30	-248
689	1026	3687	15,47	4,32	1976	3722	983	14,79	3,30	-248
690	988	3649	15,47	4,33	1962	3684	947	14,78	3,30	-248
691	949	3610	15,47	4,33	1948	3645	911	14,78	3,30	-248
692	911	3572	15,47	4,33	1934	3606	875	14,78	3,30	-248
693	873	3534	15,47	4,33	1920	3568	840	14,78	3,30	-248
694	835	3496	15,47	4,33	1906	3529	804	14,78	3,30	-248
695	798	3459	15,47	4,33	1892	3491	769	14,78	3,30	-248
696	761	3422	15,47	4,33	1877	3453	734	14,78	3,30	-248
697	724	3385	15,47	4,34	1863	3415	699	14,77	3,30	-248
698	687	3348	15,47	4,34	1849	3378	664	14,77	3,30	-248
699	650	3311	15,47	4,34	1835	3340	629	14,77	3,30	-248
700	614	3275	15,47	4,34	1820	3303	595	14,77	3,30	-248
701	578	3239	15,47	4,34	1806	3266	560	14,77	3,30	-248
702	542	3203	15,47	4,34	1791	3229	526	14,77	3,30	-248
703	507	3168	15,47	4,34	1777	3192	492	14,77	3,30	-248
704	472	3133	15,47	4,35	1763	3156	459	14,76	3,30	-248
705	437	3098	15,47	4,35	1748	3120	426	14,76	3,30	-248
706	403	3064	15,47	4,35	1734	3085	393	14,76	3,30	-248
707	369	3030	15,47	4,35	1719	3049	360	14,76	3,30	-248
708	336	2997	15,47	4,35	1705	3015	328	14,76	3,30	-248
709	303	2964	15,47	4,35	1690	2980	296	14,76	3,30	-248
710	271	2932	15,47	4,35	1676	2947	265	14,76	3,30	-248
711	239	2900	15,47	4,35	1661	2913	234	14,76	3,30	-248
712	208	2869	15,47	4,36	1647	2881	204	14,75	3,30	-248
713	178	2839	15,47	4,36	1632	2849	174	14,75	3,30	-248
714	148	2809	15,47	4,36	1618	2817	145	14,75	3,30	-248
715	119	2780	15,47	4,36	1603	2787	117	14,75	3,30	-248
716	92	2753	15,47	4,36	1588	2758	90	14,75	3,30	-248
717	65	2726	15,47	4,36	1574	2730	64	14,75	3,30	-248
718	40	2701	15,47	4,36	1559	2704	40	14,75	3,30	-248
719	18	2679	15,47	4,36	1545	2680	17	14,75	3,30	-248

ПРИЛОЖЕНИЕ В – ПАСПОРТ БЕНЗИНА



Общество с ограниченной ответственностью "Башнефть-Розница"
Юридический адрес: Российская Федерация, 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Бессонова, д.2
e-mail: Bnp-inbox@bashneft.ru, тел. +7(347) 229-98-17

Изготовитель: Филиал ПАО АНК "Башнефть" "Башнефть-УНПЗ"
Юридический адрес: РФ, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, д.30, к.1
Адрес производства: 450029, г. Уфа, ул. Ульяновых, 74
e-mail: info_bn@bashneft.ru, тел. +7(347)242-55-17 факс 8(347) 242-

Уфимская лаборатория контроля качества нефтепродуктов
РО Башкирия "ООО "Башнефть-Розница"
450051, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Чекамагушевская, д.2
Начальник лаборатории Замилева Н.С.
e-mail: ZYAMILEVANS@bashneft.ru тел. +7(347)264-59-85
Свидетельство оценки состояния измерений № ЦСМ РБ.ОС.П.Р.

срок действия по 24.12.2021 г.

ПАСПОРТ № 8530

Автомобильный бензин экологического класса К5 марки АИ-92-К5 по ГОСТ 32513-2013

Обозначение документов, устанавливающих требования к топливу:

Технический регламент таможенного союза ТР ТС 013/2011 «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту» (Решение Комиссии Таможенного Союза от 18.10.2011г. № 826) (Приложение 2)

Декларация о соответствии

ЕАЭС N RU Д-РУ.НА19.В.00806/20
Срок действия - по 25.06.2023г.

ГОСТ 32513-2013 «Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия».

Код ОКПД2 19.20.21.125

Размер партии (масса): 651 т.

Место отбора пробы (по ГОСТ 2517): РВС-1000 № 16

Дата отбора пробы: 21.08.2021 г.

Дата проведения испытаний: 21.08.2021 г.

Дата выдачи паспорта: 21.08.2021 г. время 4:40

ТТН № 101043058 от 21.08.2021
Кол-во 9.794 тонн
АЦ гос. № АЕ5340 Секция 1,2



№ п/п	Наименование показателя	Метод испытания	Норма по ТР ТС 013/2011	Норма по ГОСТ 32513-2013	Фактическое значение
1	Октановое число: по исследовательскому методу по моторному методу	ГОСТ 8226-2015 ГОСТ 511-2015	не менее 80 не менее 76	не менее 92,0 не менее 83,0	92,6 83,0 *
2	Концентрация свинца, мг/дм³	ГОСТ EN 237-2013	отсутствие	отсутствие	отсутствие *
3	Содержание промытых смол, мг/дм³ (мг/100 см³)	ГОСТ 1567-97	-	не более 50 (5)	30 (3)
4	Индукционный период бензина, мин	ГОСТ ISO 7536-2015	-	не менее 360	360 *
5	Массовая доля серы, мг/кг	ГОСТ ISO 20884-2016	не более 10	не более 10	5,0
6	Объемная доля бензола, %	ГОСТ EN 12177-2013	не более 1	не более 1	0,7
7	Объемная доля углеводородов, %: - олефиновых - ароматических	ГОСТ 32507-2013 (метод Б)	не более 18 не более 35	не более 18,0 не более 35,0	10,8 * 33,4 *
8	Массовая доля кислорода, %	ГОСТ EN 13132-2012	не более 2,7	не более 2,7	0,03
9	Объемная доля оксигенатов, %: - метанола - этанола - изопропанола (изопропилового спирта) - третбуанола (трет-бутилового спирта) - изобутанола (изобутилового спирта) - эфиров, содержащих 5 или более атомов углерода в молекуле (эфиров (C ₅ и выше)) - других оксигенатов (с температурой конца кипения не выше 210°C)	ГОСТ EN 13132-2012	отсутствие не более 5 не более 10 не более 7 не более 10 не более 15 не более 10	отсутствие не более 5,0 не более 10,0 не более 7,0 не более 10,0 не более 15,0 не более 10,0	отсутствие менее 0,16 менее 0,16 менее 0,16 менее 0,16 0,3 менее 0,15
10	Коррозия медной пластинки (3 ч при 50°C)	ГОСТ 6321-92	-	Класс I	Класс I *
11	Внешний вид	ГОСТ 32513-2013 п. 8.2	-	Чистый, прозрачный	Чистый, прозрачный
12	Плотность при 15 °С, кг/м³	ГОСТ ISO 3675-2014	-	725,0 - 780,0	745,4
13	Концентрация марганца, мг/дм³	ГОСТ 33158-2014	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие *
14	Концентрация железа, мг/дм³	ГОСТ 32514-2013	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие *
15	Объемная доля монометиланилина, %	ГОСТ 32515-2013	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие *
16	Давление насыщенных паров бензина (ДНП), кПа: (для группы испаряемости В)	ГОСТ EN 13016-1-2013	35-80	35-80	69,1
17	Функциональный состав (для группы испаряемости В): объемная доля испарившегося бензина, %, при температуре: 70 °С (Н 70) 100 °С (Н 100) 150 °С (Н 150) конец кипения, °С объемная доля остатка в колбе, %	ГОСТ ISO 3405-2013	- - - - -	15 - 48 40 - 70 не менее 75 не выше 215,0 не более 2,0	26,7 46,0 77,4 200,5 1,0
18	Максимальная остатка паровой пробы (ИПП) (для группы испаряемости В)	ГОСТ 32513-2013 п. 8.3	-	-	-

Заключение: Автомобильный бензин экологического класса К5 марки АИ-92-К5 по ГОСТ 32513-2013

соответствует требованиям:

-Технического регламента таможенного союза ТР ТС 013/2011 «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту» (Решение Комиссии Таможенного Союза от 18.10.2011г. № 826) (Приложение 2);

-ГОСТ 32513-2013 «Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия» (для группы испаряемости В)

Сведения о наличии присадок в топливе:

- антиокислительная присадка Агидол-12 в количестве до 0,15 % (масс.) в расчёте на нестабильные компоненты*.

Дополнительная информация:

- транспортирование и хранение по ГОСТ 1510

- гарантийный срок хранения 1 год с даты изготовления

20.08.2021 г.*

Топливо отгружено с Уфимской нефтебазы Центрального регионального сектора РО Башкирия ООО "Башнефть-Розница".

Адрес: 450051, г. Уфа, ул. Чекамагушевская, д.2.

* - результаты по паспорту № 5159 от 20.08.2021г. изготовителя - Филиал ПАО АНК "Башнефть" "Башнефть-УНПЗ"

Начальник Уфимской лаборатории Назарова Л.С. / Назарова Л.С. / по приказу № РО-02/20 от 20.01.2021 г.



Рисунок В.1 – Паспорт испытуемого бензина

ПРИЛОЖЕНИЕ Г – КОММЕРЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Таблица Г.1 – Коммерческое предложение на ремонтные вклады и монтаж для резервуаров РГС

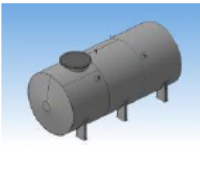
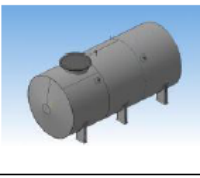
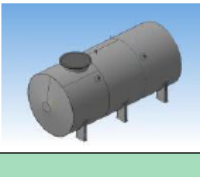
ФОТО	НАИМЕНОВАНИЕ	ОПИСАНИЕ	КОЛ-ВО	ЕД-ИЗМ	ЦЕНА, РУБ	СУММА РУБ
Стандартная комплектация						
	Вкладыш в РГС-5 м³ Размер: Д 1,9 В 2,1	Материал: высокопрочная техническая ткань с TPU покрытием (Германия). Вес: 1250 г/м². Прочность на разрыв: 500 Н (минимум) UV Защита Double Seal Protection - technology	1	шт	114 000	114 000
	Вкладыш в РГС-10 м³ Размер: Д 2,0 В 3,4		1	шт	174 000	174 000
	Вкладыш в РГС-100 м³ Размер: Д 3,2 В 12,6		1	шт	876 000	876 000
Дополнительные услуги						
	Монтаж гибких вкладышей с подготовкой поверхности, внутри РГС- 5м³ РГС- 10м³ РГС- 10м³ установка фланцев	1 специалиста Поставщика (11 дней)	1	услуга	416 000	416 000
	Разработка документации на модернизацию резервуара РГС- 5м³ РГС- 10м³ РГС- 100м³ с дальнейшим продлением срока службы	Регистрация положительноц ЭПБ в Ростехнадзоре, увеличение срока службы на 10 лет	1	услуга	2 500 000	2 500 000

Таблица Г.2 – Коммерческое предложение на ремонтные вклады и монтаж для резервуаров РГС

ФОТО	НАИМЕНОВАНИЕ	ОПИСАНИЕ	КОЛ-ВО	ЕД-ИЗМ	ЦЕНА, РУБ	СУММА РУБ
Стандартная комплектация						
	Вкладыш в РВС-100м³ Размер: Д 4,9 В 6,0	Материал: высокопрочная техническая ткань с ТПУ покрытием (Германия). Вес: 1250 г/м². Прочность на разрыв: 400 Н (минимум) UV Защита Double Seal Protection - technology	1	шт	672 000	672 000
	Монтаж гибких вкладышей внутрь РВС-100м³, установка фланцев.	1 специалист Поставщика (3 дня)	1	услуга	1 170 000	123 500
ОБЩАЯ СУММА ПО ПРЕДЛОЖЕНИЮ С НДС, РУБ					795 000	
	Вкладыш в РВС-1000м³ Размер: Д 12,0 В 10,5	Материал: высокопрочная техническая ткань с ТПУ покрытием (Германия). Вес: 1250 г/м². Прочность на разрыв: 400 Н (минимум) UV Защита Double Seal Protection - technology	1	шт	3 054 000	3 054 000
	Монтаж гибких вкладышей внутрь РВС-1000м³, установка фланцев.	1 специалист Поставщика (10 дней)	1	услуга	488 000	488 000
ОБЩАЯ СУММА ПО ПРЕДЛОЖЕНИЮ С НДС, РУБ					3 542 000	
	Вкладыш в РВС-10000м³ Размер: Д 34,2 В 12,0	Материал: высокопрочная техническая ткань с ТПУ покрытием (Германия). Вес: 1250 г/м². Прочность на разрыв: 400 Н (минимум) UV Защита Double Seal Protection - technology	1	шт	13 140 000	13 140 000
	Монтаж гибких вкладышей внутрь РВС-10000м³, установка фланцев.	1 специалист Поставщика (24 дня)	1	услуга	1 460 000	1 460 000
ОБЩАЯ СУММА ПО ПРЕДЛОЖЕНИЮ С НДС, РУБ					14 600 000	


**МЕТАЛЛ
ИНВЕСТ**

Общество с ограниченной ответственностью «МеталлИнвест»
443099, г. Самара, ул. Крупской, д. 1, литера А, комната 305
ИНН 6317109329 КПП 631701001 Филиал «Нижегородской» АО «АЛЬФА-БАНК»
р/с 40702810029450000286 БИК 042202824
тел/факс: +7 (846) 200-38-38 сайт: www.metal-i.ru e-mail: info@metal-i.ru

Исх. № 1569-24 от 24.10.2024г.

ООО "АЙГИРГРУПП"

Директору

Фатхинурову Ф.Ф.

Уважаемые господа!

На Ваш запрос, о возможности изготовления и поставки оборудования, на данный момент готовы предложить следующие цены и сроки изготовления:

№ пп	Наименование	Цена с НДС 20%, руб	Кол-во	Сумма с НДС 20%, руб
1	Понтон алюминиевый поплавкового типа ПП 4073, Ду 4073 для РВСП-100. С герметичным настилом (ширина рулона 1500мм, толщина мембраны не менее 0,6мм). Поплавки: толщина стенки 2мм, торцы 3мм. В к-те: стационарные опорные стойки 2000мм; уплотняющий затвор мягкого типа ЗМП; уплотняющие тоннели направляющих; вентиляционный люк-клапан 600х600мм (1 шт); нержавеющий болтовой крепеж. Направляющие понтона не входят в поставку. Понтон соответствует требованиям ГОСТ 31385-2016.	1 320 600,00	1	1 320 600,00
2	Понтон алюминиевый поплавкового типа ПП 10430, Ду 10430 для РВСП-1000. С герметичным настилом (ширина рулона 1500мм, толщина мембраны не менее 0,6мм). Поплавки: толщина стенки 2мм, торцы 3мм. В к-те: стационарные опорные стойки 2000мм; уплотняющий затвор мягкого типа ЗМП; уплотняющие тоннели направляющих; вентиляционный люк-клапан 600х600мм (1 шт); нержавеющий болтовой крепеж. Направляющие понтона не входят в поставку. Понтон соответствует требованиям ГОСТ 31385-2016.	1 896 800,00	1	1 896 800,00
3	Понтон алюминиевый поплавкового типа ПП 34200, Ду 34200 для РВСП-10000. С герметичным настилом (ширина рулона 1500мм, толщина мембраны не менее 0,6мм). Поплавки: толщина стенки 2мм, торцы 3мм. В к-те: стационарные опорные стойки 2000мм; уплотняющий затвор мягкого типа ЗМП; уплотняющие тоннели направляющих; вентиляционный люк-клапан 600х600мм (1 шт); нержавеющий болтовой крепеж. Направляющие понтона не входят в поставку. Понтон соответствует требованиям ГОСТ 31385-2016.	6 800 400,00	1	6 800 400,00
ИТОГО с НДС 20%:				10 017 800,00

Доставка: не входит в стоимость Товара.

Условия оплаты: 50% аванс, 50% по готовности к отгрузке.

Период выпуска продукции: 2024г.

Срок изготовления: 45-90 рабочих дней с отгрузкой партиями.

Тара: невозвратная, входит в стоимость Товара.

Гарантия: 12 месяцев со дня ввода в эксплуатацию, но не более 18 мес. со дня получения Товара потребителем.

Срок действия коммерческого предложения: 30 календарных дней.

С уважением,
коммерческий директор

Пестова О.В.

Рисунок Г.1 – Коммерческое предложение ООО «МеталлИнвест»

ПРИЛОЖЕНИЕ Д – СПРАВКИ О ВНЕДРЕНИИ



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА»
Севастопольский проспект, д. 47 А, г. Москва, Россия, 117186; email: niltn@niltn.transneft.ru; www.niltn.transneft.ru
тел. (495) 950-82-95, (499) 799-82-85, (495) 950-86-77, МТС (6553) 5600, 4585, факс (495) 950-82-97, МТС 6553-3297
ОКПО 62816002, ОГРН 1097746556710, ИНН/КПП 7736607502/772701001

10.07.2023

№ НИИ-11/02

На №

от

В диссертационный совет 24.2.428.03

СПРАВКА

о внедрении

Полученная при участии аспиранта Уфимского государственного нефтяного технического университета Габдинурова Руслана Рамилевича методика расчета дыхательной арматуры с учетом перетока при переключении резервуаров принята для разработки нормативной базы для новой редакции раздела **«Методика расчета аварийных уровней и производительности заполнения/опорожнения резервуара»** отраслевого регламента ОР-23020.00-KTH-079-14 **«Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Расчет емкости (полезной) для товарных операций и разработки технологических карт на резервуары и резервуарные парки»**

Директор Центра ИГТТ ООО «НИИ Транснефть»

Р.З. Сунагатуллин

