

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д. И. Менделеева»**

На правах рукописи



Горбунов Сергей Сергеевич

**СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ
РЕЦЕПТУР СМЕШЕНИЯ БЕНЗИНОВ**

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Егоров Александр Фёдорович

Москва - 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ.....	2
ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ОБЗОР И АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ РЕЦЕПТУР СМЕШЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА БЕНЗИНОВ.....	12
1.1 Компаундирование товарных бензинов	12
1.2 Показатели качества компонентов смешения.....	15
1.3 Взаимное влияние компонентов смешения	17
1.4 Математическое моделирование процессов смешения бензинов ..	18
1.4.1 Система контроля и оптимального управления процессом смешения в производстве бензинов и мазутов	25
1.4.2 Системы управления производством бензинов с учетом резервуарного парка компонентов смешения и товарного бензина.....	27
1.4.3 Системы планирования операций производства бензинов	37
Выводы к главе 1.....	48
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЦЕПТУР СМЕШЕНИЯ БЕНЗИНОВ	50
2.1 Статические характеристики процессов смешения бензинов	52
2.2 Динамическая модель процессов смешения бензинов	56
2.3 Онлайн система управления и постановка задач оптимизации рецептур производства бензинов	58
2.3.1 Постановка задач оптимизации рецептур смешения бензинов	60
2.3.2 Оптимизация рецептур смешения бензинов с учетом параметрической неопределенности.....	65
2.3.3 Оптимизация рецептур смешения бензинов с использованием искусственных нейронных сетей прямого распространения	69
2.3.4 Оптимизация рецептур смешения бензинов с использованием рекуррентной нейронной сети Хопфилда	74
2.3.5 Оптимизация рецептур смешения бензинов с использованием обратных рекуррентных нейронных сетей.....	79
2.3.6 Результаты численного моделирования и оптимизации рецептур смешения бензинов с использованием искусственных нейронных сетей .	79
Выводы к главе 2.....	83

ГЛАВА 3 ПОСТАНОВКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ПРОИЗВОДСТВА БЕНЗИНОВ.....	85
3.1 Постановка оптимизационной задачи планирования операций производства бензинов.....	90
3.2 Алгоритмы оптимизации технологической схемы смешения бензинов: резервуары – трубопроводы - смесители	100
Выводы к главе 3.....	103
ГЛАВА 4. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ РЕЦЕПТУР СМЕШЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА БЕНЗИНОВ И МАЗУТОВ	105
4.1 Описание программных модулей	105
4.1.1 Конфигурация базы данных.....	109
4.1.2 Расчет оптимальной рецептуры	118
4.1.3 Планирование рецептур производства бензинов и мазутов.....	127
4.1.4 Балансовое планирование	129
4.1.5 Расчет рецептур смешениям по партиям.....	136
4.2 Параметрическая идентификация нелинейной модели	148
4.2.1 Задача NLM - идентификация нелинейной модели бензинов	148
4.2.2 Идентификация нелинейной модели мазута.....	150
Выводы к главе 4.....	152
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	153
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	155
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	157
ПРИЛОЖЕНИЕ А. РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ СМЕСЕЙ ТЕМНЫХ ПРОДУКТОВ ПО ИНДЕКСАМ ВЯЗКОСТИ КОМПОНЕНТОВ СМЕШЕНИЯ	173
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПЛАНИРОВАНИЕ РЕЦЕПТУР СМЕШЕНИЯ ПО ПАРТИЯМ	175
ПРИЛОЖЕНИЕ В. РАСЧЕТ РЕЦЕПТУРЫ ПРОИЗВОДСТВА МАЗУТА М-100-7	184

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Компаундирование бензинов – это процесс интенсивного смешения бензиновых компонентов и небольшого количества высокооктановых присадок для поддержания требуемых показателей качества товарных бензинов, таких как октановое число по исследовательскому методу (ОЧИМ), октановое число по моторному методу (ОЧММ), давление насыщенных паров (ДНП) по Рейду и т. п.

В технологической цепочке установок на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) процесс смешения бензинов является одной из важных и завершающих стадий, определяющих качество товарных бензинов и, как следствие, эффективность производства НПЗ в целом.

Из множества возможных рецептов компонентов смешения и их показателей качества, удовлетворяющих спецификации товарных бензинов, выбирается одна, в соответствии с выбранным критерием оптимальности, обеспечивающая эффективность компаундирования бензинов.

Технологическая структура мощностей переработки нефти формировалась без достаточного развития процессов, повышающих качество продукции. Существенно отстает от требований времени развитие технологических процессов получения товарных бензинов, обеспечивающих качество моторных топлив.

Техническая реализация оптимального компаундирования требует решения целого ряда задач комплексной автоматизации объекта - автоматический контроль и регулирование показателей качества товарного бензина в режиме реального времени с использованием:

- поточных анализаторов качества продукта в замкнутом контуре автоматического управления смешением товарных бензинов;
- адаптивной математической модели смешения с учетом нелинейности ряда показателей качества товарного бензина от состава и показателей

качества смешиваемых компонентов, неопределенности режимных параметров для улучшения качества системы управления;

- интеллектуальных систем мониторинга и коррекции измерений для обеспечения достоверности информации и, как следствие, повышения качества управления.

Эффективность процесса достигается за счет сокращения расходов дорогостоящих компонентов бензина, минимизации запаса качества товарных бензинов и издержек за счет оптимального расписания ведения процесса смешения.

С ростом объемов потребления автомобильных бензинов, а также в свете ужесточения требований к качеству товарных продуктов при переходе на современные европейские стандарты качества, предъявляемые к высокооктановым бензинам, математические модели, наиболее точно описывающих процесс смешения в производстве бензинов, являются основным и эффективным инструментом решения комплекса задач оптимизации и управления процессами смешения топлив.

Таким образом, задача повышения эффективности и оптимизации процессов производства бензинов является крайне актуальной как с точки зрения повышения качества продукции, так и с экономической точки зрения.

Степень научной разработанности проблемы.

Процесс компаундирования топлив (бензины, мазуты) является завершающей стадией цепочки производств товарных топлив, определяющий эффективность переработки нефти на современном этапе развития отечественной нефтеперерабатывающей промышленности.

Для повышения качества получаемого бензина и его выхода ведется поиск путей совершенствования технологии компаундирования, поиск новых рецептур смешения с использованием присадок и добавок, повышающих октановое число.

Эта задача может быть решена экспериментальными способами или с использованием методов математического моделирования.

Ряд показателей качества компонентов топливной смеси, таких как, давление насыщенных паров и октановые числа для бензинов и вязкости для мазутов, не обладают свойством аддитивности. Учет нелинейности изменения показателей качества товарных топлив от состава компонентов смешения при разработке математических моделей, как инструмента решения задач оптимизации рецептур и оптимального управления в режиме реального времени, обеспечивают эффективность системы управления.

В работе отмечен и проанализирован вклад отечественных и зарубежных учёных в разделы науки, связанных с темой диссертационной работы, следующих отечественных и зарубежных учёных:

- Теоретические основы математических методов, компьютерного моделирование и оптимизация режимов сложных технологических систем разработаны в трудах РХТУ им. Д.И. Менделеева: академика АН СССР Кафарова В. В., академика РАН Мешалкина В. П., профессора Егорова А. Ф., профессора Савицкой Т. В.;
- Проблемам повышения эффективности разрабатываемых рецептур смешения бензинов и оптимального управления процессом компаундирования посвящены труды авторов: Иванчина Э. Д., Поздяева В. В., Сомова В. Е., Кузичкина Н. В., Сахневича Б. В., Киргиной М. В.;
- Существенный вклад в решение проблемы оптимального управления процессом компаундирования в режиме реального времени с учетом нелинейности показателей качества товарного топлива отражены в работах Никитина В. А., Мусаева А. А.;
- В значительной части работ по исследованию и разработке систем управления учитывается неопределенность параметров

компаундирования топлив в режиме реального времени, которые отражены в трудах авторов:

- Zhang Y., Monder D. S., Forbes J. F. «Real-time optimization under parametric uncertainty: a probability constrained approach», J. of Process Control. – 2002,
- A. Singh, J. F. Forbes, P. J. Vermeer, S. S. Woo J. «Model-based real-time optimization of automotive gasoline blending operations of Process Control». – 2000. – Vol. 10, Issue 1. – P. 43–58,
- Muller A. «New method produces accurate octane blending values», Oil & Gas J. – 1992. – Vol. 90, Issue 12. – P. 80–90,
- Zahed A. H., Mullah S. A., Bashir M. D. «Predict octane number for gasoline blends», Hydrocarbon Processing, 1993. – Vol. 72, Issue 5. – P. 85–87.
- Многопериодное оптимальное планирование и управление компаундированием топливных смесей с учетом ограниченных запасов компонентов смешения представлено в трудах Mahalec V., Castillo Castillo P., «Nonlinear Blend Scheduling via Inventory Pinch-based Algorithm using Discrete and Continuous-time Models», Dept. of Chemical Engineering, McMaster University, Hamilton, ON L8S 4L8, Canada.

Цель работы и постановка задачи исследования.

Целью диссертационной работы является постановка задач, разработка математических моделей, алгоритмов и программного комплекса оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения производства бензинов и мазута.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Анализ существующих на практике систем приготовления и оптимизации процессов компаундирования товарных бензинов;
2. Разработка математической модели смешения бензинов с учетом нелинейной зависимости ряда показателей качества бензиновых смесей (ОЧИМ, ОЧММ, ДНП) и мазута (вязкости);

3. Разработка и реализация онлайн-оптимизационных моделей и алгоритмов в условиях параметрической неопределенности, как инструмента решения проблемы эффективности процесса смешения бензинов.
4. Разработка программного комплекса оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения производства бензинов и мазута.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Сформулирована задача разработки математической модели смешения бензинов и мазутов с учетом нелинейности показателей качества топливной смеси и неопределенности параметров технологического режима;
2. Разработана система оптимального управления смешением бензинов в условиях параметрической неопределенности;
3. Разработан алгоритм интеллектуальной системы мониторинга и управления процессом смешения в производстве бензинов в режиме реального времени с целью уменьшения влияния возмущений на процесс компаундирования;
4. Разработан комбинированный алгоритм авто-ассоциативной нейронной сети и программного комплекса оптимального планирования и оптимизации рецептур для моделирования и управления процессом смешения бензинов.
5. Разработаны математические модели и алгоритмы оптимизации планирования операций процесса производства бензинов.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработке автоматизированной системы, математических моделей и алгоритмов оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения производства бензинов и мазутов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

1. Сформулированы критерии оптимизации рецептур смешения бензинов и мазутов – маржинальный и критерий оптимизации рецептур смешения бензинов с точки зрения максимума производства товарного бензина;
2. Предложена модель и алгоритм онлайн-мониторинга элементов измерительной системы с использованием авто-ассоциативных нейронных сетей (ААНС) и аппарата статистического анализа данных для группировки по их принадлежности к технологическим режимам и самокоррекции ошибочных измерений для каждой из этих групп.
3. Разработаны база данных и программный комплекс решения задач оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения производства бензинов и мазута.

Оптимизация рецептур смешения бензинов обеспечит увеличение выпуска высокооктановых бензинов без изменения объемов вовлекаемых сырьевых потоков, что свидетельствует о повышении эффективности использования ресурсов производства, позволяющей производителю получить дополнительную прибыль.

Методология и методы исследования. При решении перечисленных задач использовались следующие методы и подходы:

1. Математическое моделирование и оптимизации процессов смешения бензинов и мазутов;
2. Статистический анализ измерительной информации;
3. Авто-ассоциативная нейронная сеть для построения интеллектуальной системы мониторинга текущих измерений с коррекцией грубых ошибок в режиме реального времени.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Существующие подходы разработки математических моделей и систем управления в офф/онлайн режимах и оптимизации рецептур смешения бензинов;

2. Разработка математической модели расчета рецептур смешения бензинов и мазутов;
3. Постановка задачи оптимизации рецептур смешения бензинов;
4. Интеллектуальная система управления смешением бензинов в режиме реального времени в условиях параметрической неопределенностью;
5. Разработка программного комплекса оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения бензинов и мазутов (ПК ОПОР).

Достоверность результатов исследования основана на использовании исходных данных для моделирования и расчета рецептур смешения бензинов и мазутов, показателей эффективности рецептур смешения для сравнения с реальными данными по рецептурам на НПЗ.

Личный вклад автора заключается в проведении основного объема теоретических и экспериментальных работ, изложенных в диссертационной работе, включая обработку и обобщение экспериментальных и теоретических исследований, построение математических моделей рецептур смешения и алгоритмов расчета и анализа результатов, оформление результатов в виде научных публикаций и докладов на международных научных конференциях.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы представлены на научных конференциях: XXXII - Международная научная конференция Математические Методы в Технике и Технологиях ММТТ-32, 4/2019, (Санкт-Петербург, Россия); XXXV - Международная научная конференция Математические Методы в Технике и Технологиях ММТТ-35 30 мая – 03 июня 2022 г., (Ярославль, Россия); VI Международная научно-практическая конференция «Информатизация инженерного образования» ИНФОРИНО-2022 Национальный исследовательский университет «МЭИ», 12–15 апреля 2022 г. (Москва, Россия); VII региональная научно-техническая конференция «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России» посвященный 100-летию со дня рождения В.Л. Березина, 19-

21 сентября 2023 г.; LXXI Международная научно-практическая конференция «Научный форум: технические и физико-математические науки», Москва, 2024.

Публикации.

По теме диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях из перечня ВАК. Результаты научного исследования подтверждены участием на научных мероприятиях всероссийского и международного уровня: опубликовано 7 работ в материалах всероссийских и международных конференций.

Получено свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2018613287 «Программный комплекс оптимального планирования и оптимизации бензинов и мазутов» от 07.03.2018 г., Версия 2.0 (ПК ОПОР v 2.0).

Получено свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2023689075. Программный комплекс обнаружения утечки в трубопроводах транспортировки нефтепродуктов и природного газа

Структура и объём работы.

Диссертационная работа включает в себя введение, четыре главы, выводы, список используемой литературы и приложения. Общий объём диссертации составляет 185 страниц, включающие 80 рисунков, 17 таблиц и 3 приложения. Список цитируемой литературы содержит 154 наименования.

ГЛАВА 1 ОБЗОР И АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ РЕЦЕПТУР СМЕШЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА БЕНЗИНОВ

1.1 Компаундирование товарных бензинов

Процесс компаундирования является рациональным способом приготовления товарных бензинов, так как позволяет получать продукцию, отвечающую техническим требованиям и наиболее полно и эффективно использовать имеющиеся ресурсы компонентов смешения, получаемых на различных установках переработки нефти.

Компоненты, вовлекаемые в процесс компаундирования:

- базовые компоненты нефтепереработки, являющиеся основными в рецептуре смешения бензинов, определяющие свойства получаемых бензинов;
- присадки и добавки для повышения эксплуатационных показателей товарных бензинов (ОЧИМ, ОЧММ, ДНП).

Основным недостатком существующих систем управления процессом компаундирования бензинов является отсутствие эффективных автоматизированных систем оптимального управления в режиме реального времени, что обусловлено следующими причинами:

- Отсутствием, адекватных реальному объекту управления в широком диапазоне изменения параметров, адаптивных математических моделей;
- Ошибками в определении соотношений компонентов и присадок;
- Неточностью измерений количественных и качественных показателей компонентов, поступающих на смешение;
- Наличием неучтенных потерь в производстве товарных бензинов.

Известны различные системы оптимизации и управления процессами компаундирования бензинов [6-11, 14], ориентированные на минимизацию отклонений от заданной спецификации бензинов [6, 11], к изменяющемуся на

рынке спросу на топливо [7, 9] и другие показатели, что повышает гибкость и эффективность современных НПЗ.

Одной из основных причин является также неопределенность параметров технологического режима смешения бензинов, таких, как начальная и рассчитываемая в процессе управления и регулирования рецептура компонентов смешения из-за нарушения режимов работы установок, изменения режимных параметров: по температуре, давлению, расходу, показателям качества компонентов смешения, погрешностям измерительной системы (ИС).

Приведенные выше причины являются основной проблемой системы управления смешением бензинов, приводящей к несоответствию техническим требованиям товарного продукта по качеству и, как следствие, к потерям из-за повторного смешения [10].

Несовершенство технологической схемы компаундирования бензинов, системы контроля и управления также приводит к снижению эффективности НПЗ из-за увеличения технологических издержек, нарушения плана производства товарных бензинов из-за неоптимального расписания операций смешения и т. п.

Повышение качества производимых бензинов и мазутов достигается совершенствованием технологии компаундирования, поиском и формированием новых рецептур смешения с использованием присадок и добавок, повышающих октановое число и обеспечивающих технологическую и экономическую эффективность рецептур. Эта задача решается с использованием математического моделирования, новых информационных технологий и экспериментальных исследований [1-5, 12-14]. Однако оптимизация процесса компаундирования высокооктановых бензинов затрудняется рядом факторов физико-химических показателей компонентов бензиновой смеси, таких как, давление насыщенных паров и октановое число, не обладающих свойством аддитивности от состава рецептур и показателей

качества компонентов смешения, непрерывно меняющегося состава сырья. Сокращение времени компаундирования и повышение эффективности данного процесса возможно путем использования методов математического моделирования и компьютерных моделирующих систем.

Построение и реализация онлайн-оптимизационных адаптивных моделей и алгоритмов управления в условиях неопределенности режимных параметров, является действенной мерой повышения эффективности современных систем управления процессами производства бензинов и мазутов [14].

Разработка рецептур производства высокооктанового бензина основана на изменяющихся показателях качества бензинов, имеющихся компонентов смешения и требованиях к целевому товарному продукту. Целесообразное и экономически выгодное соотношение компонентов определяется для каждой партии товарного бензина в соответствии критериями оптимальности и технологическими ограничениями [9, 21] при использовании существующих программных комплексов оптимизации рецептур бензинов.

Наиболее важными показателями товарного бензина являются давление насыщенных паров (ДНП), октановые показатели ОЧИМ и ОЧММ, содержание в бензиновой смеси таких компонентов как сера, бензол, ароматических углеводородов и олефинов.

Высокая детонационная стойкость бензинов определяет нормальное сгорание топлива при работе двигателя. При сжатии рабочей смеси происходит повышение давления и температуры, начинается процесс окисления углеводородов, который начинает проходить более интенсивно после воспламенения смеси. При недостаточной стойкости к окислению оставшейся несгоревшей части углеводородов, происходит усиленное накопление перекисных соединений, что в дальнейшем приводит к их взрывному распаду.

Если концентрация перекисных соединений велика, может произойти тепловой взрыв, который вызывает самовозгорание топлива.

Самовоспламенение части топлива приводит к детонационному сгоранию оставшейся части топлива (взрывному горению). Детонационное горение вызывает перегрев, что приводит к повышенному износу, или даже местным разрушениям двигателя.

Следовательно, основным показателем, определяющим соотношение компонентов в товарных бензинах, является детонационная стойкость. При разработке рецептуры товарных бензинов для обеспечения требуемой детонационной стойкости товарных бензинов используются высокооктановые бензиновые компоненты и антидетонационные присадки, вовлекаемые в процесс смешения.

Современные высокооктановые товарные бензины получают смешением компонентов, получаемых в процессах прямой перегонки, крекинга, риформинга, коксования и других процессов переработки нефти.

1.2 Показатели качества компонентов смешения

Углеводороды, входящие в состав бензинов, в зависимости от структуры делятся, в основном, на четыре группы: парафины, олефины, нафтены и ароматические углеводороды. Парафины являются предельными углеводородами, поэтому обладают весьма слабой склонностью к взаимодействию с другими веществами, т.е. при обыкновенной температуре они не окисляются и не поддаются действию щелочей. Они входят в состав авиационных и автомобильных бензинов в количестве от 25 % до 60 %.

К парафинам относятся также их изомеры - изопарафины (изооктан, изопентан, n-гексан). По своим физико-химическим показателям изопарафины мало отличаются от парафинов нормального строения, но по характеру сгорания в бензиновых двигателях они отличаются очень сильно.

Изопарафины, обладающие более высокими антидетонационными свойствами, применяются как высокооктановые компоненты топлив. Парафины под действием высоких температур и давлений легко распадаются и

окисляются в присутствии воздуха, образуя пероксиды, способствующие детонации топлива. Изопарафины более устойчивы, сгорают и распадаются с меньшей скоростью не образуя пероксиды, снижая скорость разложения парафинов нормального строения. Это особенно важно при работе двигателя на бедных смесях, когда имеется избыток кислорода.

Некоторым недостатком парафиновых углеводородов является то, что они обладают сравнительно плохими низкотемпературными свойствами, поэтому с увеличением содержания этих углеводородов в топливе повышается его температура застывания [15].

Олефины нерастворимы в воде, но растворимы в спирте. Олефины способны присоединять атомы водорода и некоторых других элементов, превращая двойные связи в одиночные и переходя в парафины. Они легко окисляются, образуя окислы и смолы. В сырой нефти непредельные углеводороды почти не встречаются, так как обладают высокой химической активностью. Они образуются обычно при вторичной переработке (крекинге) нефти.

Нафтенновые углеводороды входят в авиационные и автомобильные бензины прямой гонки примерно в таком же количестве, как и парафиновые. Антидетонационные свойства нафтенновых углеводородов ниже изопарафиновых, но выше нормальных парафиновых.

Ароматические углеводороды обладают высокими антидетонационными свойствами и применяются в качестве высокооктановых компонентов бензинов. В бензинах прямой гонки, которые в основном состоят из парафинов и нафтеннов, ароматических углеводородов содержится не более 10% и их влияние незначительно. Добавление же в эти бензины чрезмерных количеств различных ароматических соединений отрицательно сказывается на их физико-химических и эксплуатационных свойствах. Повышается вязкость и температура застывания бензинов, снижается их испаряемость, ухудшающая

пусковые свойства, увеличивается гигроскопичность, токсичность, склонность к нагарообразованию и самовоспламенению [15].

Наибольшей детонационной стойкостью обладают ароматические углеводороды, наименьшей – нормальные парафиновые. Остальные углеводороды, которые входят в состав бензинов, занимают промежуточное положение. Можно получить бензины с различной детонационной стойкостью, варьируя углеводородным составом.

1.3 Взаимное влияние компонентов смешения

Молекулы и атомы оказывают друг на друга взаимное влияние, свойства индивидуальных компонентов в смеси с другими углеводородами отличаются от их свойств в свободном состоянии. Таким образом, для показателей детонационной стойкости не выполняется принцип суперпозиции, то есть не обладает свойством аддитивности [16].

Энергия связи между связанными друг с другом молекулами зависит от их вида и природы. Наиболее существенное влияние оказывает ориентационное взаимодействие, которое проявляется у веществ, состоящих из диполей [17].

Электрические заряды в молекулах углеводородов бензиновой фракции распределены неравномерно. Возможно преобладание положительных или отрицательных зарядов в определенной части молекулы. Дипольный момент – это численное выражение поляризации молекул.

Определенные взаимные расположения молекул относительно друг друга являются более устойчивыми, по сравнению с остальными [17]. Это обуславливается наличием диполя у молекулы. Ароматические углеводороды обладают наибольшей полярностью. Поэтому неаддитивность октановых чисел смеси бензинов, при вовлечении в смешение нефтяных фракций, в которых содержится значительное количество ароматических углеводородов, объясняется изменением конфигурации молекул. Структурная форма и размер

молекул оказывают прямое влияние на нелинейность изменения октановых чисел [17].

1.4 Математическое моделирование процессов смешения бензинов

Адекватная математическая модель смешения бензинов является эффективным инструментом построения системы контроля, прогнозирования качества бензинов и реализации системы усовершенствованного оптимального управления. Процесс смешения бензинов включает два типа характеристик: статическая и динамическая характеристики поточных смесителей и резервуаров.

Показатели качества бензинов включают октановое число, давление паров Рейда, летучесть и т. п. Процесс смешения включает два типа характеристик объекта управления: статическое и динамическое смешение.

Процессы компаундирования топлив (бензины, мазуты, дизельное топливо) являются важной технологической стадией в производстве топлив.

Контроль, прогнозирование качества бензинов и реализация оптимального управления на основе адекватной математической модели промышленного объекта компаундирования обеспечивает наибольшую эффективность автоматизированной станции смешения бензинов (АССБ).

Процесс смешения бензинов включает два типа характеристик объекта управления - статические и динамические характеристики АССБ

В связи с этим используются статические и динамические характеристики объекта смешения и способы их аппроксимации с использованием нейросетевых технологий и нечеткой логики.

Для улучшения качества бензинов предложено много усовершенствованных методов контроля [22-24]. Все эти подходы основываются на использовании адекватных математических моделей операции смешения. Моделирование смешения бензинов становится ключевой проблемой для контроля, прогнозирования качества бензина и реализации

оптимального управления на основе модели. Обычно используют линейную модель с элементами неопределенности для эффектов нелинейности смешения.

Используемые модели смешения являются статическими [23] или динамическими [22].

Точная математическая модель смешения бензинов слишком сложна для аналитической обработки. Было предпринято много попыток ввести упрощенные модели для построения контроллер «на основе модели» [25].

Распространенным методом для аппроксимации смешения является использование линейной (идеальной) модели [25] или рассмотрение операции смешивания с достаточно малой нелинейной неопределенностью [26].

Практически, большинство смешений в действительности производится вручную далекого от идеала. Модель смешения бензинов реального объекта, основанная на эксплуатационных данных, представляется очень важной для инженеров.

Последние результаты показывают, что использование нейронных сетей, очень эффективны при моделировании широкой категории сложных нелинейных систем, когда нет полной информации о модели из-за неопределенности в исходных данных. Нейронные сети могут быть классифицированы как прямые (статические) и рекуррентные (динамические). В большинстве публикаций по идентификации нелинейных систем используются сети прямой связи, например, многослойные перцептроны (МСП), которые реализованы для аппроксимации нелинейных функций.

Статические нейронные сети подходят для моделирования статических нелинейных систем [81]. Поскольку рекуррентные сети включают обратную связь, они обладают мощными возможностями представления и могут успешно преодолеть недостатки сетей прямого распространения для моделирования динамической системы [29].

Подход нейро-моделирования использует замечательные особенности нейронных сетей, но отсутствие математической модели процессов смешения затрудняет получение теоретических результатов по стабильному обучению.

Очень важно обеспечить стабильность нейро-моделирования в теории, прежде чем использовать их в некоторых реальных приложениях. Подход Ляпунова может быть использован непосредственно для получения надежных алгоритмов обучения для нейронных сетей непрерывно во времени [30, 31].

Нейронные сети с дискретным временем более удобны для реальных приложений. Изучены два типа устойчивости нейронных сетей с дискретным временем. Исследование устойчивости нейронных сетей можно найти в работах [32, 33].

Стабильность алгоритмов обучения обсуждались в [34, 81]. В [34] предполагается, что нейронные сети могут достаточно точно описывать нелинейные системы и пришли к выводу, что алгоритм обратного распространения гарантирует точную сходимость. В [81] была использована теорема Гершгорина для вывода условий устойчивости нейро-сетевого обучения.

Хорошо известно, что нормальные алгоритмы идентификации устойчивы для идеальных объектов [35].

Отсутствие робастности в идентификации параметров было продемонстрировано в [82]. Несколько надежных модифицированных методов были предложены в [35].

Алгоритмы коррекции весовых коэффициентов (синаптических) нейронных сетей являются методом параметрической идентификации, достаточно точно описывающий нелинейность [34]. Как правило, следует применять некоторые модификации алгоритма нормального градиента или обратного распространения, чтобы процесс обучения был стабильным.

В [81] были добавлены некоторые жесткие (строгие) ограничения в закон обучения, в [33] динамическое обратное распространение было изменено с

помощью ограничений стабильности применением локально рекуррентных нейронных сетей прямого распространения.

Другим обобщенным методом является использование надежных модифицированных методов робастного адаптивного управления [35]. В [36] применили σ -модификацию, в [38] использовали модифицированное δ -правило и в [37] использовали мертвую зону в алгоритмах настройки веса.

Стабильность между состояниями является еще одним изящным подходом к анализу устойчивости, кроме метода Ляпунова. Это может привести к общим выводам об устойчивости с использованием характеристик ввода и состояния.

Применяется подход стабильности устойчивых состояний, чтобы получить некоторые новые законы стабильного обучения, которые не нуждаются в надежных модификациях для статического и динамического моделирования операции смешивания бензина.

Оптимизация процесса смешения товарных бензинов

На предприятиях нефтепереработки технология производства товарных бензинов не является универсальной и существуют свои отличия по составу технологических установок и составу сырья на НПЗ.

В условиях изменения норм и требований к товарным бензинам корректируются отработанные рецептуры смешения ввиду меняющегося состава сырья и их показателей качества, активности катализаторов, «старения» оборудования и определить экспериментально эффективную рецептуру товарных бензинов затруднено из-за многофакторности этой проблемы. Для этой проблемы многокритериальной оптимизации процесса компаундирования эффективным методом решения является математическое моделирование и оптимизация с разработкой и использованием программных комплексов моделирования и оптимизации.

В настоящее время на рынке программных моделирующих систем существует ряд коммерческих продуктов [88, 89], таких как: Aspen Process

Industry Modeling System (Aspen PIMS) компании Aspen Technology Inc., Blend Ratio Control (BRC) и Refinery and Petrochemical Modeling System (RPMS) компании Honeywell International Inc. и Blend Optimization and Supervisory System (BOSS) компании AVEVA Refinery Off-sites (Invensys plc.) и другие, позволяющих оптимизировать использование сырьевых ресурсов смешения для производства товарных бензинов. Эти программные комплексы дают возможность автоматически рассчитывать оптимальную, с экономической точки зрения, рецептуру смешения [18-20].

Модули планирования смешений обеспечивают многопериодное автономное планирование последовательностей смешений и интерактивную оптимизацию рецептур. Модулями могут быть как независимые программные продукты, так и расширенные программные комплексы, снабженные полноценным единым пользовательским интерфейсом, базой данных, моделями, корреляциями, ограничениями, стратегиями и алгоритмами оптимизации и управления.

Основные функции могут быть реализованы как в автономном (оффлайн), так и в интерактивном (онлайн) режимах для постоянного обновления рецептур при планировании последовательности смешений и строгого применения данных о текущих и будущих запасах компонентов смешения с учетом их ограничений.

Система определяет оптимальные рецептуры, скорости потоков и время начала последовательностей смешений. Оптимизация зависит от ограничений по запасам, прогнозируемых на горизонте планирования, учитывает потоки компонентов, поступления и отгрузки, паспортизацию товарных продуктов в резервуарах, сертификацию, а также ограничения по времени. В случае невозможности получения выполнимого смешения, текущие ограничения могут быть приоритетными.

В автономном режиме генерируется и хранится серия/последовательность (ежемесячную и/или еженедельную) рецептур

смешений. В интерактивном режиме используются результаты интерактивных измерений качественных характеристик получаемой смеси, для реализации полного потенциала экономической оптимизации без ущерба для общего плана последовательности смешений, принимая в расчет долгосрочные ограничения по запасам.

Однако, несмотря на значительные достоинства подобных программных комплексов, применение их в ряде случаев затруднительно ввиду того, что при проведении расчетов часто используются не фактические показатели качества тех или иных компонентов, а условные характеристики смешения, что может привести к значительным погрешностям расчетов и потере эффективности использования ресурсов в процессе компаундирования бензинов.

Для улучшения качества бензина известны много усовершенствованных методов контроля и управления [22-24]. Все эти подходы основываются на использовании адекватных математических моделей смешения бензинов, корректной постановки и ограничений в задачах оптимального управления.

Моделирование смешения бензинов становится ключевой проблемой для контроля, прогнозирования качества бензинов и реализации оптимального управления на основе модели. Обычно используют линейную модель с элементами неопределенности для эффектов нелинейности смешения. Используемые ими модели смешения являются динамическими или [22] статическими [23].

Точная математическая модель смешения бензинов слишком сложна для аналитической обработки. Было предпринято много попыток ввести упрощенные модели для построения контроллера «на основе модели» [25].

Распространенным методом математического описания процессов смешения является использование линейной модели [23] или рассмотрение операций смешения с достаточно малой нелинейной неопределенностью [26].

В действительности, в процессе компаундирования бензинов в основном много ручных операций и существующие системы управления далеки от

эталона. Адекватная математическая модель смешения бензинов реального объекта, основанная на эксплуатационных данных, является очень важной для построения системы усовершенствованного управления технологическими процессами (APC - Advanced Process Control) в режиме реального времени.

Искусственные нейронные сети

В [27] представлены результаты исследований и численного моделирования с применением технологии искусственных нейронных сетей (ИНС), показывающие эффективность моделирования сложных нелинейных систем в условиях неполной информации об объекте управления из-за неопределенности в исходных данных. Используемые нейронные сети могут быть классифицированы как прямые (статические) и рекуррентные (динамические).

Подход, обеспечивающий стабильность состояния объекта управления, строится на надежных алгоритмах обучения двух нейронных сетей – статических и динамических.

В большинстве публикаций по идентификации нелинейных систем используются сети прямой связи, такие как многослойные перцептроны, которые реализованы для аппроксимации нелинейных функций. Статические нейронные сети подходят для моделирования статических нелинейных систем [28].

Поскольку рекуррентные сети включают обратную связь, они обладают мощными возможностями представления и могут успешно преодолеть недостатки сетей прямой распространения для моделирования динамической системы [29].

Моделирование с применением нейросетевых технологий использует преимущественные особенности нейронных сетей, таких, как стабильность (устойчивость) процесса нейромоделирования.

В [30, 31] представлены надежные алгоритмы непрерывного обучения нейронных сетей во времени. Нейронные сети с дискретным временем более

удобны для реальных приложений. Изучены два типа устойчивости нейронных сетей с дискретным временем. По устойчивости нейронных сетей можно найти в работах [5, 32, 33].

Стабильность алгоритмов обучения рассмотрены в [28, 34]. В [28] предполагается, что нейронные сети могут достаточно точно описывать нелинейные системы и представлен вывод, что алгоритм обратного распространения гарантирует точную сходимость. В [34] была использована теорема Гершгорина для вывода условий устойчивости нейросетевого обучения.

Алгоритмы коррекции весовых (синаптических) коэффициентов нейронных сетей является методом параметрической идентификации и алгоритм нормального градиента стабилен, когда модель нейронной сети может точно описывать нелинейность [34]. Как правило, применяются некоторые модификации алгоритма нормального градиента или обратного распространения, чтобы процесс обучения был стабильным.

В [28] были добавлены некоторые жесткие (строгие) ограничения в закон обучения, в [33] динамическое обратное распространение было изменено с помощью ограничений стабильности. Другим обобщенным методом является использование надежных модифицированных методов робастного адаптивного управления [35]. В алгоритмах настройки весов в [36] используется σ -модификация, в [38] - модифицированное δ -правило и в [37] используется мертвая зона.

1.4.1 Система контроля и оптимального управления процессом смешения в производстве бензинов и мазутов

Система оптимизации, контроля и управления смешением бензинов обеспечивает:

- настройку автономного (оффлайн) режима смешения с учетом требуемых ограничений;

- проверку исходной оптимальной рецептуры смешения с рецептурой онлайн-оптимизации в интерактивном режиме;
- соответствие с экономически оптимальной рецептурой, с учетом всех эксплуатационных ограничений.

Система минимизирует себестоимость продуктов смешения, снижает запас по качеству и (или) отклонение от рецептуры с учетом:

- всех ограничений на работу насосов станции смешения бензинов;
- ограничений продуктовых резервуаров и партий смешения бензинов на станции смешения;
- текущих запасов компонентов и незаполненного объема в резервуарах;
- данных по резервуарам и партиям компонентов.

В случае невозможности формирования и поддержания оптимальной рецептуры или непопадания в спецификацию система выдает планировщику рекомендации, касающиеся способов исправления ситуации.

Для оптимального баланса пропускной способности при перекачке компонентов смешения настраивается использование дополнительной функции автоматического выбора насосов. Система может использоваться для оптимизации смешения любых типов нефтепродуктов, в том числе смешение в трубопроводе сырой нефти для осуществления обычных перекачек резервуар - резервуар, резервуар-трубопровод/судно и для обеспечения непрерывного выполнения операций в технологической цепочке с контролируемыми и бесконтрольными потоками компонентов.

Одновременно оптимизируются рецептуры для нескольких узлов (станций) смешения, которые производят различные товарные нефтепродукты из общих компонентов.

Система содержит в себе библиотеку стандартных общепринятых моделей смешения с учетом нелинейной зависимости показателей качества товарного бензина.

Расчеты итоговых качественных показателей смеси бензинов по модели смешения корректируются с помощью обратной связи от интерактивного анализатора или по данным измерений проб в лаборатории, которые используются, как сигналы при отклонении от заданных параметров смеси. Значения качественных показателей компонентов могут быть автоматически получены из системы хранения результатов лабораторных анализов проб от лабораторной информационной менеджмент системы (ЛИМС), с поточных анализаторов.

1.4.2 Системы управления производством бензинов с учетом резервуарного парка компонентов смешения и товарного бензина

За пределами установок переработки нефти и нефтяных фракций НПЗ производственные площадки в основном состоят из резервуаров для хранения сырья и товарных продуктов, смесителей компонентов бензинов и сети трубопроводов, связывающих резервуары со смесителями.

Для своевременного производства бензинов, это оборудование должно быть выбрано и использовано надлежащим образом в нужное время. Тем не менее, предыдущие исследования не учитывали сеть трубопроводов.

Комплексная модель целочисленного линейного оптимального планирования смешением бензинов (MILP - Mixed Integer Linear Programming) включает резервуары и сети трубопроводов [3, 4, 52]. Моделирование и постановка задачи оптимизации осуществляется для станции смешения топлив, включающей трубопроводную сеть, резервуары компонентов смешения и товарного топлива.

Ограничения в модели планирования рецептур смешения расширяются с учетом оборудования станции смешения бензинов.

Сырая нефть из резервуаров хранения по трубопроводам поступает на установки переработки. С блока установок переработки бензиновые компоненты с резервуарного парка компонентов хранения через сеть

трубопроводов подаются на станцию смешения бензинов. Товарный продукт смешения поступает в продуктовые резервуары и далее отгружается Заказчику. Упрощенная схема показана на рисунке 1.1.

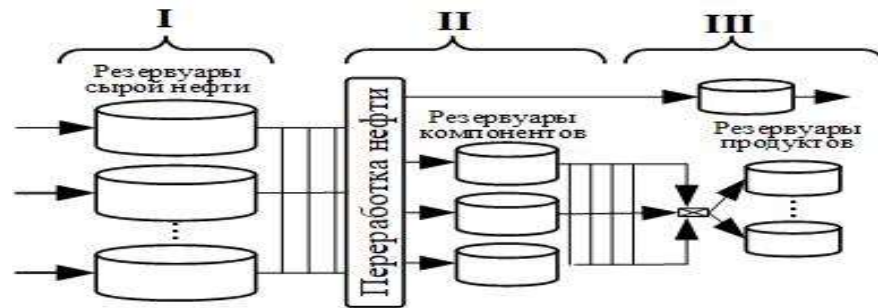


Рисунок 1.1 - Упрощенная блок-схема переработки нефти

В этом случае объектом планирования и управления является интегрированный объект, который состоит из компонентных и продуктовых резервуаров, поточных смесителей и сети трубопроводов между ними. Станция смешения бензинов определяется процессами: подачи компонентов из резервуаров хранения компонентов смешения или с установок переработки насосами в смеситель, перекачки смеси бензинов в продуктовые резервуары и отгрузка бензина.

Целью оптимального интегрированного оперативного планирования является формирование оптимального расписания, в соответствии с которым система управления осуществляет выбор и использование компонентных и продуктовых резервуаров, блендеров и трубопроводов, обеспечивающий непрерывность производства и отгрузки продукта Заказчику.

До настоящего времени было предложено несколько моделей планирования с использованием методов математического программирования и мета-эвристических методов [40-43] для совокупности (группы) взаимосвязанных процессов. В представленных работах применяется метод математического программирования с точки зрения оптимальности (стоимости) и оперативности планирования.

В работах [39, 44] предложены дискретные модели планирования по времени на временных интервалах и на основе ситуативных технологических событий [45 - 47].

В [48] для дискретной системы планирования по времени разработан комплексный подход координации краткосрочного планирования объектов смешения нескольких продуктов.

Задача нечеткого линейного программирования сформулирована в [49], обеспечивающая экспертное нечеткое решение. Постановка и решение задачи оптимального автономного смешения бензинов при краткосрочном планировании на временных интервалах рассмотрена в [50].

В [51] сформулирован критерий эффективности в задаче MILP станции смешения бензинов, основанный на непрерывном представлении процесса компаундирования во времени, но при этом не были учтены сети трубопроводов.

Планирование маршрутов подачи компонентов смешения от резервуаров к смесителю было проведено иерархически с использованием эвристических правил после запланированного оптимального графика подключения резервуара, рисунок 1.2а. В этом подходе планирования смешения бензинов не учитывалась сеть трубопроводов подачи компонентов смешения.

В [52] представлена интегральная модель планирования резервуаров и сети трубопроводов смешения бензинов с использованием метода MILP, укрупненная схема алгоритма представлена на рисунке 1.2б. Для этой цели применяется модель планирования, основанная на конкретных ситуационных технологических событиях [51], учитывая гибкость планирования и строгость ограничений для резервуаров и блендера.

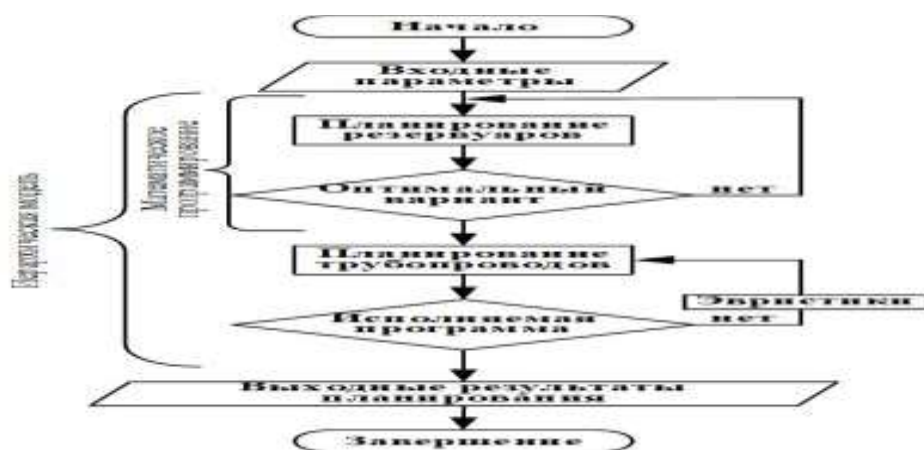


Рисунок 1.2а - Иерархическая модель составления расписаний с эвристикой

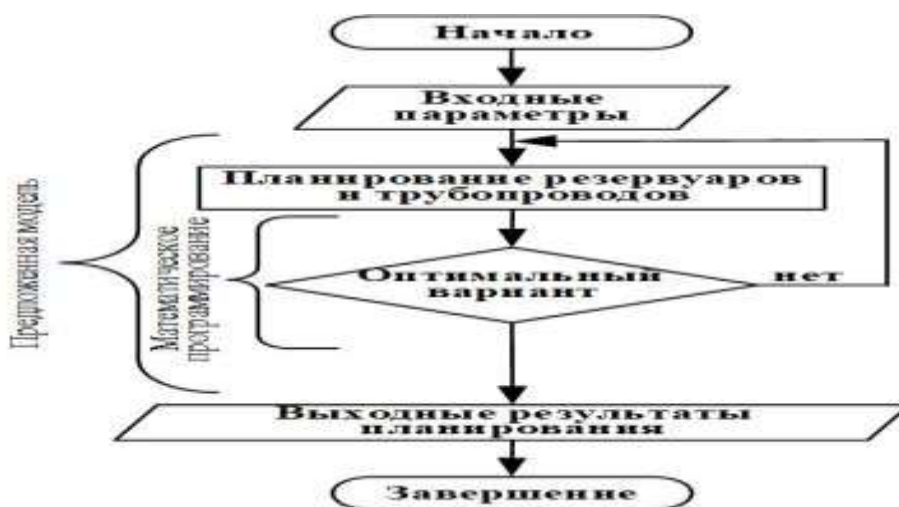


Рисунок 1.2б - Интегрированная модель совместного планирования резервуаров и трубопроводов MILP

Задача планирования смешения бензинов состоит в том, чтобы получить назначаемые начальные и конечные временные интервалы для резервуаров с компонентами, конфигурацию сети трубопроводов подачи компонентов, смесителей и резервуаров с запасами продукта.

При этом должен быть сформулирован критерий оптимальности решаемых задач с наложенными ограничениями на целевую функцию, таких как производство и доставка, заказы, спецификации резервуаров и блендеров, хранимых компонентов и продуктов, начальное количество компонентов и запасы продуктов, рецептуры, горизонт планирования, список маршрутов

подачи компонентов от резервуаров на смешение и резервуаров отгрузки товарного продукта.

Смеситель соединен с каждым продуктовым резервуаром через одну независимую трубу, соответственно.

Для интегрированного планирования смешения бензинов с учетом резервуаров хранения и трубопроводов транспортировки компонентов смешения требуется разработка модели, в которой определяются маршруты транспортировки и подачи компонентов:

- а) определение маршрута трубопроводной подачи компонентов в трубопроводной сети;
- б) схема подачи компонентов бензина в блендер.

Возможная оптимальная схема из множества конфигураций трубопроводов подачи компонентов смешения из резервуаров в блендер представлены на рисунках 1.3а и 1.3б.

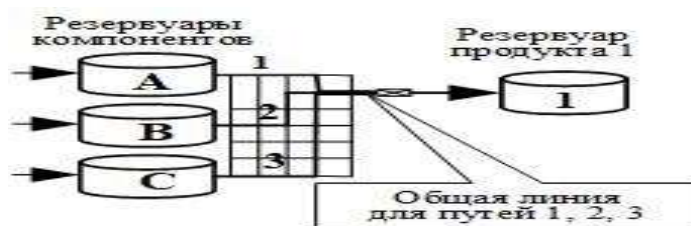


Рисунок 1.3а - Конфигурация трубопроводов подачи компонентов на одну линию смешения до блендера

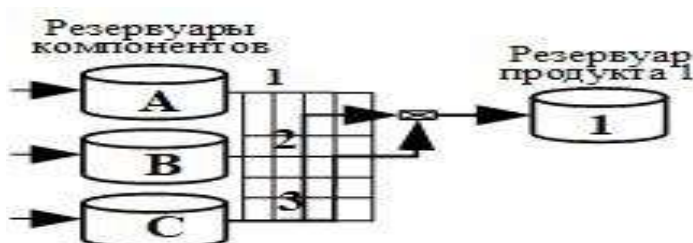


Рисунок 1.3б - Конфигурация трубопроводов подачи компонентов на один блендер

Формулировка ограничений для структурно-сложных трубопроводных сетей является комбинаторной задачей планирования системы смешения

бензинов, состоящая из резервуаров, блендера и сети трубопроводов. При формулировании ограничений на трубопроводную сеть необходимо ограничить рост вычислительных затрат, чтобы завершить расчет для планирования в течение ограниченного периода времени.

На рисунках 1.3а и 1.3б отображены наборы маршрутов подачи компонентов смешения, которые определяются решением задачи планирования.

Набор маршрутов, использующие общий трубопровод до блендера (1.3а) и исходящие из одного и того же компонентного резервуара (С) с блендером, показаны на рисунках 1.3а и 1.3б, соответственно.

Выбор компонентного резервуара и блендера в общей схеме смешения бензинов определяют маршрут подачи компонента в трубопроводной сети, формирующий «путь» перекачки компонента по схеме «резервуар компонента» – «смеситель» - «резервуар продукта». Из множества возможных путей выбирается вариант, обеспечивающий эффективность в соответствии с выбранным критерием эффективности планирования.

Кроме того, определяется набор возможных назначаемых элементов «пути» в сети трубопроводов. Следовательно, можно представить подмножество всего набора путей в виде специального набора путей. Из этих определений ограничения для структурно-сложной трубопроводной сети формулируются как задача МИЛР с использованием теории множеств.

Для решения задачи МИЛР используется метод ветвей и границ [53] и [54].

Решение интегральной модели расписания с учетом резервуаров и сети трубопроводов достигается (определение набора маршрутов) с использованием теории множеств.

В зависимости от характеристик задачи и требуемой гибкости решения, модель может быть основана на дискретном или непрерывном представлении по времени. Для сохранения линейности модели используется итерационная процедура, позволяющая эффективно решать проблемы нелинейности

показателей качества бензина от состава и свойств компонентов смешения, переменных рецептур для различных сортов продукта. Таким образом, решение заменяется последовательной аппроксимацией MILP. Вместо предварительного определения фиксированных концентраций компонентов для продуктов, предпочтительные рецептуры смеси товарного продукта из базы накапливаемых рецептур, при определенном совпадении образов наименований компонентов смешения, их показателей качества и спецификации товарного продукта в пределах допустимого порога точности, можно применять, когда это возможно.

Предлагаемый оптимизационный подход ориентирован на обеспечение эффективного и комплексного решения как проблемы планирования, так и проблемы смешения.

Проблема выбора наилучшей рецептуры смешения бензинов в соответствии с выбранным критерием оптимальности решается различными методами оптимизации. Основная цель - найти наилучший способ смешения различных промежуточных продуктов нефтеперерабатывающего завода и некоторых добавок для минимизации затрат на смешение при условии соблюдения требований к качеству и спросу на различные товарные продукты. Под качеством понимается соответствие заданным техническим характеристикам продукта.

В [55] показаны результаты внедрения системы поддержки принятия решений для автономного многопериодного смешения в компании Техасо. Поскольку эти программные комплексы ограничены решением задачи смешения, решения о необходимых ресурсах и времени должны были приниматься априори либо вручную, либо с помощью специального метода планирования. Для одновременного решения обеих подзадач был предложен двухуровневый подход к оптимизации [56], при котором для решения задачи составления расписания используется смешанная целочисленная линейная модель MILP, а для оптимизации рецептуры – нелинейная модель.

Предложенная техника декомпозиции всей задачи оптимизации основана на решении сначала нелинейной модели, направленной на генерацию оптимального решения задачи смешения, которое затем включается в модель планирования MILP в виде фиксированных решений для оптимизации только ресурсных и временных аспектов.

Таким образом, решение смешанно-интегрального нелинейного программирования MINLP-модели заменяется последовательными NLP и MILP-моделями. В [57] рассмотрена стратегия решения, основанная на декомпозиции общей проблемы нефтеперерабатывающего завода на три подсистемы:

- a) разгрузка и смешение сырой нефти;
- b) операции производственных установок;
- c) смешение и доставка продукции.

Для эффективного решения каждой из этих подзадач был разработан набор смешанных целочисленных линейных моделей MILP, которые учитывают основные особенности и трудности каждого конкретного случая. В частности, в третьей подзадаче были приняты фиксированные рецептуры продуктов, что означает, что решения о смешивании не были включены в эту модель.

В настоящее время существует множество математических методов решения задачи краткосрочного планирования и смешения бензинов. Однако для того, чтобы снизить сложность задачи, большинство из них опираются на специальные предположения, которые, как правило, делают решение неэффективным или нереалистичным.

К числу распространенных допущений относятся:

- a) фиксированные рецептуры для различных сортов продукции заранее определены;
- b) скорости потоков компонентов и продуктов известны и постоянны;

с) все показатели качества продукта от состава и показателей качества компонентов смешения принимаются аддитивными.

С другой стороны, более общие формулировки смешанно-интегрированного нелинейного программирования MINLP учитывают большинство особенностей задачи, но сложность и размер модели значительно увеличиваются, что делает задачу неразрешимой для больших или даже средних задач.

Основная проблема связана с нелинейными и невыпуклыми ограничениями, при которых производительность вычислений сильно зависит от начальных значений и границ, назначенных переменным.

Известны и разработаны различные методы оптимизации, основанные на различных предположениях и математических методах. Для упрощения решения проблемы рассматриваются фиксированные рецептуры вместо переменных рецептур продуктов [57]. Хотя эти подходы могут быть эффективными с вычислительной точки зрения, их решения могут быть нереалистичными на промышленных объектах. При этом используются методы декомпозиции общей задачи на различные подзадачи.

Существуют модели нелинейной оптимизации для обхода проблемы невыполнимости путем явного моделирования нелинейных свойств конечных продуктов. Однако, как отмечают некоторые авторы, решение логистических и качественных аспектов для крупномасштабных задач невозможно за разумное время с помощью существующих программных продуктов смешанного целочисленного нелинейного программирования MINLP и методов глобальной оптимизации [57, 58].

Основной аспект любой модели планирования связан с принятием решений во времени. Математические формулировки основаны либо на дискретном, либо на непрерывном представлении временной области.

Дискретное представление времени позволяет событиям происходить только в определенные моменты времени, которые соответствуют границам заранее заданных временных интервалов.

Основным преимуществом использования дискретной временной сетки является то, что ограничения баланса массы и запасов легче обрабатывать, но в то же время решение теряет гибкость, если не использовать меньшие временные интервалы, что может значительно снизить вычислительную производительность метода. В отличие от этого, представления с непрерывным временем генерируют более гибкие решения, хотя и с более высокими требованиями к процессорному времени.

Ограничения по запасам и массовому балансу обычно становятся более сложными для моделирования, поскольку они должны проверяться в любое время в течение горизонта планирования, чтобы гарантировать сходимость решения.

Общая задача краткосрочного планирования и смешения топлив на НПЗ соответствует многоступенчатой системе, состоящей из резервуаров для хранения компонентов, коллекторов смеси и резервуаров для хранения продукта.

Исходным заданием для оперативного планирования являются:

1. Заранее определенный горизонт планирования, обычно от 7 до 10 дней;
2. Набор промежуточных продуктов нефтеперерабатывающего завода (компоненты);
3. Набор специальных резервуаров для хранения каждого компонента с минимальной и максимальной вместимостью.

Целью является максимизация производственной прибыли при соблюдении ограничений процесса, требований к конечному продукту и спецификаций качества.

Критерием оптимизации является общая стоимость продукта, стоимость сырья и штрафы за отклонение от предпочтительных рецептур.

Дополнительные условия, включающие переменные для обработки невыполнимых решений, также могут быть включены в критерий оптимизации для обеспечения эффективного решения.

1.4.3 Системы планирования операций производства бензинов

Алгоритм формирования многопериодного расписания непрерывного приготовления топлив во времени для моделей с линейными и нелинейными характеристиками процессов смешения (MRIP-C алгоритм) представлен в [2, 4, 59, 98]. MRIP-C декомпозирует проблему планирования на:

- приблизительное планирование;
- детальное планирование.

Далее приближенная модель планирования декомпозируется на две части:

- модель 1-го уровня, учитывающая нелинейность по ряду показателей качества товарного бензина при оптимизации смешения с временными периодами и ограничениями по запасам компонентов смешения;
- модель 2-го уровня интегрированного многопериодного целочисленного линейного программирования, использующая фиксированные рецептуры смешения 1-го уровня для определения оптимального плана производства и распределения по резервуарам товарного продукта с минимизацией количества партий смешения и смены продукта в резервуарах;
- На 3-м уровне рассчитываются и формируются графики с использованием непрерывного по времени модели, включающей ограничения, основанные на решениях краткосрочного планирования.

Математические методы оптимизации стали важным инструментом разработки и внедрения системы оптимального управления цепочкой поставок для любого современного предприятия. Увеличение маржинальной прибыли за счет улучшения проектирования, планирования и принятия оперативных

решений в цепочке поставок представляет собой огромную возможность на, более чем когда-либо, конкурентном экономическом рынке, особенно в глобальном масштабе.

Промышленные и академические исследователи интенсивно работают в области проектирования технологических систем, и в области оптимизации был достигнут ряд успехов: разработка математических моделей на базе новых информационных технологий, применение эффективных алгоритмов решения, использования более мощных вычислительных систем с параллельными вычислениями и применение эффективных механизмов оптимизации.

Цепочка поставок состоит из следующих элементов: закупка и хранение сырья, объекты и процессы преобразования сырья в промежуточную и конечную продукцию, хранение этой продукции и ее распределение по складам и конечным потребителям.

Управление всей структурой цепи поставок наилучшим образом (т.е. максимизация прибыли или минимизация затрат) предполагает принятие решений на разных уровнях сети в цепи поставок [2-4]. Планирование производства определяет цели производства каждого вида продукции на определенном горизонте планирования (обычно от нескольких месяцев до 2 лет) для всей цепи поставок, для каждого отдельного производственного предприятия или для каждой производственной линии или единицы продукции.

Планирование производства определяет наилучшие последовательность операций и условия работы для достижения целевых показателей с учетом ограничений по запасам и плану производства.

Планирование осуществляется на меньших временных горизонтах (например, дни или недели) и включает больше операционных правил и ограничений, чем модели планирования. На рисунке (1.4а) и (1.4б) показано, как изменяется длина временного горизонта и точность модели в зависимости

от пространственного или временного масштаба в рамках иерархического планирования производства.



Рисунок 1.4 - Структурная схема иерархического планирования производства
а) пространственного масштаба и б) временного масштаба [68].

Вычисление оптимальных производственных планов обычно основывается на моделях линейного программирования или последовательного линейного программирования [3, 57, 50, 60], поскольку эти подходы доказали свою надежность и дают удовлетворительные результаты при различных обстоятельствах.

Модели планирования производства строятся путем деления временного горизонта на ряд периодов, длина которых обычно устанавливается равной некоторой календарной единице (например, месячные или квартальные периоды). Такой подход приводит к моделям, размер которых растет линейно с увеличением числа периодов.

Если модели нелинейные, то вероятность столкнуться с проблемами конвергенции (сходимости) значительно возрастает с увеличением размера задачи. Однако формулировка моделей планирования с нелинейностями получает все большее распространение на практике [60-63] с целью вычисления более точных решений и повышения рентабельности.

Планирование и составление расписаний во многих случаях является NP-полной [64, 65] или NP-трудной [66] задачей, означающее, что не существует полиномиального ограниченного алгоритма решения, даже если базовые модели цепочки поставок линейны. Процессы, протекающие на технологических установках, являются нелинейными, но обычная практика

составления расписаний заключается в аппроксимации поведения системы линейными моделями [57, 67-69]. Последние достижения сделали возможным использование нелинейных моделей для решения некоторых задач составления расписаний [70, 71].

Алгоритм MIP-C [59] позволяет использовать нелинейные модели для решения задач планирования и составления расписаний для НПЗ, которые производят несколько продуктов путем переключения с производства одного продукта на другой. Примером такой системы является смешение бензинов.

Первым шагом является вычисление приближенного решения, которое накладывает некоторые ограничения на детальную задачу планирования, тем самым упрощая ее и уменьшая количество целочисленных переменных, позволяющее ускорить решение детальных задач планирования за счет дополнительных ограничений.

Алгоритм MIP-C использует двухуровневый подход при решении задачи приближенного планирования [72-74] на основе нелинейных моделей смешения бензинов.

Алгоритм:

- вычисление приближенного расписания на основе нелинейной модели смешения бензинов, исходя из существующего минимального количества оптимальных рецептур смешения на горизонте планирования;
- минимизация общего количества вовлекаемых компонентов смеси;
- распределение резервуаров компонентов для подачи на станцию смешения.

Решение модели приближенного планирования обеспечивает дополнительные ограничения для задачи непрерывного планирования третьего уровня. Если задача планирования третьего уровня невыполнима, то в соответствии с алгоритмом повторно выполняется итеративное решение модифицированной приближенной задачи до тех пор, пока не будет найдено

выполнимое оптимальное решение. Пример применения алгоритма планирования смешения бензинов представлена в работах [72, 73].

В [50] представлен алгоритм планирования операций смешения, включая определение рецептуры смеси и ее реализацию. Нелинейные ограничения показателей качества смеси продукта аппроксимируются линейными соотношениями с поправочными коэффициентами. Алгоритм аппроксимации итерируется до тех пор, пока поправочные коэффициенты не сойдутся. Проблема последовательности решается, поскольку предполагается, что каждый блендер производит только один конкретный сорт бензина.

В работе [76-79] представлена разработка модели смешанного целочисленного линейного программирования MILP с непрерывным временем и общей глобальной временной сеткой для всех установок. Модель включает оптимизацию рецептур смеси и эксплуатационные особенности, встречающиеся в промышленной практике, такие как параллельные неидентичные блендеры, многоцелевые резервуары, ограничения по запасам, ограничения по производительности блендеров и планирование отгрузки продуктов.

В [69] использовали уникальную временную сетку для временных интервалов каждой единицы оборудования (т. е. резервуаров и блендеров).

Решение этих моделей для задач реального масштаба (например, горизонт планирования 8 дней, три блендера и более 25 заказов) до оптимального состояния требует большого времени выполнения (более 12 часов в приведённом примере).

Решение проблемы планирования и построения расписания смешения бензинов с объединением подсистем учета запасов компонентов смешения, ограничений по запасам, потоку и качеству с применением модели дискретного по времени смешанного целочисленного нелинейного программирования MINLP представлена в работе [71]. В этой работе представлены различные процедуры решения задачи MINLP для нахождения глобального оптимума. Два

из этих алгоритмов используют метод дискретизации на основе одной переменной, представленной в билинейной форме и получения удовлетворительного решения MILP, а один из них вычисляет лучшие решения и за меньшее время, чем коммерческие решения в MINLP. Двухуровневый метод решения задачи планирования смешения показан в работе [56].

На первом уровне рассчитываются рецептуры смесей и производственные цели на основе дискретно-временной модели NLP. Затем втором уровне решается дискретная модель планирования MILP, основанная на представлении "ресурсы – задачи - сеть". Если модель MILP оказывается невыполнимой, алгоритм повторно вычисляет рецептуру путем повторного решения модели NLP с дополнительными ограничениями.

Итерационный алгоритм оптимизации рецептуры смеси помощью модели многопериодного планирования MILP с последующей минимизацией числа переключений блендера с применением генетического алгоритма и выявлением нерешаемой задачи применением «агентного» моделирования (влияние отдельных факторов на поведение системы в целом). Алгоритм повторяется до тех пор, пока не будет найдено выполнимое решение [75].

Мендес и др. [95] представили дискретную и непрерывно - временную MILP-модель для планирования операций смешения бензинов. Для обработки нелинейных правил смешения был использован итерационный метод, при этом сохраняя линейность моделей. Несколько ключевых операционных ограничений были опущены, а проблема распределения не рассматривалась.

В [103] разработали MILP модель для непрерывного по времени одновременного планирования задач смешения бензинов и операций распределения. Линейность модели поддерживалась за счет использования заданных предпочтительных рецептур. Позже эта модель была расширена для составления расписания работы основных технологических установок на НПЗ [104].

В [105] использовали двухуровневый подход, основанный на дискретных моделях по времени. Рецептуры смесей и производственные цели были рассчитаны сначала с помощью модели нелинейного программирования. Для решения задачи краткосрочного планирования была использована модель MILP с использованием рецептов и целей.

В [106] сформулирована задача и представлена MILP модель непрерывная по времени с общей временной сеткой для всех единиц технологического оборудования системы смешения (т. е. блендеров и резервуаров). Ли и Карими [96] расширили и улучшили MILP-модель, используя временные сетки для конкретного оборудования с учетом большинства операционных ограничений, встречающихся на практике.

На основе моделей индексов смеси оптимизировали рецепты бензиновых смесей. Основываясь на работах [96], в [97] представлена формулировка MINLP с непрерывным временем для конкретной установки, где нелинейные условия возникают из-за принудительного обеспечения постоянных скоростей смешения.

В [107] представлен алгоритм трехуровневой декомпозиции и оптимизация рецептов, обеспечивающий использование линейных и/или нелинейных правил смешения.

Проблема рассмотрена с учетом распределения потоков, пороговых ограничений на объем смеси, параллельно работающих неидентичных блендеров, резервуаров смешения и, зависящее от продукта, время установки.

Для каждого уровня была сформулирована задача для дискретно-временной модели.

На первом уровне решалась задача оптимизации рецептуры смесей, на втором уровне - аппроксимация производственного графика, а на третьем уровне рассчитывался подробный график смешения и доставки.

Из-за большой размерности решение модели планирования третьего уровня для всего горизонта решалось по интервалам. Решения, полученные с

помощью этого подхода, были лучше, а время выполнения для больших задач было на два порядка меньше, чем у предыдущих методов [96, 106].

В [108] представлена модифицированная версия модели планирования с непрерывным временем с меньшим количеством двоичных переменных [109] для работы с третьим уровнем.

Для приведения нелинейной задачи к линейной были добавлены избыточные ограничения для релаксации, и модель была решена с помощью двухэтапного подхода MILP – MINLP, т.е. релаксация исходной нелинейной модели NLP. Модель была получена путем фиксации целочисленных переменных исходной модели к значениям, вычисленным в MILP. В соответствии с алгоритмом на каждой итерации к модели MILP добавляются целочисленные разрезы оптимальности и/или выполнимости. Расчет завершается, когда разница между решениями MILP и NLP меньше заданного порога.

Формулировка и решение, непрерывной по времени, задачи MILP, приведена в [113].

Модель включает большинство операционных ограничений, встречающихся на практике. В [114] расширили модель для обработки нелинейных правил смешения, таким образом сформулировав модель MINLP с непрерывным временем.

Приблизительная формулировка MILP была получена путем замены нелинейных правил смешения на линейные с индексами смешения. Значения бинарных переменных, вычисляемых с помощью MILP, были зафиксированы в исходной MINLP, таким образом, превращаясь в NLP, которая была решена для нахождения близкого к оптимальному решения исходной задачи.

Двухуровневый подход к декомпозиции общей задачи и решения многопериодных моделей планирования бензиновых смесей с нелинейными правилами смешивания приведен в [72].

Рецептура смесей рассчитываются на первом уровне путем решения дискретной модели NLP, которая учитывает только уравнения материального баланса вокруг блендеров и резервуаров для хранения, линейные и нелинейные уравнения по показателям качества, минимальные и максимальные ограничения на запасы и производственные мощности, а также спецификации качества продукции. Затем эти рецептуры фиксируются на втором уровне, который состоит из дискретно-временной MILP-модели.

В [72, 73, 80] показано расширение алгоритма для решения задач планирования смесей, вводом третьего уровня решения задачи планирования с помощью модели дискретного времени по времени MILP. В [59] представлена разработка модели с непрерывным по времени для более эффективного решения третьего уровня.

Стратегия декомпозиции

Используемая схема декомпозиции приведена в работах [59, 80]. Предполагается, что долгосрочная (например, на двенадцать месяцев) модель планирования производства была оптимизирована для НПЗ или системы смешения бензина. Кроме того, предполагается, что долгосрочный план определяет, какое сырье должно быть переработано, какие продукты произведены и общее количество для каждого из них, соответственно.

Результаты долгосрочного плана используются для оптимизации краткосрочной дискретно-временной многопериодной модели приблизительного планирования (например, на тридцать дней), которая, в свою очередь, обеспечивает ограничения для модели непрерывного планирования.

Приближённое планирование

Целью модели приближённого планирования является минимизация производственных затрат или максимизация прибыли при заданном выборе и количестве сырья. Кроме того, модель приблизительного планирования:

- Определяет, сколько нужно произвести каждого продукта и в каждый период времени.

- Управляет распределением мощностей склада; предполагается, что мощности склада могут быть перераспределены только в начале каждого периода.
- Минимизирует количество случаев различных режимов работы для каждой многорежимной установки, например, максимальное количество бензина или максимальное количество дизельного топлива для установки крекинга, количество блендеров различных сортов бензина.

Чтобы исключить случаи минимального производства для любого режима работы, для каждого производственного блока задается минимальное пороговое ограничение производства.

Еще одно отличие между моделями приближённого планирования и подробного планирования заключается в том, что задачи и ресурсы объединяются в единое целое на уровне краткосрочного планирования.

Поэтому решение приближённого планирования определяет профиль производства и запасов, который является выполнимым только на границах периода (например, в конце каждого дня).

Целевая функция на этом уровне включает в общем случае затраты на хранение запасов и затраты на переключение, связанные с дискретной переменной (решениями). Стоимость сырья и эксплуатационные расходы, вычисляемые на этом уровне, такие же, как и на верхнем уровне, поскольку режимы работы и общее количество кормов фиксируются верхним уровнем.

Детальное планирование

Модель детального планирования допускает выполнение только одной задачи в любой производственной единице в любой момент времени, гарантируя тем самым выполнимое решение на всем горизонте планирования. Целевая функция на уровне расписания включает только затраты на переключение и в общем случае затраты на переход от одного режима работы к другому.

Решение приближенной модели составления расписания (т.е. приблизительной модели составления расписания) приводит к окрестности, в которой находится оптимальное расписание. Эта окрестность описывается для задачи детального планирования в терминах целевых запасов на конец каждого дня, режимов работы, при которых каждая технологическая единица должна работать в течение каждого дня, и т.д.

На основе этих данных вычисление наилучшего расписания может происходить несколькими различными способами, например:

- Определением последовательности работы с минимальным количеством переключателей с помощью эволюционного алгоритма и проверить его выполнимость с помощью моделирования [75].
- С использованием мелко-сеточным дискретно-временным MILP-моделью планирования [80].
- Решением по модели планирования MILP с непрерывным временем [59].

При использовании ограничений, накладываемых приблизительным уровнем планирования, детальный уровень планирования решается гораздо быстрее. Однако из-за последующего сокращения множества выполнимых решений оптимальность вычисленного расписания по отношению к исходной задаче (т.е. без ограничений со стороны приближенного уровня планирования) не гарантируется, хотя ожидается, что разрыв оптимальности будет очень мал.

Один из способов улучшить это решение - использовать его в качестве отправной точки для модели планирования, включающей ограничения на качество и позволяющей рецептам смеси отличаться от тех, что были рассчитаны ранее на уровне краткосрочного планирования.

Недостатком является то, что полученная модель MILP или MINLP может потребовать запредельного времени выполнения, чтобы закрыть разрыв оптимальности.

Модель 1-го уровня (дискретно-временное ЛП или НЛП)

На 1-м уровне определяются оптимальные рецептуры смеси, которые будут зафиксированы на следующих уровнях. Временными периодами в этой модели являются L1-периоды [73]. Целевая функция минимизирует стоимость смеси и стоимость, связанную с переменными простоя. Переменные простоя включаются в остатки запасов, и их штрафные коэффициенты в функции цели больше, чем коэффициенты стоимости компонентов смеси. Поэтому, если задача имеет физически выполнимое решение, переменные провисания будут равны нулю. Если задача не имеет физически осуществимого решения, решатель вычислит численное осуществимое решение с некоторыми ненулевыми переменными провисания. Значения производительности смешения компонентов и спроса на продукт являются соответствующими агрегированными значениями для каждого из L1-периодов. Кроме того, отдельные резервуары с продуктами объединяются в пулы продуктов, а отдельные смесители объединяются в один.

Выводы к главе 1

1. Проведен обзор методов компаундирования бензинов и основных проблем, требующих решения с целью интенсификации и эффективности проведения процесса.
2. Приведен анализ влияния, входящих в состав бензина углеводородов: парафинов, олефинов, нафтенов и ароматических углеводородов на основные качественные показатели товарного бензина.
3. Рассмотрены особенности построения математических моделей процессов смешения бензинов, оптимального планирования компонентных ресурсов и оптимизации рецептур смешения.
4. Представлен обзор, существующих на рынке, основных коммерческих программных продуктов оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения топлив.

5. На основе проведенного обзора и анализа особенностей построения математических моделей, решения задач оптимизации производственного планирования и управления процессами смешения бензинов и мазутов сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Результаты реализации цели работы приведены во второй и третьей главах на примере построения математических моделей процесса смешения бензинов и постановки задач управления в режиме реального времени в условиях параметрической неопределенности.

Для построения моделей и решения задач оперативного планирования процесса смешения топлив в режиме реального времени разработан алгоритм декомпозиции и линеаризации подмоделей в подобластях решения исходной нелинейной модели.

В четвертой главе представлено описание функциональных модулей программного комплекса ПК ОПОР и результаты оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения производства бензинов и мазута.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЦЕПТУР СМЕШЕНИЯ БЕНЗИНОВ

Функциональная структура системы решения задач оптимизации рецептур смешения в производстве товарных нефтепродуктов, рисунок 2.1.

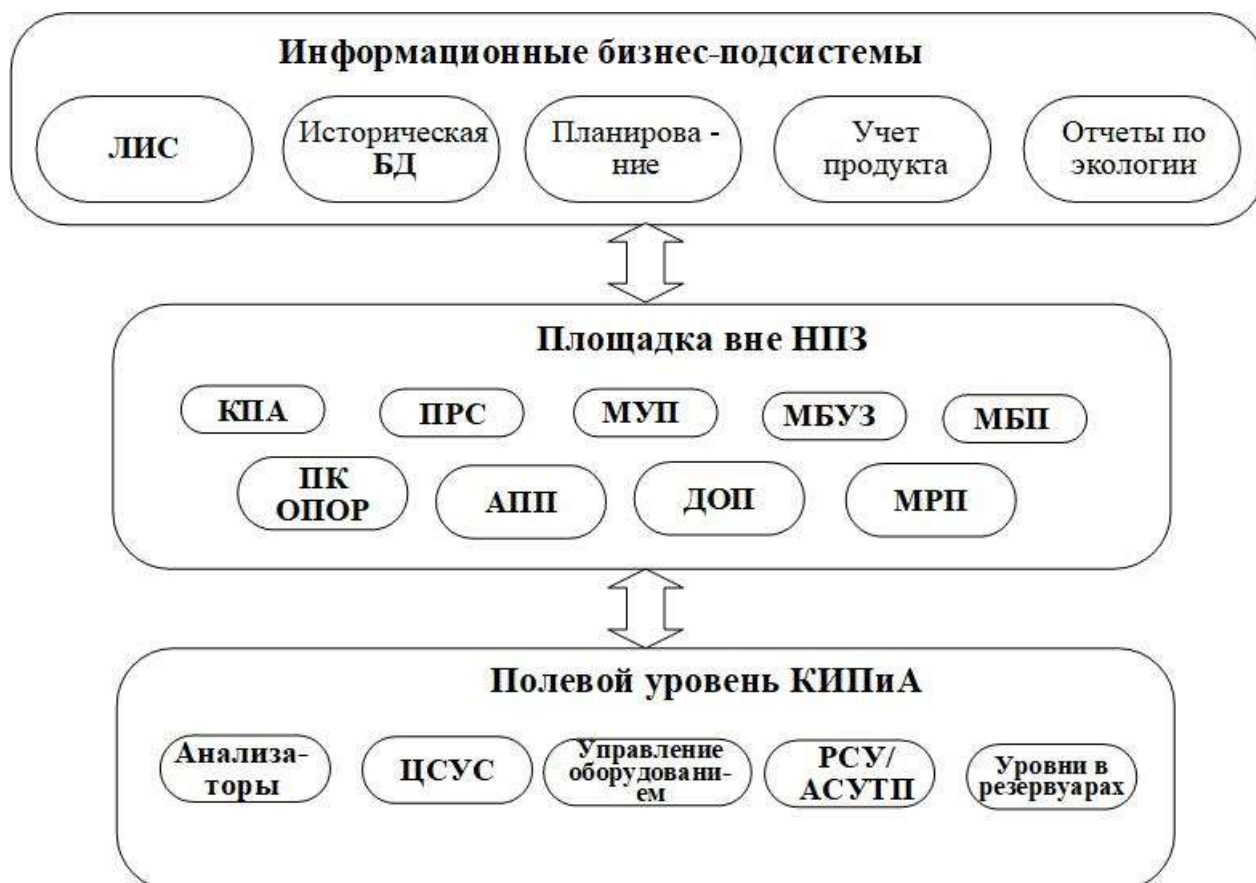


Рисунок 2.1 - Функциональная структура системы оптимизации рецептур смешения в производстве товарных нефтепродуктов

Система управления и оптимизации смешения товарных нефтепродуктов состоит из следующих подсистем, предназначенных для планирования, мониторинга и исполнения задач смешения на НПЗ, терминалах/нефтебазах и нефтехимических терминалах:

- Система управления запасами в резервуарах для мониторинга и учета запасов и управления данными по резервуарному парку (МРП – мониторинг резервуарного парка);

- **Диспетчер заданий смешения и перекачек** для мониторинга и управления перекачками и заданиями на смешение (МУП – мониторинг и управление перекачками);
- **Система автоматизации перекачек** для выстраивания очереди перекачек и автоматизации их выполнения (АПП – автоматизация последовательности перекачек);
- **Учет материального баланса** для выверки физических и учетных запасов (МБУЗ – материальный баланс и учет запасов);
- **Диспетчер отслеживания партий** для отслеживания партий в трубопроводах (ДОП – диспетчер отслеживания партий);
- **Система мониторинга потерь** для расчета и мониторинга потерь продуктов в реальном времени (МБП – мониторинг баланса и потерь);
- **Система оптимизации и контроля смешений ПК ОПОР** для оптимизации управления в автономном и интерактивном режимах (ПК ОПОР);
- **Планирование последовательностей смешений ПК ОПОР** для планирования мульти-смешений и интерактивного (онлайн) режима (ПРС – планирование расписания смешений);
- **Цифровая система смешений** для базового регулирования и управления соотношениями компонентов и последовательностью (ЦСУС – цифровая система управления смешением);
- **Система управления анализаторами и сбором данных** для проверки и калибровки интерактивного (онлайн) анализатора (КПА – калибровка поточных анализаторов).

Открытые отраслевые стандарты позволяют интегрироваться с существующими заводскими и бизнес-системами, поддерживая актуальность данных и повышая рентабельность инвестиций в существующие активы и системы.

2.1 Статические характеристики процессов смешения бензинов

Упрощенная классическая схема процесса смешения бензинов представлена на рисунке 2.2, где p_i и q_i ($i = 1, \dots, n$) являются показатели качества и расхода i -го компонента смешения, соответственно p_f и q_f являются показателями качества и выходного потока смеси бензинов, связь $p_i \rightarrow p_f$ в динамике и статике.

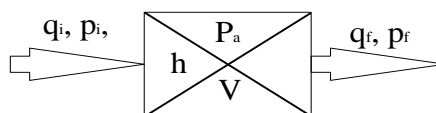


Рисунок 2.2 - Упрощенная схема смешения бензинов

Смешение и приготовление бензинов представляет собой процесс компаундирования бензиновых компонентов каталитического риформинга, каталитического крекинга, алкилирования, гидрокрекинга, высокооктановых присадок и тому подобных.

Есть несколько показателей качества, которые важны для характеристики топлив, такие как: для автомобильного бензина - октановые числа по исследовательскому и моторному методам, давление насыщенных паров, точки дистилляция; для темных нефтепродуктов и дизельного топлива - вязкость, температура вспышки, цетановое число и анилиновая точка для дизельных топлив.

Октановые числа являются показателями антидетонационных свойств. Две стандартные процедуры испытаний используются для характеристики противодетонационных свойств топлива для искровых двигателей: тест ASTM-D-908 дает октановое число по исследовательскому методу, а ASTM-D-357 октановое число по моторному методу [83], который представляет работу двигателя в условиях высокой скорости. Другими важными свойствами, которые влияют на производительность двигателя, являются летучесть и диапазон давления насыщенных паров.

В работе представлены модели расчета октанового числа ОЧИМ и давления насыщенных паров (ДНП).

1. Линейная модель для расчета октановых чисел (грубое приближение) [83].

$$\text{ОЧИМ}_1 = \sum_{i=1}^n x_i p_i = \frac{1}{q_f} \sum_{i=1}^n p_i q_i \quad (2.1)$$

где

x_i – объемная или массовая доля i -го компонента;

p_i - октановое число компонентов смешения;

q_f = октановое число по исследовательскому методу (ОЧИМ₁);

q_i – массовый или объемный расход i -го потока компонента смешения,

q_f - массовый расход смеси, удовлетворяющий материальному балансу.

$$q_f = \sum_{i=1}^n q_i, \quad x_i = \frac{q_i}{q_f}$$

2. Модель этила [84, 24].

Метод этила является одной из старейших моделей, доступных в литературе. Этот метод использовался в качестве эталона, с которым сравнивались новые модели. Нелинейность смешения моделируется в явном виде как функция чувствительности компонентов, содержания олефинов и ароматических углеводородов.

$$\begin{cases} \text{ОЧИМ}_2 = \bar{r} + a_1(\bar{rs} - \bar{r}\bar{s}) + a_2(\bar{O}^2 - \bar{Q}^2)a^2 + a_3(\bar{A}^2 - \bar{A}^2), \\ \text{ОЧММ} = \bar{m} + a_4(\bar{ms} - \bar{m}\bar{s}) + a_5(\bar{O}^2 - \bar{Q}^2)a^2 + a_6 \left[\frac{\bar{A}^2 - \bar{A}^2}{100} \right]^2, \end{cases} \quad (2.2)$$

где $S = \text{ОЧИМ} - \text{ОЧММ}$ - чувствительность, m – величина линейной части ОЧММ, r - величина линейной части ОЧИМ, O - содержание олефина в компонентах смешения, A – содержание ароматических углеводородов, a_i ($i = 1, \dots, 6$) - коэффициенты корреляций.

Переменные, отмеченные сверху черточкой, представляют собой средние объемные значения. Значения коэффициентов корреляции, следующие:

$a_1 = 0.03224$; $a_2 = 0.00101$; $a_3 = 0$; $a_4 = 0.04450$; $a_5 = 0.00081$; $a_6 = -0.00645$.

3. Модель парных взаимосвязей для расчета ОЧИМ [23, 24]

При моделировании нелинейной части используются коэффициенты парных взаимосвязей компонентов смешения, влияющих на ОЧИМ смеси в модели неполного второго порядка.

$$\text{ОЧИМ}_3 = \sum_{i=1}^n x_i p_i + \sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n I_{i,k} x_i x_k \quad (2.3)$$

где $I_{i,k}$ - коэффициент взаимодействия между компонентами

i и k , который задается как $I_{i,k} = 4O_{i,k} - 2(O_i + O_k)$

где O_i, O_k - октановое число смеси компонентов i и k в соотношении 50:50 %.

$I_{i,k}$ зависит в основном от температуры и давления.

Приведенное выше уравнение может быть обобщено для учета коэффициентов тройных взаимосвязей, требующих специальных исследований, но их вклад незначителен, что можно пренебрегать ими без потери требуемой точности результатов расчета. С практической точки зрения, коэффициенты взаимосвязей второго порядка сохраняют основные нелинейные взаимодействия гомогенных бензиновых смесей.

4. Избыточная модель [86]

$$\text{ОЧИМ}_4 = \sum_{i=1}^n x_i p_i + \sum_{i=1}^n x_{ij} O_{ij}^E \quad (2.4)$$

где O_{ij}^E - избыточное октановое число, связанное с компонентом i в смеси j , x_{ij} - объемная (массовая) доля компонента i в смеси j (марки бензинов).

5. Модель Захеда (А. Н. Zahed) [85]

$$\text{ОЧИМ}_5 = M_0 + \sum_{i=1}^n M_i (x_i p_i^l)^k \quad (2.5)$$

где M_i ($i = 0, \dots, n$), l и k – условно постоянные параметры модели.

Ниже приведены модели для расчета давления насыщенных паров бензинов.

1. Приближенная модель расчета ДНП по Рейду (линейная модель)

$$\text{ДНП}_1 = \sum_{i=1}^n x_i p_i \quad (2.6)$$

где - x_i объемная (массовая) доля i -го компонента, p_i - давление паров по Рейду в смеси, $p_f = \text{ДНП}_1$.

2. Модель неполного второго порядка с учетом коэффициентов парных взаимовлияний [23, 26]

$$\text{ДНП}_2 = \sum_{i=1}^n x_i p_i + \sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n I_{i,k} x_i x_k \quad (2.7)$$

где $I_{i,k}$ - коэффициенты взаимного парного влияния между компонентами i и k , который задается как $I_{i,k} = 4P_{i,k} - 2(P_i + P_k)$,

где P_i, k - давление пара по Рейду смеси в соотношении 50:50 i и k компонентов.

3. Индекс смешения [23]

$$\text{ДНП}_3 = \left(\sum_{i=1}^n x_i p_{bi} \right)^{0,8}, \quad p_{bi} = p_i^{1,25} \quad (2.8)$$

Модели ОЧИМ, (2.1) – (2.4), и модели ДНП (2.6) и (2.7) состоят из линейной и нелинейной частей. Нелинейные модели описания **ОЧИМ** и **ДНП** представлены в (2.5) и (2.8). Все вышеперечисленные модели используются только в некоторых особых условиях, а параметры этих моделей определяются данными лабораторных испытаний или статистического анализа режима работы смесителей.

2.2 Динамическая модель процессов смешения бензинов

Динамические свойства процессов смешения бензинов обусловлены динамикой системы резервуаров. При этом используются следующие предположения и допущения для резервуаров [87]:

- идеальное смешение;
- изотермический режим смешения;
- отсутствие химических реакций в смеси.

Гидродинамика потоков приготовления смеси бензина, рисунок 2.1, из баланса массы в этой системе, представляется в виде $\frac{d}{dt}m = \sum_{i=1}^n q_i - q_f$, где m – масса смеси бензина в резервуаре, $m = \rho_f V = \rho_f A h$, ρ_f – плотность выходного продукта, V , A и h - объем, площадь поверхности и уровень жидкости в резервуаре. В случае идеального перемешивания $\frac{d}{dt}\rho_f = 0$

$$\frac{d}{dt}m = \rho_f A \frac{d}{dt}h = \sum_{i=1}^n q_i - q_f \quad (2.9)$$

Массовый расход на выходе может быть записан в терминах скорости выходного потока

$$q_f = \rho_f A_f v_f \quad (2.10)$$

где A_f - площадь поперечного сечения на выходе. Поскольку накопление энергии представляет собой суммирование внутренней энергии, кинетической энергии, потенциальной энергии и работы потока, баланс энергии на выходе (точки a_1 и a_2)

$$\frac{d}{dt}E = \underbrace{q_f(u_1 - u_2)}_{\text{внутренняя энергия}} + \frac{q_f}{2}(v_1^2 - v_2^2) + \underbrace{q_f g(z_1 - z_2)}_{\text{потенциальная энергия}} + \frac{q_f}{\rho_f}(P_1 - P_2) = 0$$

Также предполагается незначительные изменения внутренней энергии ($u_1 = u_2$) и энергии положения ($z_1 = z_2$), v_1 мало по сравнению с v_2 , уравнение сохранения энергии утверждает, что

$$v_f = v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_f}} = \sqrt{\frac{2(P_a + \rho_f g h - P_a)}{\rho_f}} = \sqrt{2gh} \quad (2.11)$$

где P_a - давление смеси. Из уравнений (2.9), (2.10) и (2.11) получим:

$$\rho_f A \frac{d}{dt} h = -\rho_f A_f \sqrt{2gh} + \sum_{i=1}^n q_i \quad (2.12)$$

Таким образом, динамика состояния системы смешения бензинов определяется нелинейным уравнением первого порядка.

После замены переменных $R = \frac{1}{\rho_f A_f \sqrt{2gh}}$, $C = \frac{\rho_f A h}{h} = A \rho_f$ и подстановки в (2.12) получим $\frac{dh}{dt} = \frac{h}{RC} + \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{C}$, заменив $u = \sum_{i=1}^n q_i$, $x = h$, получим

$$\dot{x} = -\frac{1}{R(x)C} x + \frac{1}{C} u \quad (2.13)$$

где u – вектор управления (соотношение потоков компаундирования), x – вектор состояния (вектор показателей качества товарного топлива).

Общий материальный баланс (2.9), соответствующий объемам, имеет вид

$$\frac{d}{dt} (\rho_f V) = -\rho_f v_f + \sum_{i=1}^n (\rho_i v_i) \quad (2.14)$$

где V , v_i и v_f - объем резервуара-смесителя, объемы потоков на входе и выходе резервуара - смесителя.

Баланс по компонентам A_i ($i=1 \dots, m$)

$$\frac{d}{dt} (c_{r_i} v_i) = -c_{r_i} v_i + c_i v_i - r_i V \quad (2.15)$$

где c_{r_i} и c_i - концентрации A_i в смесителе и потоке сырья, r_i - скорость реакции A_i

Баланс по компоненту В равен

$$\frac{d}{dt} (c_f v_f) = -c_{r_f} v_f + c_f v_f + r_f V$$

где c_{r_f} и c_f - концентрации В в реакторе и в выходном потоке, r_f - скорость реакции В. Рассматриваются два динамических параметра для резервуара-

смесителя бензина: уровень в резервуаре h , представленный в (2.13) и состав каждого компонента показана, (2.15).

2.3 Онлайн система управления и постановка задач оптимизации рецептур производства бензинов

Большинство систем смешения бензинов основываются на концепции периодического смешения по партиям. В целом технология смешения и выпуск бензинов определенной марки разделена на множество партий по времени. Рецептуры смешения бензинов рассчитываются для каждой партии. Функциональная структура системы онлайн оптимизационного смешения бензинов представлена на рисунке 2.3.

Задание на планирование и смешение бензинов состоит:

- из требований к плану производства бензинов, сроков, критериев оптимизации;
- цен на компоненты смешения;
- запасов компонентов смешения и остатков товарной продукции в резервуарах;
- данных анализа состава и показателей качества компонентов смешения и бензинов с лабораторной информационно-менеджмент системы (ЛИМС).

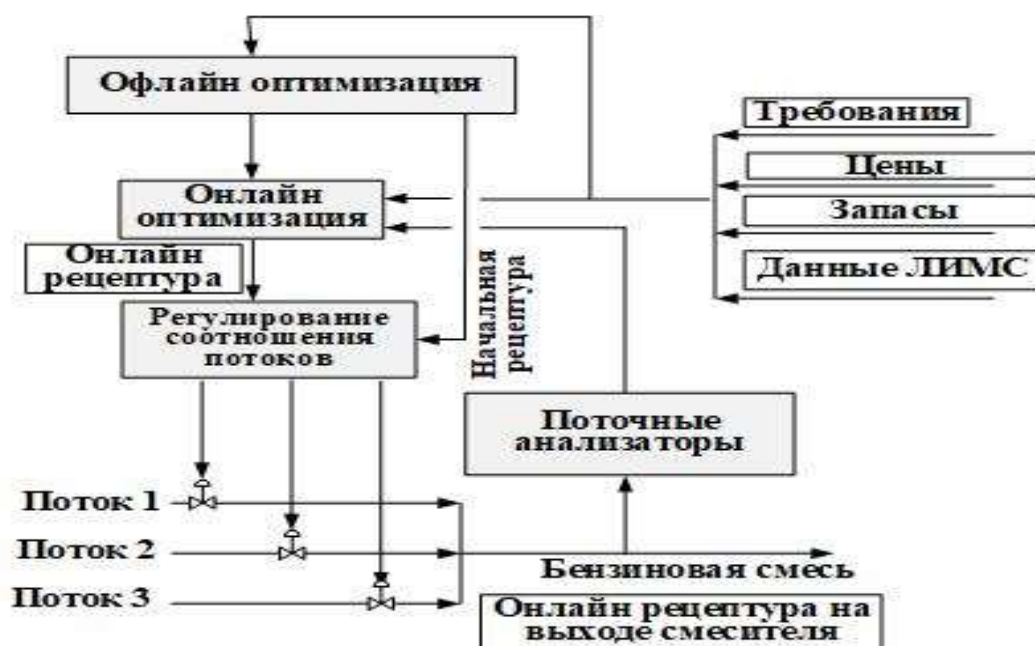


Рисунок 2.3 - Функциональная структура системы управления смешением бензинов

В модели офлайн оптимизации рассчитываются начальные оптимальные рецепты и пересылаются в распределенную систему управления (PCY) для начала процесса смешения и поддержания оптимального во времени соотношения потоков. В дальнейшем, онлайн модель оптимизации корректирует онлайн рецепты с учетом данных от поточных анализаторов и информации от производственно-диспетчерской службы до завершения партии.

Математическое описание зависимости показателей качества бензинов от состава рецептов смешения бензинов в общем случае имеет вид:

$$f_i(q_{i,j}, x_j) \approx \sum_{j=1}^N x_{i,j} q_{i,j} = q_{i,см} * \sum_{j=1}^N x_j \quad (2.16)$$

где: $f_i(q_{i,j}, x_j)$ – функция зависимости i -го показателя качества бензиновой смеси от компонентного состава x_j и их показателей качества $q_{i,см}$, с эффектом нелинейности в общем случае, $i = \overline{1, N}; j = \overline{1, M}$.

В выражении (2.16) приближенное равенство показателя качества смеси, как суммы произведений долей компонентов смеси на соответствующий

показатель качества справедливо, кроме показателей качества, имеющих нелинейную зависимость от состава рецептуры: ОЧИМ, ОЧММ и ДНП.

Результатом решения задачи оптимизации рецептур смешения по математической модели (2.16) является вектор массовых (объемных) долей компонентов смешения X .

2.3.1 Постановка задач оптимизации рецептур смешения бензинов

Критерий оптимальности

$$R = C^T * X \quad (2.17)$$

Ограничения

$$F(Q, X) \leq (E^T * X) * S + \Delta Q \quad (2.18)$$

где

$$\Delta Q = [Q_{см} - Q_{см}^П] * (E^T * X) \quad (2.19)$$

$$H * X \leq d \quad (2.20)$$

$$X^* = Arg \min_{X \in \bar{X}} R(X) \quad (2.21)$$

C - вектор цен компонентов смешения;

S – вектор спецификаций показателей качества бензинов;

X - вектор массовых (объемных) долей компонентов смешения.

Q – матрица показателей качества компонентов смешения бензинов;

$Q_{см}$, $Q_{см}^П$ – векторы показателей качества смеси измеренных и прогнозируемых по математической модели, соответственно;

E^T – единичная матрица;

H – матрица ограничений вовлекаемых компонентов смешения по рецептуре;

d – вектор ограничений на количество доступных ресурсов смешения бензинов при расчете рецептур;

ΔQ – вектор произведения «невязки» между измеренными и расчетными показателями качества смеси бензина на долю (объемную/массовую)

компонента в смеси, обновляемый на каждом интервале оптимизации и управления процессом смешения;

\mathbf{X}^* - оптимальное значение вектора \mathbf{X} ;

$\tilde{\mathbf{X}}$ – область допустимых значений вектора \mathbf{X} .

В постановке задачи (2.17) – (2.20), $\mathbf{F}(\mathbf{Q}, \mathbf{X})$ - в общем случае нелинейная функция по ряду показателей качества смеси бензинов.

Для линейной функции в условии (2.18), $\mathbf{F}(\mathbf{Q}, \mathbf{X}) = \mathbf{Q}\mathbf{X}$.

Процесс смешения бензинов осуществляется по партиям в указанное время и в определенной последовательности в зависимости от состояния резервуарных парков как по компонентам смешения, так и товарного бензина.

Массив предшествующих показателей качества компонентов смешения используются для прогнозирования показателей качества и расчета рецептур на всем временном горизонте смешения.

Критерий оптимальности по партиям

$$\mathbf{R}_P = \sum_{t_T}^{t_K} \mathbf{C}^T * \mathbf{X}_t \quad (2.22)$$

Ограничения

$$\sum_{t_H}^{t_T - \Delta t} \mathbf{F}(\mathbf{Q}_t, \mathbf{X}_t) + \sum_{t_T}^{t_K} \mathbf{F}(\mathbf{Q}_{\text{см},t}^{\Pi}, \mathbf{X}_t) \leq \left[\sum_{t_H}^{t_K} \mathbf{E}^T * \mathbf{X}_t \right] * \mathbf{S} \quad (2.23)$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{Q}_{\text{см},t}^{\Pi}, \mathbf{X}_t) \leq [\mathbf{E}^T * \mathbf{X}_t] * \mathbf{S} \quad (2.24)$$

$$[\mathbf{H} * \mathbf{X}_t]_{t_H \rightarrow t_K} \leq \mathbf{D} \quad (2.25)$$

$$\mathbf{X}_t^* = \underset{\mathbf{X}_t \in \tilde{\mathbf{X}}_t}{\text{Arg min}} \mathbf{R}(\mathbf{X}_t) \quad (2.26)$$

где t_H , t_T , t_K – время начала, текущего и окончания партии смешения, соответственно; t – время смешения; $\mathbf{Q}_{\text{см},t}^{\Pi}$ – матрица прогнозируемых показателей качества; \mathbf{D} – вектор ограничений на компоненты смешения; \mathbf{X}_t^* - оптимальное значение вектора \mathbf{X}_t на интервале времени t ; $\tilde{\mathbf{X}}_t$ – область допустимых значений вектора \mathbf{X} на интервале t .

Выбор шага дискретизации по времени Δt определяется динамикой изменения показателей качества, обеспечивающий требуемую точность. Ограничение (2.24) обеспечивает выполнение требований по спецификации в каждой партии.

На рисунке 2.4 приведена диаграмма 1, на которой представлен общий план производства по трем партиям и представлены результаты построения диаграммы Гантта производства бензинов как в целом по всем партиям, так и в отдельности по каждой партии [136-138, 145, 146, 153].



Рисунок 2.4 - Диаграмма Гантта производства бензинов общая

Партия 1 выполняется за расчетное время 6,9 часа. На интервале реализации партии 1 было израсходовано в процессе смешения изомеризата с резервуара 143 и стабильного катализата с установки Л-35/11-600, накопленного в резервуаре 281.

Учитывая, что указанные выше компоненты используются в третьей партии, идет процесс их накопления в течение 9,2 часа и 16,6 часа, соответственно. Одновременно с накоплением этих компонентов в резервуарах начинается процесс смешения и производства второй партии продукта с расчетной длительностью 5,4 часа.

По окончании второй партии, начинается процесс накопления бензина каталитического крекинга с установки в резервуаре 154 в течение 9 часов.

По окончании процесса накопления компонентов для третьей партии, начинается процесс смешения компонентов в третьей партии 2 - 3 часа и периода паспортизации в течении 5 часов для начала отгрузки продукта.

1. Диаграммы Ганта по партиям I-III

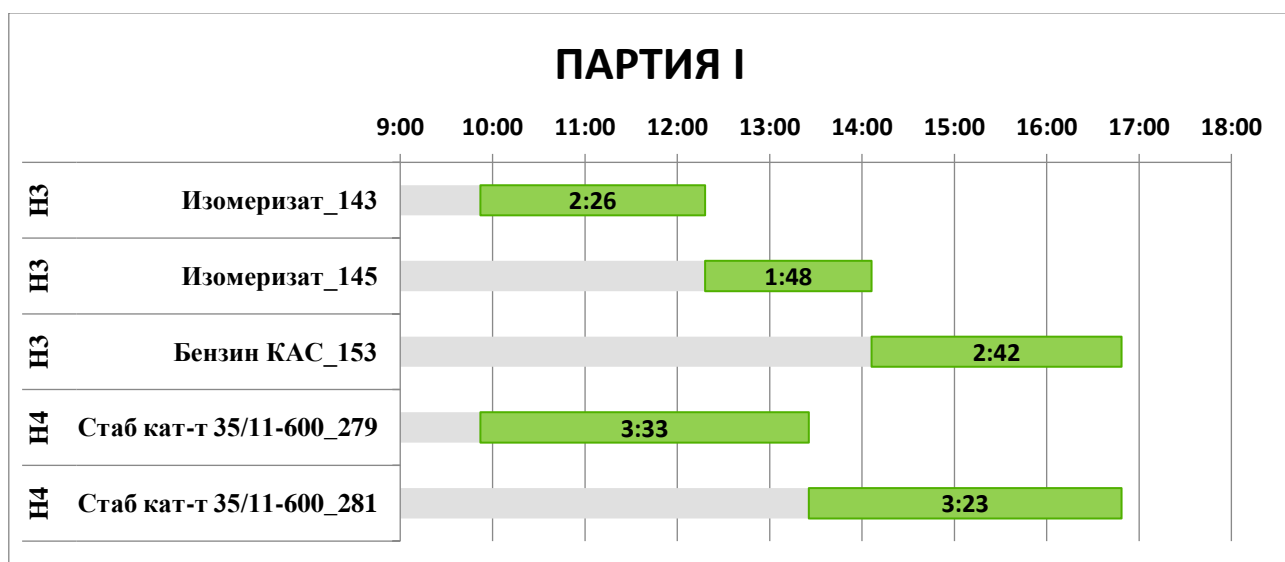
На диаграммах Ганта I – III, рис. 2.5 представлены таблицы для каждой партии смешения, конфигурации последовательности работ насосов с указанием, запланированных времени начала и окончания их работы.

ПАРТИЯ I

План	2430 т
Производительность смесителя	350 т/час
Прогноз времени смешения	6,94 час

Таблица 2.1 – Режим работы насосов перекачки компонентов смешения по партии I.

На сос	Компоненты	тонн	Всего через насос, т	Расчетн. произв. насоса, т/ч	Длительность, ч	Время старта, чч:мм:сс	Время выполнения, чч:мм:сс	Время окончания, чч:мм:сс	
Н3	Изомеризат_143	328,05	935,55	134,75	2,43	9:52	2:26	12:18	1
Н3	Изомеризат_145	243,00			1,80	12:18	1:48	14:06	2
Н3	Бензин КАС_153	364,50			2,71	14:06	2:42	16:48	3
Н4	Стаб кат-г 35/11-600_279	765,45	1494,45	215,25	3,56	9:52	3:33	13:25	1
Н4	Стаб кат-г 35/11-600_281	729,00			3,39	13:25	3:23	16:48	2



ПАРТИЯ II

План	1900	т
Производительность смесителя	350	т/ча
Прогноз времени смешения	5,43	час

Таблица 2.2 – Режим работы насосов перекачки компонентов смешения по партии II.

Насос	Компоненты	тонн	Всего через насос, т	Расчетн. произв. насоса, т/ч	Длительность, ч	Время старта, чч:мм:сс	Время выполнения, чч:мм:сс	Время окончания, чч:мм:сс	
НЗ	Изомеризат_142	448,40	811,30	149,45	3,00	16:48	3:00	19:48	1
НЗ	Бензин КАС_154	362,90			2,43	19:48	2:25	22:14	2
Н4	Стаб кат-т 35/11-600_280	1088,70	1088,70	200,55	5,43	16:48	5:25	22:14	1

Прогноз времени смешения 2,29 час



Таблица 2.3 – Режим работы насосов перекачки компонентов смешения по партии III.

На сос	Компоненты	тонн	Всего через насос, т	Расчетн. произв. насоса, т/ч	Длительность, ч	Время старта, чч:мм:сс	Время выполнения, чч:мм:сс	Время окончания, чч:мм:сс	
Н3	Изомеризат_143	120,00	248,00	108,5	1,11	9:23	1:06	10:29	1
Н3	Бензин КАС_154	128,00			1,18	10:29	1:10	11:40	2
Н4	Стаб кат-г 35/11-600_281	312,00	552,00	241,5	1,29	9:23	1:17	10:40	1
Н4	Алкилат_165	240,00			0,99	10:40	0:59	11:40	2

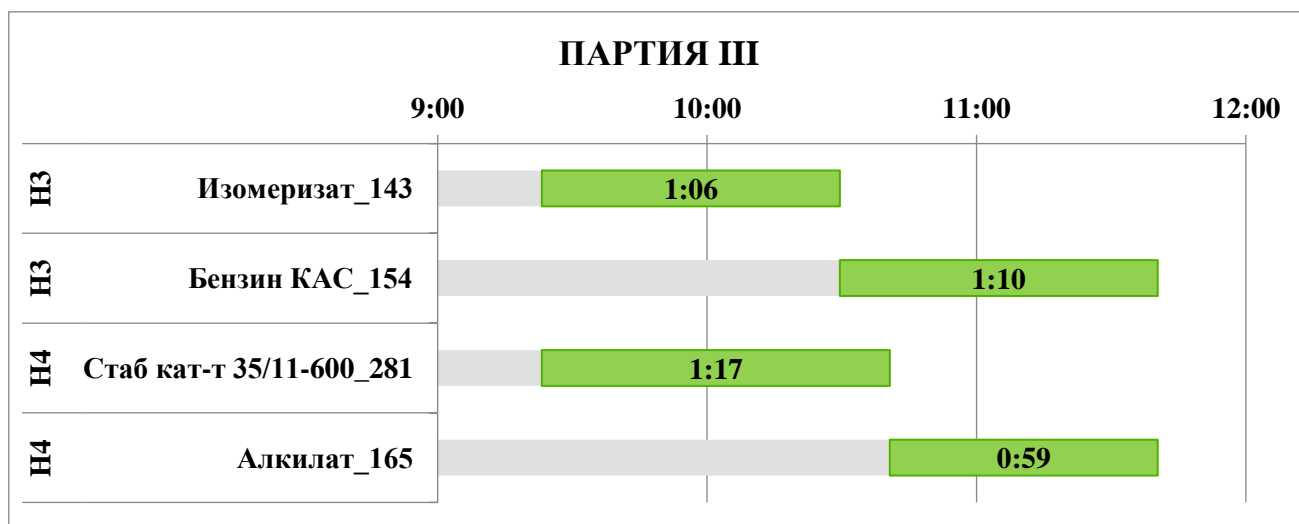


Рисунок 2.5 - Диаграмма Ганта смешения бензинов по партиям I, II, III

Представленные результаты получены на Сызранском НПЗ при тестировании программного комплекса оптимального планирования и оптимизации рецептур ПК ОПОР смешения бензинов и мазутов [136-138, 146].

2.3.2 Оптимизация рецептур смешения бензинов с учетом параметрической неопределенности

В формулировках задачи оптимальности (2.17) - (2.21) и (2.22) - (2.26) не учитываются влияние параметрической неопределенности измеряемых показателей качества компонентов смешения. В постановке задачи (2.22) -

(2.26) показатели качества компонентов смешения для каждой партии различны.

Неучтенная неопределенность измеряемых величин приводит к высокой вероятности получения некондиционного продукта и, как следствие, - повторному смешению и снижению производительности системы смешения бензинов.

Для решения задачи учета неопределенности по качеству компонентов смешения бензинов в интервале периода смешения бензинов вводится случайная функция в математическое описание постановки задачи.

Пусть \mathbf{X} - вектор компонентов рецептур смешения, ξ – стохастический (случайный) вектор.

$F(\mathbf{X}, \xi)$ - целевая функция и $h_j(\mathbf{x}, \xi)$ ($j = 1, 2, \dots, m$) - стохастическая функция ограничения.

Математическая формулировка задачи стохастической оптимизации с вероятностным ограничением имеет следующий вид:

$$R(\mathbf{x}, \xi) = F(C\mathbf{X}, \xi) \quad (2.27)$$

Ограничения по вероятности P_r в общем виде означает, что при формировании рецептур и смешении бензинов, количество вовлекаемых в смесь каждого компонента не будет превышать запасы компонентов в резервуарах с достоверностью a_j

$$Pr_j(h_j(\mathbf{x}, \xi) \leq 0) \geq a_j, \quad j = \overline{1, m} \quad (2.28)$$

где: a_j - уровень достоверности ограничения, другими словами, после получения оптимальных значений, вероятность реализации решения должна быть не ниже, чем a_j для каждого $h_j(\mathbf{x}, \xi) \leq 0$, что означает, относительно ОЧИМ, минимизацию вовлечения высокооктановых дорогих компонентов в смесь бензина. Результатом является экономия «октанового фонда» и снижение стоимости товарного бензина.

Постановка задачи в форме (2.27) определяет решение с учетом параметрической неопределенности, который применим и для онлайн оптимального управления смешением бензинов [145-148].

Онлайн модель управления ориентирована не просто на смешение бензинов по партиям и достижения максимума прибыли, но одним из показателей эффективности является время партии смешения, включая вероятность отклонения от спецификации бензина в конце каждой партии смешения и стоимость перехода от офлайн рецептур к текущим рецептурам в режиме реального времени.

Принятие решений по максимизации прибыли при планировании рецептур смешения бензинов является функцией офлайн оптимизации.

Параметрическая неопределенность по качеству компонентов смешения обозначается как вектор ξ . Неопределенность в целевой функции исключается, потому что целевая функция сводит к минимуму разницу между рецептурами верхнего уровня (офлайн оптимизация) и текущими в режиме реального времени для максимизации прибыли от смешения бензинов по каждой партии в срок

$$R_{t_{T-1}} = \Delta(X, \xi) = \|X_{t_T} - X_{t_{T-1}}\| \quad (2.29)$$

Ограничение

$$Pr_j \left\{ \left(\sum_{t_H}^{t_{T-1}} X_t \right) * Q_b + F(Q_{t_{T-1}}, \xi, X_{t_T}) \leq \left[\sum_{t_0}^{t_f} E^T * X_t \right] * S_j \right\} \geq a_j, \\ j = \overline{1, m}, \quad (2.30)$$

$$\sum_{t_H}^{t_T} H * X_t \leq d \quad (2.31)$$

В соотношении (2.30) слева от неравенства первое слагаемое в вероятности Pr - произведение вектора измерений показателей качества смеси

поточного анализатора Q_b на долю компонентов смешения в смеси, реализует функцию обратной связи в блоке онлайн оптимизации, рисунок 2.3.

Вектор неопределенности ξ представлен в ограничениях. Качество сырья в текущих условиях определяется слагаемым в (2.32) со случайным вектором возмущений ξ .

$$Q_{t_T}^{\Pi} = Q_{t_{T-1}} + \lambda * \xi \quad (2.32)$$

где: ξ – случайная функция плотности распределения вероятностей;

λ - вектор поправочных коэффициентов.

Учет вектора случайных возмущений ξ , влияющего на неопределенность изменения параметров компонентов смешения в каждой партии, решает проблему несоответствие («невязки») результатов, полученных по модели, и данными онлайн-оптимизации в режиме реального времени.

В то же время следует отметить, что смесь полученного бензина перед последующей партией смешения $\sum_{t_n}^{t_T-1} X_t$ является товарным продуктом. Для последующих партий в целом сохраняется постановка задачи эффективности смешения.

Представленная онлайн-модель оптимизации не прогнозирует показатели качества компонентов смешения для оставшегося интервала времени смешения бензинов как в (2.22) – (2.26), и рассчитывается рецептура для текущей партии с точным прогнозом длительности смешения. Для сложных процессов производства сырья крупномасштабный прогноз [14] может привести к снижению производительности системы из-за использования неточной прогнозной информации.

Выполнение условия (2.30) обеспечивает высокую вероятность производства бензиновой смеси в соответствии с требованиями к спецификации, равной произведению достоверностей a_j в целом по партиям, снижающими риск повторного смешения, вызванного некондиционностью показателей качества товарного бензина.

2.3.3 Оптимизация рецептур смешения бензинов с использованием искусственных нейронных сетей прямого распространения

Статические характеристики ОЧИМ и ДНП можно записать в следующем общем виде

$$\mathbf{y}(k) = \Phi[\mathbf{u}(k), \mathbf{u}(k-1), \mathbf{u}(k-2), \dots] = \Phi[\mathbf{X}(k)], \quad (2.33)$$

где

$$\mathbf{X}(k) = [\mathbf{u}(k), \mathbf{u}(k-1), \mathbf{u}(k-2), \dots]^T, \quad (2.34)$$

$\Phi[\mathbf{X}(k)]$ - неизвестная нелинейная функция, представляющая операцию смешения, $\mathbf{u}(k)$ - измеряемый скалярный вход (это может быть x_i – объемные (массовые) доли компонентов смешения), $\mathbf{y}(k)$ - значение ОЧИМ или ДНП в момент времени k [148].

Рассматривается многослойная нейронная сеть (многослойные персептроны, рисунок 2.4) для моделирования статических операций смешения (2.33)

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{V}_k \Phi[\mathbf{W}_k \mathbf{X}(k)], \quad (2.35)$$

где $\hat{\mathbf{y}}(k)$ скалярный выход и векторный вход $\mathbf{X}_k \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, определены в (2.34), веса в выходном слое $\mathbf{V}_k \in \mathbf{R}^{1 \times m}$, веса в скрытом слое $\mathbf{W}_k \in \mathbf{R}^{m \times n}$, Φ – m -мерная векторная функция. Типичным представлением элемента $\Phi_i[\mathbf{W}_k \mathbf{X}(k)]$ является сигмоидная функция. Идентифицированная система смешения (2.33) может быть представлена в виде $\mathbf{y}(k) = \mathbf{V}^* \Phi[\mathbf{W}^* \mathbf{X}(k)] - \boldsymbol{\mu}(k)$,

где \mathbf{V}^* и \mathbf{W}^* - множество неизвестных весов в выходном и скрытом слоях соответственно, обеспечивающие минимальную ошибку идентификации $\boldsymbol{\mu}(k)$.

Нелинейный процесс (2.33) может быть выражен как

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{V}^0 \Phi[\mathbf{W}^* \mathbf{X}(k)] - \boldsymbol{\delta}(k), \quad (2.36)$$

где \mathbf{V}^0 - известная матрица весов в выходном слое, выбранная пользователем.

В общем случае $\|\boldsymbol{\delta}(k)\| \geq \|\boldsymbol{\mu}(k)\|$. Используя разложение в ряд Тейлора вокруг точки $\mathbf{W}_k \mathbf{X}(k)$, ошибка идентификации может быть представлена как

$$\begin{aligned}
\mathbf{e}(k) &= \mathbf{V}_k \Phi[\mathbf{W}_k \mathbf{X}(k)] - \mathbf{V}^0 \Phi[\mathbf{W}^* \mathbf{X}(k)] + \delta(k) \\
&= \mathbf{V}_k \Phi[\mathbf{W}_k \mathbf{X}(k)] - \mathbf{V}^0 \Phi[\mathbf{W}_k \mathbf{X}(k)] + \mathbf{V}^0 \Phi[\mathbf{W}_k \mathbf{X}(k)] \\
&\quad - \mathbf{V}^0 \Phi[\mathbf{W}^* \mathbf{X}(k)] + \delta(k) \\
&= \tilde{\mathbf{V}}_k \Phi[\mathbf{W}_k \mathbf{X}(k)] + \mathbf{V}^0 \Phi'[\tilde{\mathbf{W}}_k \mathbf{X}(k)] + \zeta(k), \tag{2.37}
\end{aligned}$$

где Φ' - производная от нелинейной функции активации $\Phi[\mathbf{W}_k \mathbf{X}(k)]$ в точке $\mathbf{W}_k \mathbf{X}(k)$, $\tilde{\mathbf{W}}_k = \mathbf{W}_k - \mathbf{W}^*$, $\tilde{\mathbf{V}}_k = \mathbf{V}_k - \mathbf{V}^0$, $\zeta(k) = \mathbf{V}^0 \boldsymbol{\varepsilon}(k) + \delta(k)$, где $\boldsymbol{\varepsilon}(k)$ - ошибка аппроксимации рядом Тейлора второго порядка.

Интерес представляет идентификация с открытым циклом, где можно предположить, что объект (2.33) устойчив с ограниченными входом и выходом, т. е. $\mathbf{Y}(k)$ и $\mathbf{u}(k)$ ограничены в (2.33) из-за ограничений в $[\mathbf{u}(k), \mathbf{u}(k-1), \mathbf{u}(k-2), \dots]^T, \mathbf{X}(k)$.

Сигмовидная функция Φ предполагает, что $\delta(k)$ и $\boldsymbol{\varepsilon}(k)$ в (2.36) ограничены. Таким образом, $\zeta(k)$ в (2.37) также ограничены. Следующая теорема дает устойчивый алгоритм обратного распространения для многослойной нейронной сети с дискретным временем.

Если используется многослойная нейронная сеть (2.35) для идентификации нелинейного процесса (2.33), то алгоритм, обратного распространения, может обеспечить ошибку $\mathbf{e}(k)$ идентификации в заданном диапазоне.

$$\begin{aligned}
\mathbf{W}_{k+1} &= \mathbf{W}_k - \eta_k \mathbf{e}(k) \Phi' \mathbf{V}^{0T} \mathbf{X}^T(k) \\
\mathbf{V}_{k+1} &= \mathbf{V}_k - \eta_k \mathbf{e}(k) \Phi^T
\end{aligned} \tag{2.38}$$

где $\eta_k = \frac{\eta}{1 + \|\Phi' \mathbf{V}^{0T} \mathbf{X}^T(k)\|^2 + \|\Phi\|^2}$, $0 < \eta \leq 1$

Среднее значение ошибки идентификации удовлетворяет условию

$$J = \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \mathbf{e}^2(k) \leq \frac{\eta}{\pi} \bar{\zeta} \tag{2.39}$$

где $\pi = \frac{\eta}{k+1} \left[1 - \frac{k}{k+1} \right] > 0$, $k = \max_k \left(\|\Phi' \mathbf{V}^{0T} \mathbf{X}^T(k)\|^2 + \|\Phi\|^2 \right)$

$\bar{\zeta} = \max_k [\zeta^2(k)]$

Примечание 1: \mathbf{V}^0 не влияет на свойство стабильности нейро-идентификации, но влияет на точность идентификации (2.39).

Разработанный автономный метод обеспечивает лучшее значение для \mathbf{V}^0 . Допустим $\mathbf{V}^0 = \mathbf{V}_0$, алгоритм (2.38) может дать сходящуюся ошибку идентификации, т. е. \mathbf{V}_k дает ошибку идентификации меньше, чем ошибка \mathbf{V}^0 .

\mathbf{V}_0 может быть выбран следующими шагами:

1. Начало – выбор начального значения для $\mathbf{V}^0 = \mathbf{V}_0$;
2. Процедура идентификации \mathbf{V}^0 до \mathbf{T}_0 ;
3. Если $\|\mathbf{e}(\mathbf{T}_0)\| < \|\mathbf{e}(\mathbf{0})\|$, то \mathbf{V}_T присваивается новый \mathbf{V}^0 , т. е. $\mathbf{V}^0 = \mathbf{V}_{T_0}$, переход к пункту 2 для дальнейшей процедуры идентификации;
4. Если $\|\mathbf{e}(\mathbf{T}_0)\| \geq \|\mathbf{e}(\mathbf{0})\|$, то \mathbf{V}_{T_0} является окончательным значением весовых коэффициентов в выходном слое для \mathbf{V}^0 .

С этим предварительным \mathbf{V}^0 можно начать процедуру идентификации (2.38).

Динамические свойства системы смешения, такие как уровень в резервуаре, содержание каждого компонента в смеси и т. п., могут быть записаны в форме дискретного времени

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(k)] \quad (2.40)$$

Многослойные рекуррентные нейронные сети с дискретным временем представлены в виде

$$\beta \hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{V}_k \sigma[\mathbf{W}_k \mathbf{x}(k)] \quad (2.41)$$

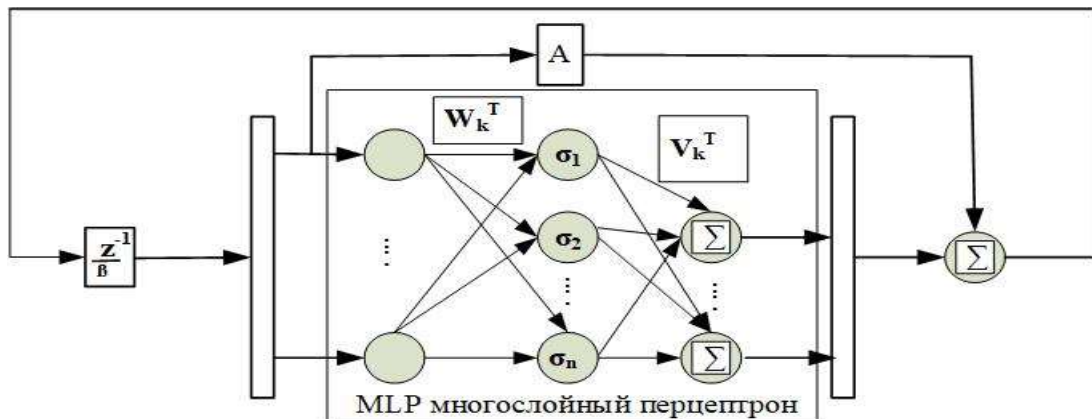


Рисунок 2.6 - Многослойная рекуррентная нейронная сеть дискретного времени

где $V_k \in R^{1 \times m}$ - веса в выходном слое, $W_k \in R^{m \times n}$ - веса в скрытом слое, σ - функция вектора многомерности, β - положительная постоянная $\beta > 1$, которая является расчетным параметром. Типовым представлением элемента $\Phi[W^* X(k)]$ является сигмовидная функция.

Структура дискретных по времени многослойных рекуррентных нейронных сетей показана на рисунке 2.6.

Идентифицированная система смешивания (2.40) может быть представлена в виде

$$\beta x(k+1) = Ax(k) + V^* \sigma[W^* x(k)] - \mu(k) \quad (2.42)$$

где V^* и W^* - множество неизвестных весов, минимизирующие ошибку моделирования $\mu(k)$. В случае трех независимых переменных гладкая функция f имеет структуру, разложенной в ряд Тейлора

$$f(x_1, x_2) = \sum_{k=0}^{i-1} \frac{1}{k!} \left[(x_1 - x_1^0) \frac{\partial}{\partial x_1} + (x_2 - x_2^0) \frac{\partial}{\partial x_2} \right]_0^k f + R_l$$

где R_l - остаток ряда Тейлора. Допустим, x_1 и x_2 соответствуют V^* и W^* , то x_1^0 и x_2^0 соответствуют V_k и W_k . Используя разложение в ряд Тейлора вокруг точки $W_k x(k)$ и V_k , то ошибка идентификации $e(k) = \hat{x}(k) - x(k)$ может быть

представлена как

$$\beta e(k+1) = Ae(k) + \tilde{V}_k \sigma[W_k x(k)] + V_k \sigma' \tilde{W}_k x(k) + \zeta(k), \quad (2.43)$$

где σ' - производная нелинейной функции активации $\sigma[W_k x(k)]$ в точке

$$W_k x(k), \tilde{W}_k = W_k - W^*, \tilde{V}_k = V_k - V^*, \zeta(k) = R_l + \mu(k)$$

где R_l ошибка аппроксимации ряда Тейлора второго порядка.

Представляет интерес только идентификация в разомкнутом контуре, предполагая, что объект (2.40) ограниченно устойчива, т. е. $x(k)$ в (2.40) ограничена. В силу ограниченности сигмовидной функции σ будем считать, что $\mu(k)$ в (2.42) ограничена, как и R_l , поэтому $\zeta(k)$ в (2.43) также ограничена.

Следующая теорема дает устойчивый алгоритм, подобный обратному распространению для многослойной нейронной сети с дискретным временем.

Если используется рекуррентная нейронная сеть (2.41) для идентификации нелинейного объекта (2.40) и \mathbf{A} выбран с учетом условия $-\mathbf{1} < \lambda(\mathbf{A}) < \mathbf{0}$, то следующий закон обновления градиента без робастной (устойчивой) модификации может привести к ограниченной ошибке идентификации $\mathbf{e}(\mathbf{k})$

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{k+1} &= \mathbf{W}_k - \eta_k \mathbf{e}(k) \sigma' \mathbf{V}_k^T \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{V}_{k+1} &= \mathbf{V}_k - \eta_k \mathbf{e}(k) \sigma^T [\mathbf{W}_k(k) \mathbf{x}(k)], \end{aligned} \quad (2.44)$$

где η_k удовлетворяет следующему требованию

$$\eta_k = \begin{cases} \frac{\eta}{1 + \|\sigma' \mathbf{V}_k^T \mathbf{x}(k)\|^2 + \|\sigma\|^2}, & \beta \|\mathbf{e}(k+1)\| \geq \|\mathbf{e}(k)\| \\ \beta \|\mathbf{e}(k+1)\| < \|\mathbf{e}(k)\|, & \mathbf{0} < \eta \leq \mathbf{1} \end{cases}$$

Среднее значение ошибки идентификации удовлетворяет условию

$$J = \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T e^2(k) \leq \frac{\eta}{\pi} \bar{\zeta}, \quad (2.45)$$

где $\pi = \frac{\eta}{k+1} \left[1 - \frac{k}{k+1} \right] > \mathbf{0}$, $k = \max_k \left(\|\sigma' \mathbf{V}^{0T} \mathbf{X}^T(k)\|^2 + \|\sigma\|^2 \right)$

$$\bar{\zeta} = \max_k [\zeta^2(k)]$$

Примечание 2: Условие $\beta \|\mathbf{e}(k+1)\| < \|\mathbf{e}(k)\|$ определяет «мертвую зону».

Этот метод всегда используется в идентификации системы, гарантирующий стабильность ошибки идентификации относительно немоделируемой динамики. Чтобы избежать такого случая, как: когда $\beta \|\mathbf{e}(k+1)\| < \|\mathbf{e}(k)\|$ ($\eta_k = \mathbf{0}$) и необходимо обучить сети, необходимо выбрать β достаточно большой, чтобы мертвая зона стала меньше. С другой стороны, большое β означает стабильность динамических нейронных сетей $\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \frac{\mathbf{A}}{\beta} \hat{\mathbf{x}}(k) + \frac{1}{\beta} \mathbf{V}_k \sigma[\mathbf{W}_k \mathbf{x}(k)]$. Противоречие между малой мертвой зоной и стабильными нейронными сетями решается с помощью нейро-моделирования.

2.3.4 Оптимизация рецептур смешения бензинов с использованием рекуррентной нейронной сети Хопфилда

Надежность и достоверность информации являются одним из определяющих факторов целостности и эффективности функционирования автоматизированной системы управления различных уровней - технологическими процессами, сведения материальных балансов предприятия и т. п. Небольшая ошибка в измерениях может привести к значительным финансовым издержкам.

В диссертационной работе рассматривается возможность решения этой проблемы использованием авто-ассоциативной нейронной сети (ААНС), обучающейся модифицированным робастным методом в системе онлайн-мониторинга «зашумленных» сигналов для обнаружения неисправностей и автокоррекции показаний измерительной системы (ИС).

Предлагаемая модель эффективно решает представленную проблему и обеспечивает низкий уровень ошибок [142].

Результатом являются надежные и достоверные измерения, обеспечивающие эффективность управления технологическими процессами, а также упреждающая информация о возможных сбоях системы [143].

Решение этой проблемы опирается на построении интеллектуальной обучающейся системы в режиме реального времени. Исходной информацией являются непрерывные данные от ИС. Система строится на базе архитектуры ААНС, позволяющей фильтровать шумы измерения, осуществлять самокоррекцию ошибочных сигналов из-за сбоев и дрейфа показаний ИС с течением времени, осуществлять обработку данных, относящихся к грубым ошибкам [144, 145].

В диссертационной работе рассматривается использование рекуррентной нейронной сети Хопфилда для моделирования характеристик статики и динамики системы смешения бензинов с применением ААНС:

измерений [139], обеспечивающей более адекватные результаты по сравнению с измерениями с меньшей взаимной корреляцией во входных векторах [14].

Динамика состояния во времени i -ого нейрона в сети из N нейронов в простейшем случае описывается дискретной динамической системой с активационной пороговой функцией T :

$$y_i(t+1) = F\left(\sum_{i=1}^N w_{ij} y_i + x_i\right), \quad (2.46)$$

$$y_i(t+1) = \begin{cases} y(t), & \text{если } \sum_{i=1}^N w_{ij} y_i + x_i = T, \\ +1, & \text{если } \sum_{i=1}^N w_{ij} y_i + x_i > T, \\ -1, & \text{если } \sum_{i=1}^N w_{ij} y_i + x_i < T, \end{cases} \quad (2.47)$$

ААНС с обратными связями устойчива в соответствии с условиями симметричности матрицы весовых коэффициентов $w_{ij} = w_{ji}$ и равенство нулю весовых коэффициентов главной диагонали матрицы $w_{ii} = 0$.

В сети Хопфилда на начальном этапе веса задаются и вычисление весов осуществляется по соотношению:

$$w_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^M x_j^k * x_i^k, & i \neq j, \\ w_{ij} = 0, & \text{при } i = j, \end{cases} \quad (2.48)$$

где x_j^k - j -я компонента запоминаемого k -го вектора; M - общее число запоминаемых образов.

Вектор состояния ААНС характеризуется двоичным кодом длиной массива N .

Матрица весовых коэффициентов W формируется следующим образом:

$$W = \sum_{k=1}^m X_k^T * X_k - E, \quad (2.49)$$

где \mathbf{E} – единичная матрица, обеспечивающая условие равенства нулю элементов главной диагонали матрицы весовых коэффициентов в 2.48, $w_{ij}=0$ при $i = j$.

Укрупненный алгоритм работы ААНС состоит из двух стадий: обучения и практического использования.

I. Стадия обучения:

1. Формирование матрицы эталонных образов $\mathbf{X}_{ij}(\mathbf{0}), \mathbf{Y}_i(\mathbf{0})$;
2. Расчет матрицы весовых коэффициентов, уравнение (2.48).

II. Стадия практического использования:

1. На вход ААНС подается зашумленный вектор-столбец измерений $\overline{\mathbf{X}}$, $i = \overline{1, N}$. Выходам нейронов присваиваются соответствующие значения входного вектора $\mathbf{Y}(\mathbf{0}) = \mathbf{X}(\mathbf{0})$;
2. Пересчет состояния нейронов и расчет выходного вектора ААНС

$$\mathbf{Y}_i^{\Pi}(\mathbf{t} + \mathbf{1}) = \mathit{sign} \left| \sum_{i=1}^N w_{ij} * \mathbf{Y}_i^{\Pi}(\mathbf{t}) \right|, \quad (2.50)$$

Каждый нейрон может быть в одном из двух состояний $\mathbf{Y}_i^{\Pi}(\mathbf{t}) \in \{-1; +1\}$.

Уравнение (2.50) представляет прогнозные результаты по ААНС.

3. Итерационные расчеты выполняются до устойчивого состояния выходного вектора, являющийся решением задачи распознавания (обученности НС).

На каждом этапе итерации \mathbf{t} и $\mathbf{t}+1$ осуществляется сравнение сходимости и устойчивости образов на выходе ААНС и оценка «невязки» с допустимым порогом ошибки. Если «невязка» в пределах порога ошибки, то ААНС обучена, эталонный образ близок входному вектору, если нет, то переход в пункт 2 стадии II, уравнение (2.50). Возможна и ситуация заикливания (чередования) выходного вектора, являющаяся признаком завершения обучения. После стабилизации ААНС выходной вектор соответствует одному из эталонных образов.

В качестве эталона принимается вектор установленной спецификации показателей качества бензинов.

Устойчивые точки (аттракторы) образуют зоны притяжения в пространстве поиска весовых коэффициентов эталона. Наряду с реальными аттракторами в сети могут быть и ложные аттракторы, которым не соответствует никакой образ.

При поступлении на вход ААНС частично искаженного входного вектора сеть стабилизируется в состоянии, ближайшем к желаемому. Для этого веса сети выбираются из условия устойчивого равновесия для каждого входного образа.

При идентификации параметров нелинейных зависимостей показателей качества бензинов по ОЧИМ и ДНП использованы модели, приведенные в работах [137-139, 14, 140, 141, 21]. При реализации ААНС в качестве структуры описания ОЧИМ и ДНП могут использоваться [137-139, 14, 140, 145].

При построении ААНС идентификация показателей качества бензинов в режиме реального времени (ОЧИМ, ДНП) задаются начальные значения коэффициентов в матрице парных взаимовлияний $\{I_{i,k}\}$ в (2.3), (2.7) и \mathbf{a} , \mathbf{b} в (2.8).

При использовании модели парного взаимовлияния на величину ОЧИМ_I соотношение (2.3) может быть представлено в виде:

$$\text{ОЧИМ}_I = \mathbf{X}^T * \text{ОЧИМ}_i + \mathbf{X}^T * \{I_{i,k}\}, \quad (2.51)$$

Укрупненная форма представления системы смешения имеет вид

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{F}[\mathbf{X}(t)], \quad (2.52)$$

где $\mathbf{Y}(t) = \text{ОЧИМ}$, $\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}$.

Оптимизация рецептуры смешения осуществляется в ПК ОПОР [136-138]. Результаты по составу рецептуры смешения и показатели качества, полученные в ААНС, являются предварительными с точки зрения критерия оптимальности и передаются в ПК ОПОР для оптимизации в пределах требований по спецификации, в соответствии с постановкой задачи - минимизации стоимости или максимизации выхода товарного бензина.

2.3.5 Оптимизация рецептур смешения бензинов с использованием обратных рекуррентных нейронных сетей

Математические модели статических и динамических характеристик смешения бензинов только в некоторых особых условиях могут быть адекватны объекту управления в режиме реального времени.

Решение этой проблемы возможно по данным функционирования системы смешения бензинов в режиме реального времени.

Аппарат нейросетевых технологий является эффективным средством моделирования смешения бензинов по данным от объекта в режиме реального времени, рассматриваемого как «черный ящик».

Рассматривается использование сети прямой связи для моделирования статических свойств системы смешения: исследование октанового числа ОЧИМ и давления насыщенных паров ДНП, моделирование динамических характеристик системы смешения (уровня в резервуаре-смесителе, состава рецептуры и температуры) периодическими нейронными сетями, рисунок 2.8.

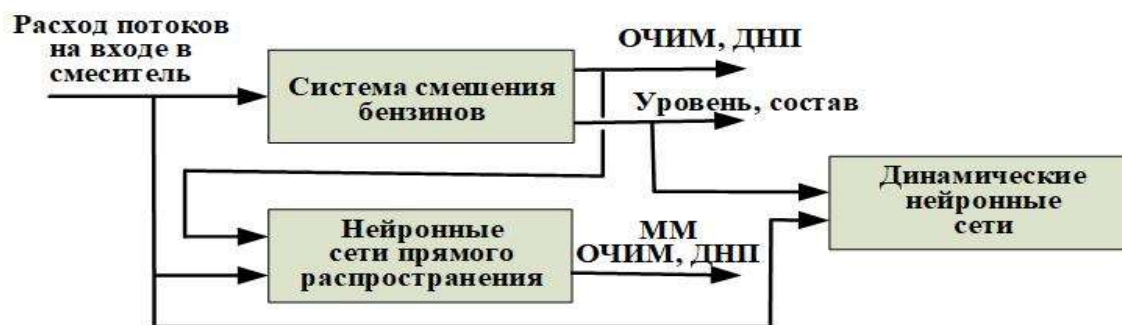


Рисунок 2.8 - Схема нейросетевого моделирования системы смешения бензинов.

2.3.6 Результаты численного моделирования и оптимизации рецептур смешения бензинов с использованием искусственных нейронных сетей

Используем нейронные сети прямого распространения для моделирования статического свойства смешения бензина с октановым числом.

Используются два вида математической модели: модель парного взаимовлияния компонентов (2.3) и модель Захеда (2.5) для аппроксимации реальных данных двух групп.

Статическая нейронная сеть используется для моделирования октанового числа бензиновой смеси.

Рассмотрим смесь бензина их пяти компонентов, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T$. Модель парного взаимовлияния компонентов может быть записана как

$$\text{ОЧИМ}_3 = \mathbf{x}^T \mathbf{p} + \mathbf{x}^T \{I_{I,K}\}, \quad (2.53)$$

где вектор показателей качества исходных компонентов, $\mathbf{p} = [p_1, p_2, p_3, p_4, p_5]^T = [90,1; 75,7; 93,8; 82,9; 95]^T$, I_{IK} - матрица парного взаимного влияния компонентов смешения на показатель качества смеси топлива, которая определяется как

$$I_{IK} = \begin{bmatrix} 0,0 & -6,0 & -8,25 & 8,25 & -6,0 \\ 0,0 & 0,0 & -7,8 & 9,0 & 11,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 11,0 & -9,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 11,5 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \end{bmatrix},$$

Стандартная форма (2.53) имеет вид

$$\mathbf{y}(k) = \Phi[X(k)], \quad \mathbf{y}(k) = \text{ОЧИМ}_3, \quad X(k) = \mathbf{x},$$

Сначала в интервале $[0, 1]$ в качестве случайных чисел выбираем $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 = 1 - (x_1 + x_2 + x_3 + x_4)$ для обучения по модели нейронной сети

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = V_k \Phi[W_k X(k),], \quad (2.54)$$

где $W_k \in R^{9 \times 5}, V_k \in R^{1 \times 9}$ начальные условия для элементов V^{0T} , W_k и V_k являются случайными числами в интервале $[0, 1]$.

Алгоритм обучения

$$\begin{aligned} W_{k+1} &= W_k - \eta_k e(k) \Phi' V^{0T} X^T(k) \\ V_{k+1} &= V_k - \eta_k e(k) \Phi^T, \end{aligned} \quad (2.55)$$

где

$$\eta_k = \frac{1}{1 + \|\Phi' V^{0T} X^T(k)\|^2 + \|\Phi\|^2}, \quad e(k) = \hat{\mathbf{y}}(k) - \mathbf{y}(k)$$

$$\Phi(*) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}},$$

$$\Phi'(*) = \operatorname{sech}(x) = \frac{2}{e^x + e^{-x}}.$$

В примере [27] для обучения было использовано 1500 данных. После $k > 1300$, веса сходятся. Затем используются различные скорости подачи потоков компонентов смещения для тестирования нейронной модели:

$$x_1(k) = 0,1 \left[1 + \sin\left(\frac{2\pi}{20}k\right) \right], \quad x_2(k) = 0,2 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{20}k\right) \right]$$

$$x_3(k) = 0,1 \left[1 + \sin\left(\frac{2\pi}{30}k\right) \right], \quad x_4(k) = 0,1 \left[1 + \sin\left(\frac{2\pi}{50}k\right) \right]$$

$$x_5(k) = 1 - [x_1(k) + x_2(k) + x_3(k) + x_4(k)]$$

Эти данные поступают в систему смещения (2.53) и модель смещения (2.54) одновременно.

Определяется среднеквадратичная ошибка за конечное время:

$$J(N) = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N e^2(k). \quad (2.56)$$

где N – дискретное время моделирования.

На этапе обучения $J_1(1500) = 0,0058$, на этапе тестирования $J_1(1500) = 0,0087$. Ошибки моделирования зависят от сложности конкретной выбранной модели и от того, насколько она близка реальному объекту. В этом примере основная часть моделирования проводится на этапе тестирования, чем на этапе обучения.

Следует отметить, что структура модели влияет на ошибку моделирования, но не нарушает стабильность процесса идентификации.

$$\text{ОЧИМ}_4 = M_0 + \sum_{i=1}^n M_i (x_i p_i^l)^k,$$

с $M_0 = 0$, $M_i = 1$, $l = 1,25$; $k = 0,8$; $n = 5$; $p = [90,1; 75,7; 93,8; 82,9; 95]^T$.

Та же нейронная сеть применима и для новой структуры математической модели ОЧИМ_4 , отличие будут только массиве весов.

Для сравнения алгоритма (2.55) с нормальным алгоритмом обратного распространения [148] используются те же многослойные нейронные сети, что и в [148] с фиксированной скоростью обучения $\eta = 0,05$.

Установлено, что при $\eta > 0.1$ нормальный алгоритм обратного распространения становится неустойчивым. Сравнение производительности может быть реализовано по среднеквадратическим ошибкам (2.56).

Предложенный в этой работе устойчивый алгоритм имеет почти такую же скорость сходимости, что и обычный алгоритм обратного распространения.

Обычный алгоритм обратного распространения для многослойных нейронных сетей имеет низкую скорость сходимости и большую ошибку идентификации, $J_1(1500) = 0,078$.

Вторая часть симуляции заключается в использовании рекуррентной нейронной сети для моделирования динамических свойств смешения бензина.

Динамику резервуара смесителя можно выразить в виде:

$$\dot{x} = \frac{A_f \sqrt{2g}}{A} \sqrt{x} + \frac{1}{p_f A} \sum_{i=1}^n q_i, \quad (2.57)$$

При заданных параметрах, таких как $A = 30$, $A_f = 2$, $g = 9,8$, $\rho_f = 0,85$, $q = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5] = [3 + a_1; 2; 1 + a_3; 1; 0,5]^T$ a_1 и a_3 - прямоугольные волны с амплитудой 10 и частотой 0,5 Гц. $x(0) = 2$. Следующая разностная схема используется для получения дискретных состояний системы (2.57) $\dot{x} = \alpha(x) + \lambda u$

где

$$\alpha(x) = \frac{A_f \sqrt{2g}}{A \sqrt{x}}, \lambda = \frac{1}{A p_f}, u = \sum_{i=1}^n q_i$$

$$s_1 = \alpha x_k, s_2 = \alpha(x_k + s_1), s_3 = \alpha\left(x_k + \frac{s_1 + s_2}{4}\right).$$

$$\text{если } \left| \frac{s_1 - 2s_3 + s_2}{3} \right| \leq \frac{|x_k|}{1000} \vee \left| \frac{s_1 - 2s_3 + s_2}{3} \right| < 1, \text{ то}$$

$$x_{k+1} = x_k + \frac{s_1 + 4s_3 + s_2}{6}, k = 0, 1, 2 \dots$$

Многослойная рекуррентная нейронная сеть (2.41) используется для идентификации (2.57),

$$\beta \hat{x}(k+1) = A \hat{x}(k) + V_k \sigma[W_k(k)x(k)] + au$$

где $\sigma(\cdot) = \tanh(\cdot)$, $A=0.8$. Сложность модели важна в контексте идентификации системы, которая соответствует числу скрытых единиц нейромодели. В этом моделировании проверяется различное количество скрытых узлов, моделирование показывает, что после того, как число скрытых узлов превысит 20, точность идентификации не будет значительно улучшена.

В [148] также использованы 20 скрытых узлов для первого скрытого слоя. Таким образом, $W_k \in \mathbb{R}^{20 \times 1}$, $V_k \in \mathbb{R}^{1 \times 20}$.

Алгоритм обучения для W_k и V_k (2.55) с

$$\eta_k = \frac{1}{1 + \|\sigma' V_k^T x(k)\|^2 + \|\sigma\|^2}, \quad \sigma'(\cdot) = \text{sech}^2(\cdot), \quad \beta = 4$$

Начальные условия для W_k и V_k являются случайными числами, то есть $W_0 = \text{rand}(\cdot)$, $V_0 = \text{rand}(\cdot)$.

Общее время моделирования составляет 60 часов, есть только 1 час, когда $\beta \|e(k+1)\| < \|e(k)\|$.

Выводы к главе 2

1. Разработаны статические и динамические модели процессов смешения бензинов;
2. Разработаны модели и алгоритмы расчета октановых чисел и давления насыщенных паров бензинов с учетом:
 - фактора парных взаимовлияний компонентов смешения на величину ОЧИМ в модели неполного второго порядка;
 - индексов смешения, с идентификацией параметров этих моделей по данным лабораторных экспериментов или статистического анализа режима работы смесителей.

3. Разработана система оптимизации и управления смешением бензинов в режиме реального времени.
4. Разработана процедура оптимизация рецептур смешения бензинов с использованием:
 - нейронных сетей с прямого распространения;
 - рекуррентной нейронной сети Хопфилда и обратных рекуррентных нейронных сетей;
5. Приведены результаты численного моделирования и оптимизации рецептур смешения бензинов с использованием искусственных нейронных сетей.

ГЛАВА 3 ПОСТАНОВКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ПРОИЗВОДСТВА БЕНЗИНОВ

Планирование операций смешения бензинов является важной и актуальной задачей, поскольку на бензин приходится 60-70% от общей прибыли НПЗ [90- 92].

Планирование технологических операций смешения бензинов на НПЗ является нелинейной комбинаторной задачей расчета рецептур компонентов смеси с различными качественными показателями.

Модель включает в себя оптимизацию рецептур бензиновых смесей, задачи распределения потоков от резервуаров хранения компонентов смешения до смесителей, после смесителей в продуктовые резервуары, операционные требования к автоматизированной системе смешения и технологических и экономических требований.

Алгоритм оптимизации, основан на процедуре внешней аппроксимации. Общая задача декомпозируется на две подзадачи: основную - смешанное целочисленное линейное программирование **MILP**, построенную путем релаксации (упрощений и допущений) исходной модели с использованием кусочно-оггибающих (релаксаций) Маккормика [125] и гиперплоскостей [126, 127], которая обеспечивает нижнюю границу и подчиненную нелинейную модель **NLP**, которая дает верхнюю границу решений. Таким образом обеспечивается выпуклость задачи в каждом временном интервале разбиения.

Алгоритм итерационного расчета осуществляется между двумя уровнями до выполнения условий критерия завершения.

Эти методы разбивают область переменных в билинейном выражении на разделы и генерируют линейные (выпуклые) задачи для каждого разбиения.

Увеличивая число разбинок и уменьшая область переменных, алгоритм уточняет оценки глобального решения.

Реализация оптимального производственного графика снижает операционные затраты, увеличивает прибыль и сводит к минимуму отклонения от экологических требований к окружающей среде [90-94].

Сложные промышленные предприятия могут иметь множество производственных, складских и распределительных подсистем, несколько различных видов сырья, промежуточных и конечных продуктов, а также сложные связи между всеми этими элементами. что делает составление расписания сложным процессом принятия решений.

Планирование и принятие решений состоит из четырех основных этапов [89]:

1. Формулировка задач для достижения соответствующих целей, требований и/или целевых показателей спроса;
2. Формулировка каждой подзадачи;
3. Определение последовательности выполнения задач;
4. Определение времени выполнения задач от момента запуска до остановки (рисунок 3.1).

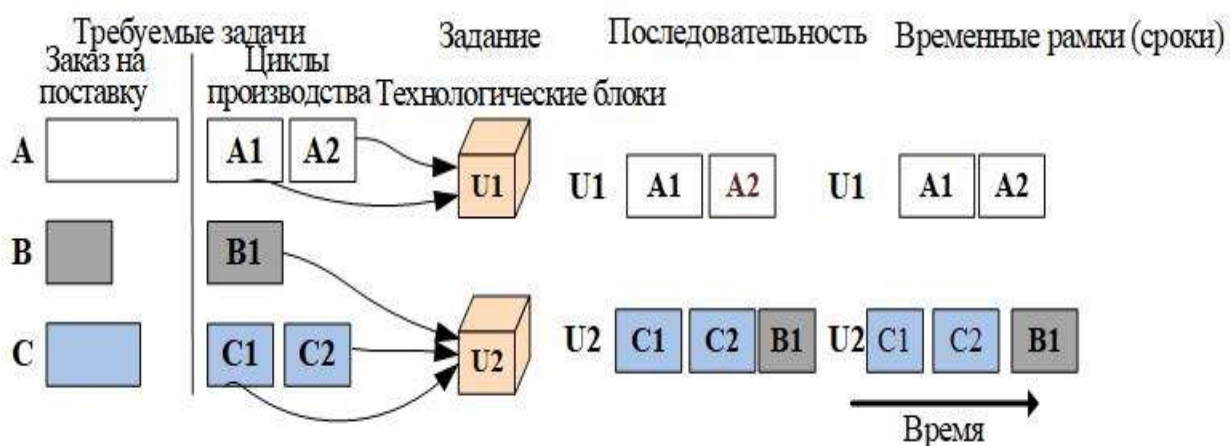


Рисунок 3.1 - Структура основных решений по планированию

Оптимальные решения по составлению расписания обеспечивают максимум или минимум сформулированного критерия оптимальности, таких как прибыль, общая стоимость, время выполнения и тому подобное. Программное обеспечение и инструменты для составления расписаний,

основанные на математическом программировании становятся все более привычными на практике.

В системе смешения бензинов компоненты из резервуаров хранения подаются в продуктовые резервуары на смешение или в поточные смесители (блендеры).

Смесительные резервуары на каждом интервале времени имеет только входящий поток продукта либо только выходящий, рисунок 3.2 для периодической системы смешения.

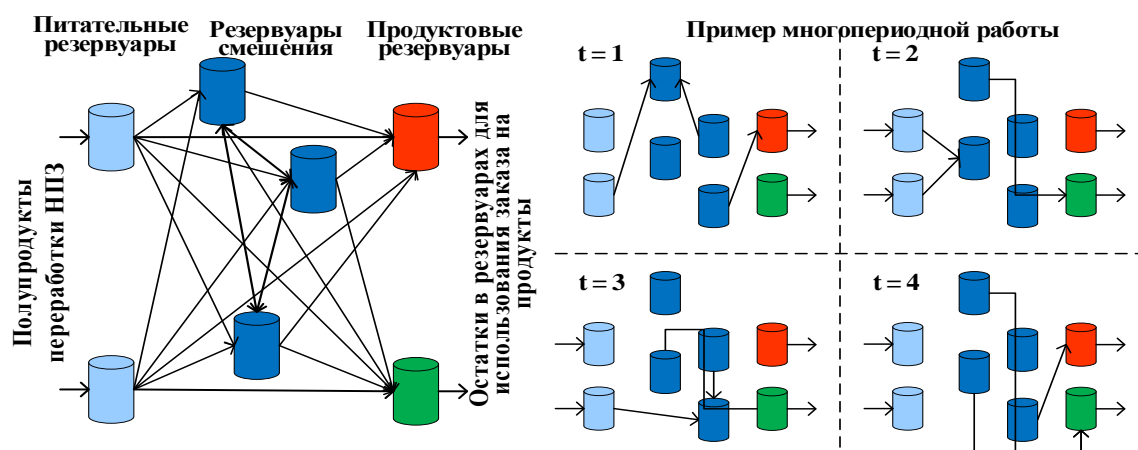


Рисунок 3.2 - Система смешения по партиям (t – время периода смешения)

В отличие от них, поточные блендеры работают в непрерывном режиме (рисунок 3.3). В дополнение к четырем решениям, упомянутым ранее, планирование операций смешения должно включать определение рецептуры смеси - то есть количества компонентов, которые необходимо смешать так, чтобы качественные показатели продукции соответствовали заданным спецификациям в соответствии выбранным критерием эффективности.

В качестве примера на рисунке 3.3 представлена укрупненная схема системы смешения бензинов, осуществляемая одним или несколькими блендерами непрерывного действия. Каждый блендер соединен с источниками компонентов смеси.

В некоторых технологических конфигурациях НПЗ смесь поступает в резервуар для хранения, в то время как в других конфигурациях он может поступать непосредственно в трубопровод. Поскольку производится несколько

сортов бензина (например, обычный, средний, высший), блендер переключается со смешивания одного сорта на другой.

Каждый переход требует частичной перестройки технологической схемы, линий подачи смеси, что приводит к потере мощности смешения.

Кроме того, переход на другой, часто требуемый технологом, диапазон качественных показателей продукта требуется перенастройка или/и повторная калибровка поточных анализаторов.

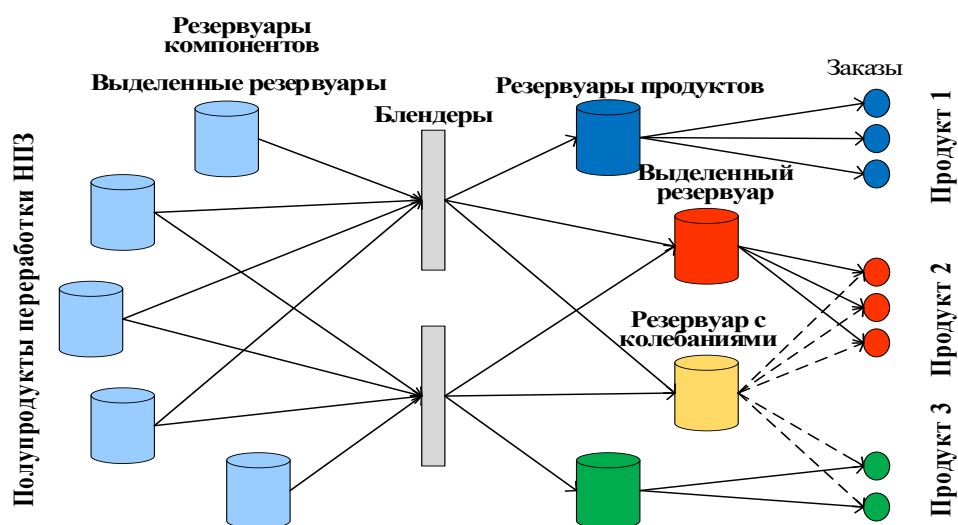


Рисунок 3.3 - Общая схема непрерывной системы смешения бензинов

Математические модели планирования обычно формулируются как задачи смешанного целочисленного линейного программирования **MILP** [111-113].

Однако для смешения бензина, нелинейное поведение присуще соответствующему процессу и для обеспечения точности решения задачи оптимального планирования необходимо использовать смешанно-целочисленное нелинейное программирование **MINLP**.

Большинство нелинейных условий являются невыпуклыми, что приводит к неэффективности методы выпуклой оптимизации [115-119].

Модели планирования можно разделить на две основные категории: дискретные и непрерывные по времени.

В дискретных по времени моделях временной горизонт планирования делится на несколько периодов известной продолжительности с фиксированным временем начала и окончания технологически операций.

В моделях с непрерывным временем временной горизонт делится на временные интервалы, продолжительность которых определяется в процессе оптимизации [131, 132].

Модели непрерывного времени порождают проблемы с меньшим количеством дискретных переменных, чем их дискретные аналоги, они более сложны в формулировке и часто содержат много ограничений [99], что приводит к снижению производительности вычислительного процесса. Более подробные формулировки задачи расписаний представлены в [94, 100-102].

Смешению бензинов уделялось внимание многими исследователями из-за его коммерческой важности и нелинейности модели («невыпуклости» - много-модальности целевого функционала) для корректной формулировки задач оптимизации и алгоритмов решения.

Операционные ограничения на смешение бензинов связаны с наличием многоцелевых резервуаров и неидентичных блендеров с различными технологическими требованиями в отношении резервуаров-хранилищ, как например, одновременное получение компонентов и их смешение, практические аспекты, такие как минимальные объемы смеси, время работы и настройки блендера.

Не все ограничения учитываются в моделях планирования. В некоторых случаях рецептуры смесей предполагаются фиксированными (т. е. их нельзя оптимизировать).

Проблема распределения или отгрузки (т. е. определение времени выполнения задач по доставке для удовлетворения спроса) иногда также является частью проблемы планирования купажа.

3.1 Постановка оптимизационной задачи планирования операций производства бензинов

Учитываются все подсистемы комплексной станции смешения бензинов (т. е. резервуары, блендеры и их взаимосвязи, рисунок 3.3) [123, 124, 154]:

- горизонт планирования;
- набор компонентов смеси и их соответствующие профили поставок и качества вдоль горизонта планирования;
- набор продуктов и их минимальные и максимальные характеристики качества;
- набор заказов на поставку для каждого продукта и начальные уровни запасов.

С учетом вышеперечисленных параметров, требуется определить рецептуры смесей, последовательности производства и поставок, а также профили запасов в резервуарах. Критерием является маржинальная стоимость продукта плюс затраты на переключение (т. е. количество запусков смеси, количество резервуаров, поставляющих каждый продукт).

Рассматриваются следующие ограничения:

1. Производительность блендера в режиме работы должен быть не менее минимальной производительности.
2. В любой момент времени блендер может производить не более одного продукта. С момента начала смешения блендер может переключаться на другой продукт только после минимально требуемого времени работы.
3. Блендеру требуется минимальное время на настройку во время переключения.
4. Блендер может подавать продукт в не более одного продуктового бака в любое время (промышленная практика).
5. В резервуарах для продукта в любой момент времени может храниться только один продукт.

6. Резервуары продуктов не могут одновременно принимать и выдавать топливо.

Допущения:

1. Профиль скорости потока каждого компонента из вышестоящего является кусочно-постоянным.
2. Профиль качества компонентов по частям постоянен.
3. Каждый блендер является идеальным смесителем.
4. Для данного компонента смеси существует только один резервуар.
5. Только много-продуктовые резервуары могут менять свое обслуживание продукта (т. е. переходить от хранения одного продукта к хранению другого).
6. Время переключения между продуктами пренебрежимо мало для много-продуктовых резервуаров.
7. Для каждого блендера время переключения между смешением продуктов зависит от продукта, но не зависит от последовательности.
8. Каждый заказ включает только один продукт (любой первоначальный заказ, включающий различные продукты, может быть разделен на заказы одного продукта).
9. Все заказы выполняются в течение выбранного горизонта планирования.

В целом, эта проблема рассматривает планирование операций смешения и доставки, определение рецептов и распределение продуктов в резервуарах на горизонте планирования.

При планировании производства бензинов по времени [109] учитывается нелинейность системы и не допускается одновременный прием и выдача топлива из продуктового резервуара. Это невыпуклая MINLP-модель [121, 122], и она будет обозначаться как модель **P** (или проблема **P**). Основные особенности модели планирования представлены в этом разделе.

Модель планирования использует различные оптимальные временные интервалы для выполнения конкретной задачи в каждом технологическом

аппарате (в данном случае в блендерах и резервуарах). Назначается достаточно большое количество временных интервалов, которых может быть больше, чем количество интервалов, необходимых для смешения каждого сорта топлив. Это гарантирует гибкость планирования из-за наличия достаточного количества степеней свободы (достаточного количества доступных переключателей) для удовлетворения изменяющегося графика поставки продукции.

Время начала единичного временного интервала (слота) равно времени окончания предыдущего.

Первый единичный слот начинается в начале горизонта планирования, а конец последнего единичного слота точно совпадает с концом горизонта. Задачи смешения начинаются в начале временного интервала, но могут закончиться до его окончания. Задачи доставки продуктов из резервуаров могут начинаться и заканчиваться в пределах соответствующего временного слота. Предполагается, что резервуары компонентов непрерывно получают сырье с некоторой заданной скоростью (т. е. профиль поставок). Временные периоды используются для определения точки, в которых происходят изменения в скорости поставки и/или качестве компонентов смеси. Этим временным периодам присваиваются временные интервалы.

Временной интервал должен заканчиваться в течение назначенного периода. Однако для компонентных резервуаров, последний временной интервал периода должен заканчиваться точно на границе этого (для того, чтобы должным образом учесть изменения в поставках и/или качества компонентов смеси). На рисунке 3.4 показано графическое представление этих временных интервалов для конкретной установки системы смешения с двумя резервуарами для компонентов смеси (**СТ1**, **СТ2**), одним блендером (**В1**) и двумя резервуарами для продукта (**РТ1**, **РТ2**). Слоты 1 и 2 предварительно назначены на период 1, а слоты 3 и 4 предварительно назначены на период 2. Следует обратить внимание на результат оптимизации, что слот 3 в сетке **СТ2** и слот 4 в сетке **РТ1** имеют нулевую длительность.

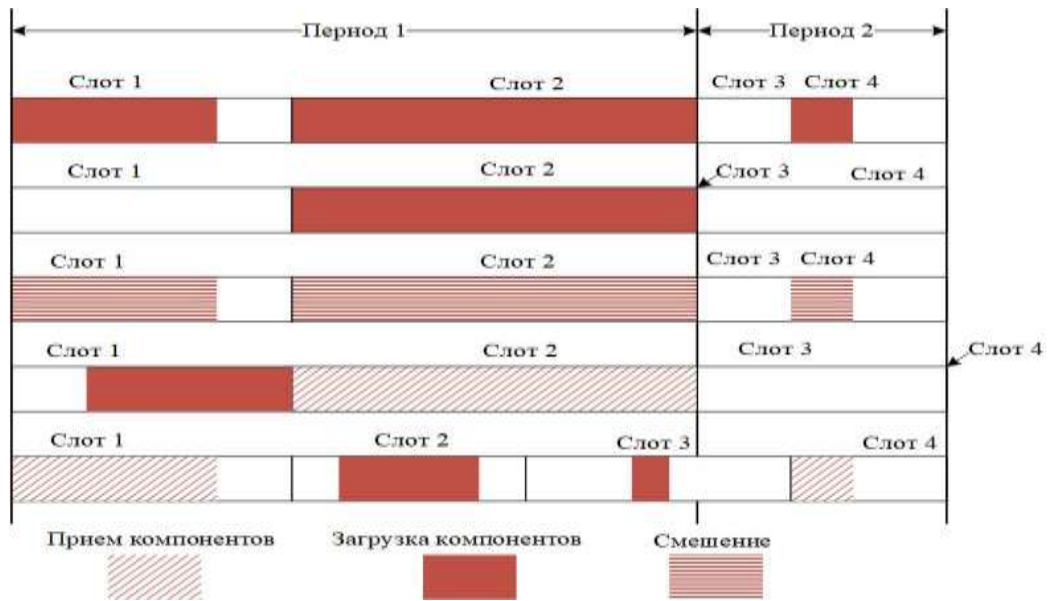


Рисунок 3.4 - Временная диаграмма технологических операций в модели планирования смешения бензинов

Целью планирования является минимизация смешанных затрат (затрат на компоненты), стоимость смеси (стоимости вовлеченных компонентов смеси), стоимость переключений, связанную с каждым переключения, циклом смешения, переключения продукта в смесительных резервуарах, количеством "прогонов доставки" (количество временных интервалов, используемых для доставки конкретного заказа из данного резервуара), а также стоимость (издержки) несвоевременной поставки.

Бинарные (двоичные) переменные используются в модели для определения в каждом временном интервале следующие дискретные решения, какой:

- резервуар с продуктом связан с каждым блендером (одна переменная для соединения каждого блендера с продуктовым резервуаром);
- сорт бензина хранится в каждом резервуаре с продуктом (одна переменная для каждой пары "сорт - резервуар");
- заказ на поставку продукта частично или полностью выполняет каждый резервуар (одна переменная для каждого соединения резервуар-заказ).

С помощью этих двоичных переменных можно моделировать другие дискретные решения с помощью непрерывных переменных 0/1, таких как:

- сорт производства бензина в каждом блендере;
- состояние блендера (работает или простаивает);
- переход блендера из работающего в неработающий и наоборот;
- время начала нового цикла смешения;
- переход продукта в блендерах;
- смена продукта в смесительных резервуарах.

Модель планирования также учитывает переменные скорости смешения и доставки, время настройки блендера (время простоя, например, для очистки или повторной калибровки датчиков), максимальную подачу компонентов смеси в резервуары для блендера и продукта), максимальные скорости подачи из резервуаров для компонентов смеси в блендеры, минимальные размер смеси и время работы каждого блендера, производящий продукт.

К другим ограничениям относятся балансы, спецификации состава продукта, спецификации качества продукта, линейные и/или нелинейные уравнения смешивания.

Сложность решения модели планирования выбора из множества субоптимальных решений наилучшего (глобального критерия) обусловлена следующими факторами:

- значительным количеством субоптимальных решений, которые могут быть приняты, которые непосредственно связаны с количеством временных интервалов, сортом бензина, смесителей, резервуаров для продукта и заказов на спрос (комбинаторный характер проблемы);
- включением нелинейных уравнений смешивания (многоэкстремальный невыпуклый характер проблемы);
- множеством операционных ограничений.

Введение ограничений, касающихся минимальной стоимости смеси и минимальной стоимости переключения, может улучшить качество решения и сократить время выполнения для проблем малого и среднего размера [109].

Минимальная стоимость смещения оценивается, используя подход, описанный в [133, 134].

Ниже представлены нелинейные уравнения, в которых нелинейные члены являются только билинейными или квадратичными.

Кусочно-линейная релаксация

Как упоминалось выше, использование кусочно-линейных релаксаций становится все более распространенным в модели смешанного целочисленного линейного программирования MILP.

В работе используется кусочно-линейная релаксация Маккормика и техника нормализованной параметрической декомпозиции, при котором каждый билинейный член в модели **P** заменяется одной переменной, тем самым линеаризуя соответствующие уравнения. Эта единственная переменная затем подчиняется различным линейным ограничениям, которые добавляют в модель дополнительные непрерывные и бинарные переменные.

Если эти дополнительные бинарные переменные равны единице, то активируется определенный интервал области (раздел) одной из переменных билинейного члена (обозначается как дискретизированная переменная).

Количество разделов обозначается как **NP**, и предполагается, что все дискретизированные переменные имеют одинаковое количество разделов.

Кусочно-линейная релаксация Маккормика **PMCR** имеет линейную зависимость между **NP** и количеством дополнительных бинарных переменных, необходимых на дискретизированную переменную, в то время как декомпозиция **NMDT** демонстрирует логарифмическую зависимость. Более подробные объяснения этих методов представлены [109, 128-130].

Полученная MILP-модель обозначается как модель **PR** и является релаксацией задачи **P**. Это означает, что оптимальное решение модели **PR** является достоверной оценкой глобального решения **P** (в случае минимизации это будет нижняя граница, **LB**).

Более того, оценка наилучшего возможного решения модели **PR** является достоверной оценкой глобального оптимума **P**. Поэтому, даже если модель **PR** не решена до оптимальности с помощью **MILP**-алгоритмов в течение заданного отведенного времени, новая оценка глобального решения все равно может быть найдена. Чем больше число разбинок (дискретных областей), тем ближе модель **PR** к модели **P**.

Если релаксация плотная, то ее оптимальное решение будет очень близко к исходному оптимальному решению. Следовательно, стратегия поиска выполнимого решения исходной задачи **P** (в случае минимизации это будет верхняя граница, **UB**) заключается в инициализации **P** оптимальным решением модели **PR**.

Поскольку некоторые программы **MILP** могут хранить несколько выполнимых решений задачи **MILP**, что потенциально может привести к различным решениям **P** из-за различных начальных условий (точек), используется параллельная стратегия с несколькими стартами.

Следует отметить, что по практическим причинам связанных со скоростью и надежностью коммерческих решателей, удобнее решать модели **NLP**, а не **MINLP**. Поэтому значения двоичных переменных фиксируются, преобразуя задачу **P** (**MINLP**) в **PF** (**NLP**). Компактные обозначения моделей **P**, **PR** и **PF** следующие:

Модель P

$$\min f_0(x, y)$$

Ограничения

$$f_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m \in M/\{0\}$$

$$f_m(x, y) = \sum_{(i,j) \in BLT} a_{ijm} x_i x_j + B_m x + C_m y + d_m, \quad \forall m \in M$$

$$0 \leq x^L \leq x \leq x^U, \quad x \in \mathbb{R}^{lx}, y \in \{0, 1\}^{ly}$$

Модель PR

$$\min f_0^R(x, y)$$

Ограничения:

$$f_m^R(x, y) \leq 0, \quad \forall m \in M/\{0\}$$

$$f_m^R(x, y) = \sum_{(i,j) \in BLT} a_{ijm} W_{ij} + B_m x + C_m y + d_m, \quad \forall m \in M$$

$$g_n^R(x, w, v, z) \leq 0 \quad \forall n \in N$$

$$g_n^R(x, w, v, z) = H_n^l x + A_n^l w + B_n^l v + C_n^l z + d_n^l \quad \forall n \in N$$

$$0 \leq x^L \leq x \leq x^U$$

Модель PF

$$\min f_0^F(x)$$

Ограничения:

$$f_m^F(x) \leq 0, \quad \forall m \in M/\{0\}$$

$$f_m^F(x) = \sum_{(i,j) \in BLT} a_{ijm} x_i x_j + B_m x + C_m y + d_m, \quad \forall m \in M$$

$$0 \leq x^L \leq x \leq x^U, \quad x \in \mathbb{R}^{lx}$$

Следует обратить внимание, что в этом разделе множество $M = \{m\}$ представляет все первоначальные ограничения, множество $N = \{n\}$ представляет все ограничения, требуемые в рамках метода кусочно-линейной релаксации, а множество $BLT = \{(i, j)\}$ представляет все билинейные члены.

Переменные x и y - исходные непрерывные и бинарные переменные, соответственно, а v и z - дополнительные непрерывные и бинарные переменные, соответственно, требуемые стратегией релаксации.

Переменная w_{ij} - непрерывная переменная, которая заменяет билинейный член $x_i x_j$. Скаляры lx , ly , lw , lv и lz представляют собой размеры векторов x , y , w , v и z , соответственно. Параметры x^L и x^U - соответственно нижняя и верхняя границы переменных x , при этом квадратичные члены могут рассматриваться как билинейные члены.

Ужесточение ограничений на переменные

Модель **PR** становится более жесткой (т. е. ближе к модели **P**) по мере увеличения числа разделов дискретизированных переменных.

Однако увеличение числа разделов приводит к увеличению размерности модели **PR**, и после определенного количества разбиений модель **PR** может стать трудно-вычислимой. Поэтому требуется избежать необходимости в большом количестве разделов.

В работе используется метод ОБВТ [127, 135]. Идея состоит в том, чтобы уменьшить область переменных, вовлеченных в нелинейные члены путем вычисления новых границ этих переменных и решения двух оптимизационных задач (задача максимизации и задача минимизации для каждой переменной).

Вычисляется новое и лучше выполнимое решение **P**. После уменьшения области переменных модель **PR** становится ближе к **P** без увеличения числа разделов.

Model PRB

Математическая модель, используемая в оптимизационном сужении границ (ОБВТ), обозначается как модель **PRB**, которая построена как релаксация **P**, но с другой целевой функцией и дополнительным ограничением. Для вычисления нижней границы переменной x_h , то есть x_h^L , целевая функция заключается в минимизации этой переменной.

Чтобы вычислить верхнюю границу переменной x_h , то есть x_h^U , целевой функцией является максимизация этой переменной. Для того чтобы вычислить новые границы, добавленное дополнительное ограничение накладывает условие, что значение ослабленной версии исходной объективной функции, то есть $f_0^R(x, y)$ должна быть, по крайней мере, не хуже, чем текущее наилучшее выполнимое решение. решение.

Модели **PR** и **PRB** могут использовать различные условия для релаксации. В работе [120] модель **PRB** использует стандартные огибающие Маккормика и требования интегральности для переменных y отпадают, что сводит **PRB** к линейному программированию (**LP**).

Нижняя и верхняя границы переменной x_h обновляются с помощью оптимальных решений соответствующей **LP**-модели. Компактные обозначения модели **PRB** показаны ниже для задачи минимизации.

Математическая модель PRB

$$x_h^L = \min x_h \quad (x_h^U = \max x_h)$$

Ограничения:

$$f_0^R(x, y) \leq UB$$

$$f_m^R(x, y) \leq 0 \quad \forall m \in M / \{0\}$$

$$f_m^R(x, y) = \sum_{(i,j) \in BLT} a_{ijm} W_{ij} + B_m x + C_m y + d_m, \quad \forall m \in M$$

$$g_k^{RB}(x, W) \leq 0 \quad \forall k \in K$$

$$g_k^{RB}(x, W) = H_k^l x + A_k^l w + d_k^l \quad \forall k \in K$$

$$0 \leq x^L \leq x \leq x^U$$

$$x \in \mathbb{R}^{lx}, \quad y \in [0, 1]^{ly}, \quad W \in \mathbb{R}^{lw}$$

Оптимизационное сужение границ **ОВВТ** заключается в решении задачи **LP** моделей для всех переменных, вовлеченных в нелинейные условия, в параллельной структуре, чтобы сократить время выполнения. Таким образом, границы, как правило, будут слабее, чем при последовательном решении задач. Поскольку количество задач для решения может быть очень большим, то они решаются в различных блоках.

Эти блоки определяются максимальным количеством задач, решаемых параллельно. После решения одного блока соответствующие границы обновляются, а затем решается следующий блок. На рисунке 3.5 показана блок-схема алгоритма **ОВВТ**, применяется только один раз для каждой переменной.

3.2 Алгоритмы оптимизации технологической схемы смешения бензинов: резервуары – трубопроводы - смесители

Алгоритм включает в себя оптимизацию, операционные требования к автоматизированной системе смешения и технологические ограничения распределения потоков от резервуаров хранения компонентов, потоков в продуктовые резервуары

Алгоритм оптимизационного сужения границ (ОВВТ) состоит в релаксации ограничений с нелинейными зависимостями, приводящей к решению линейной задачи.

Таким образом, ограничения, как правило, будут слабее, чем при последовательном решении задач. Поскольку объем решаемых задач в различных блоках может быть очень большим.

Эти блоки определяются максимальным количеством задач, решаемых параллельно. После решения задач в одном блоке обновляются соответствующие границы, а затем решаются задачи в следующем блоке.

ОВВТ применяется только один раз для каждой переменной.

На рисунке 3.5 представлена блок-схема алгоритма ОВВТ.

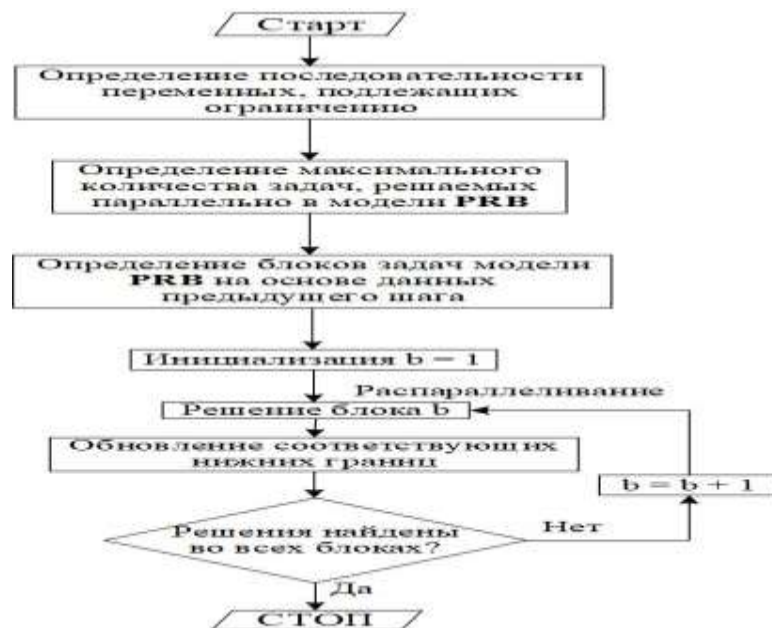


Рисунок 3.5 - Блок-схема метода ОВВТ

Блок-схема алгоритма глобальной оптимизации (задачи минимизации) представлена на рисунке 3.6.

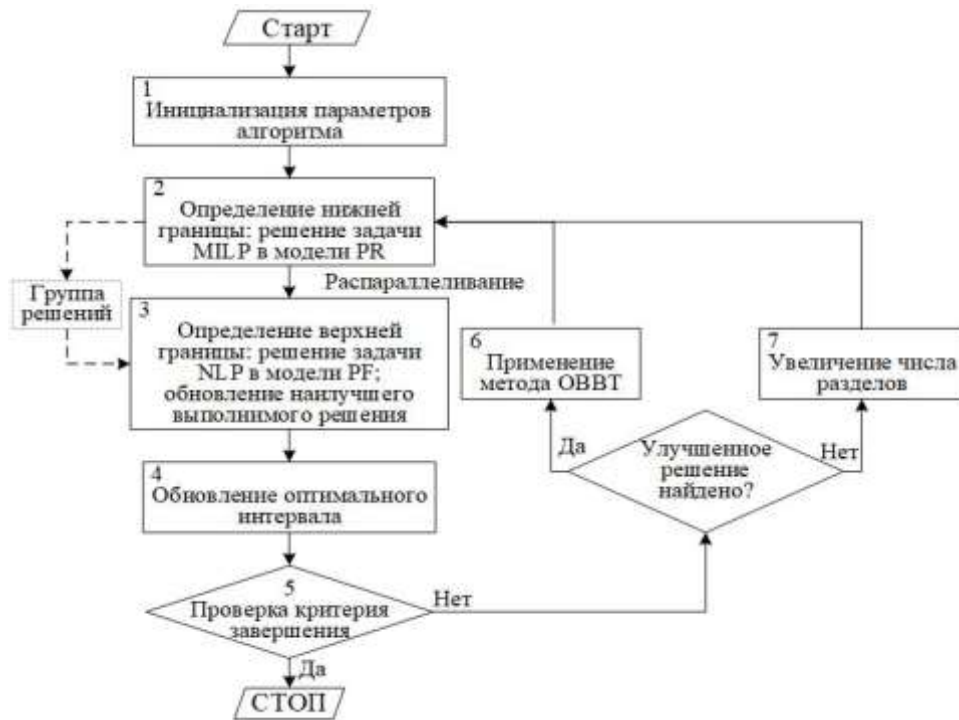


Рисунок 3.6 - Блок-схема алгоритма глобальной оптимизации

Отметим, что алгоритм может быть применен к любой нелинейной задаче MINLP, исключая билинейные или квадратичные члены.

Функции блоков

1. Инициализация параметров алгоритма:

- определение количества используемых разделов $\{NP_1, NP_2, \dots, NP_N\}$ и установка $NP = NP_1$;
- задание: нижних и верхних границ $LB = -\infty$, $UB = +\infty$; общее количество итераций $IT_{total} = 1$; итерации с одинаковым количеством разделов $IT_{sameNP} = 1$; максимальное количество общих итераций IT_{total}^{max} ; максимальное количество итераций с одинаковым количеством разделов IT_{sameNP}^{max} ; максимальное общее время $TIME_{total}^{max}$, и минимальный относительный допуск (точность) ε .

2. Определение нижней границы:

- решение задач **MILP** модели **PR** с помощью решателя **CPLEX** с активными опциями параллельности и пула решений;
- обновление нижней границы **LB** наилучшим возможным решением из **CPLEX**, если это значение больше, чем предыдущее значение **LB**.

3. Блок 3:

- определение верхней границы, используя решения, хранящиеся в **CPLEX** в качестве начальных условий для **NLP** модели **PF**;
- параллельное решение задач **NLP** модели **PF** с помощью локального нелинейного решателя;
- обновление верхней границы **UB**, если любое из вычисленных решений является выполнимым и имеет меньшее значение реальной функции, чем предыдущее **UB**.

4. Обновление разрыва оптимальности.

На этом этапе используется следующая формула шага:

$$OptGap = \frac{(UB-LB)*100}{LB}$$

5. Критерий завершения алгоритма глобальной оптимизации при:

- $OptGap \leq \varepsilon$, $\forall IT_{total} = IT_{total}^{max}$ \forall общее время выполнения $\geq TIME_{total}^{max}$,
 \forall количество разделов $NP=NP_{last}$;
- иначе, переход к шагу 6.

6. Если верхняя граница **UB**:

- не улучшилась на шаге 3 $\forall IT_{same NP} = IT_{same NP}^{max}$, то переход к шагу 7;
- в противном случае уменьшается область нелинейных переменных, используя метод **ОВВТ**;
- устанавливается $IT_{total} = IT_{total} + 1$ и $IT_{same NP} = IT_{same NP} + 1$;
- переход к шагу 2.

7. Увеличение количества разделов до следующего заданного значения:

- установка $Set IT_{total} = IT_{total} + 1$;
- переход к шагу 2.

Хотя основные элементы алгоритма уже были предложены (например, PMCR, NMDT, OBVT), новизна связана со способом реализации:

1. Пул решений **CPLEX** используется для хранения начальных точек для модели **PF**;
2. Экземпляры модели **PF** решаются параллельно;
3. **OBVT** применяется к блокам переменных и в параллельной структуре;
4. Не применяется стратегия разветвления.

Выводы к главе 3

В главе 3 приведены основные этапы формулировки и результаты решения задач планирования и принятия решений по управлению процессом смешения производства бензинов:

1. Сформулирована оптимизационная задача планирования операций смешения бензинов с учетом:
 - горизонта планирования;
 - набора компонентов смеси и их соответствующих профилей поставок;
 - портфеля заказов на поставку для каждого продукта.
2. Разработаны алгоритмы оптимизации технологической схемы смешения бензинов по технологической цепочке: резервуары – трубопроводы - смесители

Алгоритм включает в себя оптимизацию, операционные требования к автоматизированной системе смешения и технологические ограничения распределения потоков от резервуаров хранения компонентов, потоков в продуктовые резервуары.

3. Разработаны алгоритмы и блок схемы:
 - оптимизационного сужения границ (**OBVT**), состоящей в релаксации ограничений с нелинейными зависимостями в малом диапазоне, приводящей к решению линейной задачи:

- глобальной оптимизации технологической схемы смешения бензинов «резервуары компонентов смешения – трубопроводы – смесители – резервуары продуктов».
4. Результаты моделирования и оптимизации рецептур смешения бензинов и мазута приведены в Приложениях Б и В.

ГЛАВА 4 ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ РЕЦЕПТУР СМЕШЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА БЕНЗИНОВ И МАЗУТОВ

4.1 Описание программных модулей

Программный комплекс ПК ОПОР предназначен для оптимизации и планирования выпуска рецептур производства бензинов и мазутов на предприятиях нефте-газопереработки.

На рисунке 4.1а представлена укрупненная структура программного комплекса.

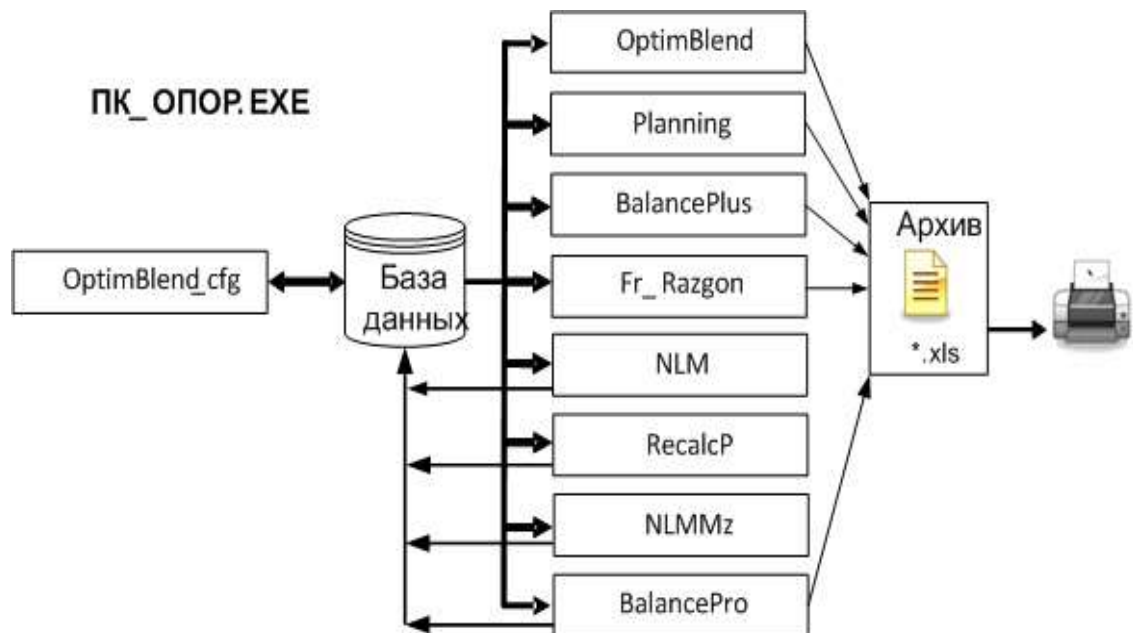


Рисунок 4.1а – Укрупненная функциональная структура ПК ОПОР

Программный комплекс оптимального планирования и оптимизации рецептур производства бензинов и мазутов состоит из ряда модулей:

1. Модуль «ПК_ОПОР.EXE», общее меню запуска всех модулей пакета.
2. Модуль «OptimBlend cfg», конфигуратор базы данных. Формирование и изменение параметров базы данных осуществляется модулем OptimBlend_cfg. База данных используются для расчетов оптимальной рецептуры бензинов и мазутов.

3. Модуль «OptimBlend», рассчитывает оптимальную рецептуру бензинов и мазутов при заданном плане производства бензинов, ресурсов компонентов смешения в резервуарах и производительности установок выработки бензиновых фракций.

4. Модуль «Planning», решает задачу оптимального планирования необходимых ресурсов компонентов смешения при заданном плане производства бензинов и мазутов на определенном интервале планирования.

5. Модуль «BalancePlus», решает задачу совместного одновременного оптимального планирования производства бензинов и мазутов с учетом требований к количеству вовлекаемых компонентов и сведения балансов по компонентам смешения.

6. Модуль «NLM», модуль параметрической идентификации нелинейной модели показателей качества бензиновой смеси (ДНП, ОЧИМ, ОЧММ и т.п.).

7. Модуль «Fr_Razgon», модуль расчета фракционной разгонки нефтепродуктов.

8. Модуль «RecalcP», модуль пересчета плотности по температуре с 20 °С на 15 °С.

9. Модуль «NLMMz», модуль расчета коэффициентов нелинейной модели для расчета вязкости мазута.

10. Модуль «BalancePro», планирование резервуаров компонентов смешения, товарных топлив и расчет рецептур смешения бензинов по партиям, формирование расписания смешения, диаграмма Ганта.

В базе хранятся справочные данные, марки производимых бензинов, количество и названия компонентов, диапазоны процентного содержания их в смеси, пользователи и их пароли.

Структура базы данных ПК ОПОР представлена на рисунке 4.1б.

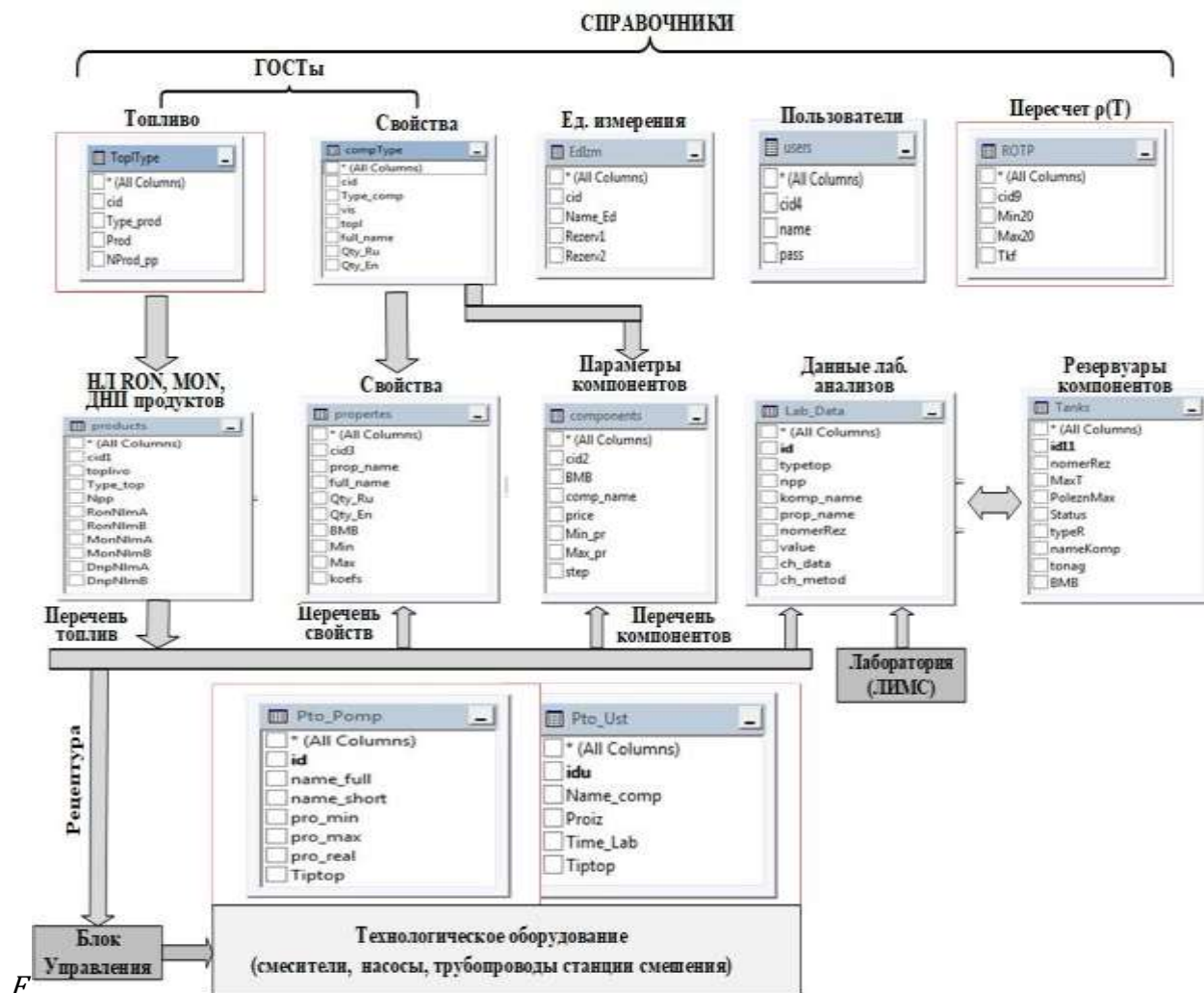


Рисунок 4.16 - Структура базы данных ПК ОПОР

В математической модели процесса смешения компонентов бензина и мазута используются как линейные зависимости свойств бензинов и мазутов от состава бензиновой смеси, так и нелинейные эффекты от состава рецептуры по отдельным свойствам бензинов и мазутов.

Критериями оптимальности формирования рецептур бензинов является:

- стоимость бензиновой смеси с учетом требований к его свойствам и технологических ограничений по пределам смешиваемости компонентов;
- выработка топлива по остаткам компонентов смешения или минимизация остатков бензиновых компонентов смешения с учетом выполнения требований к спецификации бензинов.

В программном комплексе пользователь может выборочно задавать модели расчета, учитывающие нелинейный эффект по отдельным свойствам бензина.

В программе есть возможность учитывать остатки бензинов в резервуарах при формировании оптимальной рецептуры и выполнения плана выпуска бензина.

Назначение

ПК ОПОР предназначен для оптимального планирования и оптимизации рецептуры смешения компонентов производства бензинов и мазутов с учетом выбранного критерия оптимальности рецептуры и допустимых пределов свойств смеси.

Основные модули формирования базы данных и расчета рецептур смешения ПК ОПОР:

- Конфигурирование;
- Расчет оптимальной рецептуры;
- Балансовое планирование (одновременное планирование рецептур по всей цепочке товарной продукции) при заданных ресурсах по компонентам смешения на выбранном интервале выполнения плана производства товарной продукции;
- Планирование ресурсов;
- Расчет рецептур по партиям смешения с формированием расписания.

ПК ОПОР включает в себя также модули идентификации параметров нелинейной модели, расчета фракционной разгонки компонентов и пересчета плотности по температуре с 20 °С на 15 °С.

После завершения установки только для компьютеров с 64-разрядной архитектурой необходимо запустить на выполнение файл SSCERuntime-RUS-x64.msi, кликнув по нему два раза левой клавишей мыши.

После завершения установки папка C:\Program Files\OptimBlend будет содержать задачу все необходимые модули и ряд служебных файлов.

В меню «Пуск» => «Программы» появится группа «OptimBlend», содержащая ссылки на исполняемые приложения, а на «рабочем столе» ярлык «ПК_ОПОР», с помощью которого возможен запуск любой расчетной задачи, входящей в программный комплекс. На этом установка завершена.

Удаление программы

Для удаления программы откройте «Пуск» => «Настройка» => «Панель управления» => «Установка и удаление программ» (для Windows 7/10 – «Программы и компоненты»). Выберите OptimBlend и нажмите кнопку «Удалить». После завершения процесса удаления в папке C:\Program Files\OptimBlend сохранятся только файл базы данных и файл лабораторных данных. Если они не нужны, их и папку можно удалить вручную.

4.1.1 Конфигурация базы данных

При первой установке могут отсутствовать файлы конфигурации. После запуска откроется окно программы с незаполненными полями типов бензина, компонентов, свойств и пользователей, рисунок 4.2.

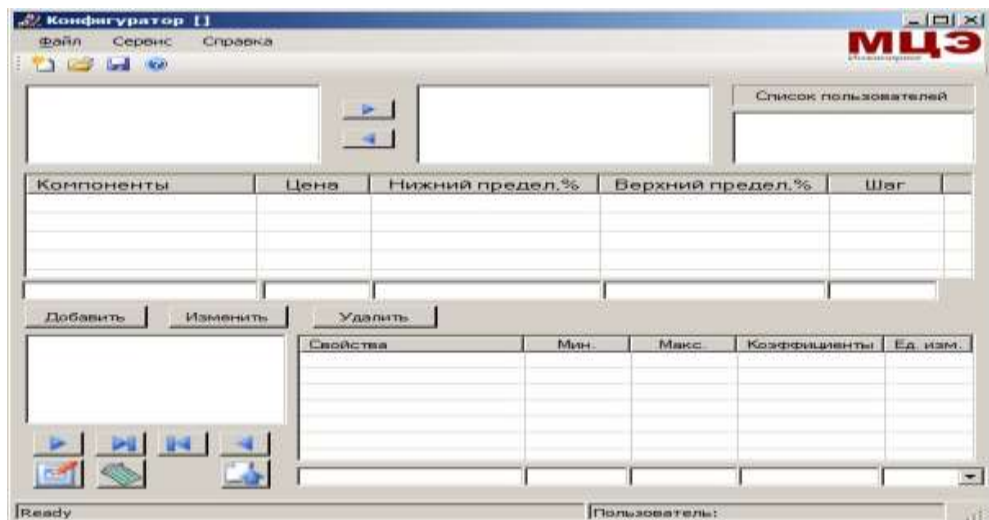


Рисунок 4.2 - Конфигуратор базы данных

При первом старте (файл базы данных *.sdf не существует) поле «список пользователей» пустое.

Добавлять, удалять и изменять имя или пароль пользователя можно при любом запуске «Конфигуратора» через меню «Сервис».

После выбора базы данных или при пункте меню «Создать» в левом верхнем окне отображаются марки бензинов. Этот список можно откорректировать вручную, внося изменения в файл, который представляет собой обычный текстовый файл. Вносить изменения можно любым текстовым редактором, например Блокнот или WordPad.

Формат файла, следующий:

- каждое название топлива записывается с новой строки;
- после названия топлива ставится двоеточие (:);
- после двоеточия указывается тип топлива (1 – бензины, 2 – дизтопливо, 3 – смесь фр. 340, 6 – мазут и т. п.);
- после следующего двоеточия указывается экологический класс бензинов: К2, К3, К4, К5 (0 – нет требований, 2 ...5 – экологический класс).

Добавление топлив можно также выполнять из меню «Сервис» => «Товарные продукты». При выборе этого пункта меню откроется новая форма, рисунок 4.3.

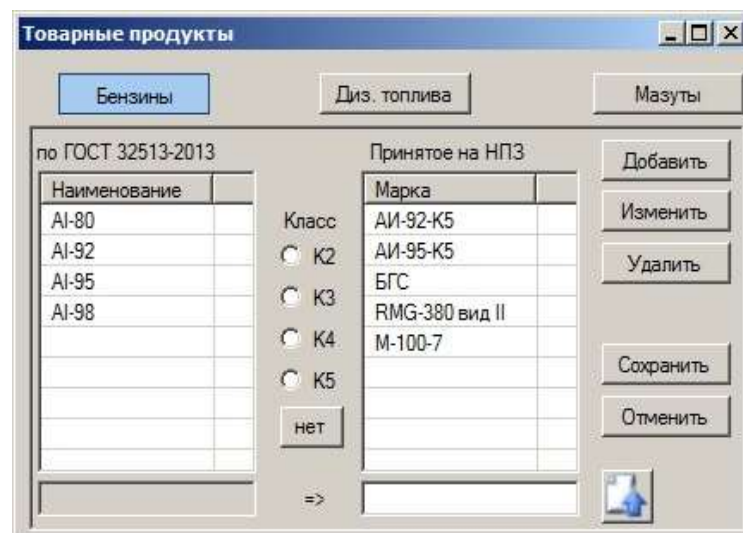


Рисунок 4.3 - Формат выбора вида топлива

В зависимости от типа выбранного топлива меняется наполнение левого окна, в нем отображаются марки топлив по ГОСТ. В правом окне отображаются уже существующие топлива (оно может быть пустым), рисунок 4.4.

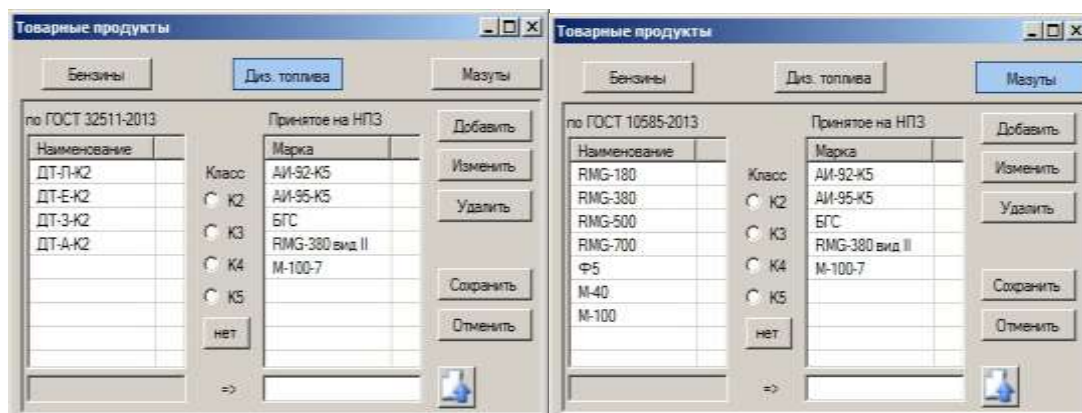



Рисунок 4.4 - Форма отображения топлива


В левом окне отображаются наименования товарных продуктов в зависимости от типа выбранного топлива (на форме – голубая кнопка).

Выбирается действие: добавить, изменить или удалить.

Список действий при выборе «добавить»:

- Выберите мышкой наименование в левом окне. При этом наименование появится в нижних полях под перечнем;
- Для бензинов указывается класс;
- В нижнем правом поле можно изменить наименование по ГОСТ на наименование, принятое на предприятии;
- Нажмите на кнопку переместить в верхний список .

Список действий при выборе «изменить»:

- Выберите наименование топлива в правом окне, щелчком мыши. При этом наименование появится в поле под списком;
- Измените наименование и/или класс;
- Нажмите на кнопку переместить в верхний список .

Список действий при выборе «удалить»:

- Выберите наименование топлива в правом окне, щелчком мыши;
- Подтвердите действие или откажитесь от удаления;

- Выбранное наименование удалится из списка.

После этих действий нажмите на кнопку «Сохранить», а затем на «Выход».

Форма закрывается и можно продолжить конфигурирование.

Выбора топлива осуществляется нажатием кнопки со стрелкой вправо в левом окне, рисунок 4.5. При этом марка топлива переместится в правое окно, нижний рисунок.

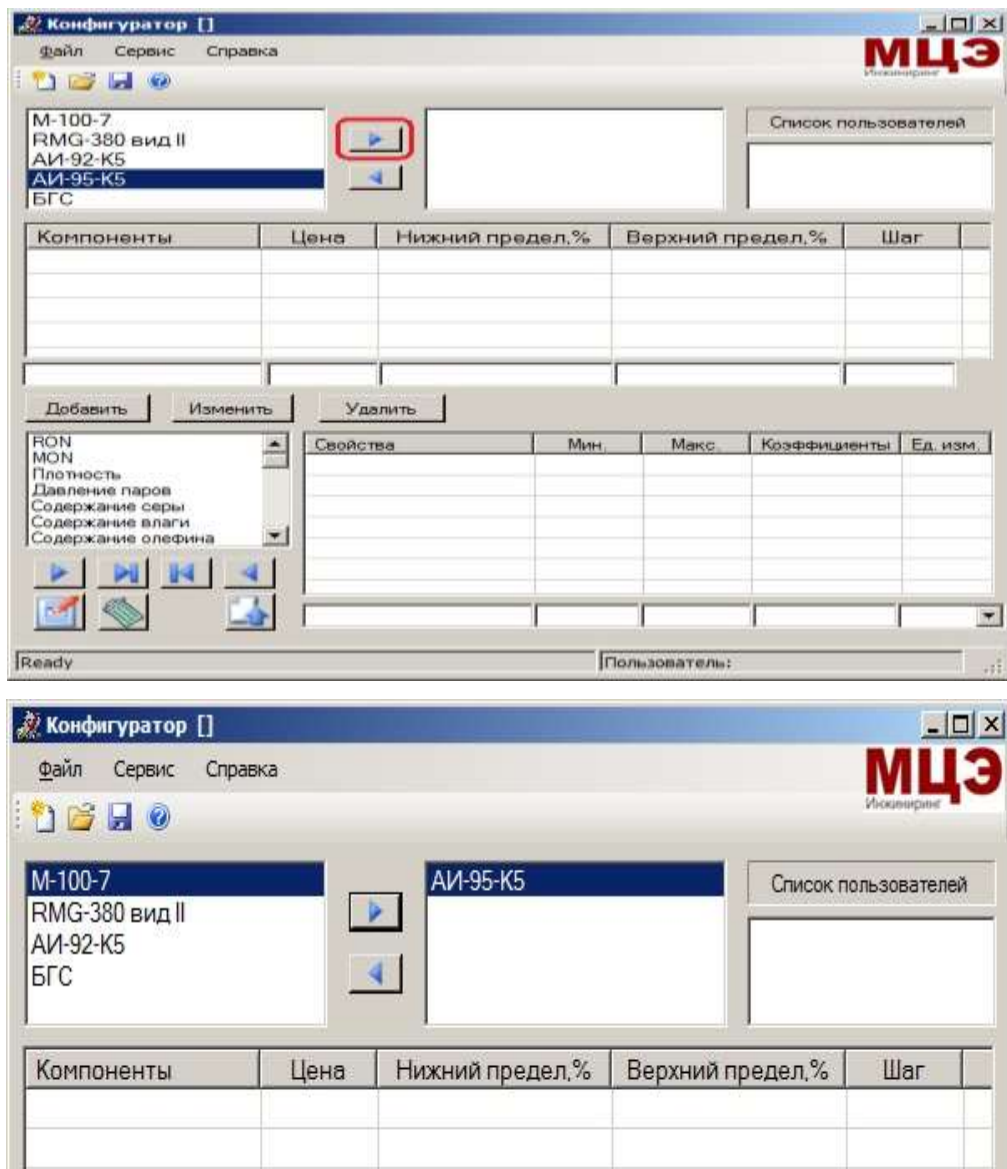


Рисунок 4.5 - Формат выбора топлива

При формировании базы данных в конфигураторе количество компонентов не задается заранее, формируется автоматически. ПК ОПОР

поддерживает до 20 компонентов в смеси. Поле содержит список наименований компонентов, рисунки 4.6 а, б, в.

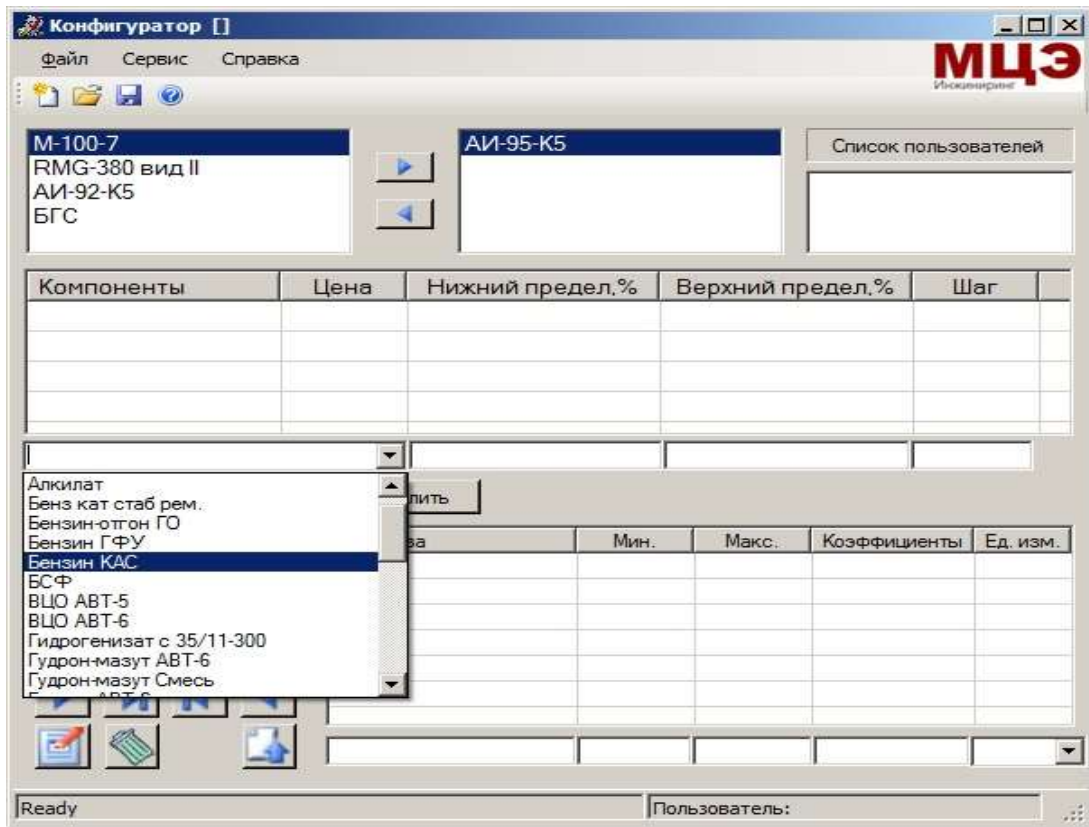


Рисунок 4.6а - Поле выбора наименования топлива и компонентов смешения

Выбирается «мышкой» необходимый компонент и, заполнив поля: «Цена», «Нижний предел», «Верхний предел» и «Шаг», и вводится кнопкой «Добавить».

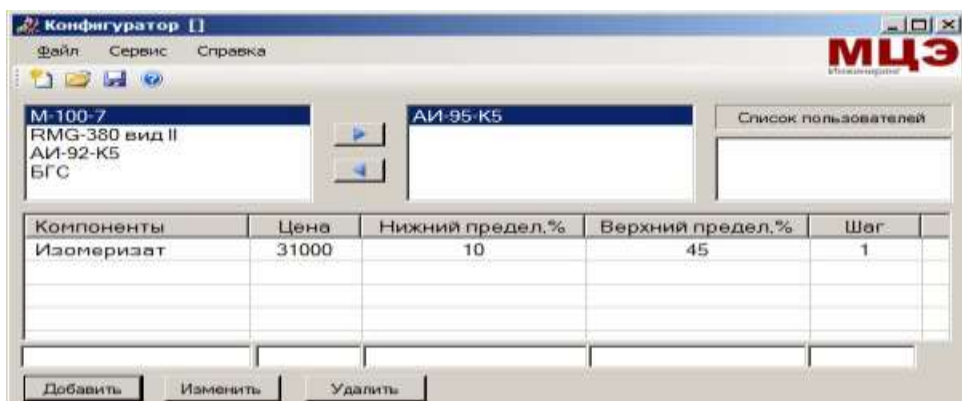


Рисунок 4.6б - Поле ввода компонентов смешения

Повторив операции для необходимого числа компонентов, получим заполненную таблицу компонентов.

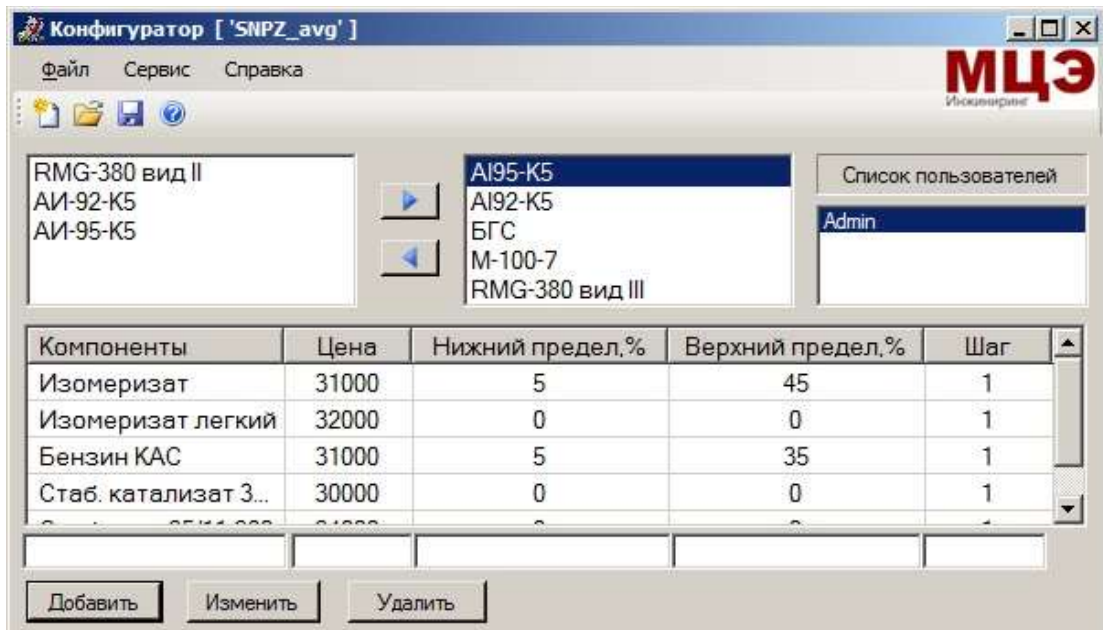


Рисунок 4.6в - Поле ввода компонентов смешения

Начальный перечень компонентов содержится в файле, который представляет собой обычный текстовый файл. Вносить изменения можно любым текстовым редактором.

Добавление компонентов можно также выполнять из меню «Сервис» => «Компоненты». При выборе этого пункта меню откроется новая форма:

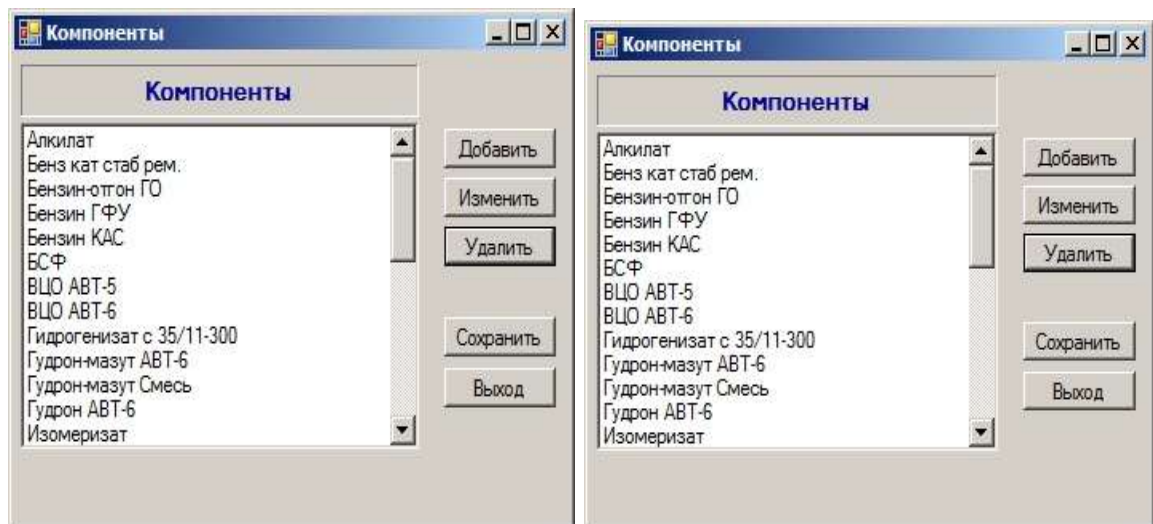


Рисунок 4.7 - Поле ввода компонентов смешения

В окне отобразится отсортированный по алфавиту список компонентов, а справа ряд кнопок: добавить, изменить, удалить. При выборе одной из них форма изменится. При нажатии на добавить под окном компонентов появится пустое поле в которую вводится наименование недостающего компонента.

При выборе пункта «изменить» в нижнем поле отобразится выбранный элемент из списка. Для удаления компонента выбирается в списке и удаляется нажатием кнопки «удалить», при этом программа запросит подтверждение операции, рисунок 4.8.

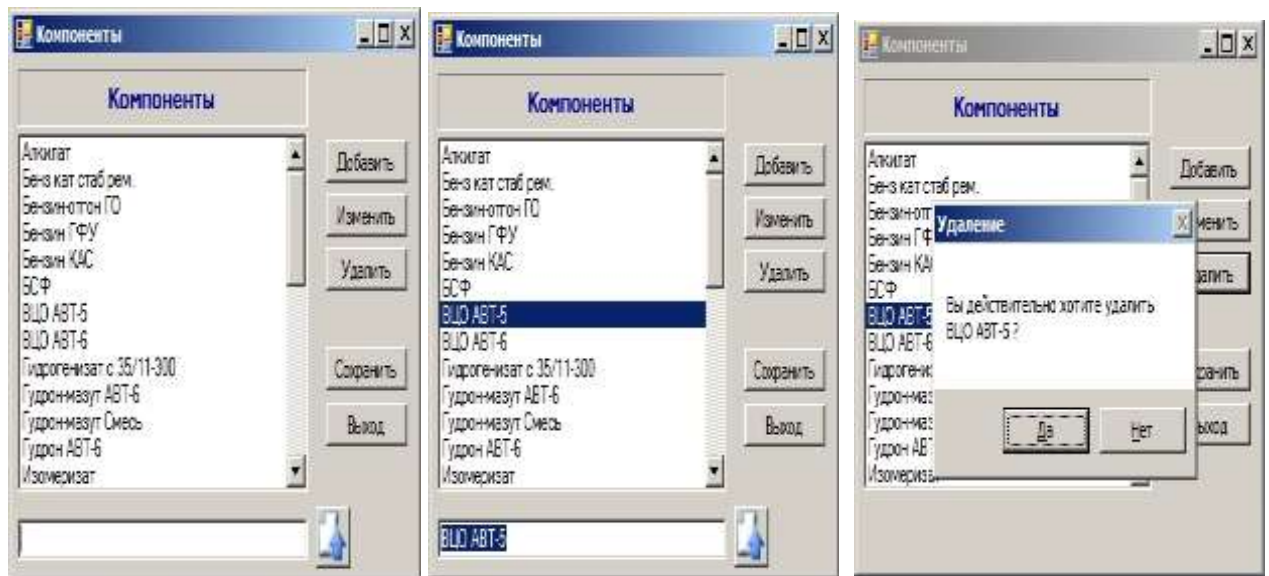


Рисунок 4.8 - Форма удаления и добавления компонентов

После внесения изменений нажмите сохраняются кнопкой «Сохранить» и далее «Выход», рисунок 4.9. Форма закроется, а поле со списком компонентов главной формы обновится.

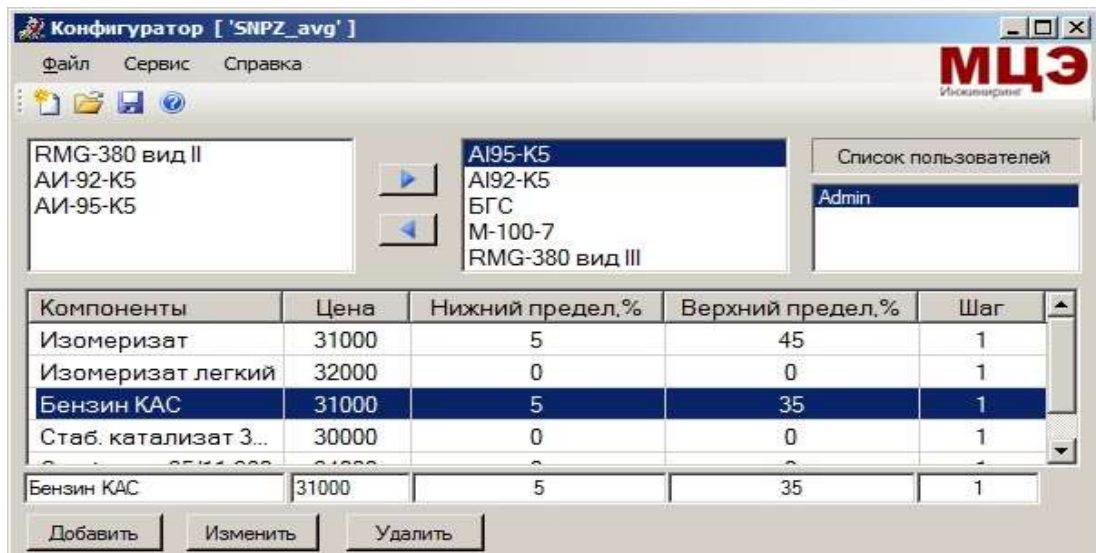


Рисунок 4.9 - Форма сохранения введенных компонентов

Исправлений принимаются кнопкой «Изменить». Поля под таблицей очистятся, а запись в таблице изменится на исправленную, рисунок 4.10.

Завершив конфигурирование бензина по компонентам, перейдем к выбору контролируемых свойств смеси.

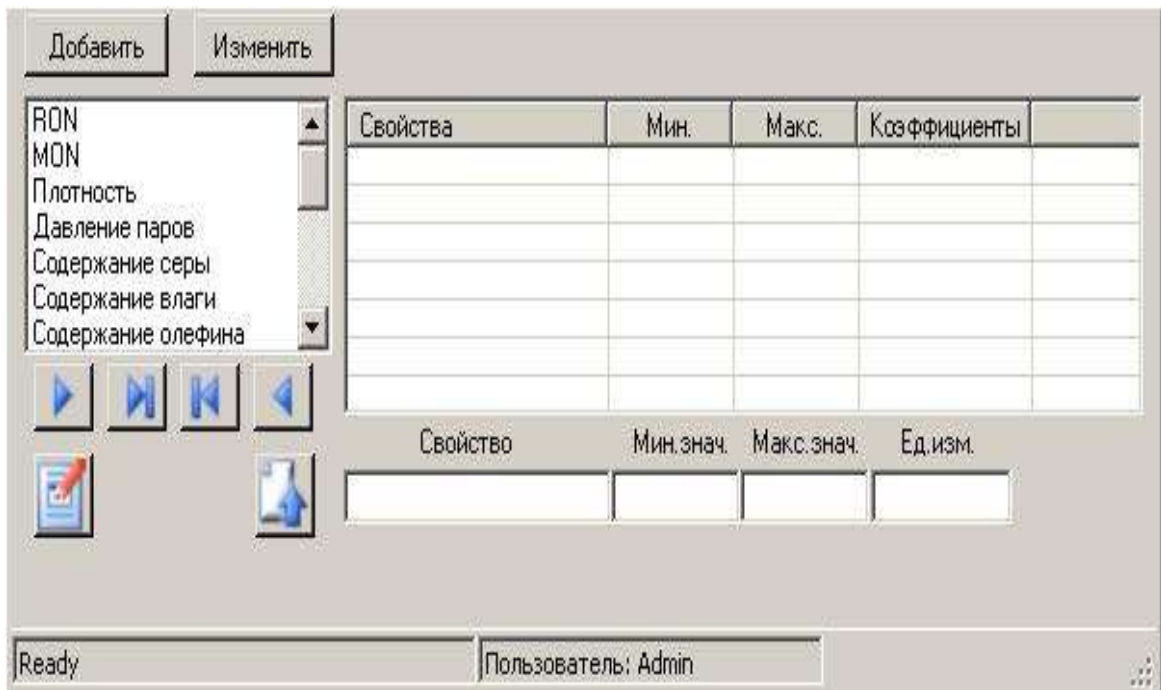


Рисунок 4.10 - Формат подтверждения изменений

В левом окне отображается список выбираемых и необходимых свойств, расположенных под списком.



В результате выбора свойств получаем заполненное поле следующего вида, рисунок 4.11.



Рисунок 4.11 - Форма заполнения свойств

В нижней строке можно изменить любой параметр вручную. В выпадающем списке уже занесены основные единицы измерения. При

отсутствии нужной единицы измерения, ее можно внести вручную либо в этом же поле, либо заранее в текстовый. При внесении в поле отсутствующая единица измерения сохранится в файле автоматически.

Добавление компонентов можно также выполнять из меню «Сервис» => «Единицы измерения», рисунок 4.12. При выборе этого пункта меню откроется новая форма:

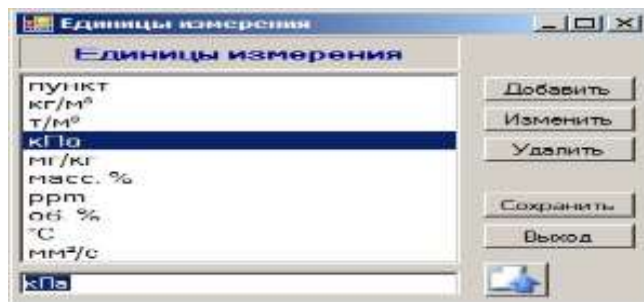



Рисунок 4.12 - Формат конфигурирования единиц измерений

Работа с формой аналогична работе формы с компонентами.

Измененное свойство переносится в верхнюю таблицу и запоминается после нажатия кнопки «переместить в набор».

На этом конфигурирование одной марки бензина завершается. Далее можно выбрать следующую марку и повторить для нее настройки. По завершению конфигурации всех марок бензинов сохраняются результаты работы одним из следующих способов:

- Файл => Сохранить;
- Нажать иконку с изображением дискеты .

Конфигурация сохраняется в файле с именем, введенным пользователем, а также создается файл с тем же именем *.xls – пустая таблица, в которой перечислены все компоненты (по горизонтали) и свойства (по вертикали), рисунок 4.13.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
		Регульр-32 4лл	И.ММА	Добавка МТБЭ	Изооптан БИИ	Катализ ат ЛКС	Катализ ат Петрофак	К.З верх	К.З бок	Остаток бензина, м3
1										
2										
3	1	Октановое число(MON), пункт								
4	2	Октановое число(RON), пункт								
5	3	Содержание бензола, об. %								
6	4	Содержание серы, масс. %								
7	5	Содержание ароматических углеводородов, об. %								
8	6	Давление насыщенных паров, кПа								
9	7	Плотность при 15 °С, т/м³								
10	8	Доля отгона при 70°С,								
11	9	Доля отгона при 100°С,								
12	10	Доля отгона при 150°С,								

Рисунок 4.13 - Формат конфигурированной базы данных

Закрашенные области (фиолетовая и зеленая) заполняются на основании данных лабораторных исследований. Поля «Остаток» заполняются только при его наличии. Если поле объема (показано малиновым цветом) пустое или «0», считается, что остатка нет.

Если пара файлов или один из них существует, программа выдаст запрос о замене каждого из файлов. От замены можно отказаться или подтвердить действие.

4.1.2 Расчет оптимальной рецептуры

Расчет рецептуры выполняет приложение **OptimBlend.exe**, которое находится в папке установки. После запуска открывается окно выбора базы данных, рисунок 4.14.

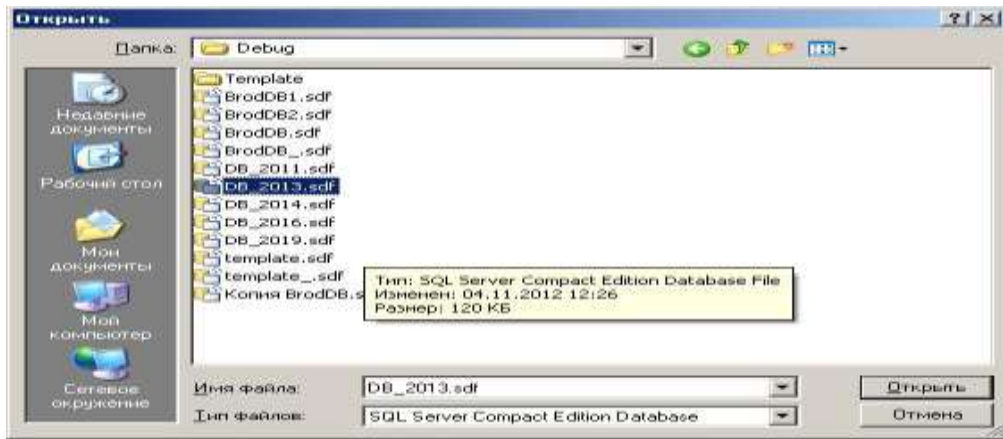


Рисунок 4.14 - Формат выбора базы данных

После ввода пароля доступа пользователя к базе данных откроется окно программы с незаполненными полями, рисунок 4.15а и с выбранной маркой бензина, рисунок 4.15_б.

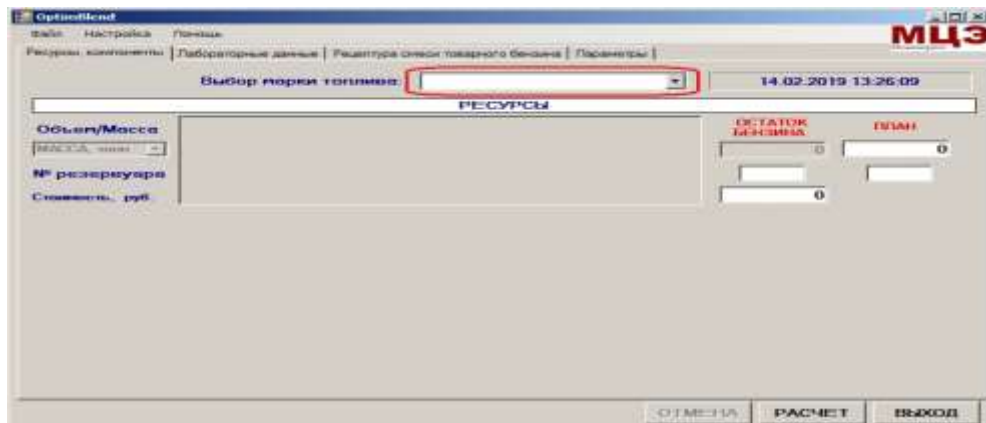


Рисунок 4.15а - Формат выбора марки бензина

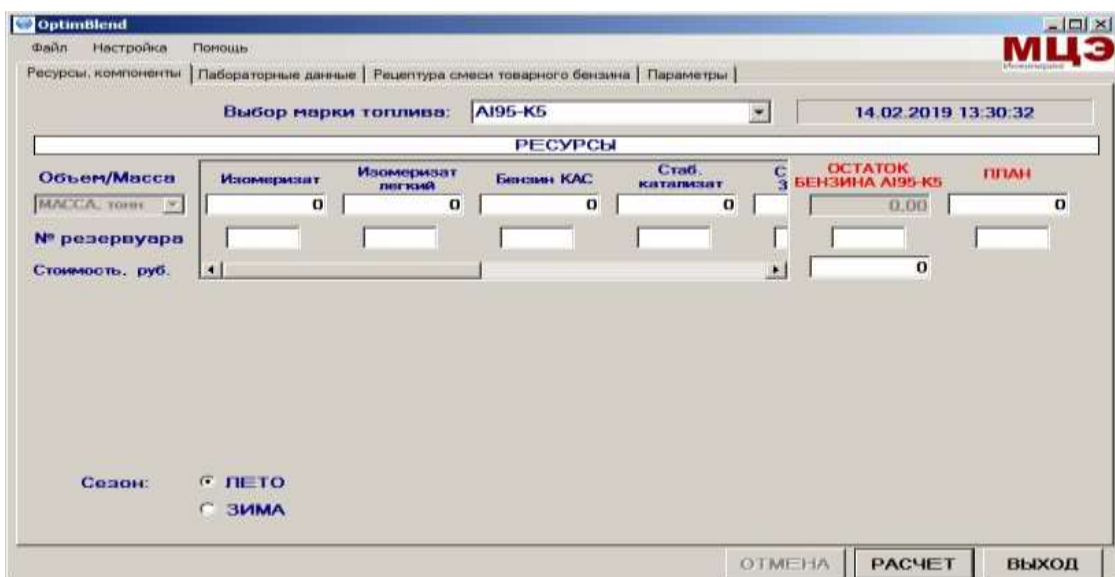


Рисунок 4.15б - Формат выбора марки бензина

Если в файле <имя базы>.xls заполнен столбец «остатка», то на форме отображается его количество (рис. 4.15_б) и отображается поле «Свойства остатка», заполненное данными свойств компонентов, рисунок 4.16.

Расчет может осуществляться по объему или по массе.

	Изомеризат	Изомеризат легкий	Бензин КАС	Стаб. катализат 35/6	Стаб. кат-т 35/11-300	A195-K3		Прогноз свойств смеси с остатком
						МИН.	МАКС.	
RON, пункт	86,50	86,50	85,00	0,00	94,50	95,20	96,00	[..]
MON, пункт	84,50	85,00	78,20	0,00	84,70	85,00		[..]
Плотность, т/м ³	0,656	0,656	0,714	0,784	0,789	0,72	0,78	[..]
Содержание серы, масс. %	0,0003	0,0003	0,0035	0,0000	0,0003		0,001	[..]
Содержание ароматики, об. %	0,00	0,00	10,00	0,00	53,00		35,00	[..]
Содержание бензола, об. %	0,00	0,00	0,70	0,00	2,50		1,00	[..]
Содержание олефина, об. %	0,00	0,00	17,30	0,00	0,40		17,00	[..]
Давление паров, кПа	105,00	114,00	70,00	0,00	70,00	45,00	70,00	[..]

Рисунок 4.16 - Формат отображения показателей качества компонентов

Вкладка «Лабораторные данные» заполняется данными из того же файла и отображаются пределы контролируемых свойств смеси. Пределы и наименование свойств берутся из базы данных.

На вкладке «Рецептура смеси товарного бензина», рисунок 4.17, подготавливаются поля, которые будут заполнены после расчета и отображаются стоимости компонентов участвующих в смешении.

	Изомеризат	Изомеризат легкий	Бензин КАС	Стаб. катализат	Стаб kat-t 35/11-300	Стаб kat-t 35/11-600	Алкил
ОБЪЕМНАЯ ДОЛЯ, %							
ОБЪЕМ, м ³							
МАССОВАЯ ДОЛЯ, %							
МАССА, т							
ЦЕНА, руб./т	31000,00	32000,00	31000,00	30000,00	34000,00	35000,00	34000,00
Стоимость компонентов в смеси, руб.							
ОСТАТОК КОМПОНЕНТОВ, м ³							

Стоимость смеси по рецептуре, руб. []

Сохранить в Excel

ОТМЕНА РАСЧЕТ ВЫХОД

Рисунок 4.17 - Форма отображения результатов расчета рецептур

После удачного расчета поля заполняются. Для сохранения полученных данных в виде файла в формате Excel служит кнопка «Сохранить в Excel».

Файл сохраняется в папке «C:\Program Files\OptimBlend\Архив» в автоматически формируемой архивной папке и наименования файла результатов с именем «Марка_бензина,_План_Дата_Время.xls».

Формы документа Отчета приведены в Приложении А, Б.

Отчет содержит исходные данные по показателям компонентов смешения.

Выбор контролируемых свойств и настройка параметров модели:

Контроль свойства	НПМ	Коэф. ПМ	Контроль свойства	НПМ	Коэф. ПМ
<input checked="" type="checkbox"/> RON	<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/> Содержание бензола		1,000
<input checked="" type="checkbox"/> MON	<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/> Содержание олефина		
<input checked="" type="checkbox"/> Плотность			<input checked="" type="checkbox"/> Давление паров	<input type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/> Содержание серы					
<input checked="" type="checkbox"/> Содержание ароматики		1,000			

Пределы долей компонентов в смеси:

	Изомеризат	Изомеризат легкий	Бензин КАС	Стаб. катализат	Стаб kat-t 35/11-300
Верхний предел, %	45,00	0,00	35,00	0,00	0,00
Нижний предел, %	5,00	0,00	5,00	0,00	0,00
Шаг, % для всех	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

ОТМЕНА РАСЧЕТ ВЫХОД

Рисунок 4.18 - Интерфейс планировщика расчета рецептур

На вкладке «Параметры» отображаются пределы долей компонентов в смеси и шаг изменения долей в смеси. Эти данные берутся из базы данных. Их можно изменять вручную, рисунок 4.18.

Снятие (установка) «галочек» слева от наименований компонентов запрещает (или предписывает) контроль свойств компонента при расчете.

Установка «галочек» справа от наименований компонентов говорит о том, что расчет компонента будет осуществляться по нелинейной модели.

Если лаборатория контролирует свойства по бензолу и аромату в топливе, то после запуска программы на вкладке «Параметры» рядом с этими свойствами появятся поля для ввода коэффициентов пересчета.

По умолчанию «1.000» об.%. Чтобы изменить коэффициент на масс. %, достаточно щелкнуть правой клавишей мыши по этому полю, рисунок 4.19.

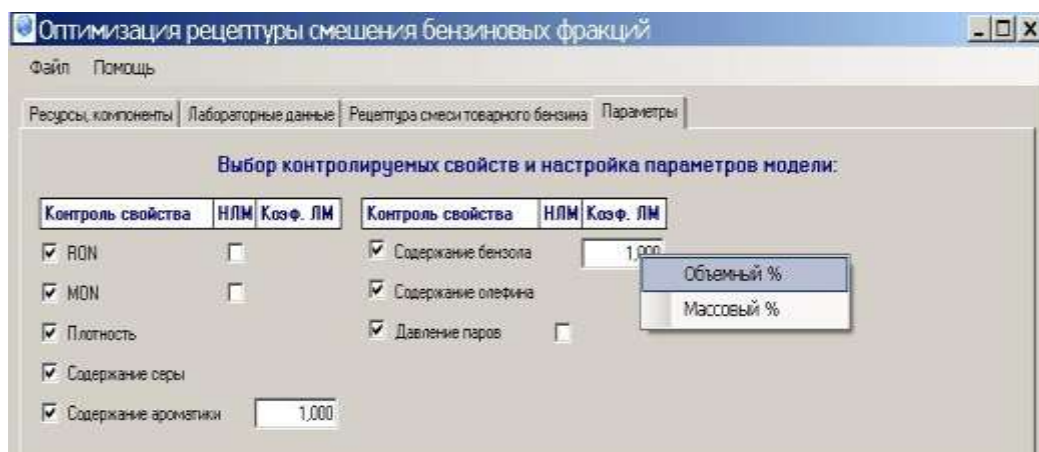


Рисунок 4.19 - Форма выбора единиц измерения состава

Их можно корректировать в любом текстовом редакторе.

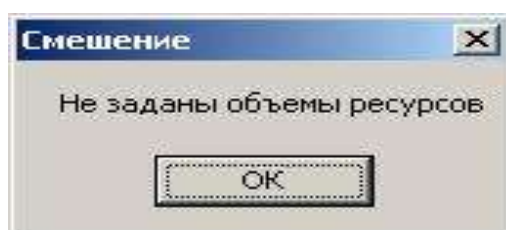
На вкладке «Параметры» устанавливается галочка рядом с «Шаг для всех», в поле шага первого компонента (даже если он не участвует в расчете 0,00) вводится желаемый шаг и нажатие клавиши «Enter».

	Изомеризат	Изомеризат легкий
Верхний предел, %	45,00	0,00
Нижний предел, %	5,00	0,00
Шаг, % для всех	1,00	1,00

Рисунок 4.20 - Форма задания шага поиска

Шаги всех компонентов изменяться на введенное значение и галочка снимется автоматически.

При нажатии кнопки «Расчет», не задав объемы компонентов, программа выдаст предупреждение:



Задаются объемы компонентов, названия резервуаров (необязательное заполнение), стоимость остатка, если он есть, сезонность, единицу измерения (масса/объем) и запуск расчета клавишей «Расчет», рисунок 4.21.

Объем/Масса	Изомеризат	Изомеризат легкий	Бензин КАС	Стаб. катализат	ОСТАТОК БЕНЗИНА А195-К5	ППАН
МАССА, тонн	1000	0	1000	0	0,00	8264
№ резервуара	142		153			358
Стоимость, руб.					0	

Рисунок 4.21 - Форма задания параметров расчета

По окончании расчета программа автоматически перейдет на вкладку «Рецептура смеси товарного бензина», где отобразятся расчетные данные смеси по объему массе и стоимости, рисунок 4.22.

	Изомеризат	Изомеризат легкий	Бензин КАС	Стаб. катализат	Стаб кат-т 35/11-300	Стаб кат-т 35/11-600	Алкоголи
ОБЪЕМНАЯ ДОЛЯ, %	5,65	0,00	5,19	0,00	0,00	44,91	42,37
ОБЪЕМ, м ³	76,24	0,00	69,99	0,00	0,00	606,09	571,81
МАССОВАЯ ДОЛЯ, %	5,00	0,00	5,00	0,00	0,00	48,00	40,00
МАССА, т	50,00	0,00	50,00	0,00	0,00	480,00	400,00
ЦЕНА, руб./т	31000,00	32000,00	31000,00	30000,00	34000,00	35000,00	34000,00
Стоимость компонентов в смеси, руб.	1550000,00	0,00	1550000,00	0,00	0,00	16800000,00	13940000,00
ОСТАТОК КОМПОНЕНТОВ, м ³	950,00	0,00	950,00	0,00	0,00	520,00	600,00

Стоимость смеси по рецептуре, руб.

Сохранить в Excel

ОТМЕНА РАСЧЕТ ВЫХОД

Рисунок 4.22 - Интерфейс результатов расчета

На вкладке «Лабораторные данные» заполнится столбец «Прогноз свойств смеси с остатком», рисунок 4.23.

A195-K5		Прогноз свойств смеси с остатком
МИН	МАКС	
95,20	96,00	95,23
95,00		117,94
0,72	0,78	0,744
	0,001	0,00054
	35,00	26,65
	1,00	0,31
	17,00	1,14
45,00	70,00	55,26

Рисунок 4.23 - Интерфейс отображения прогнозных показателей качества смеси

При неудачном результате расчета, по тем или иным причинам (нет ни одного результата, удовлетворяющим заданным условиям), программа выдает предупреждение «Для заданных исходных данных и параметров оптимизации рецептура не найдена» и появляется список возможных причин, рисунок 4.24.

Возможные причины и действия планировщика

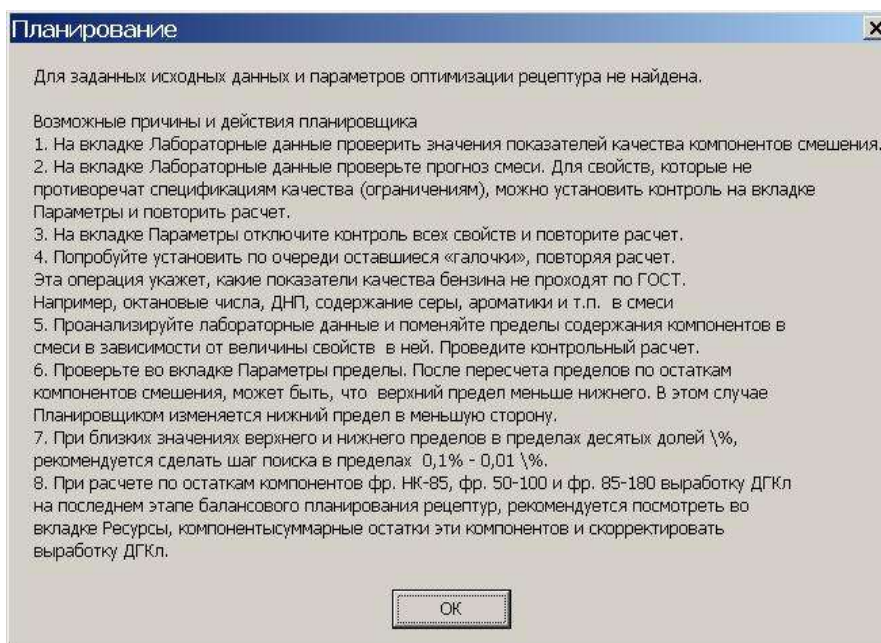


Рисунок 4.24 - Список возможных причин

Если появилось это окно, то рекомендуется выполнить следующие действия:

1. На вкладке **Лабораторные данные** проверить значения показателей качества компонентов смешения.

2. На вкладке **Лабораторные данные** проверьте **прогноз смеси**. Для свойств, которые не противоречат спецификациям качества (ограничениям), можно установить контроль на вкладке **Параметры** и повторить расчет.

3. На вкладке **Параметры** отключите контроль всех свойств и повторите расчет.

4. Попробуйте установить по очереди оставшиеся «галочки», повторяя расчет. Эта операция укажет, какие показатели качества бензина не проходят по ГОСТ. Например, октановые числа, ДНП, содержание серы, ароматических углеводородов и т.п. в смеси.

5. Проанализируйте лабораторные данные и поменяйте пределы содержания компонентов в смеси в зависимости от величины свойств в ней. Проведите контрольный расчет.

6. Проверьте во вкладке **Параметры** пределы. После пересчета пределов по остаткам компонентов смешения, может быть, что верхний предел меньше нижнего. В этом случае Планировщиком изменяется нижний предел в меньшую сторону.

7. При близких значениях верхнего и нижнего пределов в пределах десятых долей процента, рекомендуется сделать шаг поиска в пределах 0,1% - 0,01 %.

8. При расчете по остаткам компонентов на последнем этапе балансового планирования рецептур, рекомендуется посмотреть во вкладке **Ресурсы, компоненты** суммарные остатки этих компонентов и скорректировать вовлечение в смесь того или иного компонента с учетом суммарного остатка.

В процессе планирования и расчета оптимальной рецептуры, планировщик может в активных окнах (не в конфигураторе) вносить изменения значений свойств, цен, пределов смешения, шага поиска компонентов рецептуры.

В пункте меню «Настройка» есть возможность выбора коэффициента для расчета вязкости мазута, рисунок 4.25 а, б.



Рисунок 4.25а - Выбор параметров расчета мазута

Для выбора коэффициента щелкните мышью по необходимому пункту в открывшейся форме:



Рисунок 4.25б - Выбор параметров расчета мазута

4.1.3 Планирование рецептов производства бензинов и мазутов

Планирование осуществляется задачей Planning.exe. Интерфейс программы аналогичен задаче OptimBlend.exe, рисунок 4.26.

После выбора базы данных и ввода пароля открывается окно программы, где предлагается выбрать марку бензина, ввести значение планируемого объема или массы, коэффициент запаса и период. Файл <имя базы>.xls, используемый для расчета должен содержать усредненные показатели свойств компонентов.

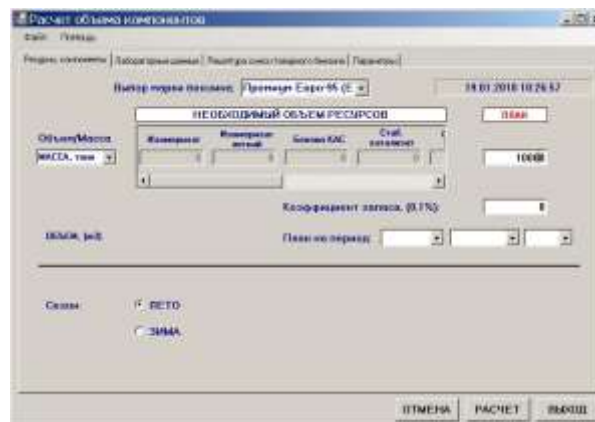


Рисунок 4.26 - Интерфейс планирования

По окончании расчета программа автоматически перейдет на вкладку «Рецептура смеси товарного бензина», где отобразятся расчетные данные смеси по объему, массе и стоимости.

В таблицах 4.1 и 4.2 представлены результаты сравнительной оценки эффективности рецептов смешения бензинов для различных вариантов ограничения нижнего предела ОЧИМ в спецификации, полученных в ПК ОПОР.

Таблица 4.1 Результаты расчета оптимальной рецептуры бензина АІ95

К5

Расчет рецептуры производства бензина АІ95-К5									
Показатели качества									
№№	Варианты	RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м ³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматич. кп. об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	Давление паров, кПа
Рецептура бензиновой смеси									
1	Вариант 1	95,20	87,42	0,756	0,00051	32,56	0,37	1,20	67,41
2	Вариант 2	95,50	88,35	0,748	0,00053	25,70	0,30	1,13	65,05
3	Вариант 3	95,60	87,75	0,758	0,00051	31,56	0,36	1,19	65,62
4	Вариант 4	95,81	89,09	0,743	0,00054	20,66	0,24	1,09	62,94
Результат расчета состава товарной смеси									
№№	Наименование компонент ов	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4	
		Об. доля, %	Массовая доля, %	Об. доля, %	Массовая доля, %	Об. доля, %	Массовая доля, %	Об. доля, %	Массовая доля, %
1	Изомеризат	5,74	5,00	5,68	5,00	5,76	5,00		
2	Бензин КАС	5,27	5,00	5,21	5,00	5,29	5,00		
3	Стаб кат-т 35/11-600	55,13	58,00	43,28	46,00	53,41	56,00		
4	Альклат	29,06	27,00	37,28	35,00	25,91	24,00		
5	МГАЭ	4,80	5,00	8,55	9,00	9,63	10,00		
Варианты		1	2	3	4				
Стоимость тонны смеси, руб./т		34 834,50	35 042,50	35 114,00	35 255,00				

Оценка маржи за тонну продукта при изменении ОЧИМ на 0,1 пункта
70,08 Р

Таблица 4.2 Результаты расчета оптимальной рецептуры бензина АІ92-

К5

Расчет рецептуры производства бензина АІ92-К5									
Показатели качества									
№№	Варианты	RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м ³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматич. кп. об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	Давление паров, кПа
Рецептура бензиновой смеси									
1	Вариант 1	92,21	84,91	0,734	0,00053	30,45	0,23	1,88	74,65
2	Вариант 2	92,50	85,22	0,733	0,00053	27,66	0,23	1,87	72,96
3	Вариант 3	92,60	85,15	0,736	0,00053	29,47	0,23	1,88	72,73
4	Вариант 4	92,80	85,02	0,742	0,00053	33,14	0,24	1,92	72,27
Результат расчета состава товарной смеси									
№ №	Наименование компонент ов	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4	
		Об. доля, %	Массовая доля, %	Об. доля, %	Массовая доля, %	Об. доля, %	Массовая доля, %	Об. доля, %	Массовая доля, %
1	Изомеризат	36,65	33,00	27,75	25,00	26,76	24,00	24,75	22,00
2	Бензин КАС	15,39	15,00	15,39	15,00	15,45	15,00	15,59	15,00
3	Стаб кат-т 35/11-600	46,91	51,00	42,29	46,00	45,24	49,00	51,23	55,00
4	Альклат	1,05	1,00	14,57	14,00	12,54	12,00	8,44	8,00
Варианты		1	2	3	4				
Стоимость тонны смеси, руб./т		33 078,50	33 379,00	33 422,00	33 508,00				

Оценка маржи за тонну продукта при изменении ОЧИМ на 0,1 пункта
71,58 Р

4.1.4 Балансовое планирование

После запуска приложения «BalancePlus.exe» выберите файл БД и нажмите кнопку «Открыть». Перед Вами появится окно программы следующего вида, рисунок 4.27:

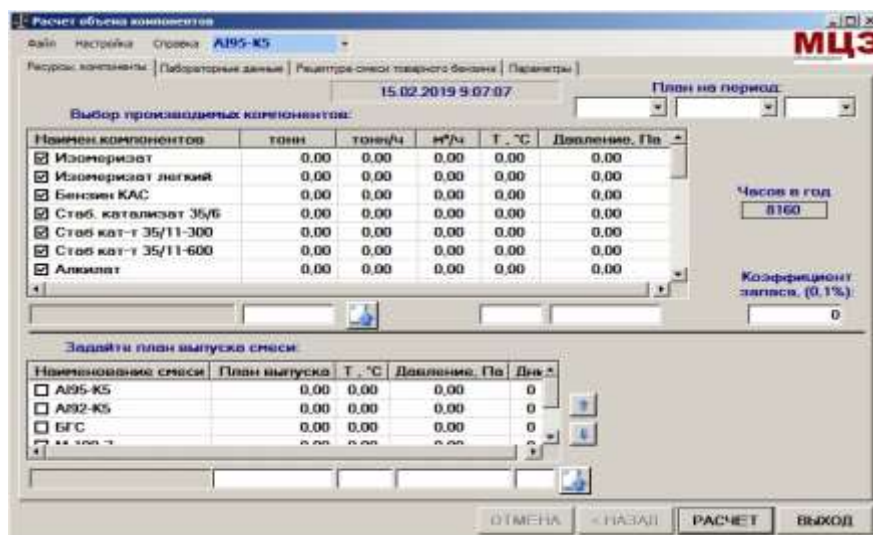


Рисунок 4.27 - Форма отображения базы данных

В окне выбора компонентов отображаются все компоненты, которые были введены в базу данных «Конфигуратором», в том числе и не участвующие в приготовлении смеси.

С левой стороны от названия компонентов установлены «галочки». Наличие галочки означает то, что данный компонент при расчете должен быть израсходован почти без остатка. С помощью мыши можно устанавливать и снимать любую из них, щелкнув по ней, рисунок 4.28.

Ресурсы, компоненты | Лабораторные данные | Рецепттура смеси товарного бензина | Параметры |

13.11.2015 15:22:56 План на

Выбор производимых компонентов: год ▾

Наимен. компонентов	тонн/год	тонн/ч	м³/ч	Т, °С	Давление, МПа
<input checked="" type="checkbox"/> N-MMA	21700	2,71	2,75	9,00	1,38
<input checked="" type="checkbox"/> Добавка МТБЭ	160000	20,00	26,82	9,00	0,60
<input checked="" type="checkbox"/> Изопентан БИИ	148700	18,59	30,00	50,00	0,60
<input checked="" type="checkbox"/> Катализат ЛКС	850000	106,25	136,71	30,00	1,50
<input checked="" type="checkbox"/> Катализат Петрофак	91400	11,43	14,50	50,00	1,00
<input type="checkbox"/> К-3 верх	465500	58,19	87,94	30,00	1,00
<input type="checkbox"/> К-3 бок	1079600	134,95	186,19	50,00	1,00
<input type="checkbox"/> Фр. КК-340	496800	62,10	62,88	0,00	0,00


↑

Задать план выпуска смеси:

Наименование смеси	План выпуска	Т, °С	Давление, МПа
<input type="checkbox"/> Регуляр-92 4кл	1350000	35,00	1,90
<input type="checkbox"/> Прениум-95 5кл	220000	0,00	0,00
<input type="checkbox"/> ДГКл	898300	0,00	0,00
<input type="checkbox"/> Смесь Фр. КК-340	600000	0,00	0,00

↑
↓

Рисунок 4.28 - Задание параметров выбора компонентов

Для заполнения количества производимых компонентов выберите «мышью» необходимый компонент. Наименование выбранного компонента и его количество (тонн/год) отображается в поле под таблицей, куда можно ввести цифровое значение. При необходимости получить пересчет объемов компонентов и бензина с поправкой по плотности заполнив поля температуры и давления. Если поля температуры и давления останутся нулевыми, то пересчет плотности производиться не будет. После ввода нажмите на кнопку . Таким же образом заполняются значения остальных компонентов.

Последовательность (очередность) планирования определяется последовательностью расположения бензинов, заданной в таблице под заголовком «Задать план выпуска смеси». В меню приложения «Расчет объема компонентов» отображается текущая марка бензина, для которого рассчитывается рецептура. После расчета рецептуры бензина автоматически осуществляется переход к следующей марке бензина, в соответствии с заданной последовательностью планирования.

Таблица «план выпуска смеси» заполняется аналогично. Осталось не забыть задать период планирования, таким образом вкладка «Ресурсы и компоненты» заполнена полностью.

На этой панели размещены еще две кнопки с изображением стрелок смены положения очередности планирования рецептуры марки бензина ↓ и ↑, рисунок 4.29. Они предназначены для изменения порядка расчета продуктов. При нажатии на эти кнопки изменяется порядок не только в таблице, но и в строке меню. Данные на других вкладках также изменяются, в соответствии с выбранным бензином.

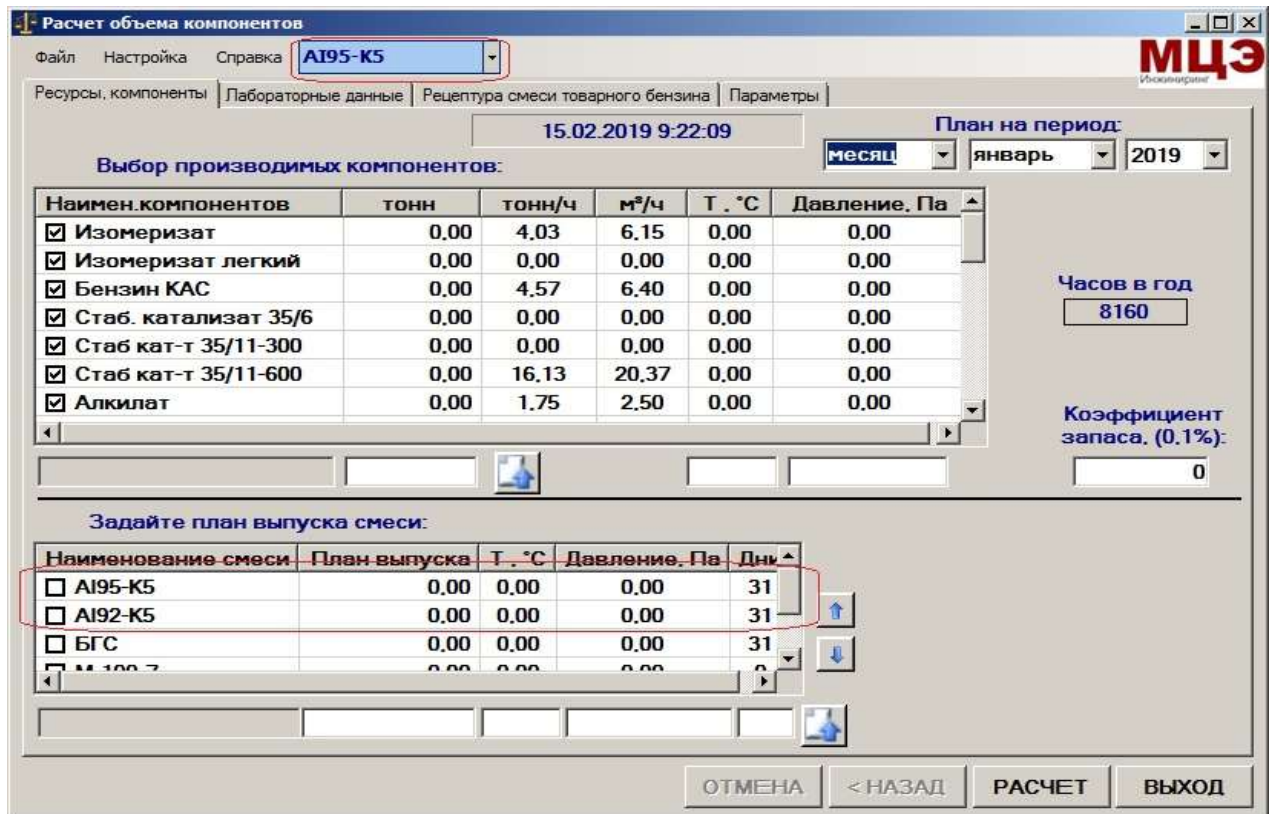


Рисунок 4.29 - Задание очередности расчета рецептуры бензинов

Остальные вкладки отображают информацию из БД, файла лабораторных данных и о пределах компонентов в смеси, так же как в приложении «OptimBlend».

Исходные данные по ресурсам и плану сохраняются в файле и восстанавливаются из файла, который создается с именем базы данных и с расширением «.bin» в директории «Template». Данные хранятся отдельно для выбранных интервалов планирования: сутки, месяц, квартал, год. Период планирования рецептур бензинов выбирается в «BalancePlus», рисунки 4.30, 4.31.

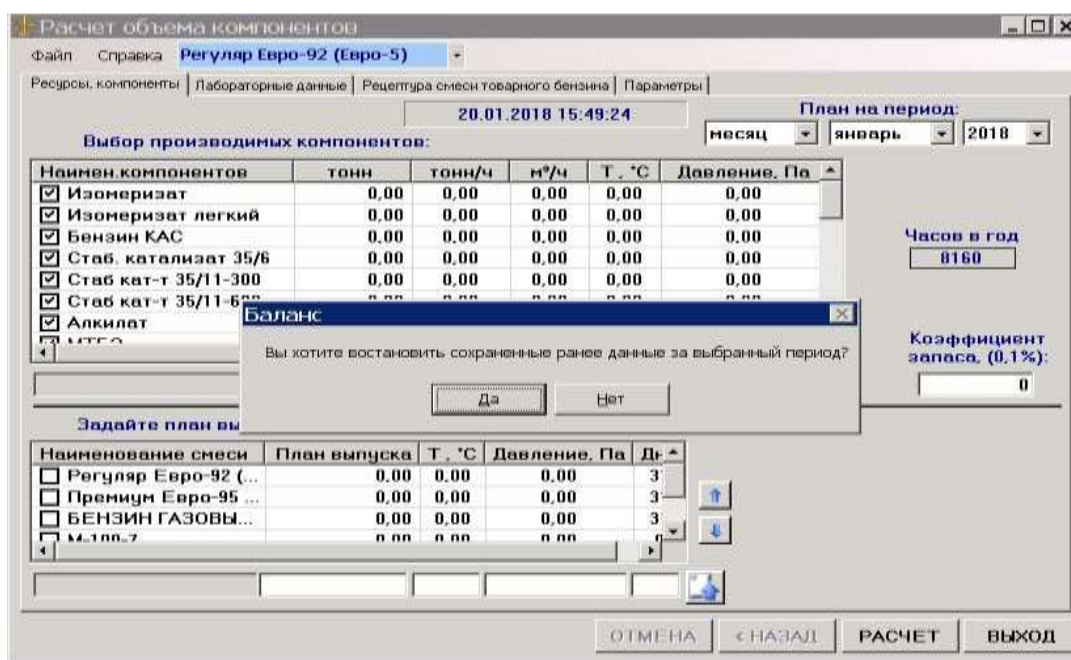


Рисунок 4.30 - Интерфейс восстановления и сохранения данных

При этом можно загрузить, сохраненные ранее данные, или отказаться и ввести данные вручную.

Если файла с данными нет, то вопрос при выборе периода не задается. Перед выходом из программы «BalancePlus» Вы можете сохранить введенные данные или отказаться.

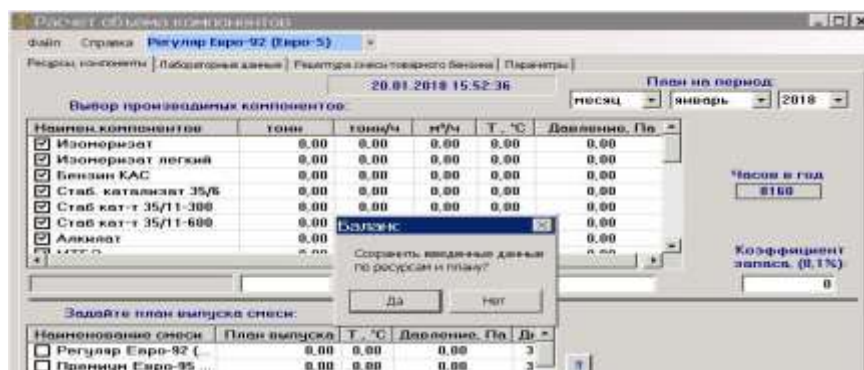


Рисунок 4.31 - Интерфейс сохранения данных

По окончании ввода данных и после выбора последовательности расчета бензинов можно приступать к расчету, нажав на кнопку «Расчет». Прежде чем приступить к расчету программа проверяет верхние пределы содержания компонентов в смеси и при необходимости их корректирует, приостанавливая свою работу, рисунок 4.32.

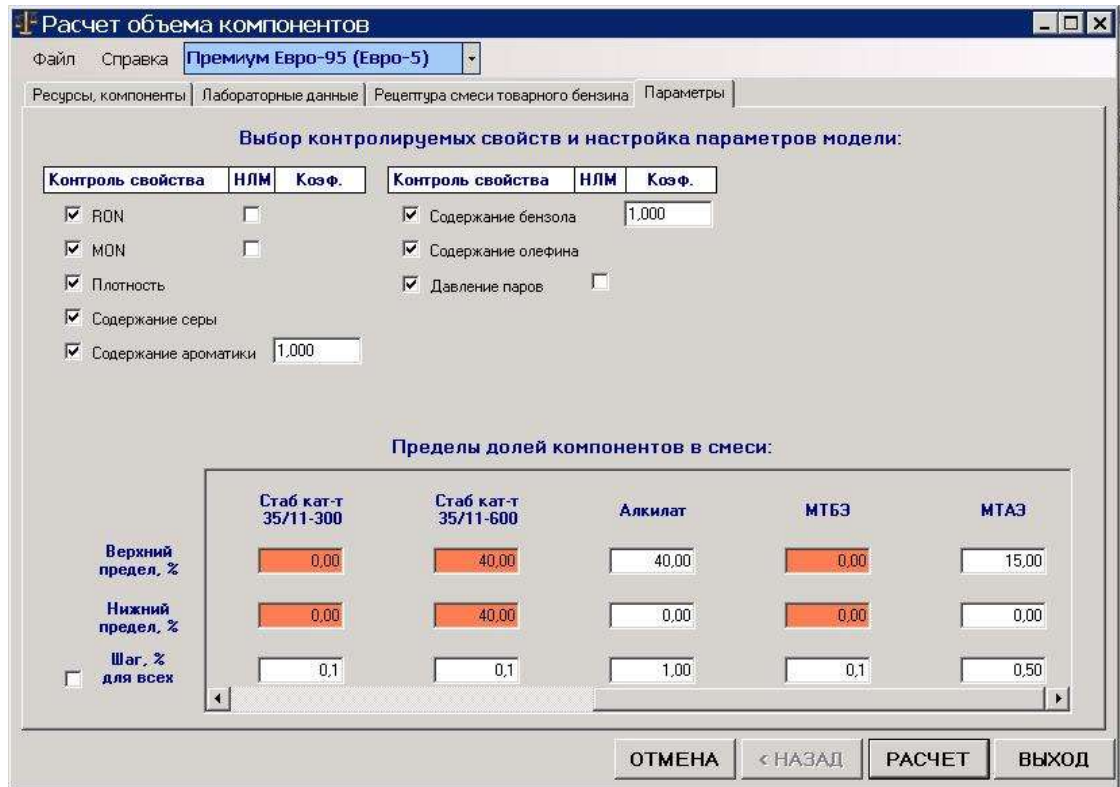
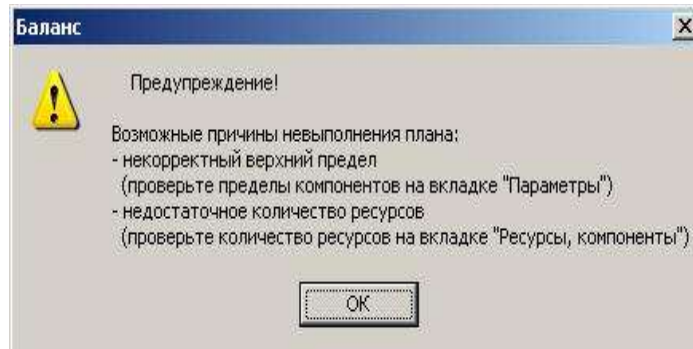


Рисунок 4.32 - Интерфейс пересчета верхних пределов компонентов смешения

При невозможности выполнить заданный план можно уменьшить количество товарного продукта и, прежде чем запустить расчет, увеличить верхние пределы откорректированных значений до 100%. На следующем рисунке «Изопентан БИИ» изменить значение на 100,00. Программа при запуске расчета пересчитает верхний предел автоматически.

Результат автоматической корректировки пределов смешения отобразится во вкладке «Параметры».

После принятия или ввода нового значения предела пользователь может продолжить выполнение программы, нажав повторно кнопку «Расчет» или «Далее >».

После расчет первого бензина программа открывает на экране Excel и записывает расчетные данные в форме таблиц. Вы их можете просмотреть.

Сверните Excel и при нажатии кнопки «Далее» программа перейдет к расчету следующего продукта. Программа вновь проверит пределы компонентов. Может внести корректировку границ исходя из остатка компонентов после предыдущего расчета. По каждому расчету полученные данные вносятся в Excel. По окончании всех расчетов файл Excel закрывается автоматически и сохраняется в папке /Архив с именем «Баланс_”период”_тек. дата_тек. время». Например, «Баланс_год_2015_от_15.04.2015_22_00_58.xls» в Приложении Б.

Его можно открыть, просмотреть и распечатать. На вкладке «Ресурсы и компоненты» в таблице производимых компонентов будут видны остатки каждого компонента, рисунок 4.33.

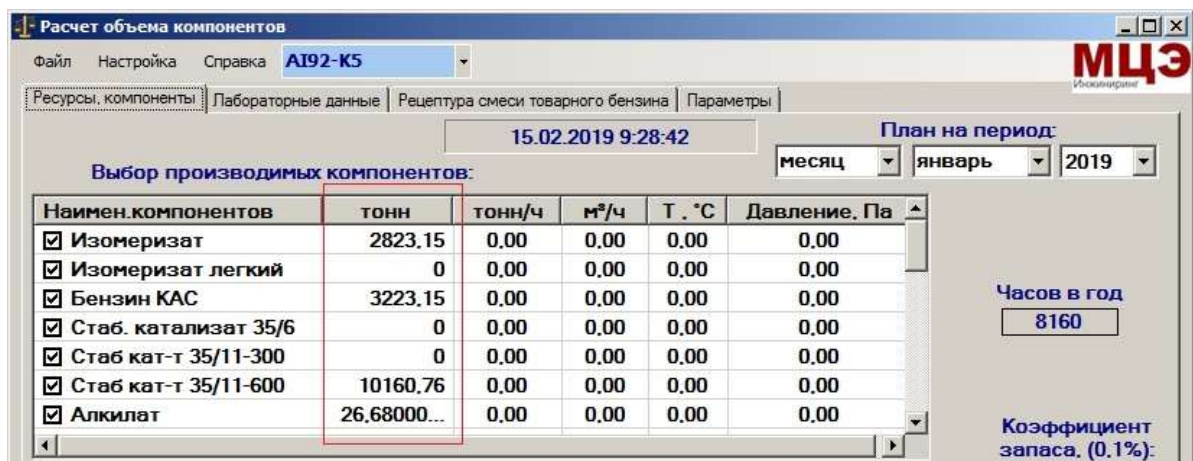


Рисунок 4.33 - Интерфейс остатков компонентов

Кнопка «Отмена» служит для прерывания расчета в момент приостановки программы после расчета какого-либо топлива или «зависании» программы в случае долгого расчета. При этом надпись «Далее» изменится на «Расчет», файл Excel закроется без сохранения данных и значения, производимых компонентов вернуться к начальным.

Этот модуль решает также задачу «максимизации» выпуска бензина какой-либо марки после выполнения плана по другой марке бензина. Можно также задать ограничение «максимума», рисунок 4.34 а, б. При значении нуля (0 по умолчанию) ограничение не контролируется.

Рисунок 4.34а - Интерфейс выбора критерия оптимизации

К примеру, задан план выпуска для Премиум-95 220000 т. Сколько же можно выпустить Регуляр-92 после выполнения плана по 95 бензину? Чтобы ответить на этот вопрос, достаточно установить «галочку» слева от марки бензина, переставить «Премиум-95» на первое место и запустить «РАСЧЕТ».

После выполнения плана программа отобразит показанный выше экран. Необходимо заполнить поле «Приращение», после чего можно продолжить, нажав кнопку «ДАЛЕЕ».

Окно программы примет следующий вид:

Расчет объема компонентов

Файл Справка Премиум-95 5кл Смесь Фр. КК-340 Регуляр-92 4кл ДГКл

Ресурсы, компоненты | Лабораторные данные | Рецепт смеси товарного бензина | Параметры

15.04.2016 13:02:06 План на период: 2016

Выбор производимых компонентов:

Наимен. компонентов	тонн	тонн/ч	м ³ /ч	Т, °С	Давление, МПа
<input checked="" type="checkbox"/> N-ММА	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Добавка МТБЭ	156000	19,50	26,15	0,00	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Изопентан БИИ	154000	19,25	31,07	0,00	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Катализат ЛКС	870000	108,75	139,93	0,00	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Катализат Петрофак	91300	11,41	14,48	0,00	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> К-3 верх	388000	48,50	73,30	0,00	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> К-3 бок	786000	98,25	135,55	0,00	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Фр. КК-340	645000	0,00	0,00	0,00	0,00

Коэффициент запаса (0,1%): 0

Задайте план выпуска смеси:

Наименование смеси	План выпуска	Т, °С	Давление, МПа
<input type="checkbox"/> Премиум-95 5кл	220000	0,00	0,00
<input type="checkbox"/> Смесь Фр. КК-340	700000	0,00	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Регуляр-92 4кл	1374700	0,00	0,00
<input type="checkbox"/> ДГКл	750000	0,00	0,00

Начальные данные расчета максимума выпуска бензина:

Сумма остатка, т: 2170300,00
Начальное приближение, т: 1367200
Максимум, т: 1400000
Коэф. начального приближения: 0,63
Приращение, т: 500

ОТМЕНА РАСЧЕТ ВЫХОД

Рисунок 4.346 - Интерфейс выбора критерия оптимизации

Коэффициент начального приближения можно изменять. При этом, определяется начальное приближение выпуска бензина, как произведение суммы остатка компонентов (сумма компонентов помеченных «галочками») на коэффициент. По умолчанию он выбран 1,3. Величина приращения плана выпуска бензинов – это величина, на которую увеличится «план», в случае удачного выполнения «плана». Для первого прогона для выявления максимума не рекомендуется задавать приращение меньше 1000 тонн. Менее 1000 тонн можно задавать после первого прогона, когда Вы знаете приблизительную величину максимального плана выпуска бензина. Начальное приближение плана выпуска бензина корректируют, приближая его к «максимуму» меняя коэффициент начального приближения.

4.1.5 Расчет рецептур смешениям по партиям

Модуль BalancePro выполняет планирование товарных топлив с учетом наличия компонентов смешения в резервуарах, расчет рецептур смешения

бензинов по партиям и формирование расписания смешения – диаграммы Ганта.

После запуска приложения «BalancePro» выберите файл БД и нажмите кнопку «Открыть». Перед Вами откроется стартовый экран, рисунок 4.35 а, б.

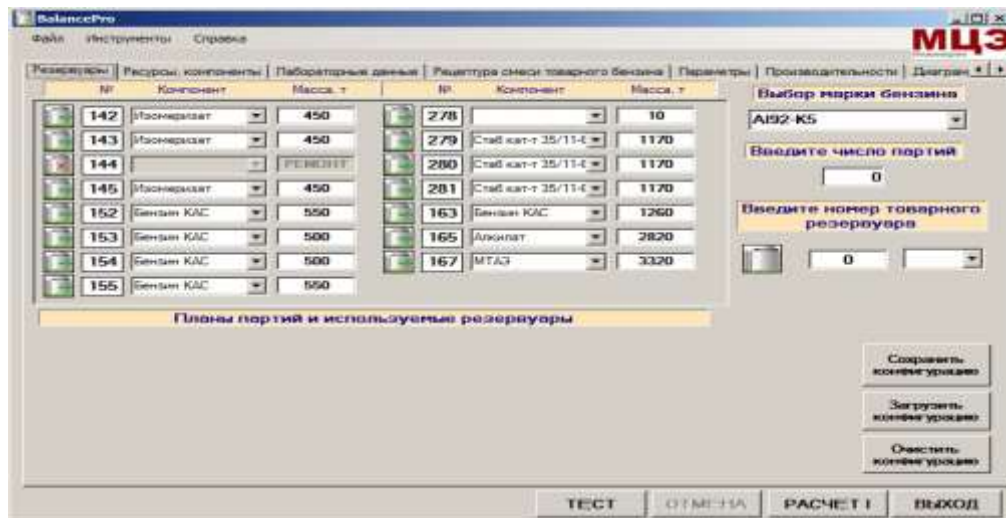






Рисунок 4.35а - Интерфейс планирования рецептур смешения по партиям

По умолчанию выбран бензин АИ-92, количество партий (0), не выбран товарный резервуар с начальным остатком 0, отображены номера и состояния компонентных резервуаров. Состояния резервуаров:

-  - ход;
-  - П П;
-  - резерв;
-  - ремонт.

Состояния можно изменять или посмотреть, нажав на изображение резервуара, при этом откроется окно:



Рисунок 4.35б - Интерфейс планирования рецептур смешения по партиям

В нем отображается номер резервуара, полный, полезный тоннаж его состояние и привязанный компонент. Любое поле можно изменить, после этого не забудьте сохранить, или выйти без сохранения, нажав кнопку «Выход».

Выбор компонента осуществляется из выпадающего меню:

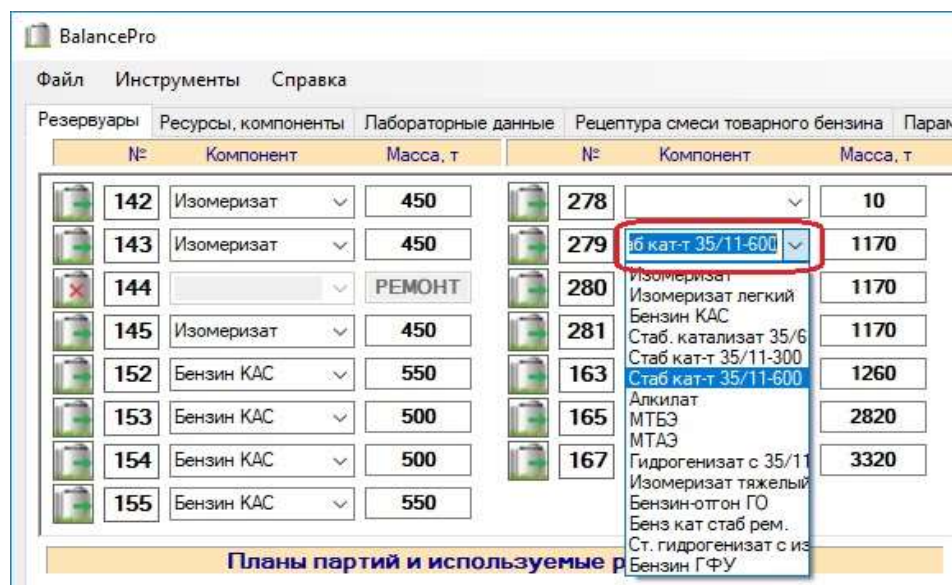


Рисунок 4.35в - Интерфейс планирования рецептур смешения по партиям

На этом же экране можно создать новую конфигурацию или загрузить сохраненную.

Для создания конфигурации необходимо выбрать марку бензина и задать число партий смешения. Допустимое количество партий может быть от 1 до 4. При выборе числа партий, например 3, откроются дополнительные поля:

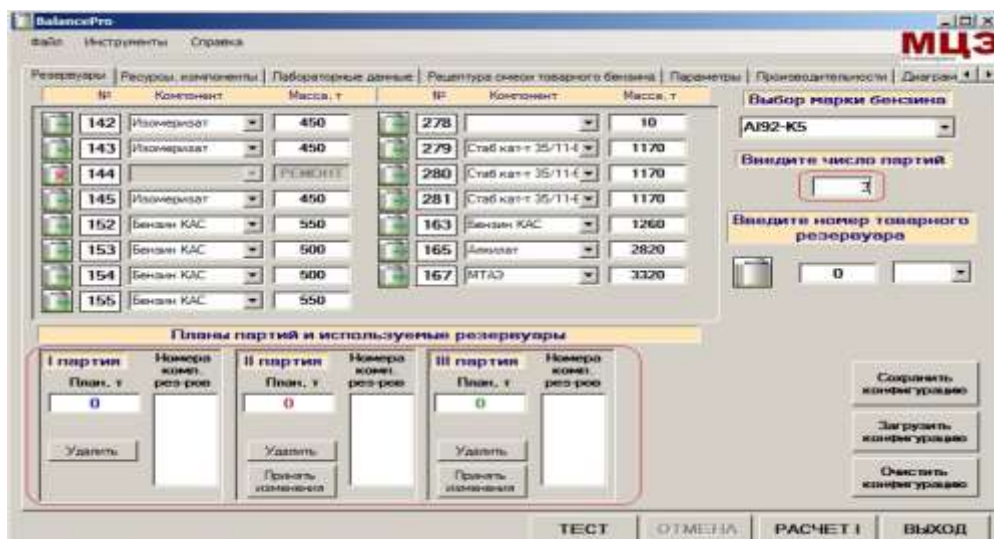


Рисунок 4.36а - Интерфейс конфигурирования резервуаров

В эти поля необходимо ввести вручную планы партий, а в поле «Номера компонентных резервуаров» ввести номера путем перетаскивания, выбрав номер резервуара, наведите курсор мыши на него, нажмите на любую клавишу мыши и, не отпуская её, перетащите номер в поле, после чего отпустите клавишу мыши, рисунок 4.36а.

После завершения конфигурирования трех партий нажмите кнопку «Сохранить конфигурацию». По нажатию на эту кнопку создается новый *.xls файл с именем выбранного бензина, например «AI92_123.xls». Значения свойств компонентов передаются в него автоматически из базы данных. Вам необходимо внести коррективы и на первом листе («AI92-K5_1») ввести тоннаж остатка и его свойства. Где «..._1» - номер партии.

Кнопка «Загрузить конфигурацию» загружает последнюю сохраненную конфигурацию в соответствии с выбранной маркой бензина, рисунок 4.36б.

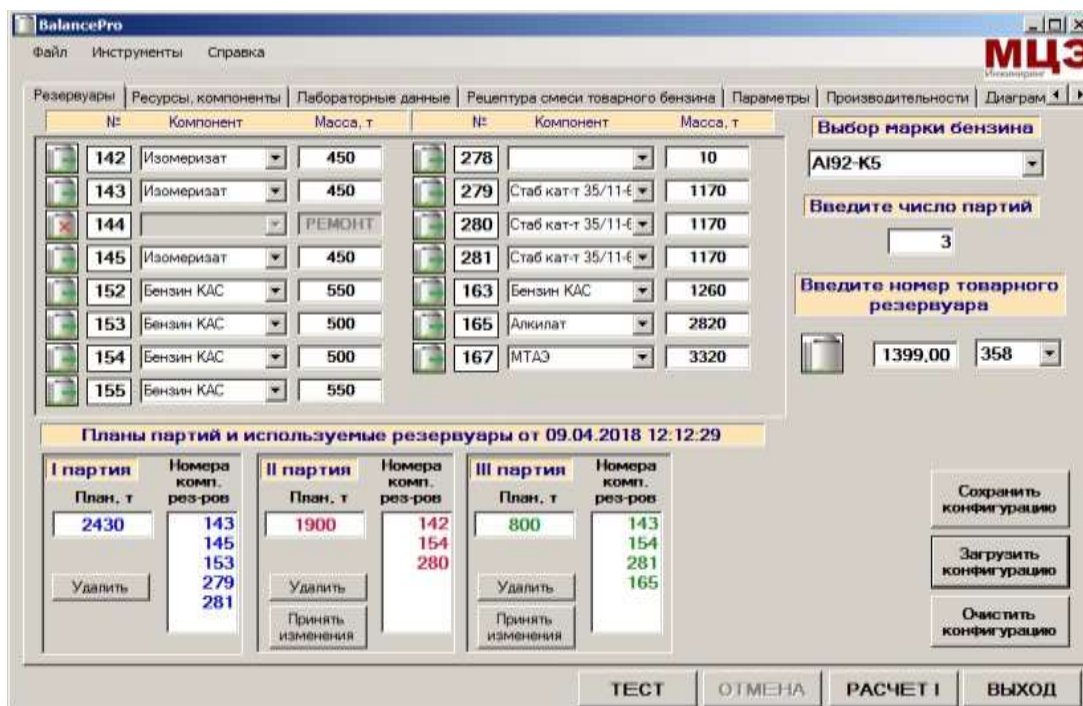


Рисунок 4.36б - Интерфейс конфигурирования резервуаров

Кнопка «Очистить конфигурацию» очищает данные о смешении и закрывает панель «Планы партий».

После загрузки конфигурации вторая вкладка «Ресурсы и компоненты» будет выглядеть так, рисунок 4.37:

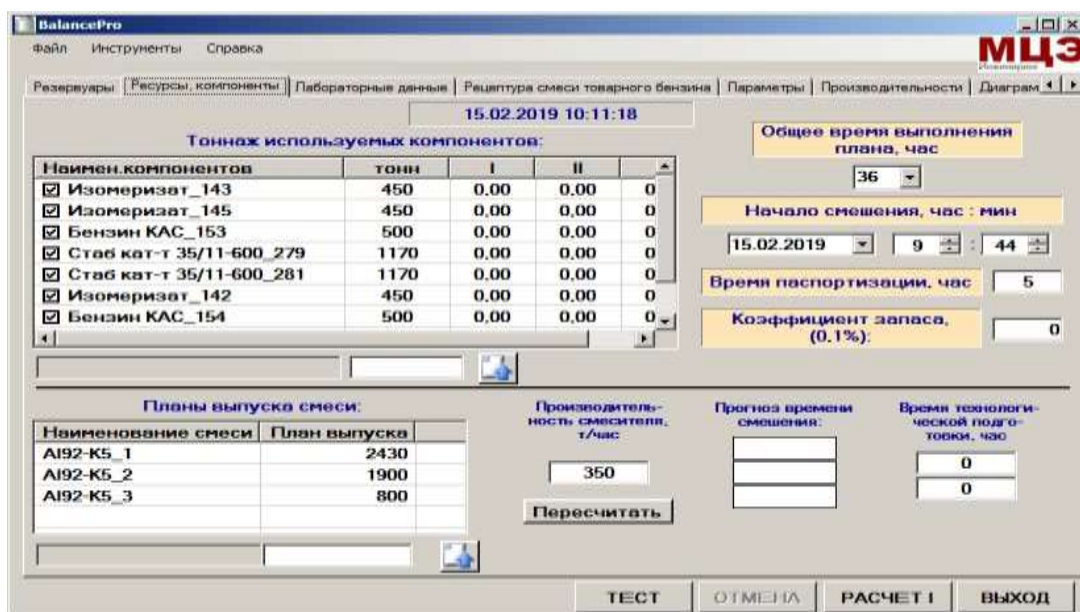



Рисунок 4.37 - Интерфейс результатов загрузки конфигуратора

В верхней таблице «Тоннаж ...» перечислены все компоненты, участвующие в партиях, и полезный тоннаж в соответствующих резервуарах.

Полезный тоннаж можно изменять, выбрав требуемое наименование компонента, перемещаемое в поле под таблицу, и указав новое значение в соседнем поле и нажав кнопку .

В нижней таблице «Планы выпуска смеси» указаны наименования партий и соответствующий план выпуска бензина, изменяемый аналогично.

Также можно откорректировать производительность смесителя для расчета прогноза времени смешения для каждой партии бензина указанием нового значения. Для расчета прогнозируемого времени смешения нажмите кнопку «Пересчитать». Также необходимо нажать эту кнопку после изменения плана партии.

При необходимости, заполните время технологического простоя между 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4 партиями.

Поля «Общее время выполнения плана», «Начало смешения», «Время паспортизации» и «Коэффициент запаса» заполнены по умолчанию. При необходимости их можно изменять. Эти данные используются при построении диаграммы Ганта.

Вкладки «Лабораторные данные», «Рецептура смеси товарного бензина» и «Параметры» аналогичны соответствующим вкладкам в модуле «Баланс+».

Кнопка «Расчет I» запускает расчет рецептуры первой партии бензина. После формирования файла отчета надпись на кнопке изменится на «Расчет II» и т.д.

В процессе расчета возможно появление сообщений (в случае использования компонентного резервуара в последующих партиях планирования):

Вариант сообщения при использовании резервуара через партию, рисунки 4.38а, б

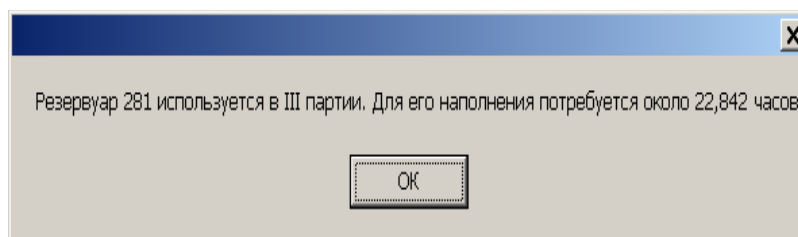


Рисунок 4.38а - Интерфейс сообщений по резервуарам

Или вариант использования резервуара в следующей партии планирования

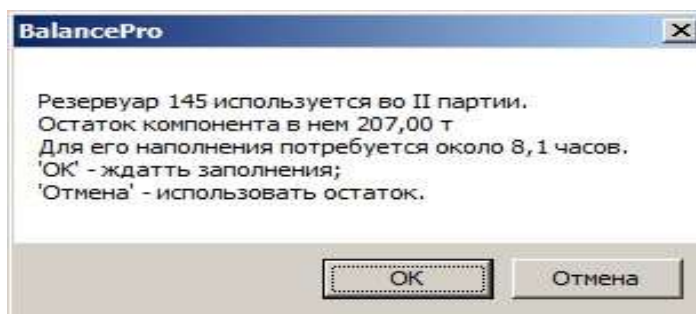


Рисунок 4.38б - Интерфейс сообщений по резервуарам

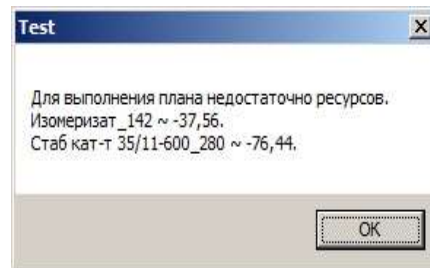
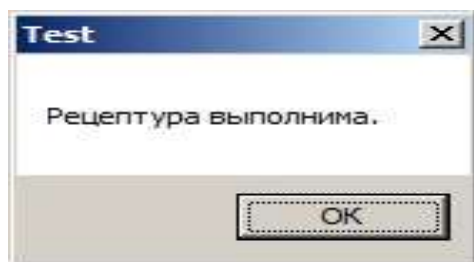
Подобное предупреждение может возникнуть при повторном использовании резервуара в следующих партиях. Эти резервуары выделяются в таблице «Тоннаж используемых компонентов», рисунок 4.39.

Резервуары				
Ресурсы, компоненты				
Лабораторные данные				
Рецептура смеси товарного бензин				
20.03.2018 9:57:04				
Тоннаж используемых компонентов:				
Наимен.компонентов	тонн	тонн/ч	м³/ч	
<input checked="" type="checkbox"/> Стаб кат-т 35/11-600_2...	127,90	0,00	0,00	
<input checked="" type="checkbox"/> Бензин КАС_163	989,70	0,00	0,00	
<input checked="" type="checkbox"/> Изомеризат_143	62,40	0,00	0,00	
<input checked="" type="checkbox"/> Стаб кат-т 35/11-600_2...	1170	0,00	0,00	
<input checked="" type="checkbox"/> Бензин КАС_155	550	0,00	0,00	
<input checked="" type="checkbox"/> Изомеризат_145	450	0,00	0,00	
<input checked="" type="checkbox"/> Бензин КАС_154	500	0,00	0,00	
<input checked="" type="checkbox"/> Алкилат_165	2820	0,00	0,00	
Стаб кат-т 35/11-600_280	1170			

Рисунок 4.39 - Интерфейс сообщений при повторном использовании резервуаров

На интерфейсе программы появилась кнопка «ТЕСТ». Её можно использовать перед расчетом рецептуры любой партии для проверки

возможности выполнения плана при заданных ограничениях. Если будет найдена оптимальная рецептура, то появится сообщение:



Кнопка «ТЕСТ» позволяет также определить необходимое количество того или иного компонента для заданного плана после выдачи предупреждения о невозможности выполнить план.

Перед нажатием на кнопку снимите «галочки» на компонентах, участвующих в смешении партии, во вкладке «Ресурсы, компоненты», и увеличьте ограничения по «Верхним пределам» на вкладке «Параметры», установите «грубый» шаг для всех компонентов. Нажатие на «ТЕСТ» производит проверочный расчет без внесения изменений в файл отчета. По окончании расчета на экране появится сообщение:

Это позволяет принять решение об изменении конфигурации «на ходу», рисунок 4.40. То есть, переходим на вкладку «Резервуары» и перетаскиваем в текущую конфигурацию партии недостающие компоненты из резервуаров с остатками от предыдущих партий.

Например:



Рисунок 4.40 - Интерфейс конфигурации резервуаров в режиме процесса

После этого нажмите кнопку «Принять изменения». Программа добавит новые компоненты для партии, после чего можно повторить расчет текущей партии.

На вкладке «Производительности» вручную задаются и изменяются средние значения производительности установок для соответствующих компонентов и время лабораторного анализа, рисунок 4.41.

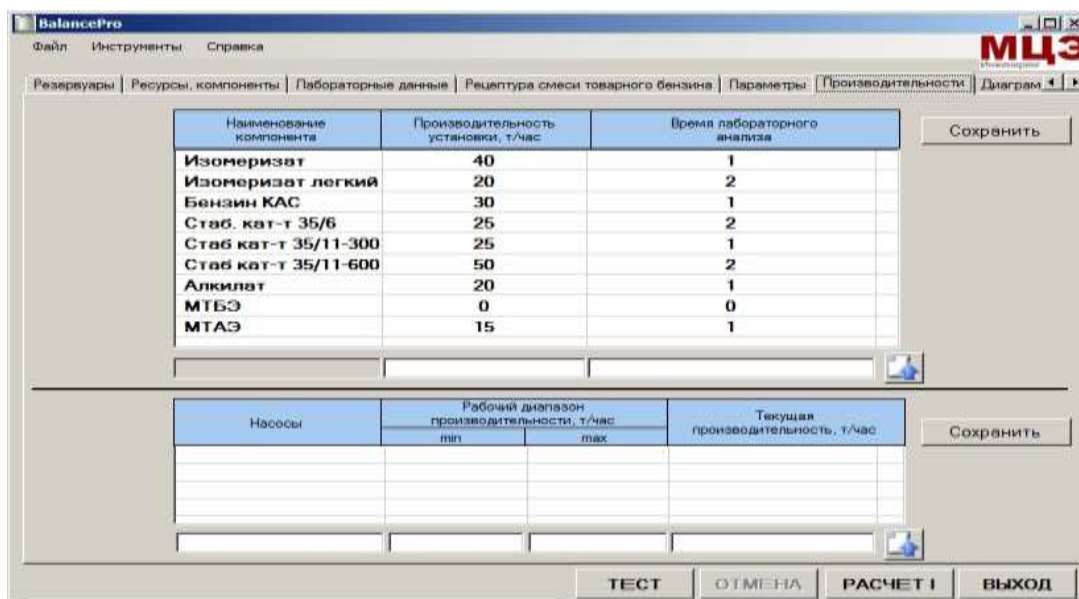


Рисунок 4.41 - Интерфейс изменения производительности в режиме процесса

Нажатие кнопки «Сохранить» сохранит все указанные значения для загрузки в программе по умолчанию.

В результате выполнения расчетов формируются два файла .xls в папке «АРХИВ» с именами «Pro__от_19.03.2018 15_15_02.xls» и «Sv_tab1_19.03.2018 15_16_14.xls».

После выполнения всего расчета на вкладке «Диаграмма Гантта» появится диаграмма, отражающая расписание смешения, рисунок 4.42.

Также её копия помещается в сохраненный файл «Pro__от_19.03.2018 15_15_02.xls» на отдельный лист.

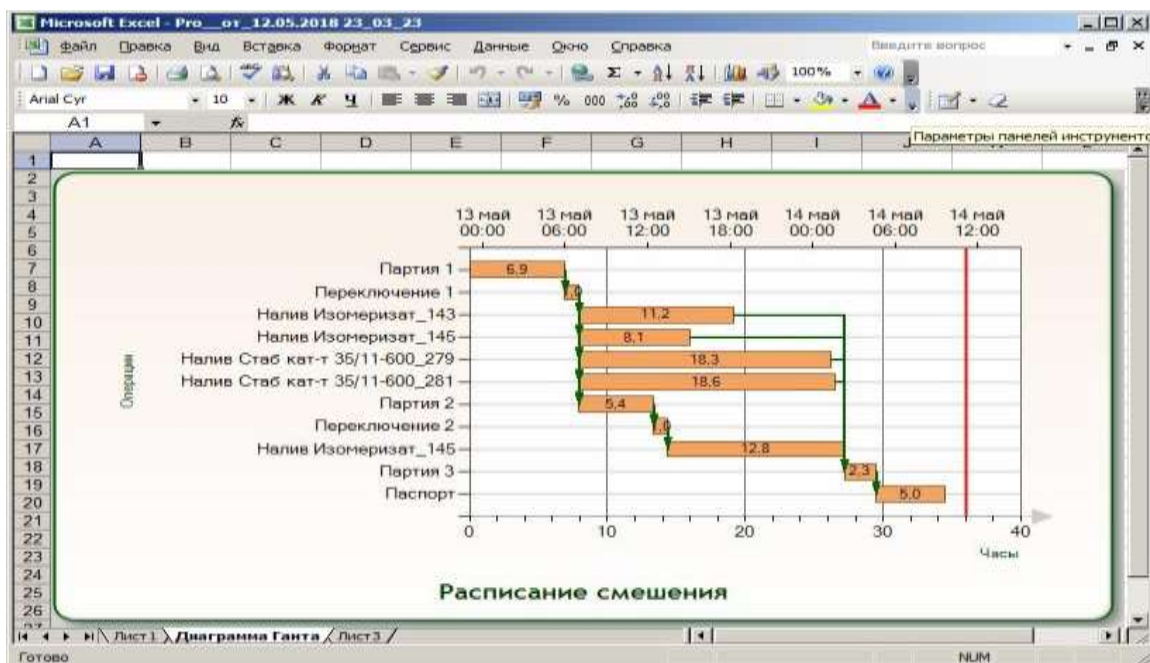


Рисунок - 4.42 Диаграмма Ганта

В модуле BalancePro добавилась новая вкладка – «Партии». При старте вкладка пустая. Заполняется она только после загрузки конфигурации. На ней отображаются количество партий, компоненты, участвующие в смешении по партиям, номера резервуаров. Поля «насос» и «очередность» не заполнены. Для того чтобы получить диаграммы Ганта по партиям, необходимо заполнить все поля.

Результаты расчетов по партиям приведены в Приложении Б.

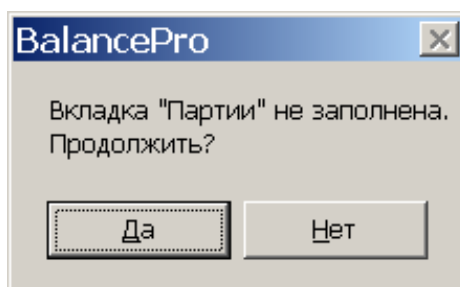
Компоненты	Резервуар	Насос	Очередность
Изомеризат_143	143	Н3	1
Изомеризат_145	145	Н3	2
Бензин КАС_153	153	Н3	3
Стаб кат-т 35/11-600_279	279	Н4	1
Стаб кат-т 35/11-600_281	281	Н4	2

Компоненты	Резервуар	Насос	Очередность
Изомеризат_142	142	Н3	1
Бензин КАС_154	154	Н3	2
Стаб кат-т 35/11-600_280	280	Н4	3

Компоненты	Резервуар	Насос	Очередность
Изомеризат_143	143	Н3	1
Бензин КАС_154	154	Н3	2
Стаб кат-т 35/11-600_281	281	Н4	1
Алкилат_165	165	Н4	2

Рисунок 4.43 - Интерфейс конфигурации насосов

Для предварительных расчетов можно не заполнять эти поля. Если не заполнено хотя бы одно поле при нажатии на кнопку «РАСЧЕТ I», будет выдаваться предупреждение вида:



«Да» – будет произведен расчет, но диаграммы по партиям построены не будут;

«Нет» – возврат для заполнения.

Если введены все данные на вкладке «Партии», то по завершении расчетов всех партий будут созданы диаграммы по партиям. Они строятся в файле отчета на листе «Диаграмма Гантта» после сводной диаграммы, Приложение В.

Пункт «Резервуары» меню «Инструменты» позволяет добавлять или удалять резервуар, рисунки 4.44, 4.44а, 4.44б.

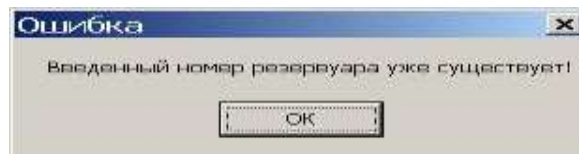


Рисунок 4.44 - Интерфейс конфигурации удаления/добавления резервуаров

При выборе пункта «Добавить» появится новое окно, которое необходимо заполнить данными. После нажатия на кнопку «Добавить», резервуар с заданными параметрами появится в общем списке.

Рисунок 4.44а - Интерфейс конфигурации удаления/добавления резервуаров

Если резервуар с введенным номером уже существует, появится предупреждение:



и данные не будут записаны. Измените номер резервуара и повторите запись.

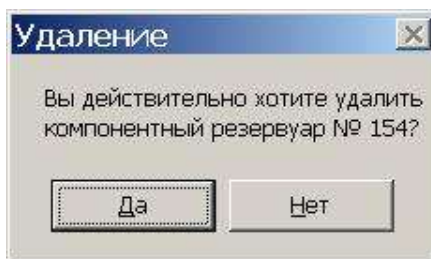
При выборе пункта меню «Удалить» появится окно:

Компонентные				Товарные			
№	Максимум	Полезный	Состояние	№	Максимум	Полезный	Состояние
142	570	450	Ход	343	0	0	Резерв
143	570	450	Ход	344	7100	5700	Резерв
144	570	450	Ремонт	345	7100	5700	Ход
145	570	450	Ход	346	0	0	Резерв
152	630	550	Ход	357	7100	5700	Ход
153	630	500	Ход	358	7100	5700	Ход
154	630	500	Ход	26	0	0	Ход
155	630	550	Ход	27	0	0	Ход
278	1460	1170	Ход	28	0	0	Ход
279	1460	1170	Ход	80	0	0	Ход
280	1460	1170	Ход	81	0	0	Ход
281	1460	1170	Ход				
163	1360	1260	Ход				
165	3100	2820	Ход				
167	3600	3320	Ход				

Рисунок 4.44б - Интерфейс конфигурации удаления/добавления резервуаров

Для удаления резервуара выделите его и нажмите кнопку «Удалить».

Появится предупреждение:



При подтверждении действия («Да») выбранный резервуар будет удален из конфигурации оборудования. При отмене («Нет») – выбранный резервуар останется в списке оборудования.

4.2 Параметрическая идентификация нелинейной модели

4.2.1 Задача NLM - идентификация нелинейной модели бензинов

Для расчета коэффициентов нелинейной модели необходимо выбрать марку бензина. После выбора на экране заполнится таблица свойств и значений. Значения загружаются из файла в формате XLS, который может создаваться автоматически из PI-System или заполняться вручную. Файл содержит именованные листы, в соответствии с марками выпускаемых бензинов, рисунок 4.45.

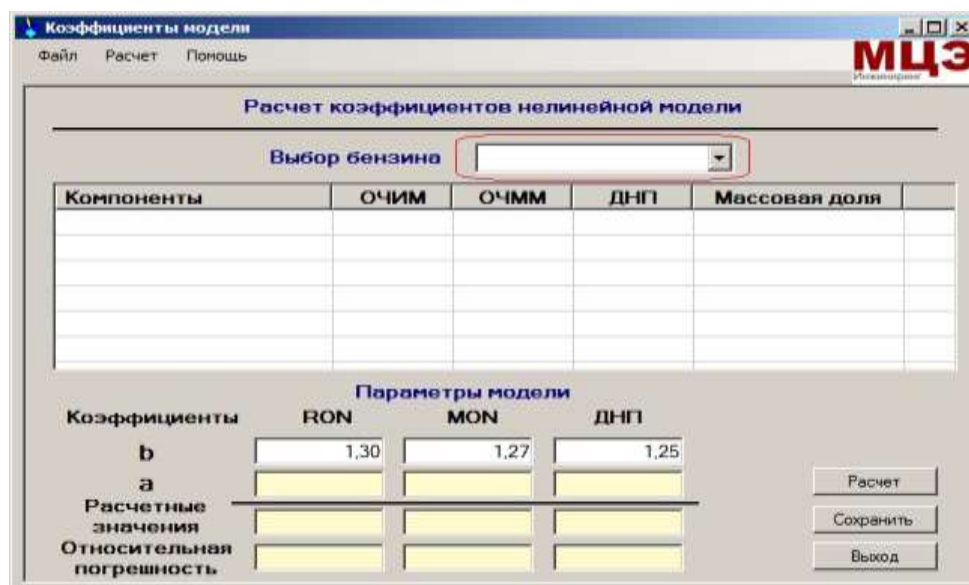


Рисунок 4.45 - Интерфейс параметрической идентификации

Пример, для бензина АИ-95

После считывания на экране появятся данные лаборатории, рисунок 4.46.

Кoeffициенты модели

Файл Расчет Помощь

МЦЭ
Инициаторы

Расчет коэффициентов нелинейной модели

Выбор бензина AI95-K5

Компоненты	ОЧИМ	ОЧММ	ДНП	Массовая доля
Изомеризат	86,50	84,50	105,00	0,1667
Изомеризат легкий	86,50	85,00	114,00	0,0000
Бензин КАС	85,00	78,20	70,00	0,0000
Стаб. катализат 35/6	0,00	0,00	0,00	0,0000
Стаб кат-т 35/11-300	94,50	84,70	70,00	0,0000
Стаб кат-т 35/11-600	96,20	85,60	68,80	0,6304

Параметры модели

Кoeffициенты	RON	MON	ДНП
b	1,30	1,27	1,25
a			
Расчетные значения			
Относительная погрешность			

Расчет
Сохранить
Выход

Рисунок 4.46 - Исходные данные для идентификации параметров нелинейной модели

До этого момента нажатие на кнопку или надпись в строке меню «Расчет» не выполняло никаких действий. Теперь же по нажатию выполнится расчет и экран примет вид, рисунок 4.47:

Кoeffициенты модели

Файл Расчет Помощь

МЦЭ
Инициаторы

Расчет коэффициентов нелинейной модели

Выбор бензина AI95-K5

Компоненты	ОЧИМ	ОЧММ	ДНП	Массовая доля
Изомеризат	86,50	84,50	105,00	0,1667
Изомеризат легкий	86,50	85,00	114,00	0,0000
Бензин КАС	85,00	78,20	70,00	0,0000
Стаб. катализат 35/6	0,00	0,00	0,00	0,0000
Стаб кат-т 35/11-300	94,50	84,70	70,00	0,0000
Стаб кат-т 35/11-600	96,20	85,60	68,80	0,6304

Параметры модели

Кoeffициенты	RON	MON	ДНП
b	1,30	1,27	1,25
a	0,78307	0,80291	0,80655
Расчетные значения	95,00	87,07	71,60
Относительная погрешность	0,000	0,000	0,000

Расчет
Сохранить
Выход

Рисунок 4.47 - Интерфейс параметрической идентификации

Рассчитанные значения коэффициентов по каждой марке бензина следует сохранить для дальнейшего использования в задачах «OptimBlend», «Planning», «BalancePlus» и «BalancePro». Это можно сделать, нажав на кнопку «Сохранить» или через строку меню «Файл» => «Сохранить».

Программа выдает на экран рассчитанные по нелинейной модели значения ОЧИМ, ОЧММ и ДНП и вычисляет относительную погрешность с лабораторными данными.

По завершении работы программа закрывается.

При «сквозном» одновременном планировании рецептов бензинов, после перехода на следующую марку бензина, во вкладке «Параметры» необходимо переустановить «галочки» выбора нелинейной модели показателей качества смеси.

4.2.2 Идентификация нелинейной модели мазута

После запуска модуля NLMMz.exe и выбора файла базы данных, в которой будут сохраняться рассчитанные коэффициенты модели, появляется стартовый экран, рисунок 4.48:

Кол-во компонентов: 3

Выбор мазута: [dropdown]

Компоненты	Вязкость при 50	Вязкость при 100	Массовая доля

Расчетные параметры модели

b1	b2	b3	b12	b13	b23

Переход к псевдо-компонентам

Colum	Colum	Colum

Δ = [input]
n I = [input]
n II = [input]

Расчет
Сохранить
Выход

Рисунок 4.48 - Интерфейс идентификации параметров нелинейной модели

Далее выберите марку мазута. Программа запросит файл свойств, например выберите «NLM_Mz_3.xls», подготовленный ранее лабораторией. После этого можно нажать кнопку «Расчет». При этом заполняются поля расчетных коэффициентов.

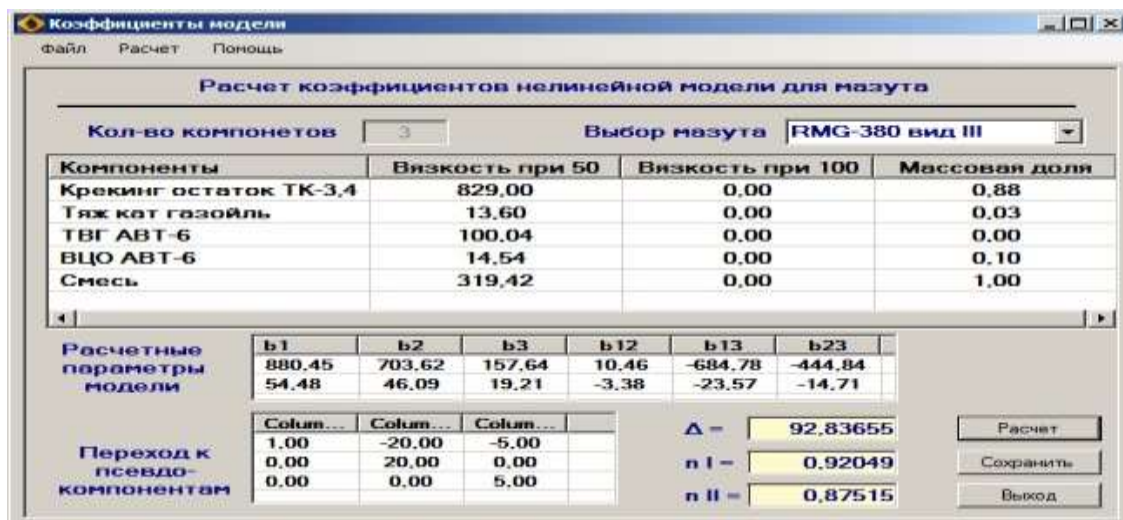


Рисунок 4.49 - Интерфейс результатов идентификации параметров нелинейной модели мазута

В ПК ОПОР реализованы два варианта построения нелинейной модели зависимости вязкости смеси мазутов от состава компонентов смешения и их вязкостей.

Вариант 1 – модель состоит из линейной части, как сумма произведений массовых долей компонентов смешения на их вязкости и части влияния парных взаимодействий компонентов смешения на вязкость мазута. При этом, для получения коэффициентов модели парных взаимодействий на вязкость мазута, лаборатория реализует образцы для анализа в соответствии с симплекс-решетчатым планом эксперимента на диаграммах «состав-свойство». Этот подход не является оперативным с точки зрения смешения в режиме «on-line» из-за длительного времени на лабораторные испытания. Он приемлем для предварительного изучения парных влияний компонентов на вязкость мазута.

Вариант 2 – нелинейная модель вязкости мазута представляет степенную функцию от линейной части. Параметр модели рассчитывается и периодически

корректируется по данным лаборатории или с поточных анализаторов в режиме реального времени.

Для сохранения коэффициентов в выбранной ранее базе данных нажмите кнопку «Сохранить». Повторите расчет для всех марок мазутов с сохранением результатов расчета.

После сохранения все модули расчета рецептур мазутов будут при расчете показателя по вязкости использовать соответствующие полученные коэффициенты модели.

Выводы к главе 4

1. Разработаны функциональная структура и программный комплекс оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения производства бензинов и мазутов;
2. Разработана логическая структура реляционной базы данных для ПК ОПОР. Конфигуратор, использующий исходные данные, создает связанные таблицы топлив, спецификаций, компонентов смешения и их показателей качества для марки выбранного топлива.
3. Приведены результаты оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения производства бензина и мазута для Сызранского НПЗ и Сургутского завода стабилизации конденсата.
4. Приведены акты результатов заводских испытаний ПК ОПОР и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613287.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ существующих систем компаундирования бензинов и определены факторы, такие как: парафины, олефины, нафтены и ароматические углеводороды, влияющие на основные качественные показатели товарного бензина;
2. Разработана модель и сформулирована задача оптимального управления смешением бензинов с ограничениями на ресурсы в условиях параметрической неопределенности.
3. Сформулирована глобальная задача оптимального управления процессами смешения товарных нефтепродуктов по схеме резервуары компонентов смешения – трубопроводы до смесителей – трубопроводы после смесителей – резервуары товарного продукта.
4. Обоснована декомпозиция общей проблемы на задачу верхнего уровня - нахождения оптимальных рецептур и оперативных планов смешения товарных продуктов, и задачу нижнего уровня - построения оптимальных расписаний смесительных операций.
5. Разработан программный комплекс оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения бензинов и мазута (ПК ОПОР).
6. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613287 «Программный комплекс оптимального планирования и оптимизации бензинов и мазутов» от 07.03.2018 г., Версия 2.0 (ПК ОПОР v 2.0).
7. Проведены заводские испытания программного комплекса на НПЗ России (в городах Сургута, Нижнекамска, Омска, Сызрани) и обучение технологического персонала работе в ПК ОПОР.

Разработанные математические модели, математическая формулировка постановка задачи оптимального управления смешением бензинов в режиме

реального времени является платформой построения «цифровых двойников» технологических процессов НПЗ.

В перспективе для создания такой системы необходима трансформация всего цикла управления производством, включающая и внедрение автоматического почасового планирования в разрезе установок и комплексов, организацию учета производственных показателей в режиме реального времени, сопровождающегося автоматическим прогнозом отклонений, выявлением их причин и выбором оптимальной реакции.

Будут использованы следующие технологии: интернет вещей для передачи информации с производственных установок, цифровые двойники объектов управления, анализ данных для ее хранения и систематизации с использованием искусственного интеллекта.

Цифровые двойники физических установок и комплексов — фундамент цифрового завода и основа для внедрения оптимизационных схем нового поколения.

Внедрение цифровых двойников дает дополнительные возможности оптимизации и процессов управления производственными активами предприятия и процессов обеспечения его кибербезопасности.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ААНС - авто-ассоциативная нейронная сеть

АССБ – автоматизированная станция смешения бензинов

ДНП – давление насыщенных паров по Рейду

ИНС – искусственная нейронная сеть

ИС – измерительная система

ЛИМС - лабораторная информационная менеджмент систем

НПЗ - нефтеперерабатывающий завод

ОЧИМ - октановое число по исследовательскому методу

ОЧММ - октановое число по моторному методу

ПК ОПОР – программный комплекс оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения топлив

APC – Advanced Process Control (система усовершенствованного управления технологическими процессами)

B1 – blender (смеситель, блендер)

BOSS – Blend Optimization&Supervision System (система оперативного оптимизационного смешения)

BPO – Blend Planning Optimizer (оптимальное планирование смешения бензинов)

СТ - component tanks (компонентные резервуары)

CTD - Composite total demand (кривая совокупного общего спроса)

CPLEX - Mathematical Programming Optimization Problem Solving Package (LP, QP, MILP, MIQP); Пакет решения задач оптимизации методами математического программирования (LP, QP, MILP, MIQP)

Input-to-state stability ISS-Lyapunov function (переход к состоянию устойчивости по Ляпунову)

MILP - Mixed Integer Linear Programming (смешанное целочисленное линейное программирование – метод линейной оптимизации системы смешения топлив)

MINLP - Mixed Integer Nonlinear programming (смешанное целочисленное нелинейное программирование – метод нелинейной оптимизации системы смешения топлив)

MPIP-C - multi-period, inventory pinch-based algorithm with continuous-time for scheduling linear or nonlinear blending processes

MPIP-C многопериодный алгоритм формирования непрерывного во времени расписания смешений для составления расписания линейных или нелинейных процессов смешения

NLP - Nonlinear programming (нелинейное программирование, метод оптимизации нелинейных задач)

NMDT - normalized multiparametric disaggregation technique (нормализованная многопараметрическая техника дезагрегации (декомпозиции))

ОВБТ - Optimality-based bound tightening (оптимизационное сужение границ)

PMCR - piecewise McCormick relaxation (кусочно-линейная релаксация Маккормика)

PT - product tanks (продуктовые резервуары)

RTN - resource-task-network (РЗС - ресурс-задача-сеть)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии: учебник для вузов по специальности "Основные процессы химических производств и химическая кибернетика" / В. В. Кафаров. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва: Химия, 1985. - 448 с.
2. Мешалкин В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем / В.П. Мешалкин - Смоленск: Универсум, 2021. — 999 с.
3. Егоров А.Ф. Интегрированные системы управления химическими производствами: учеб. Пособие / А. Ф. Егоров. – Москва: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2020. – 200 с.
4. Егоров А. Ф. Интегрированные автоматизированные системы управления химическими производствами и предприятиями: учебное пособие для вузов / А. Ф. Егоров. Москва: Издательство Юрайт, 2021. – 248 с.
5. А. И. Галушкин Применение нейронных сетей в химии и химической технологии / А. И. Галушкин, М. Б. Глебов. // Нейрокомпьютеры. - 2003. - №№ 2 - 4. - С. 1-50.
6. White J., Hall F. Gasoline blending optimization cuts use of expensive components // Oil & Gas J. - 1992. - Vol. 90, Issue 44. – p. 81-84.
7. Michalek T. F., Nordeen K., Rys R. Using a relational database for blend optimization // Hydrocarbon Processing. - 1994. - Vol. 73, Issue 9. - p. 47-49.
8. Agrawal S. S., Integrate blending control, optimization and planning // Hydrocarbon Processing. – 1995. – Vol. 74, Issue 8. - p.129-139.
9. Diaz A., Barsamian J. A. Meet changing fuel requirements with online blend optimization // Hydrocarbon Processing. - 1996. - Vol. 75, Issue 2. - P. 71-76.
10. Blend-control system all but eliminates reblends for Canadian refiner /. Vermeer P.J, Pedersen C. C., Canney W.M., Ayala J. S. // Oil & Gas J. – 1997. – Vol. 95, Issue 30. - p. 74-79.

11. Naman B. T. Linear models help refiners develop RFG recipes // Oil & Gas J. – 1999. - Vol. 97, Issue 8. - p. 64-66.
12. Ахметов А. Ф. Основы нефтепереработки: учебное пособие. / А. Ф. Ахметов, Н. К. Кондрашева, Е. В. Герасимова - Уфа, 2011. – с. 450–549.
13. Жоров Ю. М. Производство высокооктановых бензинов / Ю. М. Жоров, А.А. Гуреев, Е. В. Смидович - Москва: Химия, 1981. - 219 с.
14. Zhang Y., Monder D., Forbes J.F. Real-time optimization under parametric uncertainty: a probability constrained approach // J. of Process Control. – 2002. – Vol. 12, Issue 3. - P. 373–389. – DOI: 10.1016/S0959-1524(01)00047-6.
15. Кравцов А. В. Компьютерное прогнозирование и оптимизация производства бензинов. Физико–химические и технологические основы / А. В. Кравцов, Э. Д. Иванчина - // СТТ, 2000. - 192с.
16. Поздяев В. В. Оптимальное компаундирование бензинов / В. В. Поздяев, В. Е. Сомов, Н. В. Лисицын, Н. В. Кузичкин – // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2002. – №10. – С. 53–57.
17. Лисицын Н. В. Методология построения системы оптимального компаундирования товарных нефтепродуктов / Н. В. Лисицын, В. П. Гошкин, В. В. Поздяев, Н. В. Кузичкин // Химическая промышленность. – 2003. – №8. – С.15–20.
18. Aspen Technology, Inc. 2011. URL: <http://www.aspentech.com> (дата обращения 05.06.2012).
19. Honeywell – Global Technology Leader in Efficiency, Clean Energy Generation, Safety and Security, and Globalization. 1994. URL: <http://Honeywell.com/Pages/Home.aspx> (дата обращения 05.06.2012).
20. Invensys. 2011. URL: <http://www.invensys.com> (дата обращения 05.06.2012).
21. Сахневич Б. В. Разработка модуля автоматизированной обработки данных хроматографического анализа для повышения эффективности процесса компаундирования товарных бензинов / Б. В. Сахневич, М. В.

- Киргина, Н. В. Чеканцев, Э. Д. Иванчина - // Известия Томского политехнического университета. - 2014 - Т324. - №3 - с. 127–135.
22. Chang D-M., Yu C-C and Chien I. L., Coordinated control of blending systems, IEEE Trans. Control Systems Technology, Vol.6, No.4, 495 - 506, 1998.
 23. Singh A., Forbes J.F., Vermeer P. J., Woo S. S., Model-based real-time optimization of automotive gasoline blending operations, Journal of Process Control, Vol.10, 43-58, 2000.
 24. Zhang Y., Monder D. and Forbes J. F., Real-time optimization under parametric uncertainty a probability constrained approach // Journal of Process Control, Vol.12, 373-389, 2002.
 25. Luyben W. L., Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers, 2-nd edition, McGraw-Hill, Inc.,1990.
 26. Alvarez-Ramirez J., Morales A., Suarez R., Robustness of a class of bias update controllers for blending systems, Industrial Engineering Chemistry Research, Vol.41, No.19, 4786-4793, 2002.
 27. Wen Yu, América Morales Gasoline Blending System Modeling via Static and Dynamic Neural Networks INTERNATIONAL JOURNAL OF MODELLING AND SIMULATION, VOL. 24, NO. 3, 2004 151.
 28. Jin L. and Gupta M.M., Stable Dynamic Backpropagation Learning in Recurrent Neural Networks, IEEE Trans. Neural Networks, Vol.10, No.6, 1321-1334, 1999.
 29. Hopfield J. J., Neurons with grade response have collective computational properties like those of a two-state neurons, Proc. of the National Academy of Science, USA, vol. 81, 3088-3092, 1984.
 30. Suykens J. A. K., Vandewalle J. and De Moor B., Lur'e Systems with Multilayer Perceptron and Recurrent Neural Networks; Absolute Stability and Dissipativity, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.44, 770-774, 1999.

31. Yu W., Poznyak A. S. and Li X. Multilayer Dynamic Neural Networks for Nonlinear System On-line Identification, *International Journal of Control*, Vol.74, No.18, 1858-1864,2001.
32. Feng Z. and Michel A. N., Robustness Analysis of a Class of Discrete- Time Systems with Applications to Neural Networks, *Proc. of American Control Conference*, 3479-3483, San Deigo, 1999.
33. Suykens J. A. K., Vandewalle J., De Moor B., NLq Theory: Checking and Imposing Stability of Recurrent Neural Networks for Nonlinear Modelling, *IEEE Transactions on Signal Processing (special issue on neural networks for signal processing)*, Vol.45, No.11, 2682-2691, 1997.
34. Polycarpou M. M. and Ioannou P. A., Learning and Convergence Analysis of Neural-Type Structured Networks, *IEEE Trans. Neural Networks*, Vol.3, No.1, 39-50, 1992.
35. Ioannou P. A. and Sun J., *Robust Adaptive Control*, Prentice-Hall, Inc, Upper Saddle River: NJ, 1996.
36. Kosmatopoulos E. B., Polycarpou M. M., Christodoulou M. A. and Ioannou P. A., High-Order Neural Network Structures for Identification of Dynamical Systems, *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol.6, No.2, 442-431, 1995.
37. Song Q., Robust Training Algorithm of Multilayered Neural Networks for Identification of Nonlinear Dynamic Systems, *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, Vol.145, No.1, 41-46,1998.
38. Jagannathan S. and Lewis F. L., Identification of Nonlinear Dynamical Systems Using Multilayered Neural Networks, *Automatica*, Vol.32, No.12, 1707-1712, 1996.
39. Kondili E. et at., General Algorithm for Short-term Scheduling of Batch Operations - I. MILP Formulation, *Computers & Chemical Engineering*, vol. 17, 1993, pp 211–227.

40. Pantelides C. C., Unified Framework for Optimal Process Planning and Scheduling, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Foundations of Computeraided Process Operations, 1994, pp. 253–274.
41. Almeida M. R. et al., Optimizing the Production Scheduling of a Petroleum Refinery Through Genetic Algorithms, Int. Journal of Ind. Eng.: Theory, Applications and Practice, vol. 10, 2003, pp. 35–44.
42. Raaymakers W. H. M. et al., Scheduling Multipurpose Batch Process Industries with No-Wait Restrictions by Simulated Annealing, European Journal of Operational Research, 126, 2000, pp. 131–151.
43. Catherine A. P. et al., A Two-stage Methodology for Short-term Batch Plant Scheduling: Discrete-event Simulation and Genetic Algorithm, Computers & Chemical Engineering, vol. 22, 1998, pp. 1461–1481.
44. Pinto J. M. et al., A Continuous Time Mixed Integer Linear Programming Model for Short Term Scheduling of Multistage Batch Plants, Ind. Eng. Chem. Res., vol. 34, 1996, pp. 3037–3051.
45. Ierapetritou M. G. et al., Effective Continuous-Time Formulation for Short-Term Scheduling: 1. Multipurpose Batch Processes, Ind. Eng. Chem. Res., vol. 37, 1998, pp. 4341–4359.
46. Ierapetritou M. G. et al., Effective Continuous-Time Formulation for Short-Term Scheduling: 2. Continuous and Semi-continuous Processes, Ind. Eng. Chem. Res., vol. 37, 1998, pp. 4360–4374.
47. Ierapetritou M. G. et al., Effective Continuous-Time Formulation for Short-Term Scheduling: 3. Multiple Intermediate Due Dates, Ind. Eng. Chem. Res., vol. 38, 1999, pp. 3446–3461.
48. Glismann K. et al., Short-Term Scheduling and Recipe Optimization of Blending Processes, Computers & Chemical Engineering, vol. 25, 2001, pp. 627–634.

49. Djukanovic M. et al., Fuzzy Linear Programming Based Optimal Fuel Scheduling Incorporating Blending/Transloading Facilities, *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 11, 1996, pp. 1017–1023.
50. Mendez C. A. et al., A Simultaneous Optimization Approach for Offline Blending and Scheduling of Oil-refinery Operations, *Computers & Chemical Engineering*, vol. 30, 2006, pp. 614–634.
51. Jia Z. et al., Mixed-Integer Linear Programming Model for Gasoline Blending and Distribution Scheduling, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 42, 2003, pp. 825–835.
52. Satoshi Hoshino, Noriyoshi Furuya, and Hiroya Seki, Integrated Scheduling for Gasoline Blending Considering Storage Tanks and Pipe Network. *2008 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 2008, pp. 784-789, doi: 10.1109/COASE.2008.4626475.
53. Beale E. M. L. et al., Special Facilities in a General Mathematical Programming System for Non-convex Problems Using Ordered Sets of Variables, *Proceedings of the Fifth International Conference on Operational Research*, 1970. pp. 447–454.
54. Beale E. M. L. et al., Global Optimization Using Special Ordered Sets, *Mathematical Programming*, vol. 10, 1976, pp. 52–69.
55. Rigby B., L. S. Lasdon, and A. D. Waren. “The evolution of Texaco blending systems – from Omega to StarBlend. *Interfaces*, 25, 64, 1995.
56. Glismann K., Gruhn G. “Short-term scheduling and recipe optimization of blending processes” *Comp. Chem. Eng.*, 25, 627, 2001.
57. Jia Z., Iearapetritou M. “Mixed-integer linear programming for gasoline blending and distribution scheduling”. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, 825-835, 2003.
58. Kelly J. D., Mann J. L. “Crude-oil blend scheduling optimization: An application with multi-million dollar benefits. Honeywell Hi-Spec Solutions. Personal Communication. August 2002.

59. Castillo-Castillo P. A., Mahalec V., Scheduling of nonlinear blending processes via inventory pinch algorithm combining discrete- and continuous-time models, *Comput. Chem. Eng.* (submitted).
60. Menezes B. C., Kelly J. D., Grossmann I. E., Improved swing-cut modeling for planning and scheduling of oil-refinery distillation units, *Ind. Eng. Chem. Res.* 52 (2013) 18324. <http://dx.doi.org/10.1021/ie4025775>
61. Kelly J. D., Formulating production planning models, *Chem. Eng. Prog.* 100 (2004) 43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2003.11.027>
62. Alhajri I., Elkamel A., Albahri T., Douglas P. L., A nonlinear programming model for refinery planning and optimisation with rigorous process models and product quality specifications, *Int. J. Oil Gas Coal Technol.* 1 (2008) 283. <http://dx.doi.org/10.1504/IJOGCT.2008.019846>
63. Elkamel A., Ba-Shammakh M., Douglas P., Croiset E., An optimization approach for integrating planning and CO₂ emission reduction in the petroleum refining industry, *Ind. Eng. Chem. Res.* 47 (2008) 760. <http://dx.doi.org/10.1021/ie070426n>
64. Birewar D. B., Grossmann I. E., Simultaneous production planning and scheduling in multiproduct batch plants, *Ind. Eng. Chem. Res.* 29 (1990) 570. <http://dx.doi.org/10.1021/ie00100a013>
65. Pinto J. M., Joly M., Moro L. F. L., Planning and scheduling models for refinery operations, *Comput. Chem. Eng.* 24 (2000) 2259. [http://dx.doi.org/10.1016/S0098-1354\(00\)00571-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00571-8)
66. Terrazas-Moreno S., Grossmann I. E., A multiscale decomposition method for the optimal planning and scheduling of multi-site continuous multiproduct plants, *Chem. Eng. Sci.* 66 (2011) 4307. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2011.03.017>
67. Gothe-Lundgren M., Lundgren J. T., Persson J. A., An optimization model for refinery production scheduling, *Int. J. Prod. Econ.* 78 (2002) 255. [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(00\)00162-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00162-6)

68. Jia Z., Ierapetritou M., Efficient short-term scheduling of refinery operations based on a continuous-time formulation, *Comput. Chem. Eng.* 28 (2004) 1001. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.09.007>
69. Li J., , Karimi I. A., Scheduling gasoline blending operations from recipe determination to shipping using unit slots, *Ind. Eng. Chem. Res.* 50 (2011) 9156. <http://dx.doi.org/10.1021/ie102321b>
70. Li J., Misener R., Floudas C. A., Continuous-time modeling and global optimization approach for scheduling of crude oil operations, *AIChE J.* 58 (2012) 205. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.12623>
71. Kolodziej S. P., Grossmann I. E., Furman K. C., Sawayac N. W., A discretization-based approach for the optimization of the multiperiod blend scheduling problem, *Comput. Chem. Eng.* 53 (2013) 122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.01.016>
72. Castillo P. A., Kelly J. D., Mahalec V., Inventory pinch algorithm for gasoline blend planning, *AIChE J.* 59 (2013) 3748. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.14113>
73. Castillo P. A., Mahalec V., Inventory pinch based, multiscale models for integrated planning and scheduling-part I: Gasoline blend planning, *AIChE J.* 60 (2014) 2158. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.14423>
74. Li J., Karimi I. A., Srinivasan R., Recipe determination and scheduling of gasoline blending operations, *AIChE J.* 56 (2010) 441.
75. Thakral A., Mahalec V., Composite planning and scheduling algorithm addressing intra-period infeasibilities of gasoline blend planning models, *Can. J. Chem. Eng.* 91 (2013) 1244. <http://dx.doi.org/10.1002/cjce.21766>
76. Singhvi A., Shenoy U. V., Aggregate planning in supply chains by pinch analysis, *Trans. IChemE A.*, 80 (2002) 597. <http://dx.doi.org/10.1205/026387602760312791>
77. Singhvi A., Madhavan K. P., Shenoy U. V., Pinch analysis for aggregate production planning in supply chains, *Comput. Chem. Eng.* 28 (2004) 993. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.09.006>

78. Ludwig J., Treitz M., Rentz O., Geldermann J., Production planning by pinch analysis for biomass use in dynamic and seasonal markets, *Int. J. Prod. Res.* 47 (2009) 2079. <http://dx.doi.org/10.1080/00207540802392577>
79. Foo D. C. Y., Ooi M. B. L., Tan R. R., Tan J. S., A heuristic-based algebraic targeting technique for aggregate planning in supply chains, *Comput. Chem. Eng.* 32 (2008) 2217. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2007.10.016>
80. Castillo P. A., Mahalec V., Inventory pinch based, multiscale models for integrated planning and scheduling-part II: Gasoline blend scheduling, *AIChE J.* 60 (2014) 2475. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.14444>
81. Jin L. and Gupta M. M., Stable Dynamic Backpropagation Learning in Recurrent Neural Networks, *IEEE Trans. Neural Networks*, Vol.10, No.6, 1321-1334, 1999.
82. Egardt B., Stability of Adaptive Controllers, *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Vol.20, Springer-Verlag, Berlin, 1979.
83. Gary J. H., Handwerk G. E., *Petroleum Refining Technology and Economics*, Marcer Dekker, New York, 1994.
84. Healy W. C., Maassen C.W and Peterson R.T., A new approach to blending octanes, *Proc.24th Meeting of American Petroleum Institute's Division of Refining*, New york, 1959.
85. Zahed A. H., Mullah S.A. and Bashir M. D., Predict octane number for gasoline blends, *Hydrocarbon Processing*, N0.5, 85-87, 1993.
86. Muller A., New method produces accurate octane blending values, *Oil & Gas J.*, Vol.23, No.3, 80-90, 1992.
87. Murakami K. and Seborg D. E., Constrained parameter estimation with applications to blending operations, *Journal of Process Control*, Vol.10, 195-202, 2000.
88. Betchel Corp. PIMS (Process Industry Modeling System). User's manual, version 6.0. Houston. TX. 1993.

89. Booner and Moore Management Science. RPMS. (Refinery and Petrochemical Modeling System). A system description, Houston, TX, 1979.
90. Grossmann I.E., Van den Heever S.A. and Harjunkski I. "Discrete optimization methods and their role in the integration of planning and scheduling," AIChE Symposium Series No. 326, 98, 150, 2002.
91. Kelly J.F. "Formulating production planning models" Information Technology. 43, January 2004.
92. Moro L.F.L, Zanin A.C., Pinto J.M. "A planning model for refinery diesel production" Comp. Chem. Eng., 22, S1039-S1042, 1998.
93. Quesada I., Grossmann I.E. "Global optimization of bilinear process networks with multicomponents flows" Comp. Chem. Eng., 19, 1219-1242, 1995.
94. Harjunkski I, Maravelias CT, Bongers P, Castro PM, Engell S, Grossmann IE, et al. Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods. Comput Chem Eng. 2014; 62:161–93.
95. Mendez CA, Grossmann IE, Harjunkski I, Kabore P. A simultaneous optimization approach for off-line blending and scheduling of oil-refinery operations. Comput Chem Eng 2006; 30(4): 614–34.
96. Li J, Karimi I. Scheduling gasoline blending operations from recipe determination to shipping using unit slots. Ind Eng Chem Res 2011; 50(15): 9156–74.
97. Li J, Xiao X, Floudas CA. Integrated gasoline blending and order delivery operations: Part I. Short-term scheduling and global optimization for single and multiperiod operations. AIChE J 2016; 62(6): 2043–70.
98. Singh A, Forbes JF, Vermeer PJ, Woo SS. Model-based real-time optimization of automotive gasoline blending operations. J Process Contr 2000; 10(1): 43–58.
99. Joly M, Pinto JM. Mixed-integer programming techniques for the scheduling of fuel oil and asphalt production. Chem Eng Res Des 2003; 81(4): 427–47.

100. Floudas CA, Lin X. Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: A review. *Comput Chem Eng* 2004; 28(11): 2109–29.
101. Sundaramoorthy A, Maravelias CT. Computational study of network-based mixed-integer programming approaches for chemical production scheduling. *Ind Eng Chem Res* 2011; 50(9): 5023–40.
102. Maravelias CT. General framework and modeling approach classification for chemical production scheduling. *AIChE J* 2012; 58(6): 1812–28.
103. Jia Z, Ierapetritou M. Mixed-integer linear programming model for gasoline blending and distribution scheduling. *Ind Eng Chem Res* 2003; 42(4): 825–35.
104. Jia Z, Ierapetritou M. Efficient short-term scheduling of refinery operations based on a continuous time formulation. *Comput Chem Eng* 2004; 28(6–7): 1001–19.
105. Glismann K, Gruhn G. Short-term scheduling and recipe optimization of blending processes. *Comput Chem Eng* 2001; 25(4–6): 627–34.
106. Li J, Karimi I, Srinivasan R. Recipe determination and scheduling of gasoline blending operations. *AIChE J* 2010; 56(2): 441–65.
107. Castillo PAC, Mahalec V. Inventory pinch based, multiscale models for integrated planning and scheduling—Part II: Gasoline blend scheduling. *AIChE J* 2014; 60(7): 2475–97.
108. Castillo PAC, Mahalec V. Inventory pinch gasoline blend scheduling algorithm combining discrete- and continuous-time models. *Comput Chem Eng* 2016; 84: 611–26.
109. Castillo PAC, Mahalec V. Improved continuous-time model for gasoline blend scheduling. *Comput Chem Eng* 2016; 84: 627–46.
110. Lotero I, Trespalacios F, Grossmann IE, Papageorgiou DJ, Cheon MS. An MILP/MINLP decomposition method for the global optimization of a source based model of the multiperiod blending problem. *Comput Chem Eng* 2016; 87: 13–35.

111. Castro PM. New MINLP formulation for the multiperiod pooling problem. *AIChE J* 2015; 61(11): 3728–38.
112. Kolodziej SP, Grossmann IE, Furman KC, Sawaya NW. A discretization-based approach for the optimization of the multiperiod blend scheduling problem. *Comput Chem Eng* 2013; 53: 122–42.
113. Cerda J, Pautasso PC, Cafaro DC. A cost-effective model for the gasoline blend optimization problem. *AIChE J* 2016; 62(9): 3002–19.
114. Cerda J, Pautasso PC, Cafaro DC. Optimizing gasoline recipes and blending operations using nonlinear blend models. *Ind Eng Chem Res* 2016; 55(28): 7782–800.
115. Tawarmalani M, Sahinidis NV. A polyhedral branch-and-cut approach to global optimization. *Math Program* 2005; 103(2): 225–49.
116. Misener R, Floudas CA. ANTIGONE: Algorithms for continuous/integer global optimization of nonlinear equations. *J Glob Optim* 2014; 59(2): 503–26.
117. Boland N, Kalinowski T, Rigtering F. New multi-commodity flow formulations for the pooling problem. *J Glob Optim* 2016; 66(4): 669–710.
118. Sherali HD, Alameddine A. A new reformulation-linearization technique for bilinear programming problems. *J Glob Optim* 1992; 2(4): 379–410.
119. Ryoo HS, Sahinidis NV. A branch-and-reduce approach for global optimization. *J Glob Optim* 1996; 8(2): 107–38.
120. Smith EMB, Pantelides CC. Global optimization of nonconvex MINLPs. *Comput Chem Eng* 1997; 21(Suppl): S791–6.
121. Belotti P, Lee J, Liberti L, Margot F, Wachter A. Branching and bounds tightening techniques for non-convex MINLP. *Optim Methods Softw* 2009; 24(4–5): 597–634.
122. Achterberg T. SCIP: Solving constraint integer programs. *Math Program Comput* 2009; 1(1):1–41.
123. Castro PM. Spatial branch-and-bound algorithm for MIQCPs featuring multiparametric disaggregation. *Optim Methods Softw*. Epub 2016 Dec 13.

124. Castillo PC, Castro PM, Mahalec V. Global optimization algorithm for largescale refinery planning models with bilinear terms. *Ind Eng Chem Res* 2017; 56(2):530–48.
125. McCormick GP. Computability of global solutions to factorable nonconvex programs: Part I—Convex underestimating problems. *Math Program* 1976; 10(1):147–75.
126. Karuppiah R, Grossmann IE. Global optimization for the synthesis of integrated water systems in chemical processes. *Comput Chem Eng* 2006; 30(4):650–73.
127. Castro PM. Tightening piecewise McCormick relaxations for bilinear problems. *Comput Chem Eng* 2015; 72:300–11.
128. Misener R, Thompson JP, Floudas CA. APOGEE: Global optimization of standard, generalized, and extended pooling problems via linear and logarithmic partitioning schemes. *Comput Chem Eng* 2011; 35(5):876–92.
129. Kolodziej S, Castro PM, Grossmann IE. Global optimization of bilinear programs with a multiparametric disaggregation technique. *J Glob Optim* 2013; 57(4):1039–63.
130. Castro PM. Normalized multiparametric disaggregation: An efficient relaxation for mixed-integer bilinear problems. *J Glob Optim* 2016; 64(4):765–84.
131. Castro PM, Grossmann IE. Global optimal scheduling of crude oil blending operations with RTN continuous-time and multiparametric disaggregation. *Ind Eng Chem Res* 2014; 53(39):15127–45.
132. Castro PM. Source-based discrete and continuous-time formulations for the crude oil pooling problem. *Comput Chem Eng* 2016; 93:382–401.
133. Castillo PAC, Mahalec V, Kelly JD. Inventory pinch algorithm for gasoline blend planning. *AIChE J* 2013; 59(10):3748–66.

134. Healy WC, Maassen CW, Peterson RT. A new approach to blending octanes. In: Proceedings of the 24th Midyear Meeting of American Petroleum Institute's Division of Refining; 1959 May 27; New York, US; 1959. p. 132–136.
135. Castro PM, Grossmann IE. Optimality-based bound contraction with multiparametric disaggregation for the global optimization of mixed-integer bilinear problems. *J Glob Optim* 2014; 59(2):277–306.
136. Горбунов С.С. Программный комплекс оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения бензинов и мазутов / С.С. Горбунов, А.А. Алексанян, В.А. Костандян, А.Ф. Егоров // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-техн. достижения и передовой опыт. – 2019. – № 1. – С. 13–19.
137. Горбунов С.С. Учет нелинейности рецептур смешения топлив в программном комплексе оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения топлив / С.С. Горбунов, А.А. Алексанян, В.А. Костандян, А.Ф. Егоров // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-техн. достижения и передовой опыт. – 2019. – № 2. – С. 9–11.
138. Горбунов С.С. Комплексная система планирования и оптимизации рецептур смешения бензинов / С.С. Горбунов, А.В. Костандян, А.А. Алексанян, А.Ф. Егоров // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. – Т. 4. – С. 91–94.
139. Hines J.W., Garvey D. Process and equipment monitoring methodologies applied to sensor calibration monitoring // *Quality and Reliability Engineering*. – 2007. – Vol. 23, Issue 1. – P. 123–135. – DOI: 10.1002/qre.818.
140. Model-based real-time optimization of automotive gasoline blending operations / A. Singh, J.F. Forbes, P.J. Vermeer, S.S. Woo // *J. of Process Control*. – 2000. – Vol. 10, Issue 1. – P. 43–58. – DOI: 10.1016/S0959-1524(99)00037-2.

141. Muller A. New method produces accurate octane blending values // *Oil & Gas J.* – 1992. – Vol. 90, Issue 12. – P. 80–90.
142. Бураков М.В. Нейронные сети и нейроконтроллер: учеб. пособие. – СПб.: ГУАП, 2013. – 284 с.
143. Tian G.Y., Zhao Z.X., Baines R.W. A Fieldbus-based intelligent sensor // *Mechatronics.* – 2000. – Vol. 10, Issue 8. – P. 835–849. – DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00078-1.
144. Kramer M. A. Nonlinear principal component analysis using auto-associative neural networks // *AIChE J.* – 1991. – Vol. 37, Issue 2. – P. 233–243. – DOI: 10.1002/aic.690370209.
145. Горбунов С.С. Интеллектуальная система управления смещением бензинов в режиме реального времени с учетом параметрической неопределенности / С.С. Горбунов, А.В. Костандян, А.Ф. Егоров, В.В. Сидоров, А.А. Алексанян // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности* – 2021 – №7(576) – С. 28–36.
146. Костандян А.В. Интеллектуальная система мониторинга измерений в системах управления технологическими процессами / А.В. Костандян, С.С. Горбунов, А.Ф. Егоров, В.В. Сидоров // *Математические методы в технологиях и технике* – 2022 – №1 – С. 21–25 – включен в Международную систему библиографических ссылок CrossRef – DOI 10.52348/2712-8873_ММТТ_2022_1_21.
147. Костандян А.В. Мониторинг измерений в интеллектуальных системах управления технологическими процессами / А.В. Костандян, С.С. Горбунов, А.Ф. Егоров, В.В. Сидоров, В.А. Костандян // *Международная научно-практическая конференция «Информатизация инженерного образования (Infogino 2022): Сборник трудов международной научно-практической конференции* – 2022 – С. 41–45.
148. Горбунов С.С. Управление смещением бензинов в условиях параметрической неопределенности / С. С. Горбунов, А. В. Костандян, А.

Ф. Егоров, В. В. Сидоров. // XXXV Международная научная конференция Математические Методы в Технике и Технологиях ММТТ-35, ЯГТУ, ЯрГУ, Академия Пастухова, Ярославль, Россия.

149. Горбунов С.С. Система управления смешением бензинов в режиме реального времени в условиях параметрической неопределенности / С.С. Горбунов, А.В. Костандян, А.Ф. Егоров, В.В. Сидоров В.А. Костандян // Международная научно-практическая конференция «Информатизация инженерного образования (Inforino 2022): Сборник трудов международной научно-практической конференции – 2022 – С. 36–40.
150. Maxwell J.V. Data Book and Hydrocarbons. – N.Y.: Kriger Pub. Co, 1977. – P. 259.
151. Maples C.T. Petroleum Refinery Process Economics. – Tuls: PenWell, 1993. – P. 271.
152. Baird, C.T., IV, Guide to Petroleum Product Blending, HPI Consultants, Inc., Austin, 1989.
153. Костандян А.В., Горбунов С.С., Егоров А.Ф. Постановка задачи оптимального управления смешением бензинов. VII региональная научно-техническая конференция «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России» посвященный 100-летию со дня рождения В.Л. Березина, 19-21 сентября 2023 г., с. 315 - 316;
154. Горбунов С.С., Егоров А.Ф., Сидоров В.В. Дискретные и непрерывные модели многопериодного планирования производства бензинов. Международная научно-практическая конференция LXXI. Технические науки. Информатика, вычислительная техника и управление. Сборник статей по материалам LXXI международной научно-практической конференции № 3 (71) М.: Изд. «МЦНО», март 2024 г., с. 14–21.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ СМЕСЕЙ ТЕМНЫХ ПРОДУКТОВ ПО ИНДЕКСАМ ВЯЗКОСТИ КОМПОНЕНТОВ СМЕШЕНИЯ

В разработанной ПК ОПОР в модуле расчета рецептур мазутов, расчет вязкости основан на моделях расчета индекса вязкости индивидуальных компонентов смеси продукта.

В ПК ОПОР реализованы три алгоритма по индексу вязкостей компонентов смеси:

1. Метод, предложенный в [149, 150]

Индекс вязкости индивидуальных компонентов \mathcal{V}_i

$$I_i = a_0 - a_1 \lg \lg \mathcal{V}_i + 0,8 \quad (\text{A. 1})$$

где $a_0 = 41,10743$; $a_1 = 49,08258$

Индекс вязкости $I_{\text{см}}$

$$I_{\text{см}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i I_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (\text{A. 2})$$

где $\sum_{i=1}^n x_i$ - количество смеси (объем)

\mathcal{V}_i – вязкость i - го компонента, сст ($\text{мм}^2/\text{с}$);

x_i – кол. i - го компонента в единицах объема;

$$\mathcal{V}_{\text{см}} = 10n - 0,8 \quad (\text{A. 3})$$

где $n = 10^{(a_0 - I_{\text{см}})/a_1}$

В соответствии с этой методикой рассчитываются индексы вязкости индивидуальных компонентов, а затем индекс вязкости смеси (как аддитивную функцию от состава) по одной из известных соотношений индексов вязкости.

При расчете вязкости смесей, гудрон имеет большую вязкость (многократно) в отличие от других компонентов. Чтобы учесть и минимизировать погрешность, индекс вязкости гудрона определяется:

$$I_{\Gamma} = a_0 - a_1 \lg \lg (k_1 \mathcal{V}_1 + 0,8) \quad (\text{A. 4})$$

где

I_{Γ} – индекс вязкости гудрона;

$a_0 = 41,10743$; $a_1 = 49,08258$;

k_1 – корректирующий коэффициент, определяется по данным лаборатории измерений вязкости гудрона с различными разбавителями; ν_1 – вязкость гудрона, мм²/с;

$k_1 \nu_1$ – эквивалентная вязкость гудрона при разбавлении.

Эквивалентная вязкость гудрона можно рассчитать по вязкости разбавленного гудрона по формулам (1), (2), (3). Такой расчет проводят на некоторых НПЗ при разработке месячных планов.

2. Метод, используемый в качестве национального стандарта США

$$I_i = a_0 + a_1 \ln \ln(\nu_i + 0,8) \quad (\text{A.5.})$$

$$\nu_{\text{см}} = a_0 + \exp\left(\exp\left(\frac{I_{\text{см}} - a_0}{a_1}\right)\right) - 0,8 \quad (\text{A.6})$$

где

$a_0 = 10,975$; $a_1 = 14,535$

$I_{\text{см}}$ – индекс вязкости смеси, которая рассчитывается как аддитивная функция от состава компонентов смешения.

3. Метод, используемый в нефтяной компании Шеврон [151]

$$I_i = \frac{\ln(\nu_i)}{\ln(1000\nu_i)} \quad (\text{A.7})$$

$$\nu_{\text{см}} = \exp\left(\frac{I_{\text{см}} \ln(1000)}{(1 - I_{\text{см}})}\right) \quad (\text{A.8})$$

Результаты по трем вариантам расчета индексов вязкостей индивидуальных компонентов приведены в Приложении В.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПЛАНИРОВАНИЕ РЕЦЕПТУР СМЕШЕНИЯ ПО
ПАРТИЯМ**

Таблица Б1 - Ресурсы по компонентам

№№	Наименование компонентов	тонн
1	Изомеризат 143	450,00
2	Изомеризат 145	450,00
3	Бензин КАС 153	500,00
4	Стаб кат-т 35/11-600_279	1170,00
5	Стаб кат-т 35/11-600_281	1170,00
6	Изомеризат 142	450,00
7	Бензин КАС 154	500,00
8	Стаб кат-т 35/11-600_280	1170,00
9	Алкилат 165	2820,00

Таблица Б2 - Остаток топлива 1399 т в 358 резервуаре

Наименование компонентов	Показатели качества							
	RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м ³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматики, об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	Давление паров, кПа
Остаток	92,00	84,00	0,736	0,00050	35,00	0,33	3,94	73,60

Таблица Б3 - Расчет рецептуры производства бензина АІ92-К5

Наименование компонентов	Показатели качества							Давление паров, кПа
	RON, пункт	MON, пункт	Плотность, г/м ³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматика, об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	
Изомеризат 143	86,50	84,50	0,649	0,00030	0,00	0,00	0,00	105,00
Изомеризат 145	86,50	84,50	0,649	0,00030	0,00	0,00	0,00	105,00
Бензин КАС 153	85,00	78,20	0,710	0,00350	10,00	0,70	17,30	70,00
Стаб кат-т 35/11-600_279	96,20	85,60	0,788	0,00030	58,00	0,60	0,50	68,80
Стаб кат-т 35/11-600_281	96,20	85,60	0,788	0,00030	58,00	0,60	0,50	68,80
Смесь	92,24	84,23	0,744	0,00080	35,00	0,46	2,99	77,49

Продолжение таблицы Б3 - Расчет рецептуры производства бензина АІ92-К5

Наименование компонентов	Расход					
	тонн	м ³	тонн/ч	м ³ /ч	%, об.	%, масс.
Изомеризат 143	328,05	505,47	47,27	72,83	15,36	13,50
Изомеризат 145	243	374,42	35,01	53,95	11,38	10,00
Бензин КАС 153	364,5	513,38	52,52	73,97	15,61	15,00
Стаб кат-т 35/11-600_279	765,45	971,38	110,30	139,97	29,53	31,50
Стаб кат-т 35/11-600_281	729	925,13	105,04	133,30	28,12	30,00
Смесь	2430	3289,78			100,00	100,00

Таблица Б4 - Накоплено топлива 3829 т в 358 резервуаре

Наименование компонентов	Показатели качества							
	RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м ³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматики, об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	Давление паров, кПа
Смесь	92,15	84,15	0,741	0,00068	35,00	0,41	3,34	76,07

Таблица Б5 - Расчет рецептуры производства бензина AI92-K5

Наименование компонентов	Показатели качества							
	RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м ³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматики, об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	Давление паров, кПа
Изомеризат 143	88,10	86,10	0,656	0,00050	0,05	0,05	0,05	92,00
Изомеризат 145	85,00	79,00	0,710	0,00070	10,67	0,78	10,68	75,70
Бензин КАС 153	96,90	85,80	0,792	0,00050	61,36	0,20	0,46	63,40
Стаб кат-т 35/11-600_279	88,10	86,10	0,656	0,00050	0,05	0,05	0,05	92,00
Стаб кат-т 35/11-600_281	96,90	85,80	0,792	0,00050	61,36	0,20	0,46	63,40
Смесь	92,48	84,87	0,739	0,00050	32,93	0,24	1,91	73,83

продолжение табл. Б5

Наименование компонентов	Расход					
	тонн	м ³	тонн/ч	м ³ /ч	%, об.	%, масс.
Изомеризат 143	440,75	672,07	71,78	96,84	22,93	20,50
Изомеризат 145	322,5	454,36	52,52	65,47	15,50	15,00
Бензин КАС 153	967,5	1221,65	157,57	176,03	41,68	45,00
Стаб кат-т 35/11-600_279	204,25	311,45	33,27	44,88	10,63	9,50
Стаб кат-т 35/11-600_281	215	271,48	35,02	39,12	9,26	10,00
Смесь	2150	2931,01			100,00	100,00

Таблица Б6 - Накоплено топлива 8129 т в 358 резервуаре

Наименование компонентов	Показатели качества							Давление паров, кПа
	RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м ³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматики, об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	
Смесь	92,38	84,51	0,741	0,00060	34,45	0,32	2,62	74,61

Таблица Б7 - Расчет рецептуры производства бензина АІ92-К5

Наименование компонентов	Показатели качества							Давление паров, кПа
	RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м ³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматики, об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	
Изомеризат 143	86,50	84,50	0,649	0,00030	0,00	0,00	0,00	105,00
Бензин КАС 154	85,00	78,20	0,710	0,00350	10,00	0,70	17,30	70,00
Стаб кат-т 35/11-600_281	96,20	85,60	0,788	0,00030	58,00	0,60	0,50	68,80
Алкилат 165	96,00	92,00	0,695	0,00050	0,20	0,00	0,04	60,00
Смесь	92,95	86,21	0,727	0,00090	22,67	0,33	2,93	71,78

продолжение табл. Б7

Наименование компонентов	Расход					
	тонн	м ³	тонн/ч	м ³ /ч	%, об.	%, масс.
Изомеризат 143	120	184,90	52,40	26,64	16,72	15,00
Бензин КАС 154	124	174,65	54,15	25,17	15,79	15,50
Стаб кат-т 35/11-600_281	316	401,02	137,99	57,78	36,26	39,50
Алкилат 165	240	345,32	104,80	49,76	31,23	30,00
Смесь	800	1105,89			100,00	100,00

Таблица Б8 - Накоплено топлива 8929 т в 358 резервуаре

Наименование компонентов	Показатели качества							
	RON, пункт	MON, пункт	Плотность, т/м ³	Содержание серы, масс. %	Содержание ароматики, об. %	Содержание бензола, об. %	Содержание олефина, об. %	Давление паров, кПа
Смесь	92,43	84,66	0,740	0,00062	33,39	0,32	2,65	74,35

Таблица Б9 – Диаграмма Ганта по трем партиям



Таблица Б10 – Результаты расчета по партии 1

План 2430 т
 Производительность
 смесителя 350 т/час
 Прогноз времени
 смешения 6,94 час

Насос	Компоненты	тонн	Всего через насос, т	Расчетн. произв. насоса, т/ч	Длительность, ч	Время старта, чч:мм	Время выполнения, чч:мм	Время окончания, чч:мм
Н3	Изомеризат_1 43	328,05	935,55	134,75	2,43	8:22	2:26	10:48
Н3	Изомеризат_1 45	243,00			1,80	10:48	1:48	12:36
Н3	Бензин КАС 153	364,50			2,71	12:36	2:42	15:18
Н4	Стаб кат-т 35/11-600_279	765,45	1494,45	215,25	3,56	8:22	3:33	11:55
Н4	Стаб кат-т 35/11-600_281	729,00			3,39	11:55	3:23	15:18

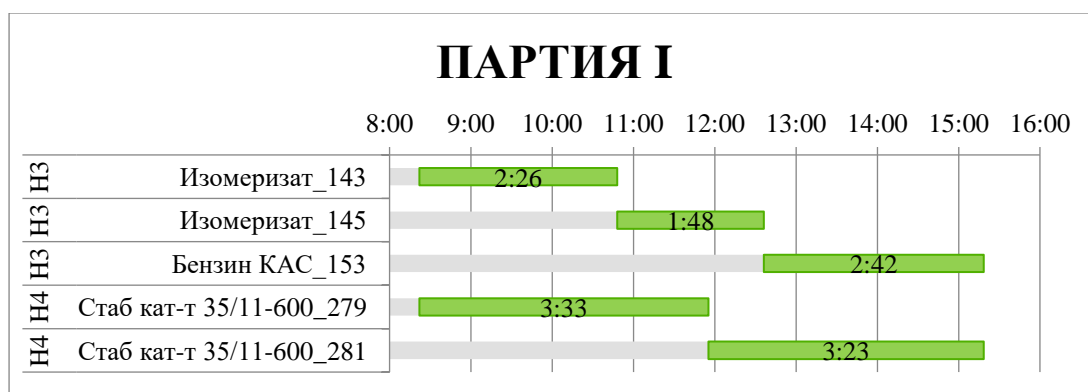


Таблица Б11 - Результаты расчета по партии 2

План 2430 т
 Производительность смесителя 350 т/час
 Прогноз времени смешения 6,94 час

Насос	Компоненты	тонн	Всего через насос, т	Расчетн. произв. насоса, т/ч	Длительность, ч	Время старта, чч:мм	Время выполнения, чч:мм	Время окончания, чч:мм
Н3	Изомеризат_1 43	440,75	967,50	157,5	2,80	15:18	2:47	18:06
Н3	Изомеризат_1 45	322,50			2,05	18:06	2:02	20:09
Н3	Бензин КАС 153	967,50	1182,50	192,5	5,03	15:18	5:01	20:19
Н4	Стаб кат-т 35/11-600_279	204,25			1,30	20:09	1:17	21:26
Н4	Стаб кат-т 35/11-600_281	215,00			1,12	20:19	1:07	21:26

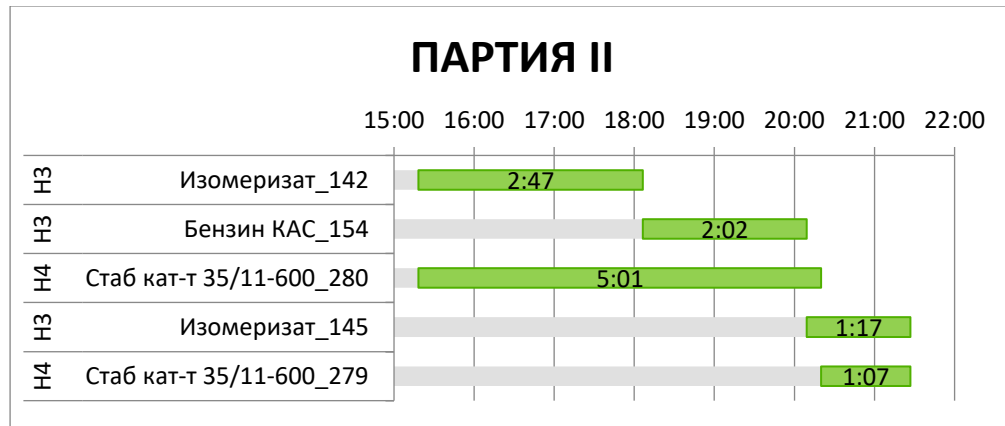
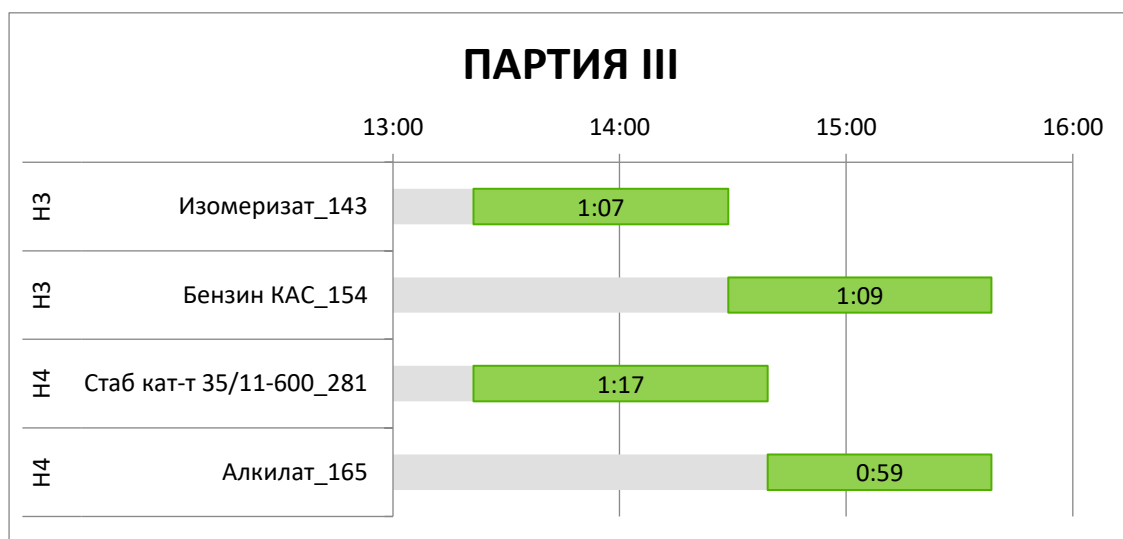


Таблица Б12 - Результаты расчета по партии 3

План 800 т
 Производительность смесителя 350 т/час
 Прогноз времени смешения 2,29 час

Насос	Компоненты	тонн	Всего через насос, т	Расчетн. произв. насоса, т/ч	Длительность, ч	Время старта, чч:мм	Время выполнения, чч:мм	Время окончания, чч:мм
Н3	Изомеризат_1 43	120,00	244,00	106,75	1,12	14:33	1:07	15:40
Н3	Бензин КАС_154	124,00			1,16	15:40	1:09	16:50
Н4	Стаб кат-т 35/11-600_281	316,00	556,00	243,25	1,30	14:33	1:17	15:51
Н4	Алкилат_165	240,00			0,99	15:51	0:59	16:50



**ПРИЛОЖЕНИЕ В. РАСЧЕТ РЕЦЕПТУРЫ
ПРОИЗВОДСТВА МАЗУТА М-100-7**

Вариант 1 (по вязкости)

Таблица В1 - Расчет рецептуры производства мазута М-100-7, вариант 1

№№	Наименование компонентов	Показатели качества		Содержание светлых, об. %	Плотность, кг/м ³
		Вязкость 100°С, мм ² /с	Т всп., °С, °С		
1	Компонент1	146,76	112,00	9,40	992,000
2	Компонент2	2,40	133,00	60,00	887,200
3	Компонент3	2,64	151,00	52,00	887,300
4	Компонент4	3,81	171,00	1,20	955,800
5	Компонент5	913,76	240,00	0,00	1007,200
	Смесь	49,61	205,90	9,72	977,760

Результат расчёта состава товарной смеси

№№	Наименование компонентов	Об. доля, %	Объем, м ³	Массовая доля, %	Масса, т	Цена, руб./т	Стоимость компонентов в смеси, руб.
1	Компонент1	1,97	64,52	2	64	15000	960000
2	Компонент2	15,4	504,96	14	448	16500	7392000
3	Компонент3	0	0	0	0	16500	0
4	Компонент4	24,5	803,52	24	768	16500	12672000
5	Компонент5	58,13	1906,27	60	1920	13500	25920000

Заданный

план, т

3200

Стоимость плановой смеси, руб.

46944000

Стоимость тонны смеси, руб.

14670

Вариант 2 (по вязкости)

Таблица В2 - Расчет рецептуры производства мазута М-100-7, вариант 2

№№	Наименование компонентов	Показатели качества		Содержание светлых, об. %	Плотность, кг/м ³
		Вязкость 100°С, мм ² /с	Т всп., °С, °С		
1	Компонент1	146,76	112,00	9,40	992,000
2	Компонент2	2,40	133,00	60,00	887,200
3	Компонент3	2,64	151,00	52,00	887,300
4	Компонент4	3,81	171,00	1,20	955,800
5	Компонент5	913,76	240,00	0,00	1007,200
	Смесь	49,05	212,60	9,49	981,148

Результат расчёта состава товарной смеси

№№	Наименование компонентов	Об. доля, %	Объем, м ³	Массовая доля, %	Масса, т	Цена, руб./т	Стоимость компонентов в смеси, руб.
1	Компонент1	0	0	0	0	15000	0
2	Компонент2	15,45	504,96	14	448	16500	7392000
3	Компонент3	0	0	0	0	16500	0
4	Компонент4	18,44	602,64	18	576	16500	9504000
5	Компонент5	66,11	2160,44	68	2176	13500	29376000

Заданный

план, т

3200

Стоимость плановой смеси, руб.

46272000

Стоимость

тонны смеси,

руб.

14460**Вариант 3 (по вязкости)**

Таблица В3 - Расчет рецептуры производства мазута М-100-7, вариант 3

№№	Наименование компонентов	Показатели качества			
		Вязкость 100°С, мм ² /с	Т вст., °С	Содержание светлых, об. %	Плотность, кг/м ³
1	Компонент1	146,76	112,00	9,40	992,000
2	Компонент2	2,40	133,00	60,00	887,200
3	Компонент3	2,64	151,00	52,00	887,300
4	Компонент4	3,81	171,00	1,20	955,800
5	Компонент5	913,76	240,00	0,00	1007,200
	Смесь	49,72	208,66	9,69	979,816

Результат расчёта состава товарной смеси

№№	Наименование компонентов	Об. доля, %	Объем, м ³	Массовая доля, %	Масса, т	Цена, руб./т	Стоимость компонентов в смеси, руб.
1	Компонент1	1,97	64,52	2	64	15000	960000
2	Компонент2	15,43	504,96	14	448	16500	7392000
3	Компонент3	0	0	0	0	16500	0
4	Компонент4	20,46	669,6	20	640	16500	10560000
5	Компонент5	62,14	2033,36	64	2048	13500	27648000

Заданный

план, т

3200

Стоимость плановой смеси, руб.

46560000

Стоимость тонны смеси, руб.

14550