

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

Головина Евгения Сергеевна

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ
ЦЕХА КОМПАУНДИРОВАНИЯ БЕНЗИНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА**

**2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация.
Организация производства**

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Хаймович Ирина Николаевна,
доктор технических наук,
профессор

Самара – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Анализ существующих моделей и методик организации производственной системы цехов компаундирования бензинов в нефтеперерабатывающем производстве.....	16
1.1 Основные принципы организации цеха компаундирования на нефтеперерабатывающем заводе.....	16
1.2 Принципы построения современного цифрового производства на нефтеперерабатывающем заводе.....	21
1.3 Обзор методик и автоматизированных систем оптимизации процесса смешения нефтепродуктов.....	25
1.4 Анализ систем имитационного моделирования для оптимизации планировки цеха и оптимизации загрузки оборудования в организации производства цехов.....	45
1.5 Выводы и рекомендации.....	53
2 Разработка подхода и метода структурного анализа и интеграции элементов производственной системы на основе показателя качества.....	54
2.1 Подход к созданию производственной системы цеха на основе подбора рецептуры компаундирования товарных бензинов.....	54
2.2 Метод структурного анализа и интеграции элементов производственной системы с учетом применения комплексного показателя качества смеси.....	67
2.3 Модель организации производственной системы цеха с оптимизацией насосного оборудования и изменением планировки.....	70

2.4 Выводы и рекомендации	80
3 Автоматизация концептуального управленческого решения для оптимизации работы цеха	82
3.1 Разработка алгоритма для принятия решения по оптимизации компонентного состава в рамках технологии производства автомобильного бензина	82
3.2 Разработка алгоритма для принятия концептуального управленческого решения по оптимизации загрузки оборудования.....	95
3.3 Выводы и рекомендации	100
4 Методические подходы к реализации имитационной модели на конкретных производствах.....	101
4.1 Методические подходы к реализации имитационной модели.....	101
4.2 Реализация имитационной модели на конкретном производстве	124
4.3 Выводы и рекомендации	126
Заключение	127
Список литературы	130
Приложение А. Акт внедрения.....	145

ВВЕДЕНИЕ

Постоянные ужесточения требований к качеству товарных бензинов, проводимые последние несколько десятилетий, стимулируют нефтеперерабатывающую промышленность к корректировке, как технологических процессов производства нефтепродуктов, так и процессов компаундирования товарных топлив. Наибольшие изменения в требованиях к качеству наблюдаются для автомобильных бензинов – в части уменьшения содержания серы и ароматических углеводородов. Таким образом, перед нефтеперерабатывающими заводами (НПЗ) стоит задача по организации производства автомобильных топлив требуемого качества с учетом сохранения экономической эффективности производства.

Товарная продукция, вырабатываемая на нефтеперерабатывающем заводе, подразделяется на две группы: продукция, производимая непосредственно на технологических установках, и продукция, приготавливаемая из различных компонентов. Значительное количество крупнотоннажных товарных продуктов, в том числе автомобильный бензин, получают на НПЗ смешением (компаундированием) из компонентов, вырабатываемых на различных технологических установках предприятия и имеющих различные качественные характеристики и себестоимость. Процесс компаундирования моторных топлив является важной завершающей стадией всей технологической цепочки производства нефтеперерабатывающего завода. На отечественных заводах в цехах компаундирования проводятся работы по модернизации оборудования для эффективного использования ресурсов предприятия.

Соответственно, отмечается потребность в оптимизации цехов компаундирования товарных топлив на отечественных нефтеперерабатывающих

заводах, которая позволила бы одновременно обеспечивать необходимое качество товарной продукции и экономическую эффективность производства.

Расчет качественных характеристик товарных бензинов, получаемых компаундированием компонентов, вырабатываемых на технологических установках НПЗ, затруднен тем, что основным показателем качества – октановое число, определяемое по исследовательскому или по моторному методам, – является не аддитивным свойством в связи с наличием межмолекулярных связей между углеводородами, входящими в состав бензина [97]. Это не позволяет получать точную оценку октанового числа смеси при наличии фактических лабораторно замеренных октановых чисел компонентов смешения. Данная проблема может быть решена применением специализированных программных продуктов, либо основанных на расчете точного индивидуального углеводородного состава компонентов смешения [95], что является длительным, трудозатратным и малоприменимым в условиях непрерывно действующего производства, либо основанных на расчете качественных характеристик с различными методами осреднения значений и применением поправочных коэффициентов. Известен ряд информационных систем, производящих расчет рецептуры смешения бензинов на основании имеющихся данных производственной цепочки НПЗ, большинство из которых иностранного производства, применение которых в условиях современной действительности затруднено [59, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 84, 88], но есть и отечественные информационные системы [90, 91, 93, 94, 97]. Большинство информационных систем решает в первую очередь задачу планирования графика смешения нефтепродуктов и вовлечения имеющихся объемов нефтепродуктов в процесс компаундирования, составление оптимальной рецептуры компаундирования является побочной решаемой задачей. В случае проведения подбора рецептуры выполняется поиск наиболее экономически целесообразного варианта рецепта, удовлетворяющего минимальным требованиям ГОСТ к качеству продукции, что не всегда дает возможность достичь оптимального состава смеси с точки зрения качества выпускаемой продукции.

Соответственно, представляется необходимой разработкой комплексного показателя качества компаундирования бензина, применение которого будет целесообразно при математическом решении задачи оптимизации процесса поиска наиболее эффективного рецепта компаундирования. К тому же, на основании комплексного показателя качества требуется разработка отечественного программного продукта, который позволит оптимизировать рецептуру компаундирования бензинов с учетом как физико-химических, так и экономических показателей.

Цех компаундирования бензинов представляет собой резервуарный парк, куда поступают компоненты компаундирования, производимые на технологических установках, либо приобретаемые дополнительно; парк резервуаров готовой продукции и операторную с размещением персонала. Рассматривая сам производственный процесс компаундирования бензинов следует отметить, что на большинстве отечественных НПЗ применяется метод циркуляционного смешения, заключающийся в смешении компонентов в смесительных резервуарах, перемешивание продукции в которых обеспечивается за счет многократного перекачивания по схеме «резервуар-насос-резервуар» до тех пор, пока не будет получена однородная по составу смесь. В функционал операторов входит запуск и остановка насосного оборудования, смесительного оборудования, контроль смешиваемых объемов, контроль соответствия объемов рецептуре смешения, выдаваемой технологом. Итоговые показатели качества полученной продукции при циркуляционном методе смешения становятся известны только после проведения лабораторного контроля по результату завершения всего процесса смешения, после чего, в случае не достижения требуемых показателей, производится добавление компонентов в смесительный резервуар.

Метод непосредственного или онлайн смешения заключается в смешении продукции на станции смешения с применением отдельного смесителя и поточных датчиков качества, что позволяет контролировать качественные параметры смеси непосредственно в процессе компаундирования. Кроме

возможности постоянного контроля качества, станции смешения позволяют оптимизировать производственный процесс, снижая трудозатраты на управление в ручном режиме и сводя к минимуму влияние человеческого фактора. Для корректной и эффективной работы цеха компаундирования с применением онлайн смешения необходимо выполнить оптимизацию конфигурации или нагрузки насосного оборудования и иного оборудования, обеспечивающего оптимальную работу цеха. Стандартным методом при решении задачи оптимизации работы цеха является применение имитационного моделирования. Анализ программ имитационного моделирования [100, 101, 102, 103, 104, 106, 110, 111, 112] показал, что для систем характерен набор стандартных функций: модели создаются при помощи графического режима работы через потоковые диаграммы, стандартные шаблоны блоков; пользователю предоставляются различные меню и библиотеки элементов; имеются интерфейсы для соединения с базами данных, средства для обработки статистики на входе и выходе модели. В случае, когда выполняется моделирование производственных цехов, модель позволяет определить динамику загрузки оборудования и работников, длительность производственного цикла, величину незавершенного производства, время проведения цикла операций и количество рабочих, порядок запуска изделий в производство, величину партии деталей. Возможно прогнозирование аварийных ситуаций. Однако особенности производственного процесса цеха компаундирования бензинов, при наличии необходимости одновременного планирования процесса смешения с учетом показателей качества получаемой смеси и настройки работы насосного оборудования, не позволяют провести имитационное моделирование имеющимися программными средствами в нужном объеме.

Таким образом, в настоящее время актуальна задача создания комплексного интегрированного программного продукта, направленного на решение задачи оптимизации цеха компаундирования бензинов с возможностью поиска рецептуры смешения на основе целевого комплексного показателя качества.

В своей работе автор опирается на труды отечественных и зарубежных ученых [1, 12, 13, 14, 26, 35, 39, 48, 49, 50, 53, 55, 56, 67, 69, 70, 72, 76, 84, 112, 116, 125]:

- в области системного проектирования и моделирования информационно-управляющих систем предприятий – Норенков И.П., Хаймович И.Н., Castillo-Castillo P. A., Mahalec V., Singh A., Лисицын Н.В., Трахтенгерц Э.А., Капустин Н.М.;

- в области проектирования и моделирования систем управления качеством на предприятиях – Астапов В.Н., Алаторцев Е.И., Аносов А.А., Капустин В.М., Смышляева Ю.А., Дрогов С.В., Сусарев С.В.

Актуальность темы исследования. Современные тенденции развития нефтеперерабатывающих предприятий тесно связаны с необходимостью постоянной оптимизации производства и повышения экономической эффективности. Ужесточение контроля качества товарных нефтепродуктов диктует необходимость проведения оптимизационных работ на нефтеперерабатывающих предприятиях. Автомобильный бензин является одним из основных товарных продуктов, выпускаемых нефтеперерабатывающим заводом (НПЗ), и получается путем компаундирования компонентов, произведенных на технологических установках предприятия, поэтому цех компаундирования бензинов должен быть также включен в процесс оптимизации. Процесс компаундирования бензинов осложняется тем, что подбор рецептуры смешения (объемы вовлекаемых в смешение компонентов) для получения смеси, соответствующей требованиям ГОСТ и ТУ, связан со значительным числом контролируемых показателей качества и их неаддитивностью.

На рынке современных информационных систем предлагаются программные продукты, позволяющие выполнить расчеты календарных графиков компаундирования и первичных рецептур смешения, однако в их составе отсутствует в явном виде такое понятие как комплексный показатель качества и возможность оптимизации качественных показателей смесей в комплексе с экономическими показателями предприятия. В основном, производителями таких

систем являются иностранные компании. Стандартом для оптимизации организации производственных цехов является применение имитационного моделирования, которое можно провести при помощи программных продуктов как отечественного, так и иностранного производства. Однако в силу специфики цеха компаундирования бензинов имитационное моделирование стандартными средствами не дает должных результатов. Дополнительно стоит отметить, что в условиях неблагоприятной конъюнктуры применение зарубежного оборудования и программных средств становится невозможным.

Таким образом, создание моделей и методик проектирования, функционирования и математического моделирования оптимальных организационно-технических структур цехов с адаптацией к условиям использования комплексного показателя качества становится актуальной научно-технической темой исследования.

Степень разработанности темы. В настоящее время процесс организационного управления процессом компаундирования бензинов на уровне цеха изучен и математически формализован недостаточно полно. В первую очередь это связано с недостаточностью формализации процесса функционирования цеха как объекта управления в разрезе достижения стандартов качества продукции. Существующие в настоящее время подходы к данной проблеме носят общий характер.

Применяемые на сегодняшний день стандартные модели управления цехами компаундирования регламентированы информационной моделью ERP, охватывающей все нефтеперерабатывающее предприятие, при этом в моделях отсутствует формализация производственных и технологических процессов в цехе, направленных на оптимизацию качества выпускаемой продукции. Эти ограничения не позволяют сформировать модели организационного управления адекватными современным требованиям к производственному процессу компаундирования.

Большой вклад в теорию организации и оптимизации процессов производственных систем в промышленности и нефтепереработке внесли Аносов

А.А., Дозорцев В.М., Алаторцев Е.И., Хаймович И.Н., Мусаев А.А., Лисицын Н.В., Li J., DeWitt C. W., Mendez C.A., Castillo-Castillo P.A., Тархтенгерц Э.А. и др. Вопросам информационно-измерительных систем для контроля качества топлив посвящены работы Астапова В.Н., Скворцова Б.В., Арвикар К.Дж., Астром Т., Сусарева С.В., Дрогова С.В., Бочарова В.Н., Ardila J.A., Djukanovic M., Голованова Ю.В., Пискунова И.В. и других ученых. Исследованиям математического аппарата в области прогнозирования качества компаундированных смесей посвящены работы Горбунова С.С., Сизикова А.П., Кувыкина В.И., Иванчиной Э.Д., Смышляевой Ю.А., Daly Sh.R., Voigt M., Cooper J.B., Flecher Ph.E., Welch S.A., Singh A. и др.

Наиболее эффективные решения для управления цехом компаундирования с контролем качества продукции предложены разработчиками программного обеспечения AspenTech, Honeywell, AVEVA Group plc, ABB, Haverly Systems, ООО «МЦЭ-Инжиниринг».

Целью исследования является повышение результативности производственных процессов в цехе компаундирования бензинов за счет математического моделирования организации производства в цехе с учетом комплексного показателя качества и имитационного моделирования принимаемых технологических решений.

Достижение поставленной цели предполагает формулировку и последовательное решение **следующих задач**:

- проведение анализа существующих моделей и методик организации производственных систем в цехе, которые нашли применение в производстве в процессах компаундирования бензинов на предприятиях нефтеперерабатывающего профиля, выявление основных проблем организации данных процессов на цеховом уровне;

- обоснование подхода и разработка методики структурного анализа и интеграции технологических, производственных и информационных элементов производственной системы (ПС) с учетом комплексного показателя качества для

создания формализованной модели организации производственного процесса компаундирования бензинов;

– формирование модели организации производственных процессов цеха компаундирования бензинов для их автоматизации в процессе получения продукции, уменьшения задержки во времени для контроля качества смеси и уменьшения количества потерь времени производства по «узким» местам на предприятиях нефтеперерабатывающего профиля;

– формирование концептуального управленческого решения, позволяющего адекватно учитывать все параметры производственной системы для ликвидации потерь качества выпускаемой продукции путем выявления всех формализованных параметров технологического процесса производства бензинов на уровне цеха;

– разработка имитационной модели рациональной работы цеха по принятому управленческому решению в процессах компаундирования бензинов на предприятиях нефтеперерабатывающего профиля;

– проведение апробации разработанной имитационной и оптимизационной модели для действующего производства.

Объект исследования: организация производственной системы цеха с учетом контроля и оптимизации качества производимой продукции.

Предмет исследования: механизмы формирования и использования цеховых производственных ресурсов.

Область исследования соответствует п. 5 «Методы оценки качества объектов, стандартизации и процессов управления качеством»; п. 9 «Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов»; п. 13 «Научные основы цифровых, автоматизированных комплексных систем управления производством и качеством работ на базе технических регламентов и стандартов» паспорта специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

Методы и подходы исследования. Решение поставленных задач проведено на основе современных научно-теоретических и практических подходов к организации процессов производственных систем в промышленности, теории систем, процессного подхода к управлению, принципов управления качеством, методологии моделирования производственных процессов. Обработка данных, получаемых в результате математического и имитационного моделирования, производилась с использованием математического аппарата программного продукта MS Excel.

Научная новизна диссертационной работы определяется следующими положениями:

- обоснован подход к созданию формализованной модели организации производственных процессов в цехе на основе подбора рецептуры, отличающийся тем, что впервые формализовано решена задача интеграции структур технологических, организационных и информационных процессов на основе октанового числа и плотности смеси в процессах компаундирования бензинов на предприятиях нефтепереработки (п. 5 паспорта специальности 2.5.22);

- разработана методика структурного моделирования материальных и информационных ресурсов в цехе, отличающаяся тем, что впервые математическая модель производственного процесса цеха, основывающаяся на комплексном показателе качества процесса компаундирования бензинов, отражает особенности отклонений при взаимодействии ресурсов и качественно (октановое число, плотность) и количественно (объемы) (п. 9 паспорта специальности 2.5.22);

- разработан математический аппарат организации ПС в цехе, в основе которого лежит оптимизация конфигурации насосного оборудования и планировки цеха, позволяющая реализовать комплексное управленческое решение по рационализации производственных факторов в явной форме, отображающее все воздействия при изменении технологического процесса в цехе (п. 13 паспорта специальности 2.5.22);

- разработана имитационная модель управленческого решения, позволяющая повысить результативность технологических процессов в процессах компаундирования бензинов на предприятиях нефтеперерабатывающего профиля на цеховом уровне за счет уменьшения потребления ресурсов, включая дорогостоящие компоненты смещения и электроэнергию, и, как следствие, сокращение себестоимости продукции без потери качества продукции в рамках информационно-имитационной модели (п. 13 паспорта специальности 2.5.22).

Теоретическая значимость работы. Предложен подход к созданию формализованной модели организации производственных процессов в цехе на основе подбора рецептуры, отличающийся тем, что впервые формализовано решена задача интеграции структур процессов на основе октанового числа и плотности смеси в процессах компаундирования бензинов на предприятиях нефтепереработки. Разработана методика структурного моделирования материальных и информационных ресурсов в цехе, отличающаяся тем, что впервые математическая модель качественно и количественно отражает особенности отклонений при взаимодействии ресурсов. Разработан математический аппарат организации производственных систем в цехе, позволяющий оптимизировать подбор насосного оборудования и планировку цеха, что дает возможность реализовать комплексное управленческое решение по рационализации производственных факторов. Разработана имитационная модель управленческого решения, а также программное обеспечение, позволяющее повысить результативность технологических процессов компаундирования бензинов.

Практическая значимость работы определяется реализованной оптимизацией участка компаундирования автомобильных бензинов товарно-сырьевого цеха на предприятии АО «Куйбышевский нефтеперерабатывающий завод», а так же возможностью применения разработанных моделей и методики на отечественных нефтеперерабатывающих предприятиях, имеющих автомобильные бензины в корзине выпускаемой продукции.

Практические решения, разработанные автором, зарегистрированы в виде программы для ЭВМ «Имитационная модель цеха компаундирования бензина» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022680985 от 09.11.2022 г.).

Положения, выносимые на защиту:

1. Формализованный подход к построению интегральной модели производственной системы (ПС) с последовательно-параллельной организацией на основе подбора рецептуры смеси в процессах компаундирования бензинов на уровне цеха.

2. Математическая модель организации ПС с учетом комплексного показателя качества, обеспечивающая максимальную загрузку оборудования на каждой операции.

3. Методика структурного анализа и интеграции технологических процессов и элементов ПС в условиях нефтепереработки на основе объединения качественных (октановое число, плотность) и количественных (объем) характеристик.

4. Модель организации производственных процессов в цехе с учетом «узких» мест, основанная на моделировании работы элементов ПС с учетом оптимизации конфигурации насосного оборудования и планировки цеха.

5. Алгоритм организации рациональной работы цеха компаундирования бензинов с учетом комплексного показателя качества смеси и ликвидации «узких» мест на основе прогнозного концептуального управленческого решения.

Степень достоверности и обоснованности научных положений диссертационной работы обусловлена корректным применением методов теории организационного управления (производственного менеджмента), методов структурного моделирования, методов параметрического анализа показателей промышленных предприятий. Научные результаты не противоречат известным результатам, опубликованным в специальной литературе.

Достоверность предложенных решений подтверждается также положительным экономическим эффектом от их внедрения в систему управления

цехом компаундирования товарных топлив АО «Куйбышевский нефтеперерабатывающий завод».

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций», 21-23 апреля 2020 года, г. Самара; Научно-практической конференции «Актуальные задачи нефтегазохимического комплекса», 19-20 ноября 2020 года, г. Москва; 7-й ежегодной конференции «Даунстрим Россия 2021», 2-4 марта 2021 года, г. Краснодар; III Международной конференции «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» («International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies» ICMSIT-III-2022), 3-5 марта 2022 года, г. Санкт-Петербург.

Публикации. По теме исследования опубликовано 14 научных работ, из них 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России; 5 статей в научных изданиях, индексируемых базой Scopus; 6 статей в материалах других журналов и научно-практических конференций; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (авторский вклад объемом 1,61 п.л.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы – 146 страниц, включая 64 рисунка, 10 таблиц, 1 приложение, список литературы из 133 наименований.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДИК ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ЦЕХОВ КОМПАУНДИРОВАНИЯ БЕНЗИНОВ В НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ПРОИЗВОДСТВЕ

1.1 Основные принципы организации цеха компаундирования на нефтеперерабатывающем заводе

Товарная продукция, вырабатываемая на нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ), подразделяется на две группы: продукция, производимая непосредственно на технологических установках, и продукция, приготавливаемая из различных компонентов. Значительное количество крупнотоннажных товарных продуктов, в том числе автомобильный бензин, получают на НПЗ смешением (компаундированием) из компонентов, вырабатываемых на различных технологических установках предприятия и имеющих различные качественные характеристики и себестоимость. Процесс компаундирования моторных топлив является важной завершающей стадией всей технологической цепочки производства нефтеперерабатывающего завода [1].

Различают два основных метода компаундирования – циркуляционный метод (приготовление производится в смесительных резервуарах и смешение в аппаратах с перемешивающими устройствами) и метод непосредственного смешения. Циркуляционный метод заключается в том, что компоненты товарных продуктов с технологических установок НПЗ поступают в отдельные резервуары парков смешения, анализируются, после чего передаются насосами в смесительный резервуар. Приготовленный в смесительном резервуаре продукт забирают специальными насосами и многократно перекачивают по смехе «резервуар – насос – резервуар» до тех пор, пока не будет получена однородная

по составу смесь, показатели которой соответствуют требованиям, предъявляемым к готовому продукту [1]. Циркуляционный метод имеет ряд недостатков, однако остается одним из наиболее применяемых на российских НПЗ.

На большинстве российских НПЗ в настоящее время применяется метод циркуляционного смешения, поскольку многие предприятия были построены более 30 лет назад и метод поточного смешения в те времена не применялся. Замена метода смешения в цехе компаундирования товарных бензинов возможна только с одновременной заменой как материальной базы, так и самой организации производства в целом.

В должностные обязанности оператора цеха компаундирования товарных бензинов при реализации метода циркуляционного смешения входят следующие операции:

- контроль процесса наполнения резервуаров компонентного парка (наполнение резервуаров продукцией, поступающей с технологических установок);
- корректировка данных на консоли управления смешением в соответствии с рецептурой смешения;
- включение насосов для перекачки компонентов смешения в резервуар смешения на консоли управления;
- открытие задвижек непосредственно на линии перекачки компонентов в резервуар смешения с фактическим перемещением оператора по цеху компаундирования;
- контроль наполнения резервуара смешения;
- закрытие задвижек непосредственно на линии перекачки компонентов в резервуар смешения с фактическим перемещением по цеху;
- выключение насосов для перекачки компонентов смешения на консоли управления;
- составление отчетности;

- проведение отбора проб нефтепродуктов совместно с работником центральной заводской лаборатории;
- корректировка рецептуры смешения для достижения оптимального значения качества продукции совместно с инженером-технологом;
- выполнение операций, связанных с обеспечением защиты резервуаров от воды, грязи, включая замеры уровня нефтепродуктов и подтоварной воды в резервуарах;
- участие в текущих и капитальных ремонтах оборудования, подготовка оборудования и коммуникаций к ремонту.

В случае применения устаревшего оборудования в цехе, значительный объем времени работы оператора, при применении метода циркуляционного смешения, занимает перемещение по цеху для ручного включения процесса перекачки компонентов, при этом компонентные резервуары могут быть значительно удалены друг от друга (более 500 метров), в том числе требует времени и внимания процесс визуального контроля показателей взлива (объемов наполнения резервуаров) на консоли оператора. О качестве полученного товарного бензина оператор узнает только после проведения контрольной пробы по результату завершения процесса смешения, после чего будут приняты решения о дополнении резервуара компонентами, либо о завершении процесса компаундирования. Как правило, работа операторов при такой организации процесса минимально автоматизирована. Как правило, отсутствуют программные продукты и системы управления, способствующие оптимизации работы цеха компаундирования и контролю качества продукции.

Метод непосредственного смешения заключается в одновременном смешении товарных потоков на автоматической станции смешения, при этом устанавливается задание счетчикам на подачу определенных количеств компонентов (рецептуры), а характеристики товарных продуктов постоянно контролируются с помощью поточных анализаторов качества, за счет чего

возможно поддержание показателей качества на уровне нормативных требований. Приготовленный продукт передается в товарный парк.

Технологический процесс поточного компаундирования топлив на нефтеперерабатывающем заводе схематично приведен на рисунке 1.1.

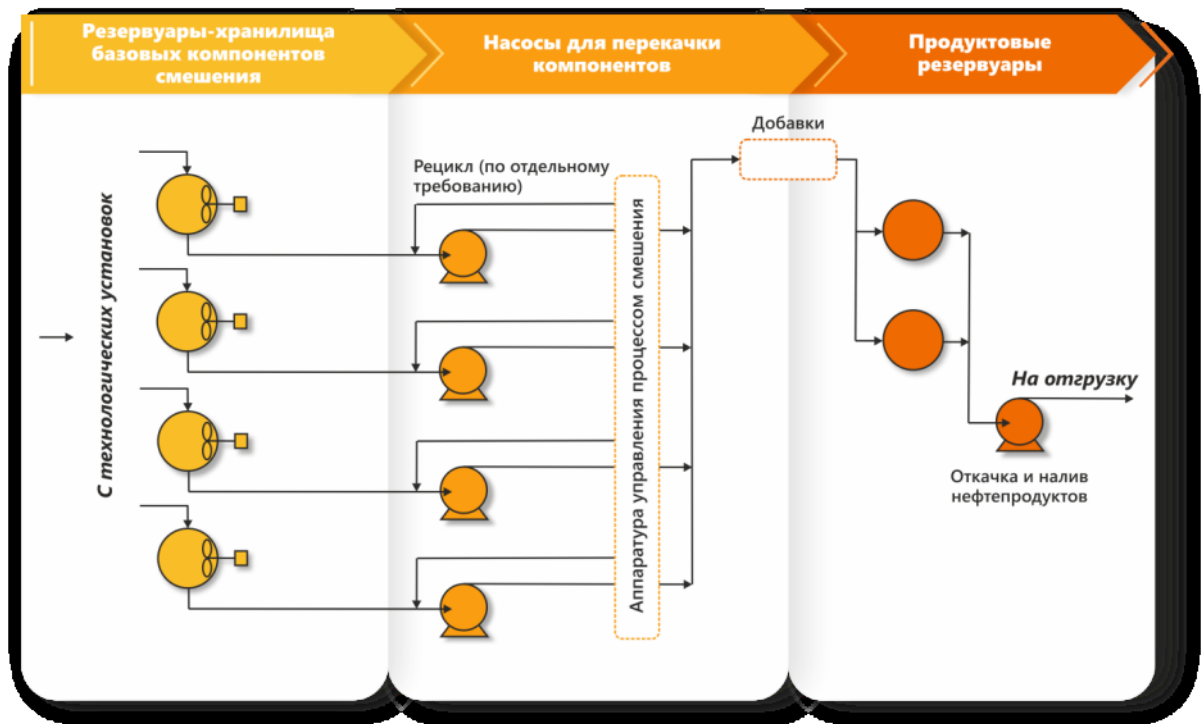


Рисунок 1.1 – Схема непрерывного поточного смешения нефтепродуктов

Оптимизация работы нефтеперерабатывающего предприятия в целом, включая систему оптимизационного смешения товарной продукции, является одним из ключевых этапов построения современного цифрового нефтеперерабатывающего завода. Для реализации схемы непрерывного поточного смешения необходима комплексная оптимизация конфигурации материальной базы цеха: требуется установка автоматической станции смешения, оснащение автоматизированными удаленно управляемыми задвижками, оснащение датчиками скорости или объема потока, установка поточных пробоотборников и поточных анализаторов объемов и качества продукции для возможностей проведения большего числа замеров в единицу времени. Поточные анализаторы

не могут в полном объеме заменить лабораторный контроль, однако именно их применение дает возможность оптимизации процесса.

Проблема увеличения частоты проведения лабораторных замеров сопряжена с необходимостью применения специализированного дорогостоящего оборудования и реагентов, к тому же проведение лабораторного замера октанового числа по исследовательскому методу занимает значительное время (до 30 минут на один образец). Поточные анализаторы позволяют значительно сократить время измерения, доводя частоту измерений до 1 раза в минуту. Значительная оптимизация достигается за счет применения методов хроматографии или спектрального анализа. Основой для создания поточных анализаторов, позволяющих определять октановое число смеси, являются методы инфракрасного спектрального анализа (ИК на различных участках спектра, в том числе на основе преобразования Фурье [2, 3, 4]), ядерно-магнитного резонанса [5, 6] или рамановской спектроскопии [7, 8, 9, 10, 11], встречаются оптико-акустические методы [12] и методы, основанные на электродинамических характеристиках углеводородных топлив [13, 14], методы на основании работы параметрического квантового генератора [15].

Значительный пласт работ посвящен разработке и применению математического аппарата для возможности обработки получаемых на стадии спектроскопии данных [16, 17, 18]. Корреляции между лабораторными исследованиями октанового числа и спектрами осуществляются авторами методами проекции на латентные структуры [19], либо составлением корреляционных моделей методами главных компонент [20, 21] и опорных векторов [22]. Проводятся исследования возможности применения нейронных сетей для идентификации компонентов бензина с определением его состава и детонационной стойкости [23, 24, 25]. На основании научных трудов проводится разработка экспериментальных и промышленных анализаторных комплексов, применение которых делает возможным внедрение автоматизированных станций смешения нефтепродуктов на нефтеперерабатывающих предприятиях [21, 31, 32, 33, 34]. Промышленное внедрение разработанных математических моделей в

деятельность предприятий показывает высокую сходимость при последующем лабораторном контроле, что дает возможность нефтеперерабатывающим предприятиям повышать экономическую эффективность [26, 27, 28, 29, 30].

Одновременно с дополнением материальной базы необходима установка автоматизированной системы управления технологическим процессом в сочетании с системами автоматизированной оптимизации смешения нефтепродуктов [35]. Весь указанный комплекс работ позволяет перейти к цифровому двойнику цеха компаундирования, что является важным шагом к построению цифрового завода [36].

Ввиду технологической сложности и важности для производства, поточный процесс компаундирования требует постоянного автоматизированного контроля, а также контроля со стороны оператора процесса. В связи с этим необходимо применение автоматизированных систем, позволяющих контролировать процесс в режиме реального времени и давать возможность оператору вмешаться, сообщать о критических неисправностях, отклонениях от норм и т.д.

В случае применения указанного выше комплекса по оптимизации производства товарной продукции, функции оператора могут быть смещены в сторону контроля непосредственно качества производимой продукции, минимизировав перемещения сотрудников по цеху и тем самым снижая травмоопасность работ.

1.2 Принципы построения современного цифрового производства на нефтеперерабатывающем заводе

Задача повышения результативности работы нефтеперерабатывающего завода может быть решена путем формирования имитационной модели или цифрового двойника предприятия, включающего в себя информацию о взаимодействии отдельных технологических установок и цехов, расстановке и свойствах оборудования, а также данные, поступающие от интеллектуальных систем управления технологическими процессами, процессами распределения и

планирования. Собственно система управления представляет собой программно-аппаратный комплекс, управляющий в зависимости от ступени (рисунок 1.2), начиная от регуляторов параметров единичного оборудования, переходя к системам усовершенствованного управления технологическим процессом и заканчивая календарным планированием производства [37, 38, 39]. Для систем управления характерна следующая иерархия, отраженная на рисунке 1.3 [40, 126]:

1. Уровень базового регулирования – регулирующие клапаны, датчики и прочее, являющиеся источниками собственно технологических данных.
2. Системы управления и информационные системы, на которых базируется все последующие системы – комплекс из распределенной системы управления (PCY) и автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) [41, 42]. Отсутствие данного уровня делает невозможным применение верхнеуровневых систем автоматизации.
3. Для целей оптимизации и повышения эффективности отдельных процессов нефтепереработки и нефтехимии применяются системы усовершенствованного управления технологическим процессом (СУУТП) или системы глобальной динамической оптимизации (СГДО), являющиеся развитием СУУТП с возможностью управления пулом технологических установок [43, 44, 45].
4. Верхним уровнем управления являются исполнительная система управления производством (MES – Manufacturing Execution System) и система планирования ресурсов предприятия (ERP - Enterprise Resource Planning). Данные системы осуществляют интеграцию производства, управление активами, распределение ресурсов [46].



Рисунок 1.2 – Схематическая иерархия управления нефтеперерабатывающим производством

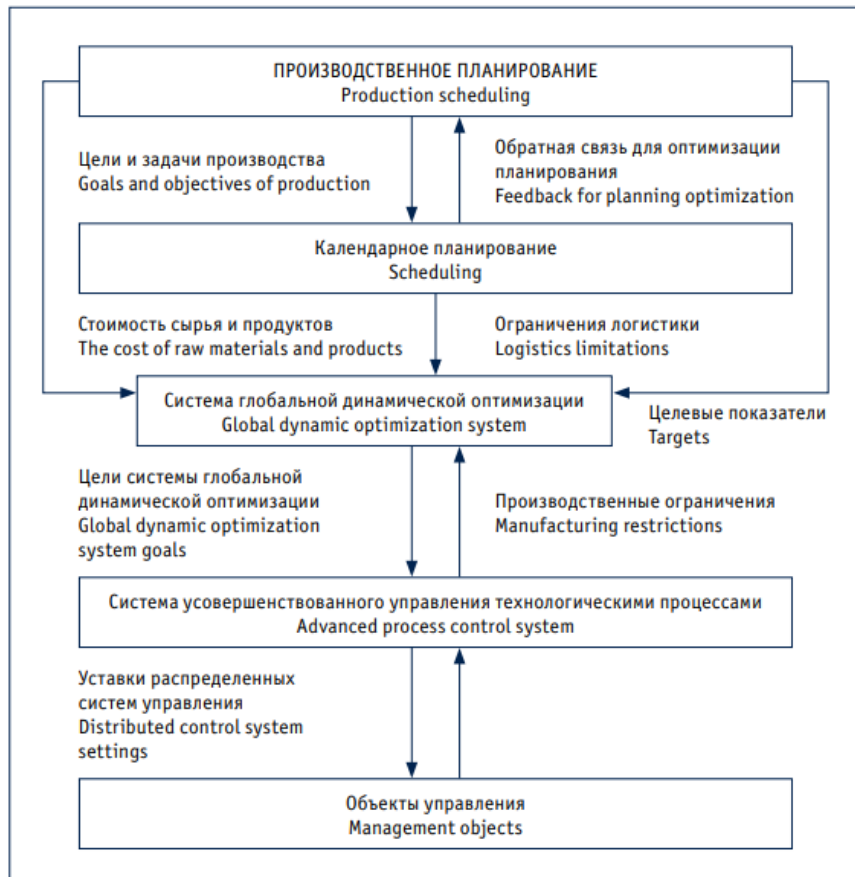


Рисунок 1.3 – Схематическая иерархия системы управления нефтеперерабатывающим производством

Технологический процесс компаундирования товарных бензинов является одним из ключевых в общей системе управления качеством на нефтеперерабатывающем предприятии. Управление качеством включает в себя данные, поступающие из системы хранения лабораторных измерений, с датчиков, установленных непосредственно на технологическом оборудовании, с виртуальных анализаторов, а также целевые показатели и производственные планы, устанавливаемые через MES предприятия [47, 48, 49, 50].

Управление процессом компаундирования товарных бензинов отвечает тем же требованиям, которые предъявляются к СУУТП [51, 52, 53, 127]. Рассматриваемые далее промышленные решения для автоматизации цеха компаундирования бензинов охватывают различное количество уровней управления: в ряде программных продуктов имеется возможность моделировать полный комплекс взаимодействия технологических процессов, часть из них нацелена исключительно на моделирование конкретных технологических установок или станции смешения. При анализе программных продуктов необходимо учитывать различия в конфигурации применяемых систем.

В целом системы поддержки принятия стратегических решений на предприятиях, являющиеся продолжением развития корпоративных информационных систем, ориентированных на стратегическое управление, долгосрочное и среднесрочное корпоративное планирование, позволяют решать задачи, направленные на оптимизацию функционирования различных видов деятельности предприятия за счет использования имитационного моделирования и оптимизационных методов [54, 55, 56].

Комплексное имитационное моделирование систем позволяет не только вырабатывать оптимальную схему цеха и процесса его функционирования, но и дает возможность перейти к созданию тренажеров для операторов, включая виртуальные тренажеры [57, 129, 130, 131]. Тренажеры служат дополнительным учебным материалом, позволяющим повысить уровень подготовки операторов цеха и уровень организации труда сотрудников. Для возможности максимального погружения в процессе обучения могут дополнительно проводится обмерные и

фотометрические работы, позволяющие обучаемому взаимодействовать в формате программы с объектами, визуально и технически аналогичными производственным объектам [58, 132].

1.3 Обзор методик и автоматизированных систем оптимизации процесса смешения нефтепродуктов

Оптимизация работы цеха компаундирования бензинов не возможна без внедрения автоматизированных систем оптимизации смешения нефтепродуктов. Системы оптимизации можно разделить на две большие группы – работающие в режиме off-line (на уровне системы управления производством для отдельных подразделений) и работающие в режиме on-line (на уровне автоматизированной системы управления технологическим процессом, оперативный уровень взаимодействия с оборудованием). Ряд программных комплексов может работать в обоих режимах (off-line и on-line) в зависимости от настроек и требований к системе. Большинство имеющихся промышленных систем являются комплексными разработками иностранного производства, сочетающими в себе задачи подбора рецептуры смешения, управления запасами, управления процессом смешения. Ввиду экономических санкций, применяемых в настоящее время к Российской Федерации, доступность иностранных программных комплексов значительно снижена [59].

Значительный пласт исследований в области оптимизации производства товарных бензинов посвящен планированию операций по смешиванию бензинов. Данная задача является многокритериальной и многофакторной и требует использования специализированных алгоритмов, что наиболее эффективно может быть выполнено с использованием методов математического моделирования и применения компьютерных моделирующих систем. Наиболее распространена формулировка математических моделей для задач планирования как задач смешанного целочисленного программирования, однако для характеристик бензинов при смешении присуще нелинейное поведение, в связи с чем для

повышения точности может быть применено смешанное нелинейное программирование. Примеры применения различных уровней моделей, комбинации дискретных и непрерывных моделей, с добавлением избыточных ограничений, приведены в работах [60-76].

Компания AVEVA Group plc, приостановившая поставки инженерного и промышленного программного обеспечения в Российскую Федерацию в апреле 2022 года [77], предлагает для промышленного внедрения систему AVEVA Refinery Off-sites, позволяющую управлять запасами, перекачками и смешением товарных нефтепродуктов на НПЗ, нефтебазах и терминалах [78]. Общая архитектура системы управления запасами парка резервуаров и перекачками представлена на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Архитектура системы управления запасами парка резервуаров и перекачками производства AVEVA Group plc

В состав системы, в том числе, входит система оптимизации и контроля смешения (BOSS), которая обеспечивает настройку автономного (off-line) режима смешения с учетом ограничений, проверку и оптимизацию исходной рецептуры и непрерывное управление процессом смешения с онлайн-оптимизацией рецептуры смешения в интерактивном режиме. Заявлено, что BOSS минимизирует себестоимость продуктов смешения, снижает запас по качеству и/или отклонения от рецептуры с учетом данных по ограничению насосов, ограничений узлов или станции смешения, текущих запасов компонентов и данных по резервуарам и партиям компонентов. В случае невозможности создания оптимальной рецептуры или непопадания в спецификацию система выдает рекомендации касательно подбора насосного оборудования, пример которых приведен на рисунке 1.5.

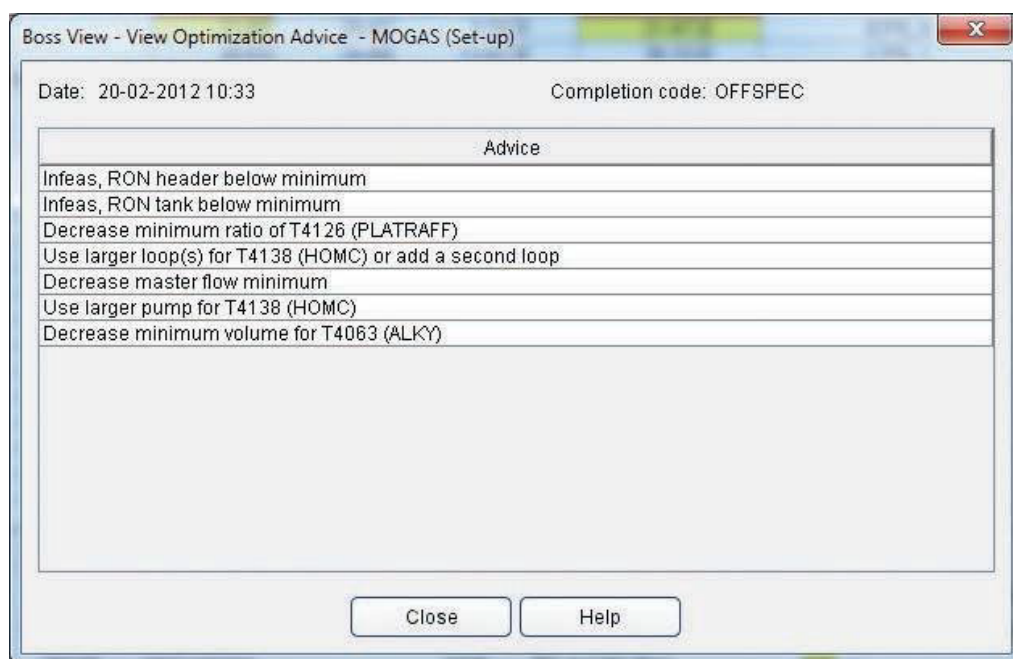


Рисунок 1.5 – Пример рекомендаций, выдаваемых программой BOSS производства AVEVA Group plc

Принцип оптимизации рецептуры и функция достижения качества для программного комплекса не разглашается.

Компания AspenTech разработала набор программных продуктов, которые могут применяться при планировании и управлении компаундированием

моторных топлив. В программном обеспечении (ПО) AspenPIMS заложена возможность оптимизации работы и проектирования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических предприятий и иных объектов нефтеперерабатывающей промышленности. ПО используется для решения задач стратегического планирования и, в том числе, дает возможность прогнозирования рецептуры смешения, при этом процессы оптимизации рецептуры и управления процессом смешения в нем не предусмотрены [79]. В ПО AspenPIMS на основе стоимости, объемов сырья и продуктов, перерабатывающих мощностей создается система линейных уравнений, в результате решения которой производится выбор оптимальных объемов покупки сырья и продуктов, а так же загрузки производственных мощностей. Функцией оптимизации при этом является разность между выручкой от продаж и затратами на сырье и электроэнергию, функция оптимизируется к максимуму [80]. Примеры уравнений и неравенств и целевых функций прибыли, формируемых AspenPIMS, представлены на рисунке 1.6.

Уравнения и неравенства, формируемые PIMS:

Материальные балансы:

- по этилену:
- по пропилену:
- по смоле:

$$\left[\begin{array}{l} -0.50A - 0.25B - 0.25C + E = 0 \\ -0.25A - 0.50B - 0.25C + P = 0 \\ -0.25A - 0.25B - 0.50C + C = 0 \end{array} \right]$$

Ограничения:

- по сумме этилена и пропилена
- по пропилену

$$\left[\begin{array}{l} E + P \leq 150 \\ P \leq 80 \end{array} \right]$$

Целевая функция (валовая прибыль):

$$OBJ = 0.18E + 0.24P + 0.06S - 0.12A - 0.12B - 0.10C$$

Система уравнений / матрица

$$\begin{cases} x + y = 5, \\ y = 2x + 2. \end{cases}$$

Предмет максимизации



Рисунок 1.6 – Пример уравнений, неравенств и целевой функции прибыли, формируемых AspenPIMS

При решении программный продукт формирует ряд таблиц, из которых создает матрицу оперативной памяти и передает решателю. AspenPIMS проводит оптимизацию закупки сырья, режимов работы технологических установок и смешения компонентов с учетом операционных затрат и прибыли от реализации товарной продукции. Решенные показатели моделей передаются в базу данных, откуда происходит формирование отчетов (рисунок 1.7).

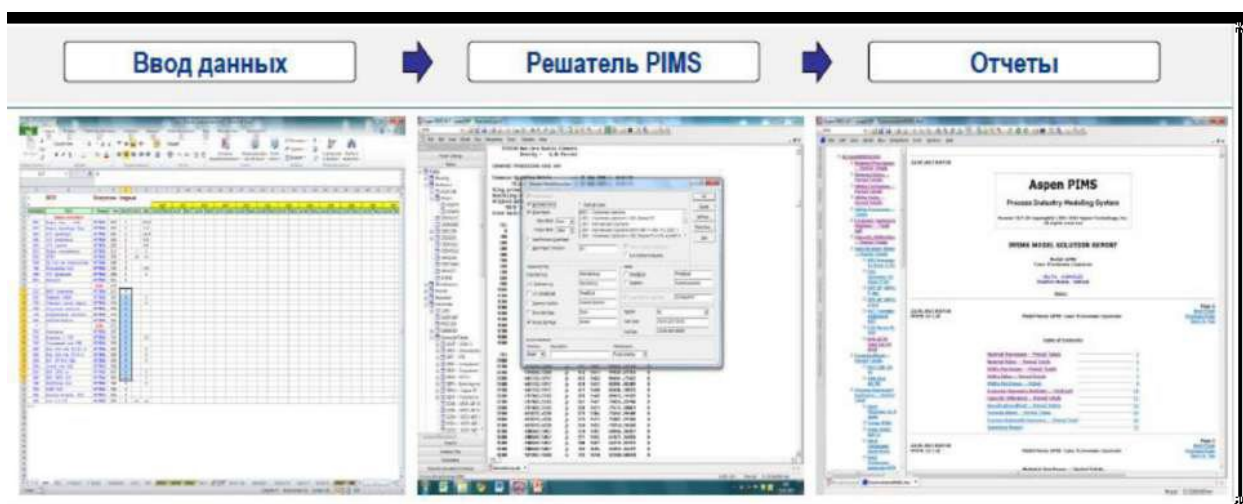


Рисунок 1.7 – Принцип работы программы AspenPIMS

Другой продукт этой компании, Multi-Blend Optimizer, позволяет формировать график смешения в режиме off-line и проводить оптимизацию рецептуры, он может использоваться как отдельный продукт, и в сочетании с Blend Control Interface этой же компании для организации управления процессом смешения в режиме on-line [81]. Программный комплекс включает ряд переменных и дает в результате график проведения операций смешения с учетом оптимальной рецептуры, которая рассчитывается с учетом экономической составляющей (рисунок 1.8).

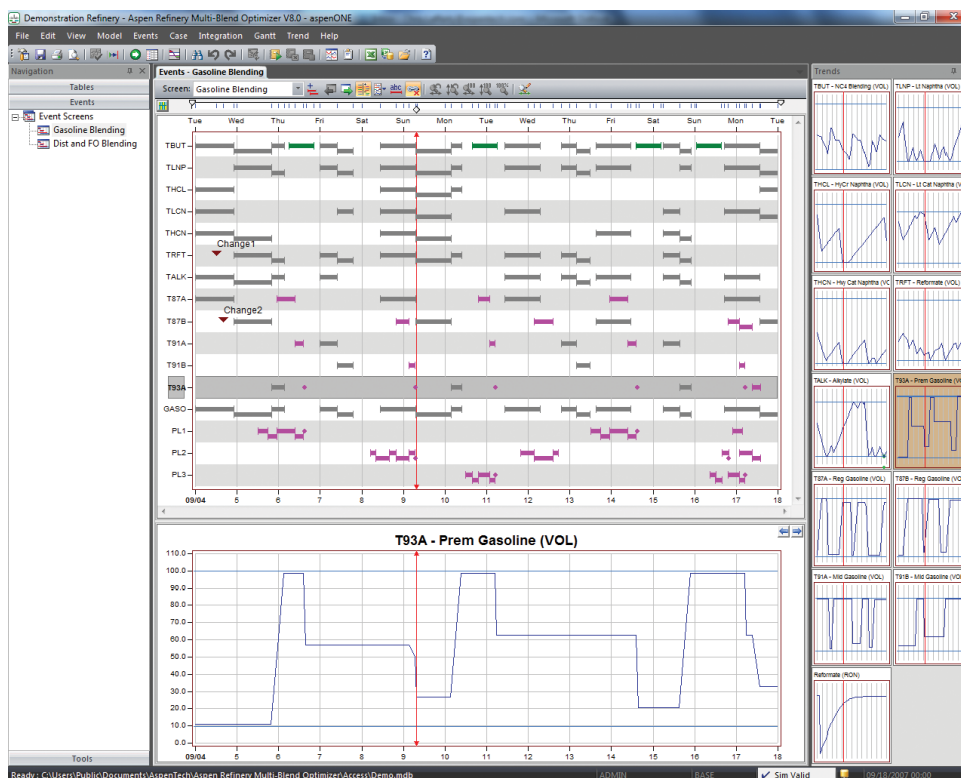


Рисунок 1.8 – Пример диаграммы Гантта с графиком проведения смешения и отгрузки готовой продукции на одну неделю в программе Aspen Refinery Multi-Blend Optimizer

По состоянию на конец 2022 года компания AspenTech не сообщала о применении санкций против российских компаний и продолжает продавать и поддерживать программные продукты, однако высокая стоимость лицензий является блокирующим фактором для повсеместного применения на российских заводах.

Компания АВВ сосредоточила усилия в части разработки программных продуктов, непосредственно управляющих процессом смешения (on-line) с использованием обратной связи от поточных анализаторов для корректировки процесса [82]. Максимальный эффект от применения решений компании достигается при применении модулей Advanced Blend Control (ABC – усовершенствованное управление смешением) и Regulatory Blend Control (RBC – регулируемое управление смешением), построенных на базе технологии Industrial^{IT} и поточного анализатора. Общая архитектура предлагаемого решения

на примере нефтеперерабатывающего завода Preem в Готенбурге (Швеция) представлена на рисунке 1.9.

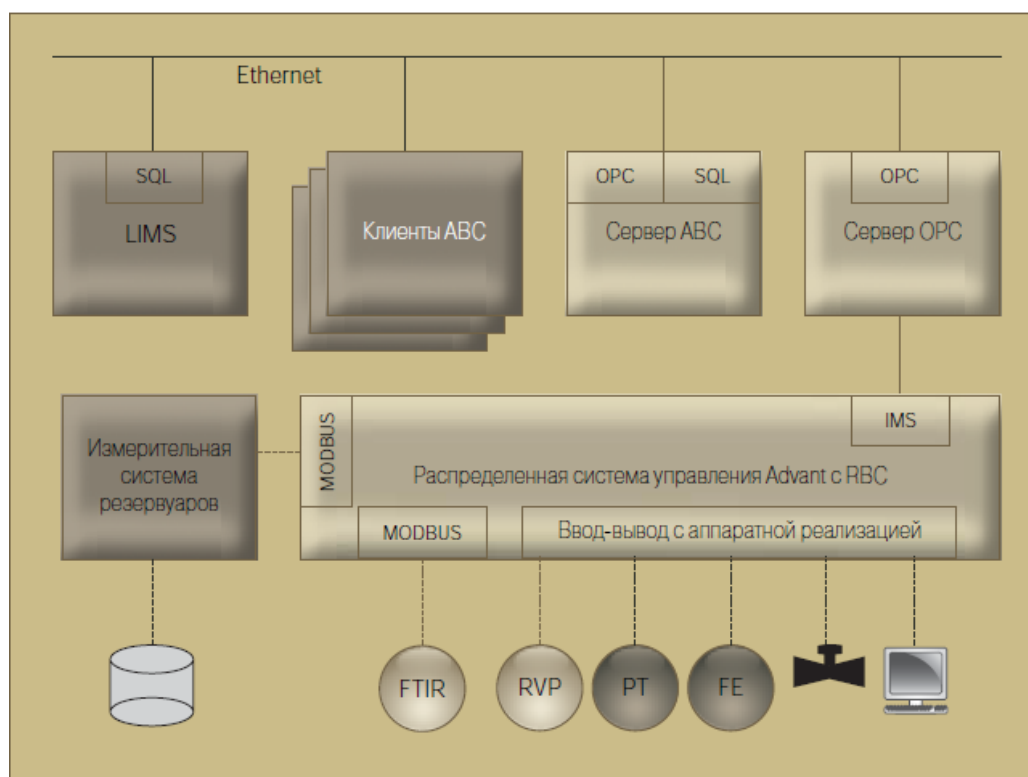


Рисунок 1.9 – Архитектура интегрированной системы управления смешением на примере завода Preem в Готенбурге (Швеция), реализованной с применением программных продуктов компании АВВ

Для оптимизации рецепта смеси используется комплекс из модели смешения и оптимизатора. Модель смешения позволяет рассчитывать свойства, получаемые из рецепта смеси; оптимизатор производит поиск по пространству возможных рецептов с целью нахождения рецепта с минимальной стоимостью компонентов смеси, минимальных превышением заданных характеристик и (или) отклонением от запланированного рецепта. В модуле ABC использовалось собственное ядро GAMS (системы обобщенного алгебраического моделирования) в сочетании с разработками сторонних производителей. Система GAMS используется для постановки целей и пределов оптимизации (включая модели

смещения и требования к свойствам смеси) и образует интегрированную систему решения нелинейных уравнений.

В целом компания АВВ делает ставку на производство электродвигателей, робототехники, промышленной автоматизации и электротехники, в связи с чем, по всей видимости, программное обеспечение в отрыве от аппаратной составляющей системы блендирования не получило широкое распространение. Компания АВВ перестала осуществлять поставки в Российскую Федерацию в июле 2022 года [83].

Компанией Honeywell разработана платформа для создания систем автоматизации в режиме реального времени, таких как управление смешением в режиме реального времени (система Experion Blend Controller - EBC), усовершенствованное управление и оптимизация технологических процессов (линейка продуктов Profit[®]), инжиниринг на основе имитационного моделирования (платформа моделирования UniSim[®]) и другие [84]. Компания Honeywell поддерживает разработку всех уровней пирамиды промышленной автоматизации (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Средства промышленной автоматизации компании Honeywell

Управление смешением товарных продуктов, реализованное компанией Honeywell в системе Experion Blend Controller (EBC), является надстройкой над распределенной системой управления Experion и предназначена для выполнения полного цикла смешения на основании типовой поточной схемы (рисунок 1.11). В основные функции системы EBC входят: запуск, управление и выключение смесителей, смежного оборудования, управление уставками скорости потока, регулирование объема и скорости потока смеси, проверка правильности рецептуры, поддержание процентного соотношения компонентов и концентрации присадок в соответствии с рецептурой и прочие функции, связанные с управлением и регулированием насосного оборудования.

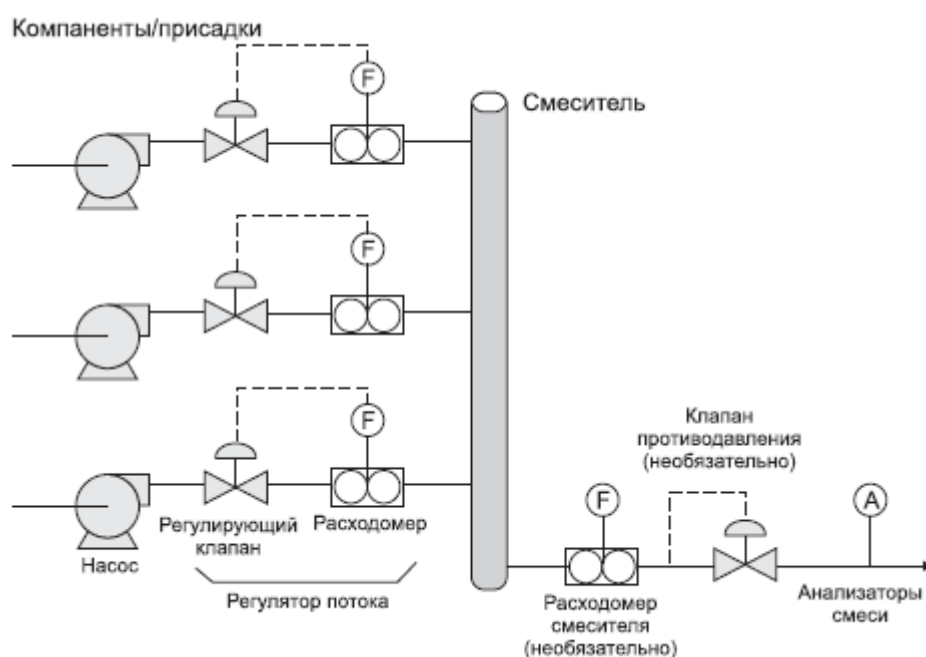


Рисунок 1.11 – Типовая поточная схема смешения, реализованная в системе Experion Blend Controller компании Honeywell

Основные компоненты системы EBC Honeywell [84] представлены на рисунке 1.12. Таким образом, компания представляет комплексную систему управления смешением с тремя уровнями: off-line оптимизация (начальный оптимальный рецепт), on-line оптимизация (оптимизация текущего рецепта) и РСУ (автоматическое ведение процесса смешения).

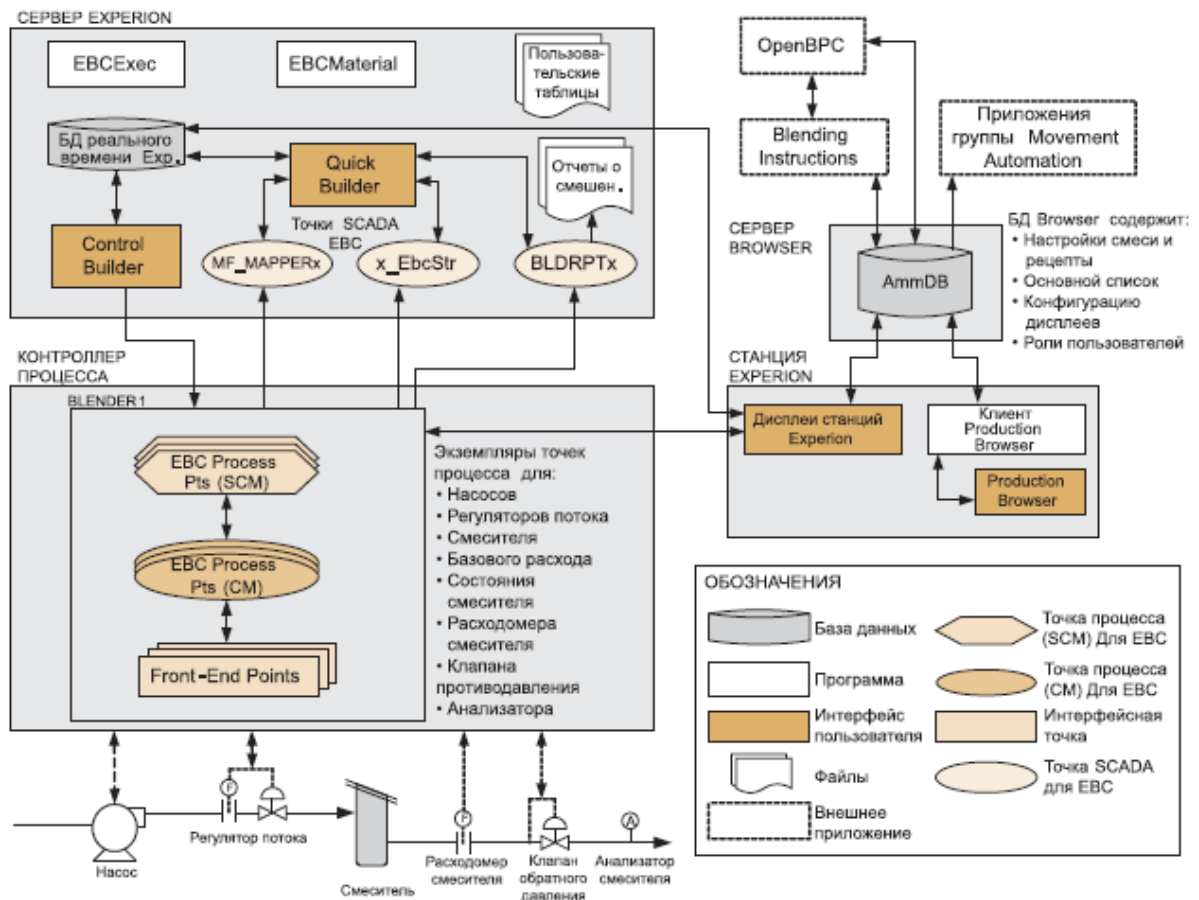


Рисунок 1.12 – Типовая поточная схема смешения, реализованная в системе Experion Blend Controller компании Honeywell

Система включает связь расходомерами, поточными анализаторами качества, снабжена алгоритмами прогнозирующего контроля показателей качества, библиотеками данных и отчетов по смешению. Поиск оптимальной рецептуры производится в программном продукте Open Blend Property Control [85]. На анализе опыта внедрения программы на предприятии ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» программа не осуществляет интеллектуальную настройку математической модели смешения, но дает аналитическую информацию для принятия решений [86].

Компания Honeywell приостановила деятельность в Российской Федерации в марте 2022 года [87], доступ к детальному описанию программных продуктов производителя отсутствует.

Компания Haverly Systems представляет программный продукт NetBlend (или Product Blending Tool), позволяющий рассчитать качество смеси при заданных параметрах компонентов, подобрать рецептуру с целью максимизации производства высокомаржинальных продуктов, с учетом стоимости компонентов в том случае, если они закупаются со стороны [88, 89]. Программный продукт также позволяет управлять резервуарами компонентного парка и готовой продукции, позволяет упростить взаимодействие с заводской лабораторией, предоставляет полный пакет централизованных данных в части процесса смешения нефтепродуктов для планирования, составления графика смешений и отгрузки готовой продукции (рисунок 1.13).

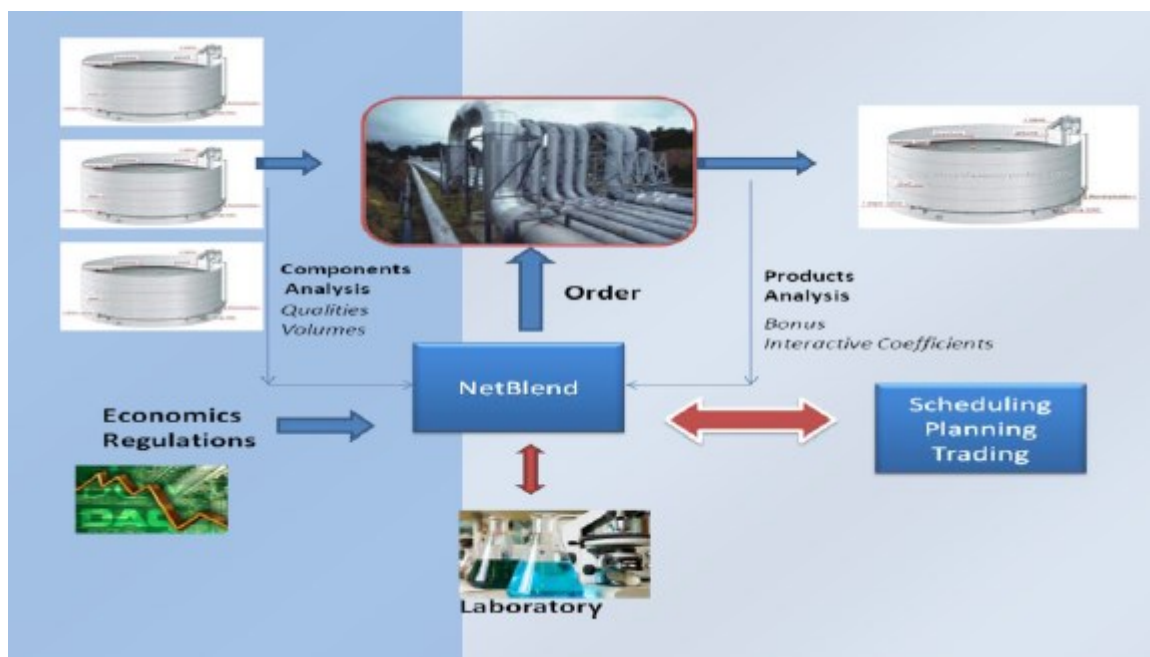
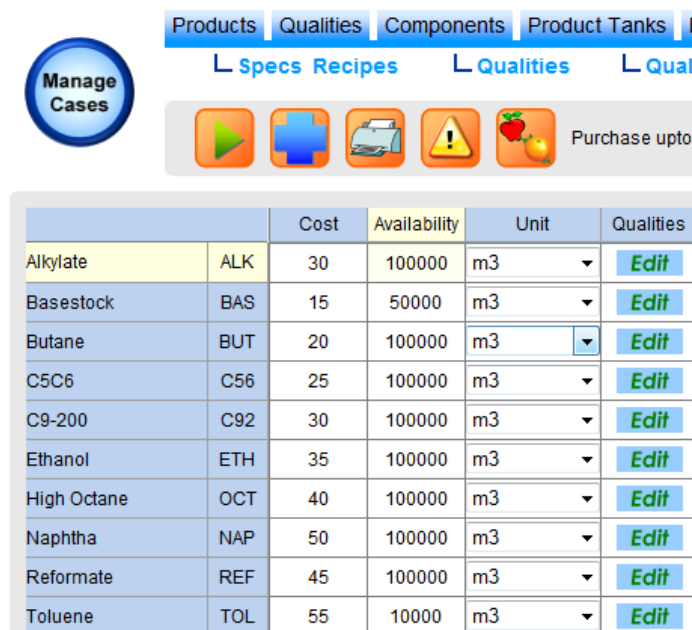


Рисунок 1.13 – Схематичное изображение процесса взаимодействия программных продуктов компании Haverly Systems и управляемых технологических процессов

Расчеты в программе производятся методом симплексов с учетом ограничений, устанавливаемых пользователем: вариант «максимальный» для максимизации выпуска высокомаржинальной продукции, вариант «минимальный» для минимизации добавления компонентов и соблюдения

требований к смеси, вариант «целевой» для подбора объемов заправки для получения конкретного продукта с конкретными целевыми характеристиками. Возможны ограничения по объему вовлечения продукции в смесь. Пример взаимодействия с пользователем в программе NetBlend представлен на рисунке 1.14.



		Cost	Availability	Unit	Qualities
Alkylate	ALK	30	100000	m3	Edit
Basestock	BAS	15	50000	m3	Edit
Butane	BUT	20	100000	m3	Edit
C5C6	C56	25	100000	m3	Edit
C9-200	C92	30	100000	m3	Edit
Ethanol	ETH	35	100000	m3	Edit
High Octane	OCT	40	100000	m3	Edit
Naphtha	NAP	50	100000	m3	Edit
Reformate	REF	45	100000	m3	Edit
Toluene	TOL	55	10000	m3	Edit

Рисунок 1.14 – Окно программного продукта NetBlend компании Haverly Systems

Среди отечественных разработок можно выделить программный комплекс (ПК) ОПОР – программный комплекс оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения бензинов и мазутов совместного производства ООО «МЦЭ-Инжиниринг» и РХТУ им. Д.И. Менделеева [90]. ПК ОПОР позволяет осуществить связь между применяемыми на предприятии системами, предназначенными для планирования и оптимизации, а именно с системой SAP APO (Advanced Planner and Optimizer), автоматизированной системой управления технологическими процессами (АСУ ТП) и лабораторной информационной системой менеджмента (ЛИМС). Укрупненная блочная структура информационных связей автоматизированной станции смешения бензинов на

основе информационного обмена ПК ОПОР, SAP APO, АСУ ТП и ЛИМС представлена на рисунке 1.15.



Рисунок 1.15 – Укрупненная блочная структура информационных связей автоматизированной станции смешения на основании ПК ОПОР производства ООО «МЦЭ-Инжиниринг»

Входными данными для ПК ОПОР являются объемы товарной продукции (бензинов) для интервалов планирования, запасы компонентов смешения и стоимости компонентов смешения, критерии оптимальности смешения бензинов (постановка задачи) из SAP APO; показатели качества компонентов смешения и фактически реализованных рецептур бензинов из ЛИМС; режимные параметры процессов смешения и данные с поточных анализаторов из АСУ ТП. В результате работы ПК ОПОР в АСУ ТП передается оптимальная рецептура смешения в качестве уставок для регуляторов поддержки соотношения потоков смешения. Связь систем SAP APO и ПК ОПОР осуществляется через файлообменный сервис.

Внутренняя структура ПК ОПОР [91] представлена на рисунке 1.16. В состав ПК ОПОР входят следующие модули: общее меню запуска пакета, конфигуратор базы данных, модуль расчета оптимальной рецептуры OptimBlend, модуль оптимального планирования ресурсов компонентов смешения при заданном плане производства Planning, модуль для совместного одновременного оптимального планирования производства бензинов и мазутов с учетом ограничения по количеству вовлекаемых компонентов Balance+, модуль параметрической идентификации нелинейной модели показателей качества NLM, модуль расчета фракционной разгонки нефтепродуктов Fr_Razgon, модуль пересчета плотности по температуре RecalcP, модуль расчета коэффициентов нелинейной модели для вязкости мазута NLMMZ и модуль планирования резервуаров компонентов смешения по партиям BalancePro. В качестве базы данных используется Microsoft Server Compact Edition.

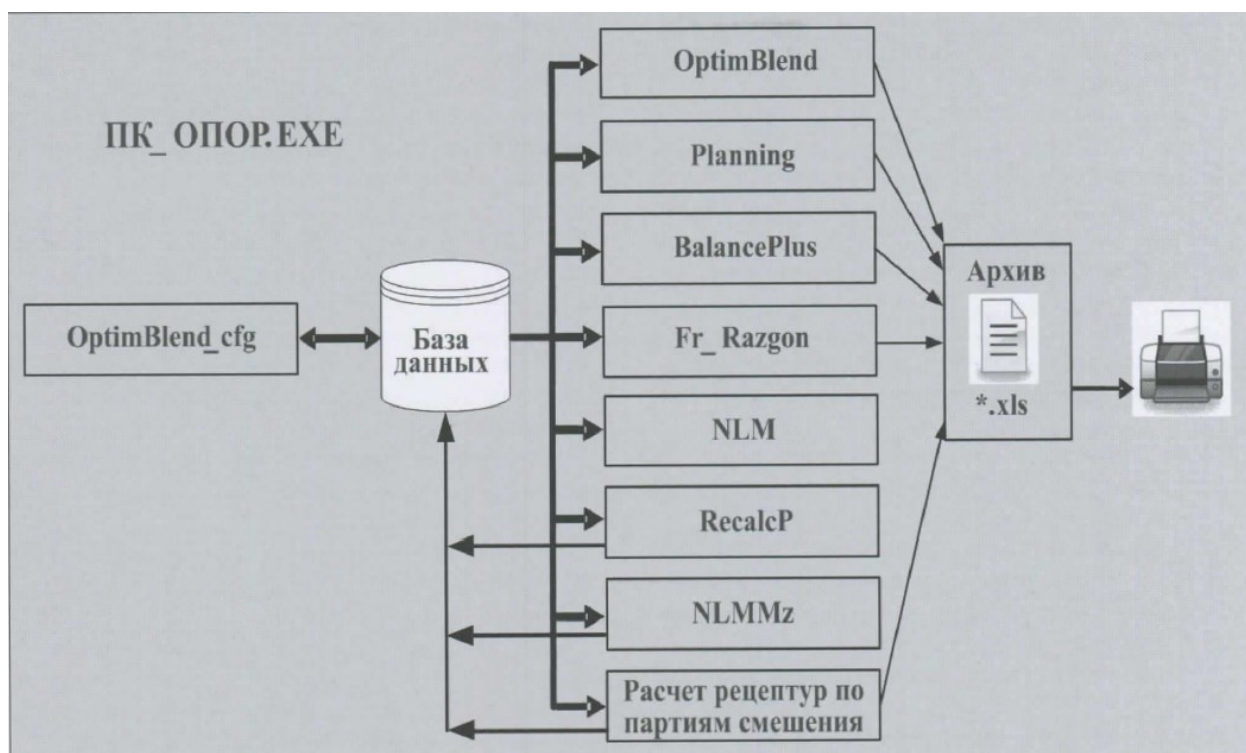


Рисунок 1.16 – Укрупненная структура ПК ОПОР производства ООО «МЦЭ-Инжиниринг»

Примеры экранных форм ПК ОПОР [91] приведены на рисунках 1.17-1.19.

Расчет объема компонентов

Премиум Евро-95 (Евро-5)

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

20.01.2018 15:39:45

План на период:

Выбор производимых компонентов:

Наимен. компонентов	тонн	тонн/ч	м³/ч	Т, °С	Давление, Па
<input checked="" type="checkbox"/> Изомеризат	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Изомеризат легкий	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Бензин КАС	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Стаб. катализат 35/6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Стаб кат-т 35/11-300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Стаб кат-т 35/11-600	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Алкилат	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<input type="checkbox"/> МТСО	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Часов в год: 8160

Коэффициент запаса, (0,1%): 0

Задать план выпуска смеси:

Наименование смеси	План выпуска	Т, °С	Давление, Па	Дни
<input type="checkbox"/> Премиум Евро-9...	0,00	0,00	0,00	0
<input type="checkbox"/> Регуляр Евро-92 ...	0,00	0,00	0,00	0
<input type="checkbox"/> БЕНЗИН ГАЗОВЫ...	0,00	0,00	0,00	0
<input type="checkbox"/> М.100.7	0,00	0,00	0,00	0

ОТМЕНА < НАЗАД РАСЧЕТ ВЫХОД

Рисунок 1.17 – Задание интервала и плана товарного продукта, последовательности планирования рецептур, объемов компонентов смешения в ПК ОПОР производства ООО «МЦЭ-Инжиниринг»

Оптимизация рецептуры смешения бензиновых фракций

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

	Изомеризат	Изомеризат легкий	Бензин КАС	Стаб. катализат	Стаб кат-т 35/11-300	Стаб кат-т 35/11-600	Алкилат
ОБЪЕМНАЯ ДОЛЯ, %	16,88	0,00	0,00	0,00	0,00	37,08	35,74
	23,11	0,00	0,00	0,00	0,00	50,76	48,92
ОБЪЕМ, м³	462,25	0,00	0,00	0,00	0,00	1015,23	978,4
МАССОВАЯ ДОЛЯ, %	15,00	0,00	0,00	0,00	0,00	40,00	34,00
МАССА, т	300,00	0,00	0,00	0,00	0,00	800,00	680,00
ЦЕНА, руб./т	31000,00	32000,00	31000,00	30000,00	34000,00	35000,00	34000,00
Стоимость компонентов в смеси, руб	9300000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28000000,00	23698000,00
ОСТАТОК КОМПОНЕНТОВ, м³	700,00	0,00	0,00	0,00	0,00	200,00	320,00

Стоимость смеси по рецептуре, руб: 69 908 000,00

Сохранить в Excel

ОТМЕНА РАСЧЕТ ВЫХОД

Рисунок 1.18 – Результаты оптимизации рецептур смешения бензинов в ПК ОПОР производства ООО «МЦЭ-Инжиниринг»

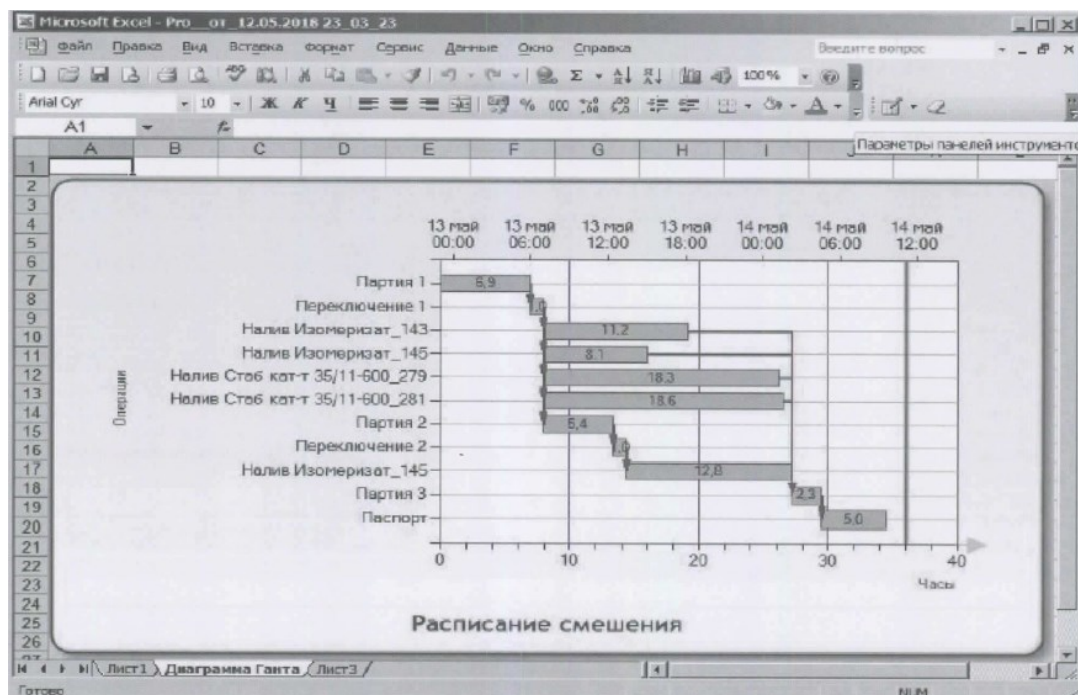


Рисунок 1.19 – Диаграмма Ганта для расписания смешения бензинов в ПК ОПОР производства ООО «МЦЭ-Инжиниринг»

В программном комплексе для целей учета нелинейных эффектов от состава рецептуры по отдельным свойствам бензинов применялась полностью нелинейная структура модели расчета с возведением соответствующих показателей качества компонентов в степень, которая является предметом вычисления на основе эмпирических данных [92]:

$$Y_j = \left\{ \sum_{i=1}^n x_i \cdot (p_{ji})^{a_j} \right\}^{b_j}$$

где Y_j – показатель качества смеси (давление насыщенных паров ($j = 1$) или октановое число по исследовательскому ($j = 2$) или моторному методу ($j = 3$)), x_i – концентрация i -го компонента рецептуры смешения ($i=1, \dots, n$), p_{ji} – j -й показатель качества i -го компонента смешения, a_j и b_j – заранее неизвестные параметры моделей.

Модуль оптимизации рецептуры OptimBlend, входящий в ПК ОПОР, решает задачу нахождения экономически оптимальной рецептуры с учетом цены

товарных бензинов, компонентов смешения, имеющихся запасов, качества компонентов и требований к товарным бензинам. Возможен учет различных технологических ограничений. Используются следующие критерии оптимальности формирования рецептур бензинов в зависимости от постановки задач: стоимость с учетом требований к спецификации, выход товарного топлива по остаткам компонентов смешения или минимизация остатков бензиновых компонентов смешения с учетом выполнения требований к спецификации. Оптимальная рецептура рассчитывается при заданном плане производства бензинов, ресурсов компонентов смешения в резервуарах и производительности установок выработки бензиновых фракций [90]. Критерием оптимальности рецептуры выступает минимизация себестоимости планируемого выпуска бензина:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot X_j \cdot Ц_j \rightarrow \min$$

где $i = 1, \dots, M$ – бензины разных марок, $j = 1, \dots, N$ – компоненты смешения, a_{ij} – доля j -го компонента смешения в рецептуре i -го бензина, X_j – ресурс j -го компонента смешения, т, $Ц_j$ – стоимость j -го компонента смешения. При минимизации стоимостной составляющей учитываются ограничения на показатели качества получаемой смеси (октановые числа, содержание серы, ароматических углеводородов, бензола, оксигенатов, давление насыщенных паров, плотность, фракционный состав, ограничения на ресурсы компонентов смешения и план выпуска бензинов и условия по вовлечению бензиновых компонентов) [93].

Еще одной отечественной разработкой является программный продукт СМОННП (система оптимизации нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств) разработки Александра Павловича Сизикова из Самарского государственного экономического университета. Основная задача, решаемая программой – расчет оптимального производственного плана и соответствующего

ему общего материального баланса предприятия [94]. Экранная форма программы СМОНПП представлена на рисунке 1.20.

Смесевые пулы	Цена, руб	Не менее	Не более	Тыс.тонн	Отк
- Регуляр-92 Е-2	15000,00	33,00	33,00	33,00	
- Премиум-95 Е-2	16700,00	66,00	66,00	66,00	
- Супер-98 Е-2	19465,00	33,00	33,00	33,00	
- Регуляр-92 Е-3	16000,00		15000,00	212,00	
- Премиум-95 Е-3	17700,00		15000,00	0,00	
- Супер-98 Е-3	20500,00	33,00		33,00	
- Премиум-95 Е-4	18500,00		77,00	77,00	
- Супер-98 Е-4	21000,00			0,00	
- ДТ 3-0.035	12700,00		333,00	333,00	

Компоненты смеси	Пр	Не менее	Не более	% массы	Тыс.тонн
- МТБЗ				0,00	6,95
- Фр. iC5				12,95	2,70
- Стаб.изомеризат				31,21	18,46
- Стаб.рифформат				28,47	0,00
- Фр. НК-62+85-кк ССР				22,18	131,12
- Рафинат				5,19	33,22
- Бензин АГФУ				0,00	19,54

Параметры смеси	Пр	Не менее	Не более	Рез-тат	Отклон. %
- Плотность		0,72	0,775	0,72	0,00
- Октановое число мот м		83,00		85,49	0,00
- Октановое число исслед		92,00		92,00	0,00
- Сера			0,015	0,000	0,00
- Упругость паров		338,00	714,30	416,15	0,00
- Ароматика			42,00	31,12	0,00
- Бензол			1,00	1,00	0,00
- Олефин			21,00	0,00	0,00
- Объем испар. при 70оС		22,00	50,00	50,00	0,00
- Объем испар. при 100о		46,00	71,00	67,08	0,00
- Объем испар. при 150о		75,00		85,91	0,00
- Тем-ра к.к.			210,00	130,58	0,00

Рисунок 1.20 – Экранная форма программы СМОНПП

В программе СМОНПП имеется возможность выбрать в качестве критерия оптимальности производственного плана различные технико-экономические показатели: выход светлых нефтепродуктов, глубина переработки нефти, покрытие и другие. В программу заложено решение задачи по оптимальному проведению компаундирования бензинов из имеющихся компонентов, при этом функцией оптимизации является стоимость получаемой товарной продукции, для которой ведется поиск максимума. Особенностью программы является отсутствие возможности подбора рецептуры смешения: на основании заданных потоков компонентов, их объемов и свойствах, программа распределяет потоки таким образом, чтобы полученная товарная корзина была наиболее экономически выгодной. Объемы компонентов, вовлекаемых в смешение каждого типа бензина, могут быть зафиксированы, тогда значение вовлекаемого объема не будет меняться со стороны программы, или могут быть назначены как свободные

переменные, в таком случае общий объем данного компонента будет распределен между марками бензинов с целью максимизации стоимости итогового объема продукции. Программа сообщает, если в процессе распределения компаундирования не были достигнуты те или иные целевые показатели качества бензинов, при этом рекомендаций по корректировке рецептуры не предлагается.

В Томском политехническом университете была проведена обширная научная работа по применению метода математического моделирования для выработки нового подхода к расчету рецептуры приготовления бензинов, в результате которой была разработана база данных по октановым числам компонентов, на основании которой при помощи компьютерной системы можно рассчитать октановое число результирующей смеси [95]. В результате работы была создана компьютерная моделирующая система для расчета оптимизации процесса приготовления высокооктановых бензинов на основе математической модели расчета октановых чисел высокооктановых бензинов с учетом интенсивности межмолекулярных взаимодействий углеводородов, входящих в состав компонентов смеси [96].

На основании указанной работы в области химической инженерии разработана компьютерная моделирующая система Compounding [97]. Программа является результатом исследований, в которых установлена связь, объясняющая отклонение октановых чисел смешения с учетом межмолекулярного взаимодействия на основе эмпирических данных. В состав программы внесены данные по октановым числам для индивидуальных углеводородов, которые присутствуют в составе бензина. Для подбора рецептуры в программе используются составы смешиваемых нефтепродуктов, для чего необходимо проводить детальный углеводородный анализ всех компонентов смешения. Программа рассчитывает оптимальное значение октанового числа смеси на основе полученных данных и минимизирует себестоимость получаемой продукции. Сложность применения программы связана с необходимостью проведения дополнительных исследований компонентов смесей и внесением

значительного объема данных в программу. Пример формата и объема вносимой информации для проведения расчетов приведен на рисунке 1.21.

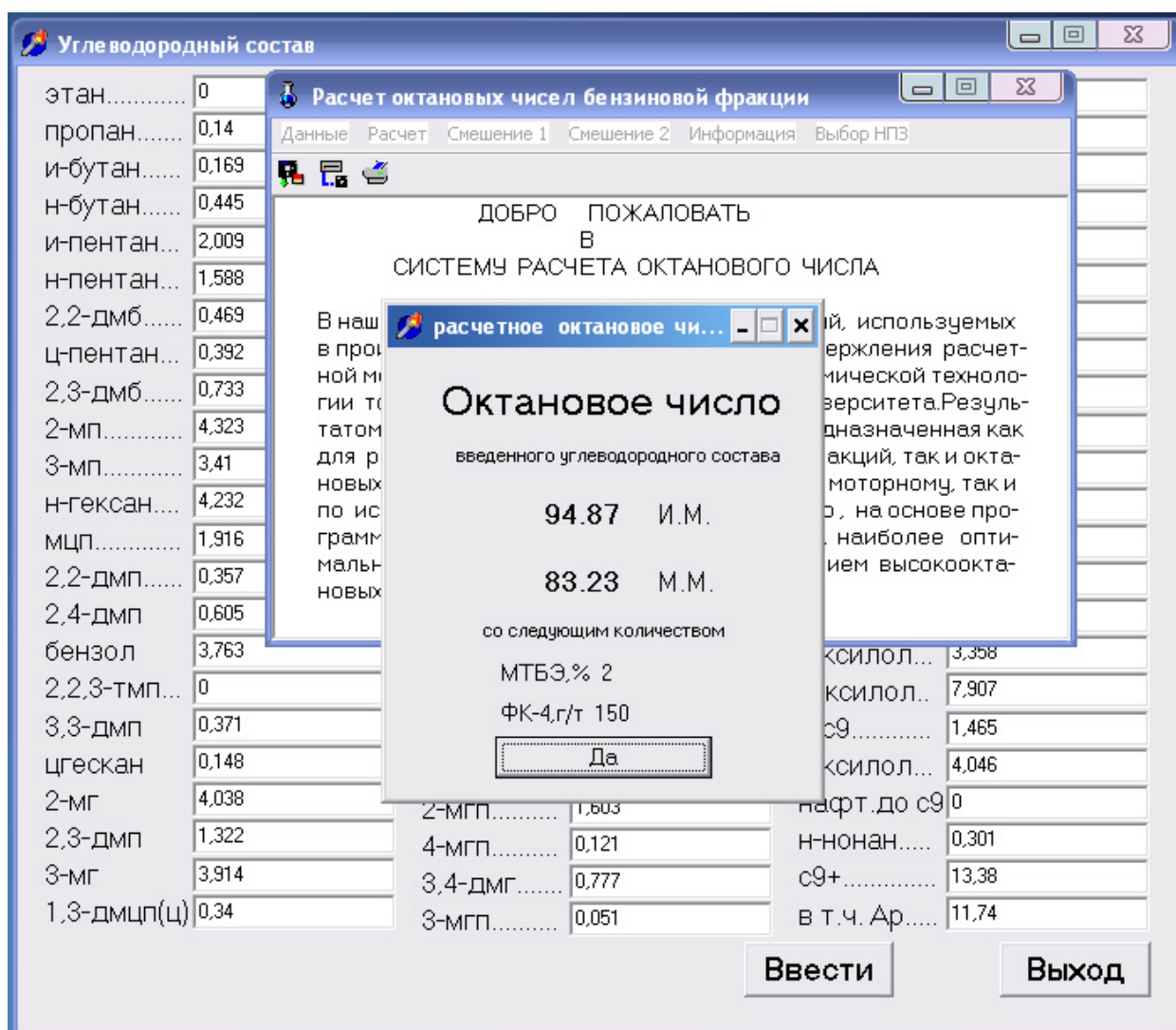


Рисунок 1.21 – Пример объема данных для внесения в программу Componding по одному компоненту смешения

Имеются другие примеры отечественных разработок, направленных на поиск рецептуры на основании минимизации себестоимости смеси в рамках ограничений, вызванных необходимостью соблюдения границ параметров качества в соответствии с ГОСТ или ТУ [98, 99].

Проведенный анализ показывает, что разработка отечественного программного продукта, который позволит оптимизировать рецептуру

компаундирования бензинов с учетом как физико-химических, так и экономических показателей, является актуальной.

1.4 Анализ систем имитационного моделирования для оптимизации планировки цеха и оптимизации загрузки оборудования в организации производства цехов

Задача оптимизации производства цеха компаундирования бензина может быть решена при помощи систем имитационного моделирования процессов. Имитационное моделирование это симуляция на персональном компьютере пользователя процесса функционирования исследуемой системы, что позволяет исследовать состояние системы и отдельных ее элементов в определенные моменты модельного времени [100]. Имитационные модели различаются разными уровнями абстракции при их создании – высокий уровень абстракции соответствует стратегическому уровню модели, средний – тактическому, низкий – оперативному уровню [101]. Условное распределение областей применения имитационных моделей в соответствии с используемыми в моделях уровнями абстракции [102], представлено на рисунке 1.22. Таким образом, планирование цехов принято выполнять на среднем уровне абстракции, включая в модель осредненные значения свойств потоков, расписания, задержки, мощности, емкости.

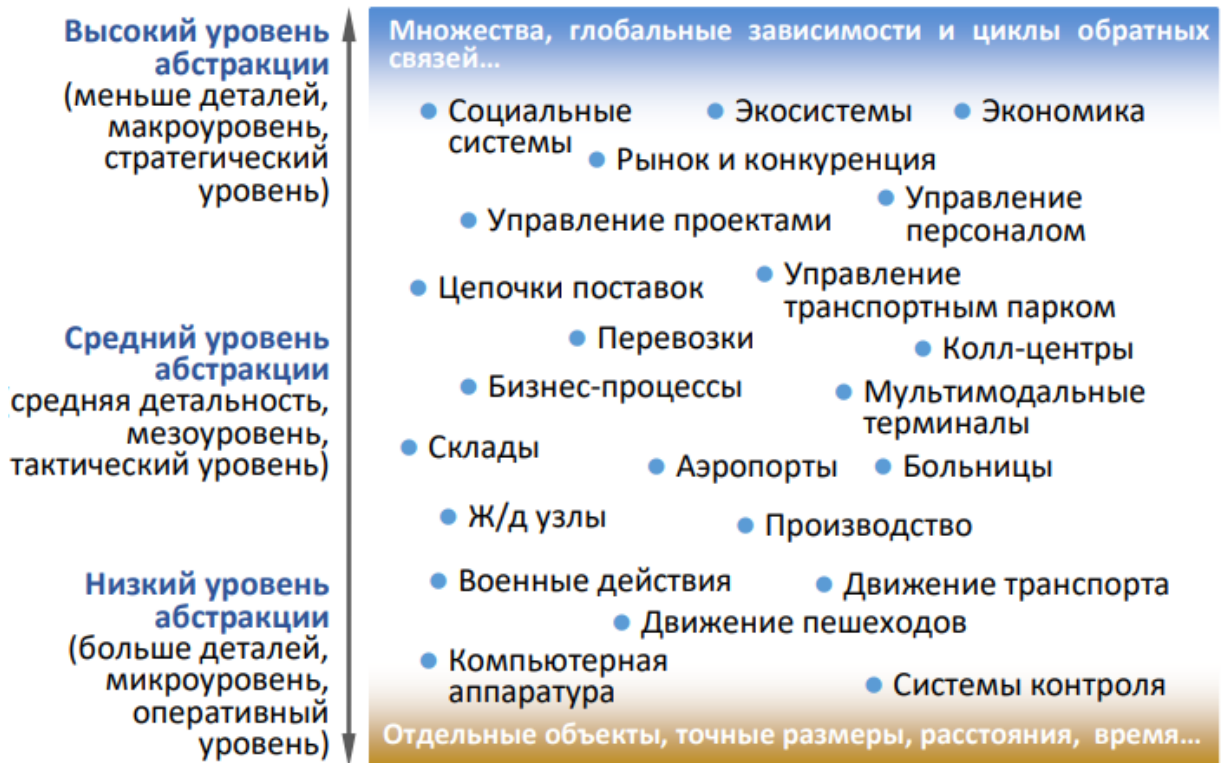


Рисунок 1.22 – Условное распределение областей применения имитационных моделей в соответствии уровнями абстракции в модели

Методы, применяемые при имитационном моделировании, делятся на три группы:

- системная динамика;
- дискретно-событийное моделирование;
- агентное моделирование.

Условное распределение методов по отношению к уровню абстракции [102] представлено на рисунке 1.23.

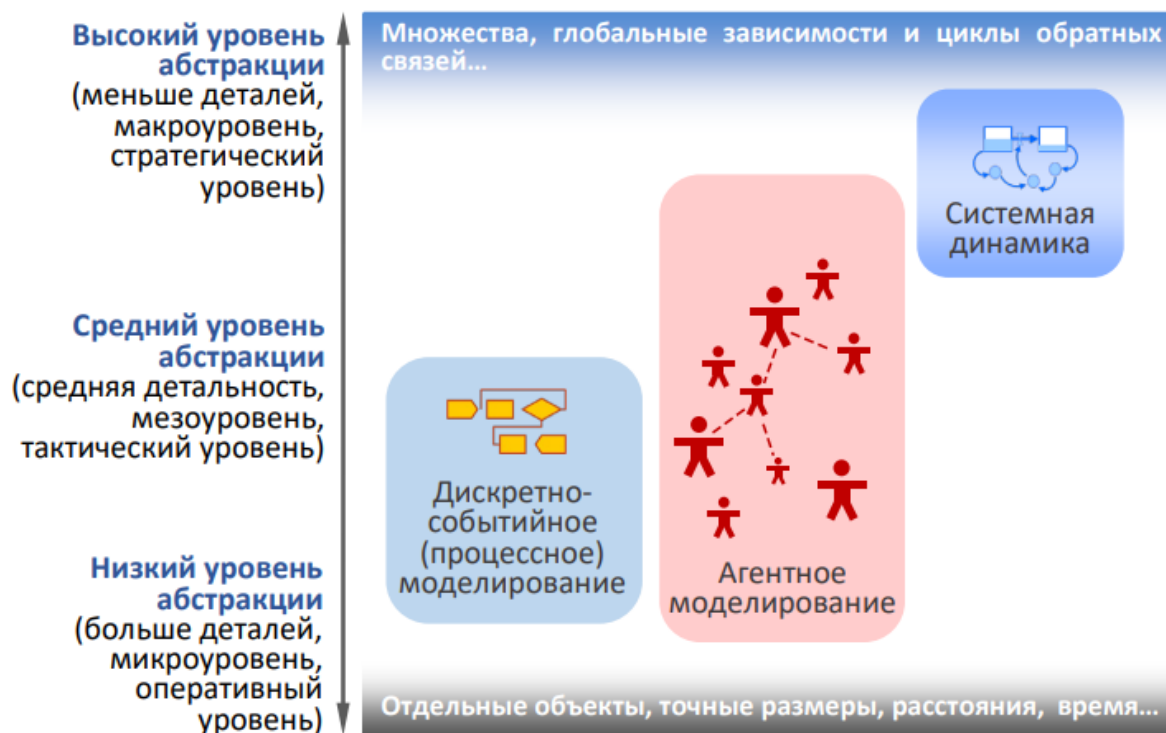


Рисунок 1.23 – Условное распределение методов моделирования по отношению к уровню абстракции

Современные программные продукты для имитационного моделирования имеют возможность применять различные методы моделирования в ответ на растущий спрос на глобальную оптимизацию со стороны бизнеса [103]. К наиболее популярным и распространенным на текущий момент следует отнести следующие программные продукты: AnyLogic, Arena, FlexSim и PlantSimulation [104].

AnyLogic является разработкой российской компании XJTechnologies, конкурентным преимуществом данного продукта является поддержка всех трех парадигм имитационного моделирования и возможности использования их в рамках одной модели [101]. Широкое распространение программный продукт AnyLogic получил для целей моделирования оптимизации производства цехов машиностроительной отрасли [105]. Создание структурной модели в программном продукте представляет собой нанесение элементов на область

построения модели с их последующим соединением и указанием различных свойств элементов и соединений (процессов) (рисунок 1.24).

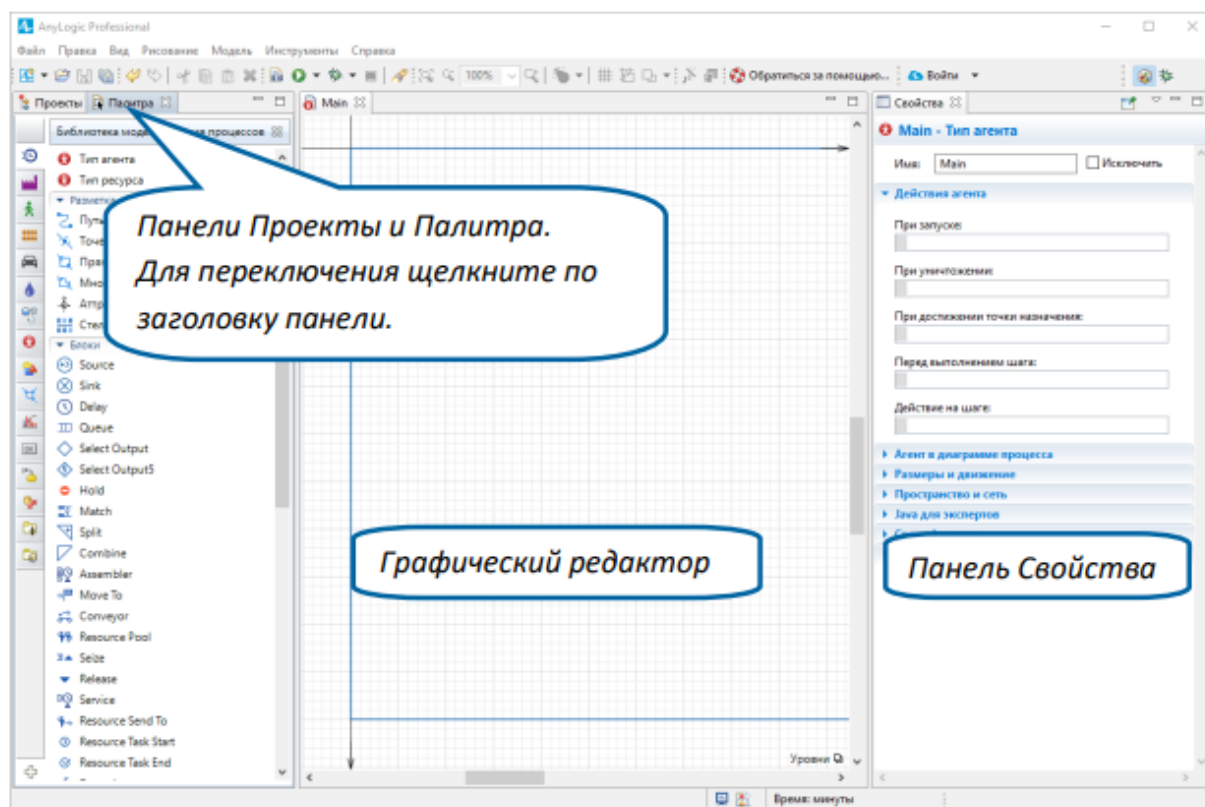


Рисунок 1.24 – Рабочее пространство программы AnyLogic

При помощи инструмента системной динамики можно провести моделирование накопления жидкостей в процессе компаундирования бензинов с указанием определенных свойств насосного оборудования, применяемого в модели (рисунок 1.25). В программе нет возможности прогнозировать свойства смеси на основании информации о качественных свойствах компонентов смесей, в том числе нет возможности объединения блока расчета рецептуры смешения с имитационной моделью цеха компаундирования.

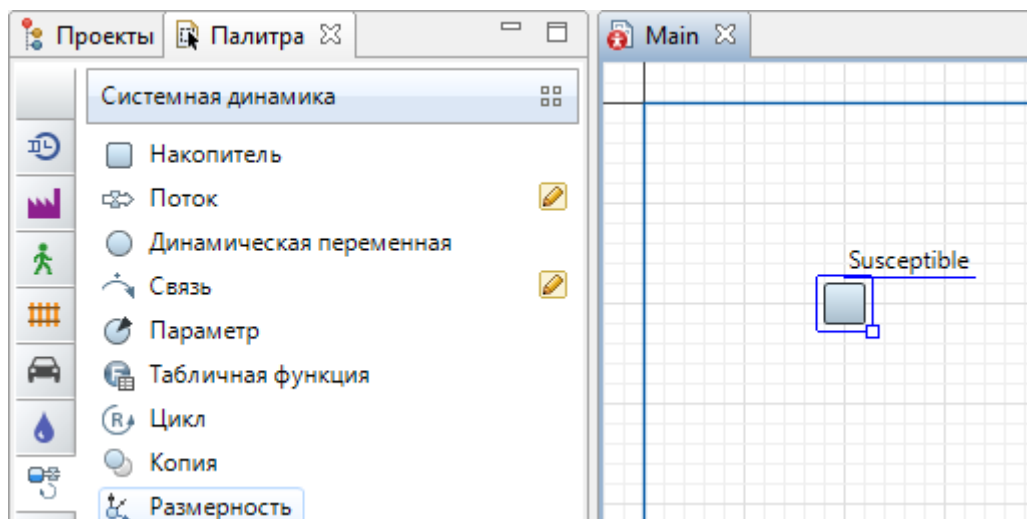


Рисунок 1.25 – Инструменты блока «Системная динамика» программы AnyLogic

Система имитационного моделирования Plant Simulation, входящая в состав продуктовой линейки Tecnomatix Plant Design & Optimization компании Siemens PLM Software, предназначена для создания и исследования в визуальной среде различных по сложности цифровых динамических моделей производственных и логистических схем [106, 107]. В библиотеки стандартных объектов включены объекты, которые позволяют моделировать потоки жидкости и объекты. Функциональность программного продукта позволяет, в том числе, моделировать оборудование, включая насосное оборудование, трубы и резервуары (рисунок 1.26). Продукт в основном применяется для моделирования в производстве автомобилей, наиболее распространен в Германии [104, 108]. Невозможность прогнозирования рецептур смешения, сложность имитационного моделирования свойств смесей, а также введенные санкции со стороны компании-производителя [109] затрудняют применение данного продукта для целей моделирования цеха компаундирования бензинов.

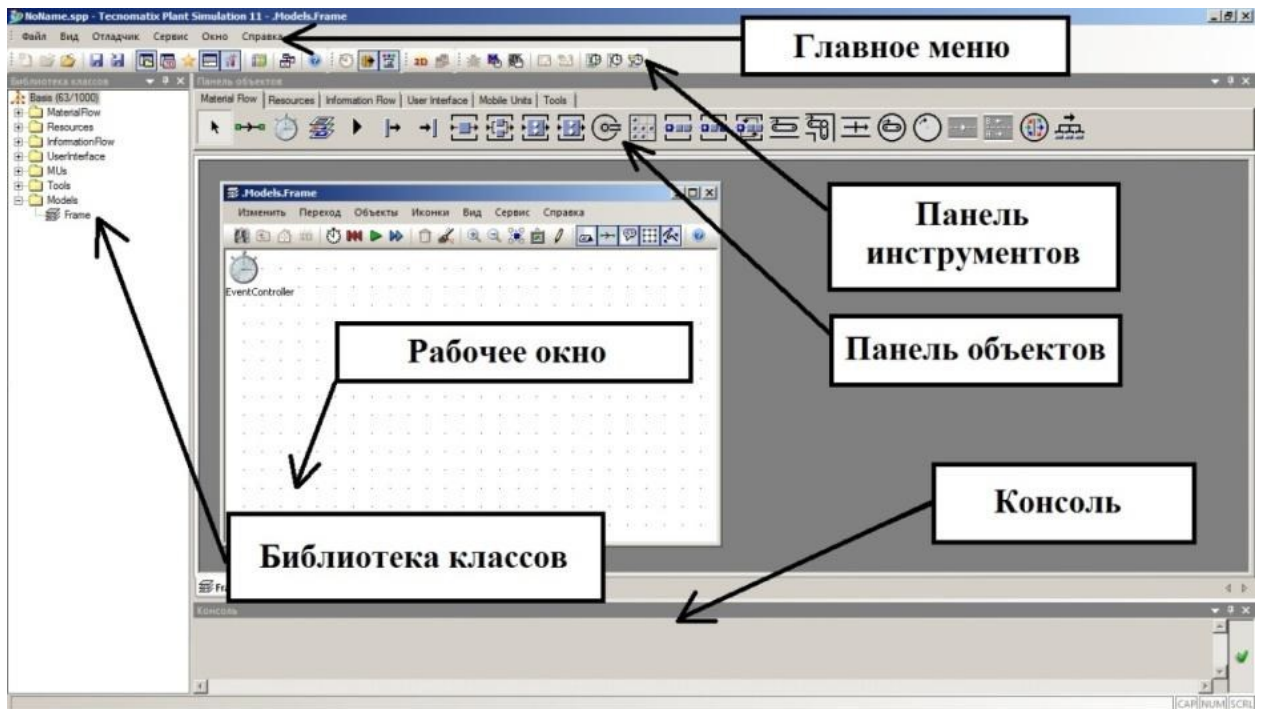


Рисунок 1.26 – Основное рабочее окно программы Tescnomatix Plant Simulation

Программный продукт Arena производства SystemsModeling применяется в некоторых вузах для обучения имитационному моделированию, однако как промышленная программа применяется мало [104]. Корпорация SystemsModeling была основана автором первого промышленно-ориентированного общецелевого языка имитационного моделирования SIMAN Деннисом Педгеном. Программа также позволяет моделировать различные виды деятельности, снабжена объектно-ориентированным интерфейсом, при этом требует значительного времени для освоения, глубоких знаний теории вероятностей, математической статистики и иных областей математики. Программа позволяет проводить дискретное, непрерывное и дискретно-непрерывное моделирование [110]. Пример имитационной модели работы цеха, построенной в программе, приведен на рисунке 1.27. Низкая распространенность, отсутствие стандартных библиотек для моделирования перемещений жидкости, невозможность применения блоков прогнозирования рецептуры не дает возможность использовать данный

программный продукт для имитационного моделирования цеха компаундирования бензинов.

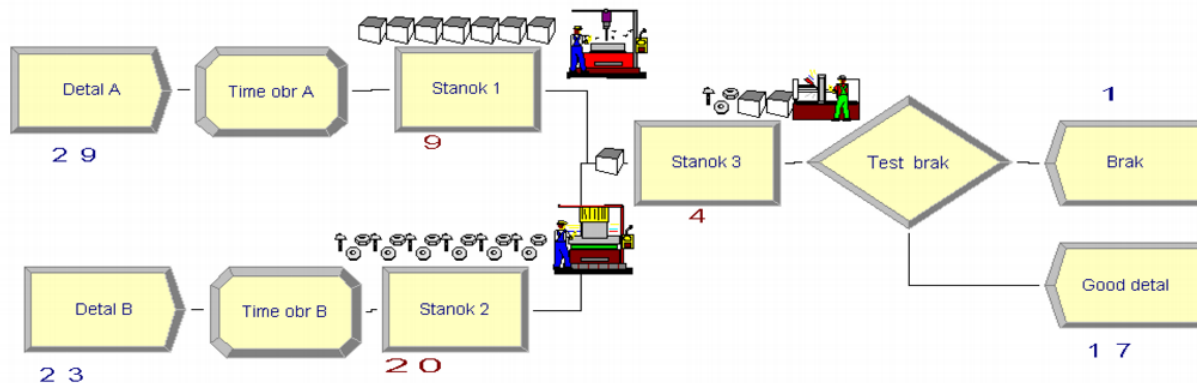


Рисунок 1.27 – Пример имитационной модели работы цеха, построенной в программе Arena

Система Flexsim производства компании Flexsim Software Products, Inc. представляет собой систему имитационного моделирования, предназначенную для моделирования бизнес-процессов. Система позволяет определить пропускные способности предприятий, сбалансированность производственных линий, выявлять узкие места производственных процессов и т.д. [111]. Система поддерживает все три парадигмы имитационного моделирования (процессно-ориентированный, системно-динамический и агентный подходы) и их комбинации. Графический интерфейс системы, ее инструменты и библиотеки позволяют сравнительно быстро создавать модели для различных предметных областей, и давать наглядные описания с визуализацией. Пример структурной модели, разработанной в программе Flexsim, представлен на рисунке 1.28. В целом программа имеет стандартный для аналогичных программных продуктов интерфейс. Аналогично другим системам имитационного моделирования, в программе Flexsim нет возможности провести моделирование свойств смешиваемых жидкостей и затруднено моделирование взаимодействия непрерывно смешиваемых потоков жидкости.

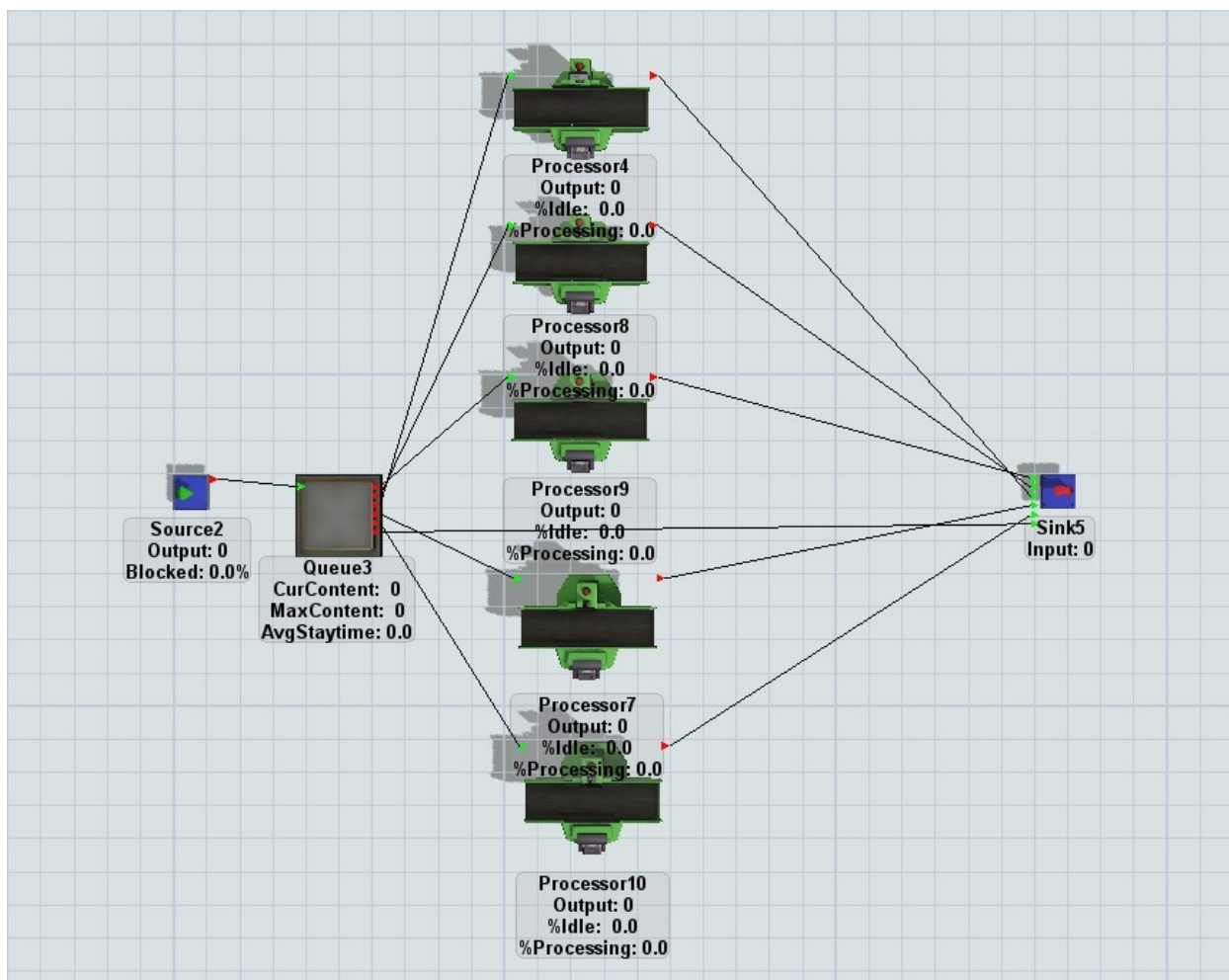


Рисунок 1.28 – Пример структурной модели, построенной в программе Flexsim

Существует еще ряд аналогичных систем, позволяющих проводить имитационное моделирование процессов: ExtendSim, GPSS, AutoMod, Simio, Simul8, Repast, NetLogo, Ponodel и ряд других, многие из которых являются узкоспециализированными, наполненными элементами, взятыми из предметной области. Часть из систем, в том числе рассмотренные выше, можно назвать универсальными [112]. Для систем характерен набор стандартных функций: модели создаются при помощи графического режима работы через потоковые диаграммы, стандартные шаблоны блоков, пользователю предоставляются различные меню и библиотеки элементов, имеются интерфейсы для соединения с базами данных, средства для обработки статистики на входе и выходе модели. В случае, когда выполняется моделирование производственных цехов, модель

позволяет определить динамику загрузки оборудования и работников, длительность производственного цикла, величину незавершенного производства, время проведения и количество рабочих, порядок запуска изделий в производство, величину партии деталей. Возможно прогнозирование аварийных ситуаций. Однако особенности производственного процесса цеха компаундирования бензинов при наличии необходимости одновременного планирования процесса смешения с учетом показателей качества получаемой смеси и настройки работы насосного оборудования не позволяют провести имитационное моделирование имеющимися программными средствами в нужном объеме.

1.5 Выводы и рекомендации

В результате проведенного анализа программных продуктов, направленных на создание имитационных моделей, можно сделать вывод о том, что, несмотря на широкую направленность имеющихся систем имитационного моделирования, в полной мере провести моделирование цеха компаундирования бензинов не представляется возможным. Анализ специализированных программных продуктов, направленных на составление расписания компаундирования и составление рецептуры, показывает, что в них нет возможности провести оптимизацию производства в цехе с учетом целевого получения оптимального качества получаемой продукции и с применением критерия по экономической составляющей. Также в существующих программных продуктах не задействовано понятие комплексного показателя качества, что не позволяет оптимизировать работу цеха для достижения оптимальных показателей качества продукции.

Таким образом, создание интегрированного программного продукта, направленного на решение задачи оптимизации цеха компаундирования бензинов, лишенного указанных недостатков, является актуальной задачей.

2 РАЗРАБОТКА ПОДХОДА И МЕТОДА СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА И ИНТЕГРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА

2.1 Подход к созданию производственной системы цеха на основе подбора рецептуры компаундирования товарных бензинов

Структура ПС цеха компаундирования бензинов состоит из взаимосвязанных элементов, включающих в себя производственный технологический процесс (технологические операции по получению товарной продукции, расчету рецептуры, проведению лабораторных замеров качества компонентов и продукции и т.д.), ресурсы (компоненты смешения, электроэнергия, трудовые ресурсы) и продукцию. Особенности функционирования насосного и смесительного оборудования каждого конкретного предприятия формируют различный набор производственных операций, производимых в цехе: при наличии систем удаленного контроля клапанов, задвижек, пуска и останова насосного и смесительного оборудования, повышается уровень автоматизации самого производственного процесса путем перевода операций из ручного режима в режим управления через распределенную систему управления цеха. Аналогичным образом, возможность дополнительного контроля показателей качества входящего сырья и готовой продукции повышает степень автоматизации производства и позволяет внедрять усовершенствования в технологический процесс.

Одним из основных элементов технологического процесса компаундирования является процесс подбора рецептуры смешения.

Итоговая эффективность всего процесса компаундирования товарной продукции во многом зависит от эффективности подбора рецептуры смешения.

Рецептура компаундирования бензинов (процентное соотношение объемов или масс смешиваемых компонентов) рассчитывается для достижения максимального соответствия требуемому качеству согласно нормативным требованиям (например, ГОСТ 32513-2013 или ТР ТС 013/2011 [113, 114]) и минимальной себестоимости продукта. Сам автомобильный бензин и его компоненты, участвующие в компаундировании при его приготовлении, проходят периодический лабораторный контроль.

Рецептура компаундирования товарных автомобильных бензинов зависит от качества смешиваемых компонентов и их стоимости в товарной корзине предприятия. Под качеством компонентов подразумевается детонационная стойкость (октановые числа по исследовательскому и моторному методам), объемная доля бензола, объемная доля олефиновых и ароматических углеводородов, содержание серы, давление насыщенных паров и ряд других показателей.

Проблематика подбора рецептуры состоит в том, что показатель октанового числа результата компаундирования – автомобильного бензина, не аддитивен составу и соответствующим значениям октановых чисел компонентов смешения, что объясняется наличием межмолекулярных связей между углеводородами в бензинах [97, 115]. На НПЗ разработка рецептур смешения товарных автомобильных бензинов осуществляется либо на основе среднестатистических данных о составе и характеристиках потоков за предшествующий период, либо с применением специализированных программных продуктов, учитывающих качественные показатели компонентов смешения. В процессе производства за счет изменения качества входного сырья (нефти), изменения внешних факторов (например, резкое изменение температуры окружающей среды), а так же за счет колебаний параметров на технологических установках, качественные показатели потоков, приходящих с технологических установок на станцию смешения, могут варьироваться. Результатом таких изменений может стать изменение качественных показателей автомобильного бензина. Например, в том случае, если октановое число автомобильного бензина получено ниже требуемого ГОСТ или

ТУ, процесс смешения необходимо провести повторно с доведением до требуемого качества. При превышении октанового числа (по моторному или исследовательскому методам) над минимально допустимым в соответствии с ГОСТ или ТУ, НПЗ несет убытки в виде недополученной прибыли [116]. Оптимизация процесса компаундирования бензинов позволяет максимизировать маржинальную прибыль предприятия.

Требованиями ГОСТ 32513-2013 для территории Российской Федерации установлены 18 физико-химических и эксплуатационных показателей качества автомобильных бензинов, которым должно соответствовать топливо, выпускаемое для реализации (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Физико-химические и эксплуатационные показатели бензинов и требования к испаряемости в соответствии с требованием ГОСТ 32513-2013 для территории Российской Федерации

Наименование показателя	Норма для марки			
	АИ-80	АИ-92	АИ-95	АИ-98
1. Октановое число:				
– по исследовательскому методу, не менее	80,0	92,0	95,0	98,0
– по моторному методу, не менее	76,0	83,0	85,0	88,0
2. Концентрация свинца, мг/дм ³	отсутствие			
3. Концентрация промытых смол, мг/дм ³ (мг/100 см ³), не более	50 (5)			
4. Индукционный период, мин, не менее	360			
5. Массовая доля серы, мг/кг, не более, для экологического класса:				
– К2	500			
– К3	150			
– К4	50			
– К5	10			

Продолжение таблицы 2.1

Наименование показателя	Норма для марки			
	АИ-80	АИ-92	АИ-95	АИ-98
6. Объемная доля бензола, %, не более, для экологических классов:				
– К2	5			
– К3, К4, К5	1			
7. Объемная доля углеводородов, %, не более, для экологических классов К3, К4, К5:				
– олефиновых	18,0			
– ароматических	35,0 (42,0 – экологический класс К3)			
8. Массовая доля кислорода, %, не более, для экологических классов К3, К4, К5	2,7			
9. Объемная доля оксигенатов, %, не более, для экологических классов К3, К4, К5:				
– метанола	отсутствие			
– этанола	5,0			
– изопропилового спирта	10,0			
– трет-бутилового спирта	7,0			
– изобутилового спирта	10,0			
– эфиров (C ₅ и выше)	15,0			
– других оксигенатов (с температурой кипения не выше 210 °С)	10,0			
10. Испытание на медной пластинке (3 ч при 50 °С)	класс 1			
11. Внешний вид	чистый, прозрачный			
12. Плотности при 15 °С, кг/м ³	725,0-780,0			
13. Концентрация марганца, мг/дм ³ , не более	отсутствие			
14. Концентрация железа, мг/дм ³ , не более	отсутствие			
15. Объемная доля монометиланилина, %, не более, для экологических классов:				
– К2	1,3			
– К3, К4	1,0			
– К5	отсутствие			

Окончание таблицы 2.1

Наименование показателя	Норма для марки			
	АИ-80	АИ-92	АИ-95	АИ-98
16. Давление насыщенных паров бензина (ДНП), кПа:				
– в летний период		35-80		
– в зимний и межсезонный период		35-100		
17. Фракционный состав:				
– объемная доля испарившегося бензина, %, при температуре:				
– 70 °С (И70) для летних групп бензинов		15-48		
– 70 °С (И70) для зимних и межсезонных групп бензинов		15-50		
– 100 °С (И100)		40-70		
– 150 °С (И150), не менее		75		
– конец кипения, °С, не выше		215,0		
– объемная доля остатка в колбе, %, не более		2,0		
18. Максимальный индекс паровой пробки (ИПП)				
– для летних и зимних групп бензинов		-		
– для межсезонных групп бензинов		1350		

Основными качественными показателями компонентов смешения и итоговой смеси являются: плотность, октановое число по исследовательскому методу, давление насыщенных паров, массовая доля серы, объемная доля бензола, ароматических углеводородов и испарившегося вещества при 70, 100, 150 °С. Рассмотрим перечень законов, формул и правил, по которым происходит расчет показателей качества смеси на основании известных данных о качестве входящих в смешение потоков.

Относительная плотность жидкого нефтепродукта – безразмерная величина, представляющая собой отношение его истинной плотности к плотности дистиллированной воды, взятых при определенных температурах, обозначается $\rho_{t_1}^{t_2}$, где t_1 – температура воды, t_2 – температура нефтепродукта. В РФ

стандартными приняты температуры для воды 4 °С, для нефтепродукта 20 °С (ρ_4^{20}). В США, Великобритании и некоторых других странах стандартные температуры воды и нефтепродукта одинаковые – 15,6 °С (ρ_{15}^{15}).

Плотность уменьшается с ростом температуры, в связи с чем, для большинства углеводородных смесей зависимость между температурой и плотностью носит линейный характер и определяется формулой Д.И. Менделеева:

$$\rho_4^t = \rho_4^{20} - \alpha(t - 20) \quad (2.1)$$

где ρ_4^t – относительная плотность при температуре t , ρ_4^{20} – относительная плотность при 20 °С, α – средняя температурная поправка относительной плотности на один градус (таблица 2.2).

Пересчет на плотность ρ_{15}^{15} можно осуществить по формуле:

$$\rho_4^{20} = \rho_{15}^{15} - 5\alpha \quad (2.2)$$

Таблица 2.2 – Средняя температурная поправка относительной плотности

ρ_4^{20}	α	5α	ρ_4^{20}	α	5α
0,7000-0,7099	0,000897	0,00448	0,8500-0,8599	0,000699	0,00349
0,7100-0,7199	0,000884	0,00442	0,8600-0,8699	0,000686	0,00343
0,7200-0,7299	0,000870	0,00435	0,8700-0,8799	0,000673	0,00336
0,7300-0,7399	0,000857	0,00428	0,8800-0,8899	0,000660	0,00330
0,7400-0,7499	0,000844	0,00422	0,8900-0,8999	0,000647	0,00323
0,7500-0,7599	0,000831	0,00415	0,9000-0,9099	0,000633	0,00316
0,7600-0,7699	0,000818	0,00410	0,9100-0,9199	0,000620	0,00310
0,7700-0,7799	0,000805	0,00402	0,9200-0,9299	0,000607	0,00303
0,7800-0,7899	0,000792	0,00396	0,9300-0,9399	0,000594	0,00297
0,7900-0,7999	0,000778	0,00386	0,9400-0,9499	0,000581	0,00290
0,8000-0,8099	0,000765	0,00382	0,9500-0,9599	0,000267	0,00283
0,8100-0,8199	0,000752	0,00376	0,9600-0,9699	0,000554	0,00277
0,8200-0,8299	0,000738	0,00369	0,9700-0,9799	0,000541	0,00270
0,8300-0,8399	0,000725	0,00362	0,9800-0,9899	0,000522	0,00261
0,8400-0,8499	0,000712	0,00356	0,9900-1,0000	0,000515	0,00257

Плотность дистиллированной воды при различных температурах приводится в справочниках, например в справочнике по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [117], выдержка из которого приведена в таблице 2.3. При отсутствии значения в таблице, допускается линейная интерполяция.

Таблица 2.3 – Выдержка из справочника по плотностям дистиллированной воды при температурах от 0 до 98 °С

t, °С	ρ , кг/м ³	ρ , г/мл	t, °С	ρ , кг/м ³	ρ , г/мл
0	999,8	0,9998	62	982,1	0,9821
0,1	999,8	0,9998	64	981,1	0,9811
2	999,9	0,9999	66	980	0,98
4	1000	1	68	978,9	0,9789
6	999,9	0,9999	70	977,8	0,9778
8	999,9	0,9999	72	976,6	0,9766
10	999,7	0,9997	74	975,4	0,9754
12	999,5	0,9995	76	974,2	0,9742
14	999,2	0,9992	78	973	0,973
16	999	0,999	80	971,8	0,9718
18	998,6	0,9986	82	970,5	0,9705
20	998,2	0,9982	84	969,3	0,9693
22	997,8	0,9978	86	967,8	0,9678
24	997,3	0,9973	88	966,6	0,9666
26	996,8	0,9968	90	965,3	0,9653
28	996,2	0,9962	92	963,9	0,9639
30	995,7	0,9957	94	962,6	0,9626
32	995	0,995	96	961,2	0,9612
34	994,4	0,9944	98	959,8	0,9598
36	993,7	0,9937	100	958,4	0,9584
38	993	0,993	105	954,5	0,9545
40	992,2	0,9922	110	950,7	0,9507
42	991,4	0,9914	115	946,8	0,9468
44	990,6	0,9906	120	942,9	0,9429
46	989,8	0,9898	125	938,8	0,9388
48	988,9	0,9889	130	934,6	0,9346
50	988	0,988	140	925,8	0,9258
52	987,1	0,9871	150	916,8	0,9168
54	986,2	0,9862	160	907,3	0,9073
56	985,2	0,9852	170	897,3	0,8973
58	984,2	0,9842	180	886,9	0,8869
60	983,2	0,9832	190	876	0,876

Плотность является аддитивным свойством, поэтому при смешении нефтепродуктов плотность смеси можно определить по формулам:

- при выражении состава по заданным массам компонентов плотность определяется по формуле (2.3), где m_i – масса i -го компонента;

$$\rho_{\text{см}} = \frac{m}{\sum \left(\frac{m_i}{\rho_i} \right)} \quad (2.3)$$

- при выражении состава по массовым долям плотность определяется по формуле (2.4), где $x_i = \frac{m_i}{m}$ – отношение массы компонента к массе смеси;

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{\rho_i} \right)} \quad (2.4)$$

- при выражении состава по объемным долям плотность определяется по формуле (2.5), где $x_{V_i} = \frac{V_i}{V}$ – отношение объема компонента к объему смеси [118].

$$\rho_{\text{см}} = \sum x_{V_i} \rho_i \quad (2.5)$$

Октановое число является показателем, который характеризует детонационную стойкость топлива, применяемого в двигателях внутреннего сгорания с внешним смесеобразованием. Октановое число определяется по исследовательскому или моторному методам, при этом для неэтилированных бензинов моторный и исследовательский методы аналогичны. Наибольшая проблема вызвана тем, что показатель октанового числа результата компаундирования, не аддитивен составу и соответствующим значениям октановых чисел компонентов смешения, что объясняется наличием межмолекулярных связей в углеводородах [97]. Относительно точный расчет может быть проведен на основании подробной информации по углеводородному составу смеси, но проведение такого расчета многократно итерационным способом не представляется возможным в условиях действующего производства. Октановое число смеси можно рассчитать по формуле, учитывающей полиномы второго и третьего порядков:

$$\Omega_{\text{см}} = \sum_i \alpha_i x_i + \sum_{i,j} \alpha_{ij} x_i x_j + \sum_{i,j,k} \alpha_{ijk} x_i x_j x_k \quad (2.6)$$

где $\Omega_{\text{см}}$ – октановое число смеси, α_i , α_j , α_k – коэффициенты, полученные с помощью уравнений регрессии, построенных по приготовленным в лаборатории

бензиновым смесям с использованием симплекс-решетчатого планирования эксперимента [119]. Чаще всего данные коэффициенты не доступны для применения, поэтому для целей моделирования была применена формула вычисления октанового числа смеси [95]:

$$\Omega_{\text{см}} = \frac{\sum m_i \cdot \Omega_i}{\sum m_i} + \alpha \quad (2.7)$$

где i – номер компонента, вовлекаемого в компаундирование, Ω_i – октановое число i -го компонента, ед., m_i – масса i -го компонента, вовлеченная в компаундирование, кг, α – поправочный коэффициент.

Поправочный коэффициент α может корректироваться итерационно при проведении ряда расчетов и сопоставлений с лабораторно замерными величинами в соответствии с формулой:

$$\alpha = \Omega_j^{\text{зам}} - \frac{\sum m_i^j \cdot \Omega_i}{\sum m_i^j} \quad (2.8)$$

где j – номер замера, $\Omega_j^{\text{зам}}$ – октановое число j -го замера в условиях лаборатории, ед., m_i^j – масса i -го компонента, вовлеченная в компаундирование на стадии j -го замера, м³.

Давление насыщенных паров – давление, развиваемое парами, находящимися над жидкостью в условиях равновесия при определенной температуре. Давление насыщенных паров смесей и растворов зависит от температуры и от состава жидкой и паровой фаз. Для растворов и смесей, подчиняющихся законам Рауля и Дальтона, общее давление насыщенных паров может быть вычислено по формуле [120, 121]:

$$P = \sum P_i x_i' \quad (2.9)$$

где P – общее давление насыщенных паров смеси, P_i – давление насыщенных паров компонентов при заданной температуре, кПа, x_i' – мольные концентрации

компонентов, при этом $x'_i = \frac{x_i/M_i}{\sum(x_i/M_i)}$, где M_i – молярная масса компонента, кг/моль.

Зависимость между молярной массой и плотностью выражает формула Крэга при условии $\rho < 660$ кг/м³:

$$M = \frac{44,29 \cdot \rho_{15}^{15}}{1,03 - \rho_{15}^{15}} \quad (2.10)$$

или при $\rho \geq 660$ кг/м³ формула Б.М. Воинова

$$M = 60 + 0,3t_{\text{ср.м}} + 0,001t_{\text{ср.м}}^2 \quad (2.11)$$

где $t_{\text{ср.м}} = \sum \frac{N_i}{N} t_i = \sum x'_i t_i$ – средняя температура кипения нефтяной фракции, N_i – число молей компонента, N – общее число молей в смеси.

Приближенно среднюю температуру кипения можно определить как среднее арифметическое начальной и конечной температур кипения [118].

Молярную массу смеси рассчитывают по правилу аддитивности, исходя из известного состава и молярных масс компонентов:

$$M = \sum M_i x'_i \quad (2.12)$$

В случае, когда исходные данные для расчета не доступны, можно применить расчет давления насыщенных паров с использованием индексов смешения [122]:

$$P = \left(\frac{\sum P_i^{1,25} \cdot V_i}{\sum V_i} \right)^{1/1,25} \quad (2.13)$$

Массовая доля серы является показателем, аддитивным по массе. **Объемные доли бензола, ароматических углеводородов, испарившегося вещества** при 70, 100, 150 °С можно условно принять аддитивными по массе. При этом необходимо учитывать, что при лабораторных исследованиях компонентов компаундирования данные о фракционном составе могут быть представлены не в формате объемных долей испарившегося вещества при контрольных температурах, а в формате значений температур, при которых объем

испарившегося вещества соответствует контрольным значениям, стандартно – начало кипения, 10%, 30%, 50%, 70%, 90%, конец кипения. Для точного определения требуемых значений необходимо построение кривой истинных температур кипения с кривой однократного испарения. Упрощенно кривые истинных температур кипения можно заменить построением линейной зависимости выхода фракций в % об. или масс. в зависимости от температуры кипения в °С по имеющимся точкам с последующим нахождением недостающих значений по полученному графику.

Таким образом, значительное число показателей качества и затрудненность их вычисления ввиду отсутствия аддитивности усложняют процесс подбора рецептуры.

В производственном процессе добавляется фактор себестоимости каждого из компонентов, применяемого при компаундировании, а также ограничения по вовлечению в компаундирование определенных объемов произведенных компонентов – например, полное вовлечение катализата в смешение и минимизация вовлечения покупного метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ) или метил-трет-амилового эфира (МТАЭ). Таким образом, имеется необходимость а) в формулировании комплексного показателя качества для смеси и б) в формировании целевой функции для применения в математической модели поиска оптимальной рецептуры смешения.

В рамках работы предлагается рассматривать **комплексный показатель качества компаундирования бензина** k по следующей формуле:

$$k = \frac{\left| \frac{\sum V_i \cdot \rho_i}{\sum V_i} - \rho_{min}^{ГОСТ} \right| + \left| \frac{\sum V_i \cdot \rho_i}{\sum V_i} - \rho_{max}^{ГОСТ} \right|}{100} + \left| \frac{\sum V_i \cdot \rho_i \cdot \Omega_i}{\sum V_i \cdot \rho_i} + \alpha - \Omega^{ГОСТ} \right| \quad (2.14)$$

где:

- i – номер компонента, применяемого в компаундировании;
- V_i – объем i -го компонента, вовлекаемый в компаундирование, м³;
- ρ_i – плотность i -го компонента при 15 °С, кг/м³;

- $\rho_{min}^{ГОСТ}, \rho_{max}^{ГОСТ}$ – минимально и максимально допустимое значение плотности товарного бензина при 15 °С в соответствии с ГОСТ или ТУ, кг/м³;
- Ω_i – октановое число по исследовательскому методу i -го компонента, ед.;
- $\Omega^{ГОСТ}$ – октановое число по исследовательскому методу товарного бензина в соответствии с ГОСТ или ТУ, ед.;
- α – поправочный коэффициент при расчете октанового числа смеси, ед.

В соответствии с физическим смыслом величин, входящих в формулу (2.14) с учетом граничных значений плотности из таблицы 2.1, $k \geq 0,55$ и качество смеси тем лучше, чем ближе k к 0,55.

Следует отметить, что автомобильный бензин и компоненты, участвующие в компаундировании при его приготовлении, проходят периодический лабораторный контроль. Для определения октанового числа по исследовательскому или по моторному методам в заводской лаборатории требуется применение специализированного дорогостоящего оборудования и реагентов, сам лабораторный анализ длится от 25 до 30 минут для одного образца, в связи с чем, число измерений значительно ограничено.

Для возможностей проведения большего числа замеров в единицу времени могут быть применены различные варианты измерений с применением поточных анализаторов качества компонентов и смесей. Увеличение числа замеров в единицу времени в таком случае возможно за счет принципов работы поточных анализаторов, основанных на анализе спектров, излучаемых образцом, возможные принципы действия поточных анализаторов описаны в разделе 1.1. При этом полная замена лабораторного контроля не подразумевается, поскольку контрольные измерения и калибровка результатов вспомогательных методов измерений осуществляются исключительно в соответствии с требованиями российских и международных стандартов [7].

Применение комплексного показателя качества смеси, разработанного в данной работе, позволяет перевести данные, получаемые от поточных анализаторов качества, из набора количественных значений в качественный

показатель смеси. Широкая вариативность промышленных поточных анализаторов качества позволяет реализовать данную цепочку непосредственно в производственном процессе нефтеперерабатывающего завода.

Для целей формирования целевой функции при автоматизированном подборе рецептуры компаундирования необходимо объединить комплексный показатель качества (2.14) с итоговой себестоимостью смеси. Для это было предложено проводить оптимизацию целевой функции Ψ до минимума по формуле (2.15) в соответствии с ограничениями (2.16):

$$\Psi = k + \frac{\sum Z_i \cdot V_i \cdot \rho_i}{10^n} \quad (2.15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum V_i = V; \\ \rho_{min}^{ГОСТ} \leq \frac{\sum V_i \cdot \rho_i}{\sum V_i} \leq \rho_{max}^{ГОСТ}; \\ \frac{\sum V_i \cdot \rho_i \cdot \Omega_i}{\sum V_i \cdot \rho_i} + \alpha \geq \Omega^{ГОСТ}; \\ P_{min}^{ГОСТ} \leq \frac{\sum V_i \cdot P_i}{\sum V_i} \leq P_{max}^{ГОСТ}; \\ V_j \geq V_j^{min}; \\ V_s \leq V_s^{max}. \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Здесь в дополнение к предыдущим обозначениям:

- V_i – изменяемый параметр – объем вовлечения в компаундирование i -го компонента, м³;
- Z_i – себестоимость i -го компонента, руб./т;
- n – число разрядов в результате вычисления $\sum Z_i \cdot V_i \cdot \rho_i$;
- V – целевой объем товарного бензина, получаемого в процессе компаундирования, м³;
- P_i – давление насыщенных паров i -го компонента, кПа;
- $P_{min}^{ГОСТ}$, $P_{max}^{ГОСТ}$ – минимально и максимально допустимое значение давления насыщенных паров бензина в соответствии с ГОСТ или ТУ, кПа;

- j – номер компонента компаундирования, вовлечение которого необходимо максимизировать (опционально);
- V_j^{min} – минимально необходимый объем j -го компонента для вовлечения в компаундирование;
- s – номер компонента компаундирования, вовлечение которого необходимо минимизировать (опционально);
- V_s^{max} – максимально допустимый объем s -го компонента для вовлечения в компаундирование.

Поскольку в целевую функцию изменяемый параметр входит нелинейно, оптимизация может происходить только нелинейными методами с поиском локальных оптимальных значений. Соответственно, для работы любого из алгоритмов поиска решения большую роль будет играть выбор начальных условий. В качестве начальных условий для работы алгоритма предлагается принимать рецептуру из технологического регламента, принятого на НПЗ. Данная рецептура не является идеальной, но является результатом предыдущей работы завода, а также отвечает требованиям технологического регламента производства.

2.2 Метод структурного анализа и интеграции элементов производственной системы с учетом применения комплексного показателя качества смеси

Основу процесса производства моторных топлив составляет технологический процесс компаундирования, т.е. комплекс последовательно выполняемых операций. Под компаундированием понимается дозированное смешение компонентов, вырабатываемых на различных технологических установках НПЗ, с целью достижения определяющих показателей качества. Производственную систему цеха смешения товарной продукции условно можно представить как совокупность следующих основных зон: парк резервуаров базовых компонентов, заводская лаборатория, зона аппаратуры смешения, парк резервуаров товарной продукции, зона

размещения персонала (операторные). Условная графическая модель цеха производства товарной продукции на примере приготовления товарных бензинов представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Условная графическая модель процесса компаундирования товарных бензинов

На отечественных нефтеперерабатывающих предприятиях чаще всего применяется стандартная схема компаундирования с циркуляционным смешением (рисунок 2.2). При такой схеме технологический персонал производит установку величины подачи насосов, контролирует процесс накопления резервуаров. Большинство операций производится вручную, поскольку автоматизация процесса при данной схеме минимальна. Готовая смесь проверяется в заводской лаборатории на соответствие требованиям ГОСТ или ТУ и, в случае не достижения целевых показателей, производится перерасчет рецептуры и вычисление объемов добавления компонентов, после чего персонал цеха компаундирования организует домешивание.

Применение комплексного показателя качества смеси, предложенного автором, позволяет рассмотреть возможность внедрения на нефтеперерабатывающем заводе технологической схемы он-лайн компаундирования (рисунок 2.3) с применением поточного смешения и поточных анализаторов качества компонентов и продукции. Особенностью схемы №2

является возможность ежеминутной корректировки рецептуры смешения в автоматизированном режиме, т.е. соотношения объема вовлекаемых в процесс базовых компонентов, непосредственно в процессе компаундирования, а не по факту его завершения, что было бы не возможно без наличия комплексного показателя качества смеси.

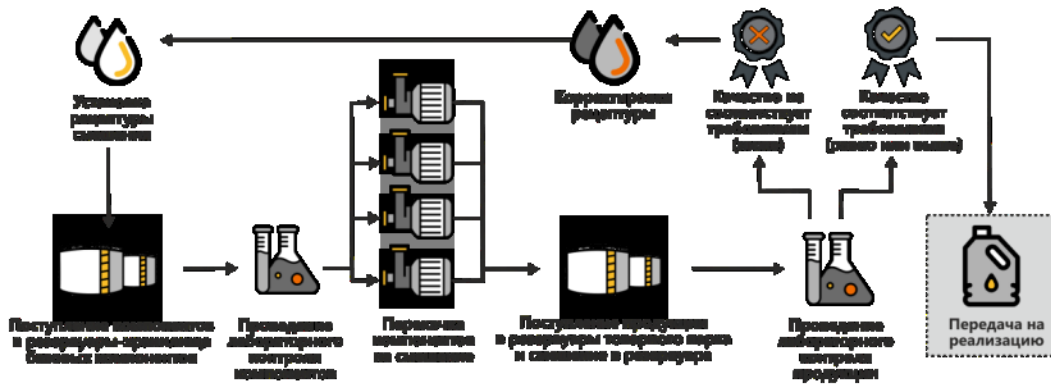


Рисунок 2.2 – Графическая схема технологического процесса компаундирования по схеме №1 (циркуляционное смешение)

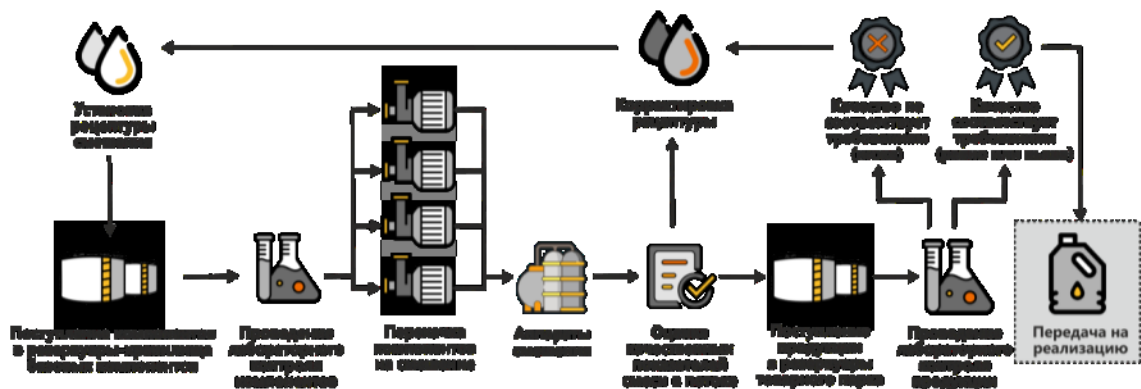


Рисунок 2.3 – Графическая схема технологического процесса компаундирования по схеме №2 (он-лайн смешение)

При реализации компаундирования по технологической схеме №2 технологический персонал цеха компаундирования осуществляет постоянный

контроль процесса и постоянно вовлечен в процесс в качестве контролирующих лиц, получая из системы поддержки принятия решений информацию о качестве смеси в потоке. В целом организация производства при реализации технологической схемы компаундирования №2 представляется более ритмичной с равномерно распределенными нагрузками на персонал.

Для реализации схемы он-лайн смешения необходим подбор оборудования цеха в дополнение или на замену существующего: требуется вовлечение дополнительного оборудования по смешению, пробоотбору в потоке, поточных анализаторов, необходима настройка системы поддержки принятия решений для обработки поступающих данных с применением комплексного показателя качества смеси. При этом возможна оптимизация конфигурации или нагрузки насосного оборудования за счет подбора типоразмеров насосов в соответствии с планируемой рецептурой.

2.3 Модель организации производственной системы цеха с оптимизацией насосного оборудования и изменением планировки

Разработанный автором комплексный коэффициент качества смеси дал возможность создать математический аппарат, позволяющий адаптировать рецептуру смешения под требования норм, что в свою очередь дало возможность разработать модель организации ПС цеха компаундирования с учетом оптимизации насосного оборудования, дооснащения автоматизированной станцией смешения и смены схемы смешения на смешение в потоке.

Концептуальная модель процесса компаундирования товарных топлив на примере компаундирования бензинов из алкилата, катализата, изомеризата и МТБЭ для обоих вариантов технологических схем представлена на рисунке 2.4, где приняты следующие обозначения:

- в случаях, когда нумерация технологического процесса состоит из двух нижних индексов, принимается, что первый индекс – это номер операции, второй – номер компонента (1 – алкилат, 2 – катализат, 3 –

изомеризат, 4 – МТБЭ). В случае, когда индекс состоит из одной цифры, операция производится вне зависимости от выбора компонентов;

- S_{11}, S_{12}, S_{13} – технологическая операция по наливу в парк резервуаров базовых компонентов с технологических установок нефтеперерабатывающего завода. Чаще всего МТБЭ закупается отдельно, поэтому для этого компонента в рассматриваемой модели данная операция не производится, что является допущением модели;

- $V_{11}, V_{12}, V_{13}, V_{14}$ – резервуары хранения базовых компонентов;

- S_{21}, S_{22}, S_{23} – технологическая операция по взятию проб для передачи в заводскую лабораторию;

- Q_1 – проведение анализов компонентов в заводской лаборатории;

- S_3 – технологическая операция по подбору/корректировке рецептуры смешения;

- $S_{41}, S_{42}, S_{43}, S_{44}$ – технологическая операция по запуску насосов по перекачке базовых компонентов в смеситель;

- S_5 – технологическая операция смешения;

- X_1, X_2 – операции по сопоставлению показателей с эталонными величинами (красная ветка – отрицательный результат (показатели качества не соответствуют эталонным, хуже них), зеленая ветка – положительный результат (показатели качества соответствуют эталонным, равны им или лучше них));

- S_6 – технологическая операция по проверке качества смеси в потоке;

- V – резервуар хранения товарной продукции (бензина);

- S_7 – технологическая операция по перемешиванию смеси в резервуаре товарной продукции;

- S_8 – технологическая операция по взятию проб из резервуаров товарной продукции;

- Q_2 – проведение анализов смеси в заводской лаборатории;
- S_9 – технологическая операция по паспортизации продукции и отгрузке.

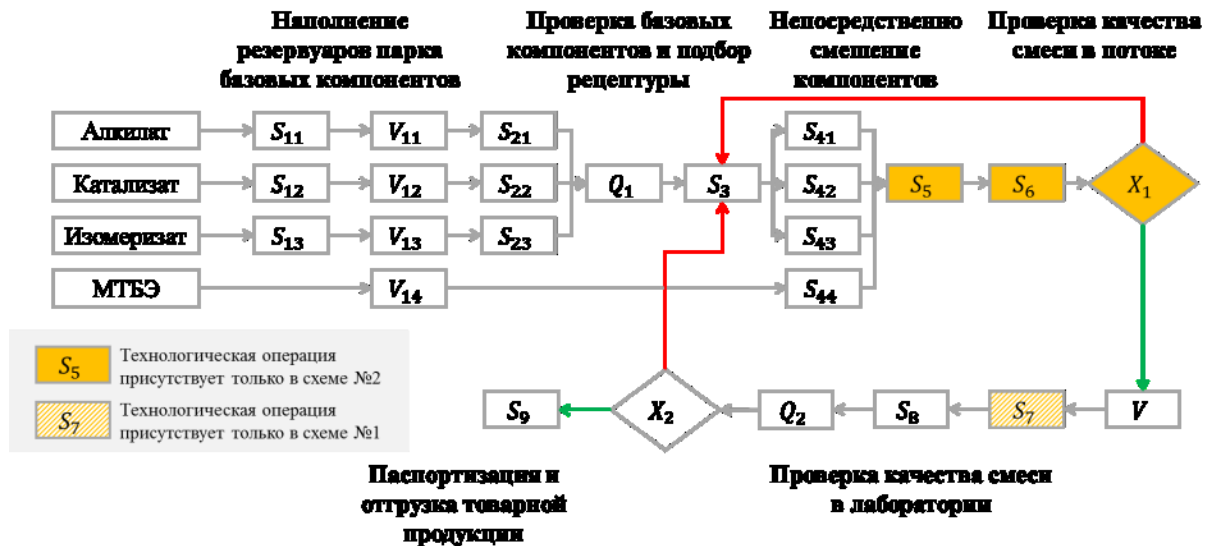


Рисунок 2.4 – Концептуальная модель процесса компаундирования товарных топлив на примере компаундирования бензинов из алкилата, катализата, изомеризата и МТБЭ

Различия модели между двумя рассматриваемыми реализациями технологической цепочки следующие:

- в случае применения технологической схемы №1 (циркуляционное смешение):
 - возврат цепочки на этап S_3 производится однократно с дополнением в смесь высокооктанового базового компонента (объем дополнения приведен в допущениях модели);
 - этап S_7 включает в себя время и энергозатраты на работу циркуляционного насоса, осуществляющего перекачивание товарной продукции по схеме «резервуар-насос-резервуар»;
 - этапы S_5 , S_6 , X_1 отсутствуют;
- в случае применения технологической схемы №2 (смешение в потоке):

- возврат цепочки с этапа X_2 не производится;
- этапы S_5 , S_6 , X_1 включены в процесс.

Оптимизация работы производственной цепочки по компаундированию может быть решена за счет повышения результативности производственного процесса. Сопоставление вариантов организации технологического процесса решается путем применения имитационного моделирования.

Целью построения имитационной модели ПС цеха компаундирования товарных бензинов является исследование влияния выбора технологического процесса, подбор параметров насосного оборудования, а также максимизация условной прибыли предприятия.

Основные задачи моделирования:

- определить параметры оптимального выбора между циркуляционным методом смешения и методом поточного смешения товарных бензинов;
- определить оптимальный выбор производительности насосного оборудования;
- максимизировать условную доходность предприятия.

Имитационная модель процесса компаундирования товарных бензинов была реализована при помощи языка программирования VBA, встроенного в MS Excel. Модель построена в соответствии с концептуальным описанием, приведенным на рисунке 2.4, и реализована как пошаговый расчет процесса с накоплением необходимых данных (накопленные объемы жидкости в резервуарах, накопленная электроэнергия от каждого вида электромеханического оборудования) относительно временной шкалы. Шаг модели принят дискретным и равным 1 минуте. Накопление данных на этапе налива резервуаров компонентного парка осуществляется однократно, после чего идет два параллельных расчета работы при реализации различных технологических цепочек – с применением поточных анализаторов качества и смешением в потоке и без него. Результатом расчетов является сопоставление суммарного времени на выполнение всей цепочки и итоговый условный доход от реализации готовой

продукции, за вычетом затрат на себестоимость вовлеченных в компаундирование компонентов и затрат на электроэнергию, в единицу времени.

Для описания алгоритма работы имитационной модели процесса компаундирования товарных бензинов приняты следующие допущения. Число базовых компонентов принято равным 4: будем считать, что автомобильный бензин производится смешением алкилата, катализата, изомеризата и МТБЭ. В общем случае число компонентов смешения может быть отличным от четырех, но перечисленные компоненты являются наиболее распространенными в производстве товарных бензинов. Рассматривается производство наиболее распространенных марок автомобильного бензина – АИ-92 экологического класса К5 (АИ-92-К5) и АИ-95 экологического класса К5 (АИ-95-К5).

Для целей моделирования были зафиксированы условные стоимости компонентов, товарных бензинов и электроэнергии, применяемый модельный ряд насосов представлен в таблице 2.4, условная рецептура смешения в % объема представлена в таблице 2.5.

Таблица 2.4 – Модельный ряд насосов, применяемый в модели

Марка	Подача, м ³ /ч	Мощность, кВт
Марка №1	80	45
Марка №2	160	85
Марка №3	268	109,4

Таблица 2.5 – Условная рецептура компаундирования товарных бензинов

Товарный бензин	Алкилат, % об.	Изомеризат, % об.	Катализат, % об.	МТБЭ, % об.
АИ-92-К5	5	24	71	0
АИ-95-К5	15	10	69	6

Итоговые затраты рассматриваются по завершенной единичной технологической цепочке – начиная от налива резервуаров с базовыми

компонентами и завершая паспортизацией товарной продукции в резервуаре бензина. В общем случае на производстве процесс компаундирования может происходить при одновременном наливке нескольких резервуаров товарной продукции. Объем готовой продукции сопоставим с суммарным объемом базовых компонентов.

Для имитации несовершенства технологической схемы №1 принято, что по результатам компаундирования требуется добавление от 2,5% до 4% от объема резервуара товарной продукции изомеризата (данный компонент выбран с допущением, как базового компонента из собственного производства с наибольшим октановым числом в рассматриваемом в рамках модели варианте). Точный процент добавления выбирается случайным образом из указанного диапазона.

Для имитации корректировки рецептуры при реализации технологической схемы №2 (с применением поточного метода) принято, что на каждом шаге параметры качества базовых компонентов, поступающих в смеситель, меняются в пределах от 97% до 103%, что приводит к автоматическому перерасчету рецептуры с изменением объемов вовлекаемых в смешение компонентов. Проценты выбираются случайным образом из указанного диапазона на каждый расчет модели.

При реализации технологической схемы №2 мощность насосов на налив в резервуар готовой продукции увеличена на 10% для имитации дополнительного сопротивления процессе работы поточного смесителя. Пересчет мощности насоса при уменьшении подачи не производится.

В качестве целевой функции оптимизационной модели рассматривается условный доход предприятия S – отношение разности стоимости товарной продукции и понесенных затрат на компоненты и электроэнергию, нормированное на итоговый объем товарной продукции и время её приготовления, рассчитываемый по формуле:

$$S = \frac{V \cdot Z - \sum V_j \cdot Z_j - E}{W \cdot t} \quad (2.17)$$

где:

- t – итоговое время приготовления топлива начиная от стадии налива в резервуары базовых компонентов (не считая закупаемого со стороны МТБЭ) и завершая выдачей паспорта продукции на резервуар товарного бензина, мин;
- V – объем подготовленного к реализации товарного бензина за время t , м³;
- Z – стоимость товарного бензина в период производства, руб/м³;
- V_j – объем j -го компонента смешения, использованного при производстве объема продукции V , м³;
- Z_j – стоимость j -го компонента смешения в период производства, руб/м³;
- E – затраты на оплату электроэнергии, затраченной за период приготовления топлива, руб.

Оптимизация заключается в последовательном выполнении имитационной модели с определенными исходными данными для последующего нахождения оптимальных для задачи значений целевой функции. Поскольку в работе имитационной модели применяются случайные величины, для каждого набора насосного оборудования производится пятикратный пересчет имитационной модели с последующим усреднением результатов. Результаты выполнения вычислений вносятся в таблицу результатов.

Пример результата работы имитационной модели на данных, приближенных к работе цеха компаундирования АО «Куйбышевский НПЗ», приведен на рисунке 2.5, где а) и б) – графики накопленных объемов налива резервуаров хранения базовых компонентов и резервуара хранения товарной продукции для технологических схем №1 и №2 соответственно; в) и г) – накопленные затраты электроэнергии на работу насосного оборудования для технологических схем №1 и №2 соответственно. Исходные данные для приведенного примера приведены в таблице 2.6.

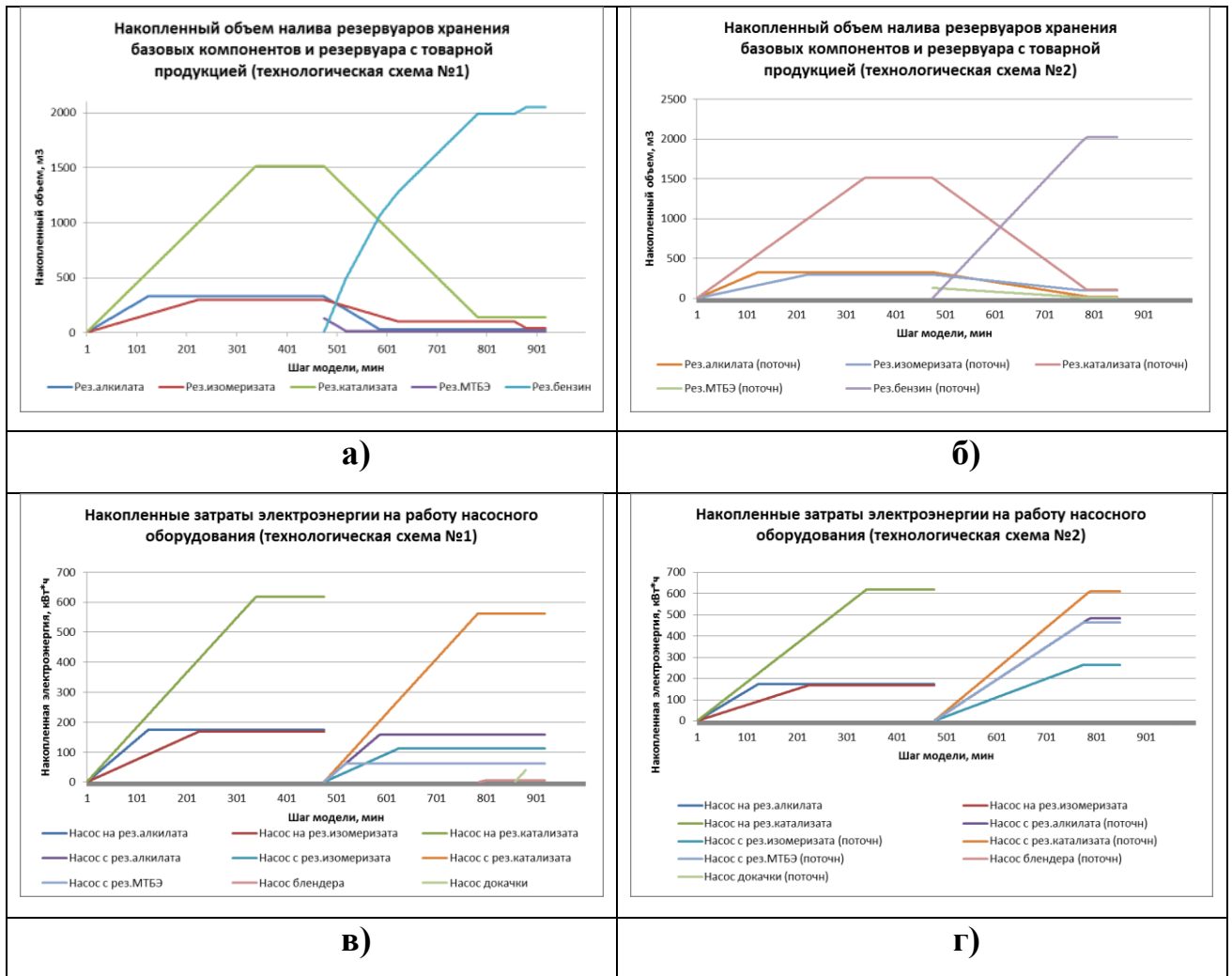


Рисунок 2.5 – Пример результатов имитационного моделирования для компаундирования бензина марки АИ-95-К5: а) и б) – графики накопленных объемов налива резервуаров хранения базовых компонентов и резервуара хранения товарной продукции для технологических схем №1 и №2 соответственно; в) и г) – накопленные затраты электроэнергии на работу насосного оборудования для технологических схем №1 и №2 соответственно

Таблица 2.6 – Исходные данные для имитационного моделирования (пример)

Резервуар компонента	Подача насоса, м3/ч
Алкилат	160
Изомеризат	80
Катализат	268
МТБЭ	160

Расчет имитационной модели проводился для всех возможных наборов выбора насосного оборудования из зафиксированного модельного ряда для применения при наливке в резервуар товарной продукции с резервуаров хранения базовых компонентов, что в принятых допущениях составляет число перестановок с повторениями для 4 позиций из 3 вариантов, то есть 81 вариант. С учетом необходимости нивелирования выбора случайных величин и пятикратного пересчета модели, число расчетов составило 405, результаты расчетов итоговой условной прибыли предприятия при одинаковых наборах оборудования усреднялись.

Анализ результатов моделирования показал, что основной вклад в изменение результатов условной прибыли при указанных в модели допущениях дает выбор насоса для подачи с резервуара катализата, поскольку объем данного компонента в смеси из рассматриваемого примера с учетом допущений модели – максимальный. Наиболее предпочтительным вариантом является реализация технологической схемы №2 (поточное смешение), что отвечает современным трендам развития нефтеперерабатывающих производств. На рисунке 2.6 представлено процентное отношение условной прибыли предприятия при реализации технологической схемы №2 к условной прибыли предприятия при реализации технологической схемы №1.

Второе по важности влияние на оптимизационную функцию оказывает выбор подачи насоса с резервуара алкилата, влияние выбора остальных насосов минимальное, ввиду малых вовлекаемых объемов компонентов. На рисунке 2.7 продемонстрировано наличие корреляции между изменением напора насоса с резервуара алкилата для всех вариантов выбора насоса с резервуара катализата, при изменении моделей остальных насосов корреляция между результатами отсутствует.

Сопоставление результатов расчета показывает, что наибольшая условная прибыль предприятия в заданных условиях достигается при применении технологической схемы №2 с применением насосного оборудования с максимально возможной подачей для резервуара катализата.

Подходы к построению систем управления технологическими процессами, включая организацию цеха компаундирования топлив, были доложены на Научно-практической конференции «Актуальные задачи нефтегазохимического комплекса» 19-20 ноября 2020 года в г. Москва [128].

Результаты работы имитационной модели с применением комплексного коэффициента качества смеси и с учетом работы автоматизированного подбора рецептуры на каждом шаге смешения показывают, что с применение предложенных автором изменений дает возможным провести оптимизацию работы цеха компаундирования за счет внедрения новой схемы технологического процесса компаундирования. Результаты проведенной работы были доложены на III Международной конференции «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» («International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies» ICMSIT-III-2022) 3-5 марта 2022 года в режиме он-лайн, основная площадка проведения – г. Санкт-Петербург, и опубликованы в Journal of Physics: Conference Series [123].

2.4 Выводы и рекомендации

В рамках второй главы разработан формализованный подход к построению интегральной модели ПС с последовательно-параллельной организацией на основе подбора рецептуры смеси в процессах компаундирования бензинов на уровне цеха.

Разработан комплексный показатель качества смеси и основанный на нем математический аппарат автоматизированного расчета рецептуры компаундирования. Разработана имитационная и оптимизационная модели, включающая математический аппарат и комплексный показатель качества смеси,

позволяющая выполнить оптимальную организацию ПС цеха компаундирования топлив с учетом загрузки оборудования и оптимизации планировки цеха.

3 АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ЦЕХА

3.1 Разработка алгоритма для принятия решения по оптимизации компонентного состава в рамках технологии производства автомобильного бензина

Основным элементом производственной системы цеха компаундирования бензинов является технология производства автомобильного бензина, в том числе выработка оптимального компонентного состава смеси (рецептуры смешения). Рецепт смешения составляется на основании информации о фактически накопленных объемах компонентов в компонентном резервуарном парке, первичного технологического рецепта, требований по соответствию смеси нормативным значениям в соответствии с ГОСТ или ТУ, требований по объему смеси.

В связи с особенностями производства автомобильных бензинов на нефтеперерабатывающем заводе, определенные объемы произведенных компонентов необходимо вовлечь в процесс компаундирования, даже не смотря на то, что при этом оптимальность рецептуры будет нарушена. Поэтому при разработке алгоритма для принятия решения по оптимизации компонентного состава необходимо предусмотреть возможность часть объемов компонентов оставлять неизменными.

Автором разработан программный модуль оптимизации рецептуры при помощи языка программирования VBA (Microsoft Visual Basic for Applications 7.0 version 1643), встроенного в MS Excel (версия 14.0.7208.5000 (64-разрядная)). Для корректной работы модели минимальным требованием является использование персонального компьютера с установленной версией 10 Microsoft Office или

выше. Блок-схема основной логики работы программного модуля представлена на рисунке 3.1. Общий вид программного модуля представлен на рисунке 3.2.



Рисунок 3.1 – Блок-схема взаимодействия пользователя с программным модулем оптимизации компонентного состава при компаундировании автомобильных бензинов

Дата	20.12.2022		Все расчеты по скорректированному рецепту!													
Компонент	Резервуар	Масса компонента в резервуаре	Технологический рецепт, % масс.	Масса компонента, тонн		% расчетный массовый по корр.рецептуре	Отклонения корр.рецепта от технологического	ОЧ (ИМ)	ДНП, кПа	70°С	100°С	Содержание серы, ppm	Об. доля бензола, %	Об. доля ароматических УВ, %	Плотность при 15°С, кг/м³	Массовая доля кислорода, %
				первичный рецепт	корр. рецепт											
Изомеризат итогов, в т.ч.			28,33%	542,324	542,324	25,93%	-2,40%									
Изомеризат	330	1200		70,378	70,378			88,30	98,00	96,00	100,00	3	0,005	1,0	643,0	
Изомеризат	330	700		471,946	471,946			88,30	101,00	96,00	100,00	3	0,005	1,0	643,4	
Изомеризат	63			0,000	0,000			88,30	96,00	96,00	100,00	3	0,005	1,0	643,4	
Изомеризат	63			0,000	0,000			88,30	96,00	96,00	100,00	3	0,005	1,0	643,4	
ОСК итогов, в т.ч.			69,88%	1399,058	1399,058	66,89%	-2,99%									
ОСК	372	1000		430,770	430,770			94,30	77,50	17,00	38,00	5	1,55	47,0	767,1	
ОСК	373	1000		968,288	968,288			94,40	73,80	17,00	36,00	5	1,67	47,0	766,8	
ОСК	331	250		0,000	0,000			92,00	80,00	38,00	55,00	56	0,9	30,4	725,7	
ОСК	63			0,000	0,000			94,30	72,30	18,00	39,00	5	1,24	47,0	767,4	
ОСК	4			0,000	0,000			94,30	72,30	18,00	39,00	5	1,24	47,0	767,4	
Алкилбензин итогов, в т.ч.			1,77%	150,053	150,053	7,17%	5,40%									
Алкилбензин	332	600		30,053	30,053			97,10	41,50	7,00	28,00	3			699,2	
Алкилбензин	329	120		120,000	120,000			97,10	41,50	7,00	28,00	3			699,2	
Алкилбензин	332			0,000	0,000			97,10	41,50	7,00	28,00	3			699,2	
МТБЭ итогов, в т.ч.			0,00%	0,000	0,000	0,00%	0,00%									
МТБЭ	350			0,000	0,000			114,00	53,00	100,00	100,00	32,2	0	1,0	746,1	21,0
МТБЭ	351			0,000	0,000			114,00	53,00	100,00	100,00	32,2	0	1,0	746,1	21,0
Фракция нормальный бутан итогов, в т.ч.			0,02%	0,000	0,000	0,00%	-0,02%									
Фракция нормальный бутан	10т	20		0,000	0,000			95,00	600,00	100,00	100,00	110	0	1,0	600,0	
Фракция нормальный бутан	10т			0,000	0,000			97,00	600,00	100,00	100,00	110	0	1,0	600,0	
Фракция изо-бутан итогов, в т.ч.			0,02%	0,000	0,000	0,00%	-0,02%									
Фракция изо-бутан	5т	20		0,000	0,000			97,00	600,00	100,00	100,00	110		1,0	600,0	
Фракция изо-бутан	5т			0,000	0,000			95,00	600,00	100,00	100,00	110		1,0	600,0	
Остаток				669,233	669,233			92,00	78,00	38,00	58,00	5	1	31,6	726,0	
ИТОГО			100%	2760,668	2760,668	100,00%		92,38	79,80	39,03	55,36	4,50	1,027	30,42	725,78	0,00
Референсные значения (минимум)								92	35	15	40				726	
Референсные значения (максимум)					2760,668				100	50	70	<10	<1	<35	780	<2,7
Поправка к октановому числу								-0,3								
ИТОГО без остатка				2091,435	2091,435			92,50								

Поставить % по технологии (в столбце "Технологический рецепт")

Создать первичный рецепт (из массы компонентов в резервуарах)

Применить рецепт из столбца "Первичный"

Уточнить рецепт по выделенным жирным шрифтом компонентам

Рисунок 3.2 – Внешний вид программного модуля по оптимизации компонентного состава при компаундировании автомобильных бензинов

Входными данными для программного модуля являются:

- показатели качества и стоимости компонентов компаундирования – информация по стандартным результатам замеров показателей качества для компонентов, вовлекаемых в компаундирование, а также информация о себестоимости или стоимости данных компонентов в производственной цепочке нефтеперерабатывающего предприятия (данные вынесены на отдельную закладку «Свойства» программного модуля). Данная информация передается в основную закладку программы с возможностью корректировки;
- первичный технологический рецепт для целевой марки автомобильного бензина – компонентный состав для компаундирования автомобильного бензина, разрабатываемый на основании целевой корзины товарной продукции и на основании компонентных потоков. Данная информация вносится на отдельную закладку «Технология» и используется при формировании первичного рецепта компаундирования.

Пользователю программного модуля по оптимизации рецептуры компаундирования доступны следующие возможности:

- внесение информации о накопленной массе компонентов в резервуарном парке;
- внесение информации о массе компонентов, предполагаемых к смешению с учетом их качественных характеристик. Первичные качественные характеристики принимаются равными данным, внесенным на закладке «Свойства» с возможностью корректировки при наличии уточненных лабораторных данных;
- внесение первичного технологического рецепта в виде проставления процентов по массе в соответствии с выбранной маркой бензина. Информация вносится в соответствии с данными, внесенными на закладке «Технология»;

- опциональное формирование первичного рецепта на основании внесенной пользователем информации о накопленных массах компонентов в резервуарном парке, целевой массы требуемой марки бензина, а также на основании первичной технологической рецептуры. Модуль проводит первичную проверку достаточности суммарной массы компонентов, находящихся в компонентном резервуарном парке, в соответствии с внесенной информацией от пользователя, на соответствие целевой массе производимого бензина. В случае если суммарная масса компонентов меньше целевой массы бензина, программный модуль выдаст ошибку и расчет произведен не будет. Иначе, программный модуль рассчитывает первичную рецептуру на основании технологического рецепта. В модуле предусмотрено сопоставление полученного первичного рецепта с технологическим рецептом в виде сопоставления процентов вовлекаемых компонентов;
- уточнение первичного рецепта компаундирования на основании выбранных к изменению масс компонентов, выбранного целевого бензина, указания целевой массы бензина – уточнение происходит на основании поиска оптимального решения методом обобщенного понижающего градиента, встроенного в MS Excel, где целевая функция это сумма комплексного показателя качества компаундирования бензина (вычисляемого по формуле 2.14), разработанного автором и являющегося научной новизной работы, и нормированной суммарной стоимости компонентов, входящих в смесь, с учетом ограничения по суммарной массе компонентов, которая приравнивается целевой массе бензина, ограничения по плотности смеси снизу и сверху в соответствии с указанными пользователем границами и ограничений по возможному вовлечению

массы данного компонента в соответствии с внесенными массами в резервуарах;

- в случае необходимости корректировки рецептуры для пользователя доступна возможность возврата к первоначально заданному рецепту.

Взаимодействие с пользователем организовано следующим образом: для выбора номера резервуара, компонента, целевого октанового числа бензина и масс компонентов, которые предполагается корректировать в процессе оптимизации, пользователь выделяет жирным шрифтом соответствующие ячейки. Далее пользователь нажимает соответствующую кнопку на листе программного модуля.

В программном модуле производится расчет суммарной массы смеси и параметров качества смеси с учетом данных по каждому компоненту, вовлекаемому в смесь, и с учетом данных об остатке в резервуаре, где происходит компаундирование. Октановое число рассчитывается как средневзвешенное по массе между октановым числом остатка и октановым числом смеси, октановое число смеси в свою очередь рассчитывается по формуле (2.7). Давление насыщенных паров рассчитывается как средневзвешенное по объему с учетом индексов смешения по формуле (2.13), плотность смеси рассчитывается по формуле (2.3), остальные показатели рассчитываются как аддитивные по массе. После расчетов программный модуль указывает на показатели качества, которые не соответствуют референсным значениям по ГОСТ/ТУ, выделяя их красным шрифтом.

Приведем пример фактического применения программного модуля на АО «Куйбышевский НПЗ». Накопленные компоненты, которые можно вовлечь в компаундирование, в резервуарах компонентного парка, на 19.12.2022 следующие:

- резервуар №330, изомеризат, 500 тн;
- резервуар №373, отбензоленный стабильный катализат (ОСК), 650 тн;
- резервуар №331, ОСК, 750 тн;

- резервуар №332, алкилбензин, 55,1 тн;
- резервуар №5т, фракция изо-бутан, 30,1 тн.

В резервуаре смешения №32 имеется остаток 318,343 тн с качественными показателями:

- октановое число по исследовательскому методу (ОЧ ИМ) 92,0;
- давление насыщенных паров (ДНП) 71 кПа;
- фракционный состав – выход до 70⁰С и до 100⁰С – 39 и 57% об. соответственно;
- содержание серы 5 ppm;
- объемная доля бензола 0,9%;
- объемная доля ароматических углеводородов (УВ) 33,1%;
- плотность при 15 ⁰С 727 кг/м³;
- массовая доля кислорода 0%.

Показатели качества для вовлекаемых компонентов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Показатели качества для вовлекаемых в смешение компонентов для примера фактического применения программного модуля оптимизации компаундирования

Компонент	Резервуар	ОЧ (ИМ)	ДНП, кПа	Объемная доля испарившегося УВ, %, при температуре:		Содержание серы, ppm	Об. доля бензола, %	Об. доля ароматических УВ, %	Плотность при 15 ⁰ С, кг/м ³
				70 ⁰ С	100 ⁰ С				
Изомеризат	330	88,00	79,00	96,00	100,0	3	0,005	1,0	643,1
ОСК	373	94,50	78,00	18,00	39,00	5	1,4	47,0	767,0
ОСК	331	94,40	78,00	18,00	39,00	5	1,36	47,0	767,0
Алкилбензин	332	97,10	41,50	7,00	28,00	3	-	-	699,2
Фракция изо-бутан	5т	97,00	530,00	100,00	100,00	22	-	-	563,3

При выполнении расчета первичного рецепта на основании технологических данных программный модуль дает распределение масс вовлекаемых компонентов в соответствии с таблицей 3.2.

Таблица 3.2 – Первичный расчет рецептуры программного модуля для примера фактического применения программного модуля оптимизации компаундирования

Компонент	Резервуар	Объем компонента в резервуаре	Технологический рецепт, % масс.	Масса компонента, тонн	% расчетный массовый по корр.рецептуре	Отклонения корр.рецепта от технологического
				первичный рецепт		
Изомеризат итого, в т.ч.			28,33%	500,000	27,06%	-1,27%
Изомеризат	330	500		500,000		
ОСК итого, в т.ч.			69,88%	1314,203	71,12%	1,24%
ОСК	373	650		650,000		
ОСК	331	750		664,203		
Алкилбензин итого, в т.ч.			1,77%	33,288	1,80%	0,03%
Алкилбензин	332	55,1		33,288		
Фракция изо-бутан итого, в т.ч.			0,02%	0,376	0,02%	0,00%
Фракция изо-бутан	5т	30,1		0,376		
Остаток				318,343		
ИТОГО			100%	2166,210	100,00%	

Технолог цеха компаундирования на основании необходимости вовлечения всей накопленной массы фракции изо-бутана, а также с учетом опыта прошлых лет в части использования всей накопленной массы алкилбензина, проводит корректировку первичного рецепта. Скорректированный рецепт представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Скорректированный рецепт, разработанный технологом

Компонент	Резервуар	Объем компонента в резервуаре	Технологический рецепт, % масс.	Масса компонента, тонн	% расчетный массовый по корр.рецептуре	Отклонения корр.рецепта от технологического
				первичный рецепт		
Изомеризат итого, в т.ч.			28,33%	486,321	25,86%	-2,47%
Изомеризат	330	500		486,321		
ОСК итого, в т.ч.			69,88%	1309,433	69,62%	-0,26%
ОСК	373	650		601,844		
ОСК	331	750		707,589		
Алкилбензин итого, в т.ч.			1,77%	55,061	2,93%	1,16%
Алкилбензин	332	55,1		55,061		
Фракция изо- бутан итого, в т.ч.			0,02%	30,1	1,60%	1,58%
Фракция изо-бутан	5т	30,1		30,1		
Остаток				318,343		
ИТОГО			100%	2199,264	100,00%	

По скорректированному технологом рецепту ожидаются следующие основные показатели качества смеси:

- октановое число 92,31 с учетом поправочного коэффициента -0,3;
- давление насыщенных паров 88,4 кПа;
- объемная доля бензола 0,908%;
- объемная доля ароматических углеводородов 31,53%
- плотность при 15 °С 725,77 кг/м³.

Расчетные показатели находятся в пределах требуемых значений. Комплексный показатель качества смеси равен 0,85, целевая функция равна 5,19.

В программном модуле оптимизации рецептуры компаундирования необходимо отметить массы тех компонентов, которые допустимо корректировать в данном конкретном случае. В данном примере, технолог цеха принял решение о возможности уточнения масс: изомеризата, получаемого из резервуара №330 и ОСК, получаемого из резервуара №373. Алкилбензин необходимо вовлечь в компаундирование в минимальном объеме 20 тн, в связи с чем в модуле добавляется еще одна строка с информацией по алкилбензину.

Масса 35,061 тн алкилбензина из резервуара №332 может быть подвержена уточнению в составе рецептуры, а 20 тн алкилбензина из резервуара №332 корректировать нельзя. Указанные массы выделяются в столбце первичного рецепта жирным шрифтом, после чего программный модуль проводит поиск оптимального решения методом обобщенного понижающего градиента с минимизацией целевой функции и сохранением ограничений по плотности, максимальным возможным к вовлечению массам выделенных компонентов, при сохранении общей массы смеси. Дополнительно, технологом было принято решение о внесении усиленных ограничений снизу на плотность для минимизации брака партии – плотность смеси принимается на нижнем пороге равной 726 кг/м^3 .

Программный модуль скорректировал рецептуру следующим образом: увеличил массу вовлекаемого изомеризата до максимально возможного к вовлечению (ограничение по накопленной массе в резервуаре №330 – 500 тн); увеличил массу вовлекаемого ОСК с 601,844 тн до 623,232 тн и уменьшил массу вовлекаемого дорогостоящего алкилбензина с 35,061 тн до 0 тн.

Результаты расчетов представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Скорректированный рецепт по результаты работы программного модуля оптимизации рецептуры компаундирования (скорректированные массы выделены жирным шрифтом)

Компонент	Резервуар	Объем компонента в резервуаре	Технологический рецепт, % масс.	Масса компонента, тонн		% расчетный массовый по корр.рецептуре	Отклонения корр.рецепта от технологического
				первичный рецепт	корр. рецепт		
Изомеризат итого, в т.ч.			28,33%	486,327	500,000	26,58%	-1,75%
Изомеризат	330	500		486,327	500,000		
ОСК итого, в т.ч.			69,88%	1309,433	1330,821	70,75%	0,87%
ОСК	373	650		601,844	623,232		
ОСК	331	750		707,589	707,589		
Алкилбензин итого, в т.ч.			1,77%	55,061	20,000	1,06%	-0,71%
Алкилбензин	332	55,1		35,061	0,000		
Алкилбензин	332	20		20,000	20,000		
Фракция изо-бутан итого, в т.ч.			0,02%	30,100	30,100	1,60%	1,58%
Фракция изо-бутан	5т	30,1		30,100	30,100		
Остаток				318,343	318,343		
ИТОГО			100%	2199,264	2199,264	100,00%	

По скорректированному программным модулем рецепту ожидаются следующие основные показатели качества смеси (рисунок 3.3 – результирующий вид расчета в программном модуле):

- октановое число 92,22 с учетом поправочного коэффициента -0,3 – на 0,09 ед. ниже рецепта, принятого технологом изначально;
- давление насыщенных паров 88,95 кПа;
- объемная доля бензола 0,921%;
- объемная доля ароматических углеводородов 31,98%
- плотность при 15 °С 726,01 кг/м³.

Расчетные показатели находятся в пределах требуемых значений. Общая условная стоимость смеси на 0,5% ниже, чем по рецепту, принятому технологом изначально. Комплексный показатель качества смеси равен 0,76 (на 0,09 ед. ниже предыдущего рецепта), целевая функция равна 5,07 (на 0,12 ед. ниже предыдущего рецепта). Отклонения от первичного технологического рецепта при этом составляют не более ±2%.

Опыт расчетов корректировок рецептуры в сопоставлении с первично принятыми рецептами, разработанными технологами в ручном режиме, показывает оптимизацию условной стоимости смеси до 1,5%.

Компонентный парк																				
Компоненты		Резервуары компонентов (номера)					Целевой бензин (ОЧ ИМ)			Целевая масса бензина										
Изомеризат		330	63					92	95	98		2199,3	Уточнить рецепт							
ОСК	Добавить	372	373	331	63	4		Целевой бензин (плотность)			Поправка к ОЧИ			Вернуть рецепт						
Алкилбензин		332	329					минимум максимум			-0,3									
МТБЭ		350	351					726 780												
Фракция нормальный бутан	Очистить	10т																		
Фракция изо-бутан		5т																		
Дата		19.12.2022					Все расчеты по скорректированному рецепту!													
Компонент	Резервуар	Объем компонента в резервуаре	Технологический рецепт, % масс.	Масса компонента, тонн		% расчетный массовый по корр.рецептуре	Отклонения корр.рецепта от технологического	ОЧ (ИМ)	ДНП, кПа	70°С	100°С	Содержание серы, ppm	Об. доля бензола, %	Об. доля ароматических УВ, %	Плотность при 15°С, кг/м³	Массовая доля кислорода, %	Стоимость компонента, тыс.руб/т	Кэф. качества	Целевая ф-я	Объем, м³
Изомеризат итого, в т.ч.			28,33%	486,327	500,000	26,58%	-1,75%													
Изомеризат	330	500		486,327	500,000			88,00	79,00	96,00	100,00	3	0,005	1,0	643,1		19)			777,5
ОСК итого, в т.ч.			69,88%	1309,433	1330,821	70,75%	0,87%													
ОСК	373	650		601,844	623,232			94,50	78,00	18,00	39,00	5	1,4	47,0	767,0		24,52)			812,6
ОСК	331	750		707,589	707,589			94,40	78,00	18,00	39,00	5	1,36	47,0	767,0		24,52)			922,5
Алкилбензин итого, в т.ч.			1,77%	55,061	20,000	1,06%	-0,71%													
Алкилбензин	332	55,1		35,061	0,000			97,10	41,50	7,00	28,00	3			699,2		29)			0,0
Алкилбензин	332	20		20,000	20,000			97,10	41,50	7,00	28,00	3			699,2		29)			28,6
Фракция изо-бутан итого, в т.ч.			0,02%	30,100	30,100	1,60%	1,58%													
Фракция изо-бутан	5т	30,1		30,100	30,100			95,00	600,00	100,00	100,00	110		1,0	600,0		15)			50,2
Остаток				318,343	318,343			92,00	71,00	39,00	57,00	5	0,9	33,1	727,0		0)			437,9
ИТОГО			100%	2199,264	2199,264	100,00%		92,22	88,95	42,31	58,16	5,96	0,921	31,98	726,01	0,0		0,76	5,07	3029,2
Референсные значения								92	35-100	15-50	40-70	<10	<1	<35	725-780	<2,7				
ИТОГО без остатка					1880,921	1880,921		92,25												

Рисунок 3.3 – Итоги оптимизации рецепта компаундирования в программном модуле для рассмотренного примера

3.2 Разработка алгоритма для принятия концептуального управленческого решения по оптимизации загрузки оборудования

Разработанный алгоритм оптимизации рецептуры компаундирования дал возможность перейти к алгоритму для принятия концептуального управленческого решения, позволяющего оптимизировать не только рецептуру компаундирования, но и загрузку оборудования, используемого в технологическом процессе.

Программа «Имитационная модель цеха компаундирования бензина» [124] была реализована при помощи языка программирования VBA (Microsoft Visual Basic for Applications 7.0 version 1643), встроенного в MS Excel (версия 14.0.7208.5000 (64-разрядная)). Для корректной работы модели минимальным требованием является использование персонального компьютера с установленной версией 10 Microsoft Office или выше.

Модель реализована как пошаговый расчет процесса компаундирования в зависимости от выбранной схемы смешения и рецептуры с накоплением необходимых данных на каждом временном шаге: объемов компонентов смешения, вовлеченных в процесс компаундирования (объем алкилата, изомеризата, катализата, МТБЭ), объем бензина, получаемого в результате компаундирования, накопленная электроэнергия, затрачиваемая на работу насосного оборудования. Шаг модели принят дискретным и равным 1 минуте.

Визуально имитационная модель состоит из следующих логически разделенных участков: блок резервуаров (рисунок 3.4 – блок 1), блок рецептуры (рисунок 3.4 – блок 2), блока выбора насосного оборудования (рисунок 3.4 – блок 3), результаты расчетов (рисунок 3.4 – блок 4) и графики (рисунок 3.4 – блок 5).



Рисунок 3.4 – Внешний вид основной формы имитационной модели после проведения вычислений

Блок-схема взаимодействия пользователя с программой по запуску имитационной модели представлена на рисунке 3.5.

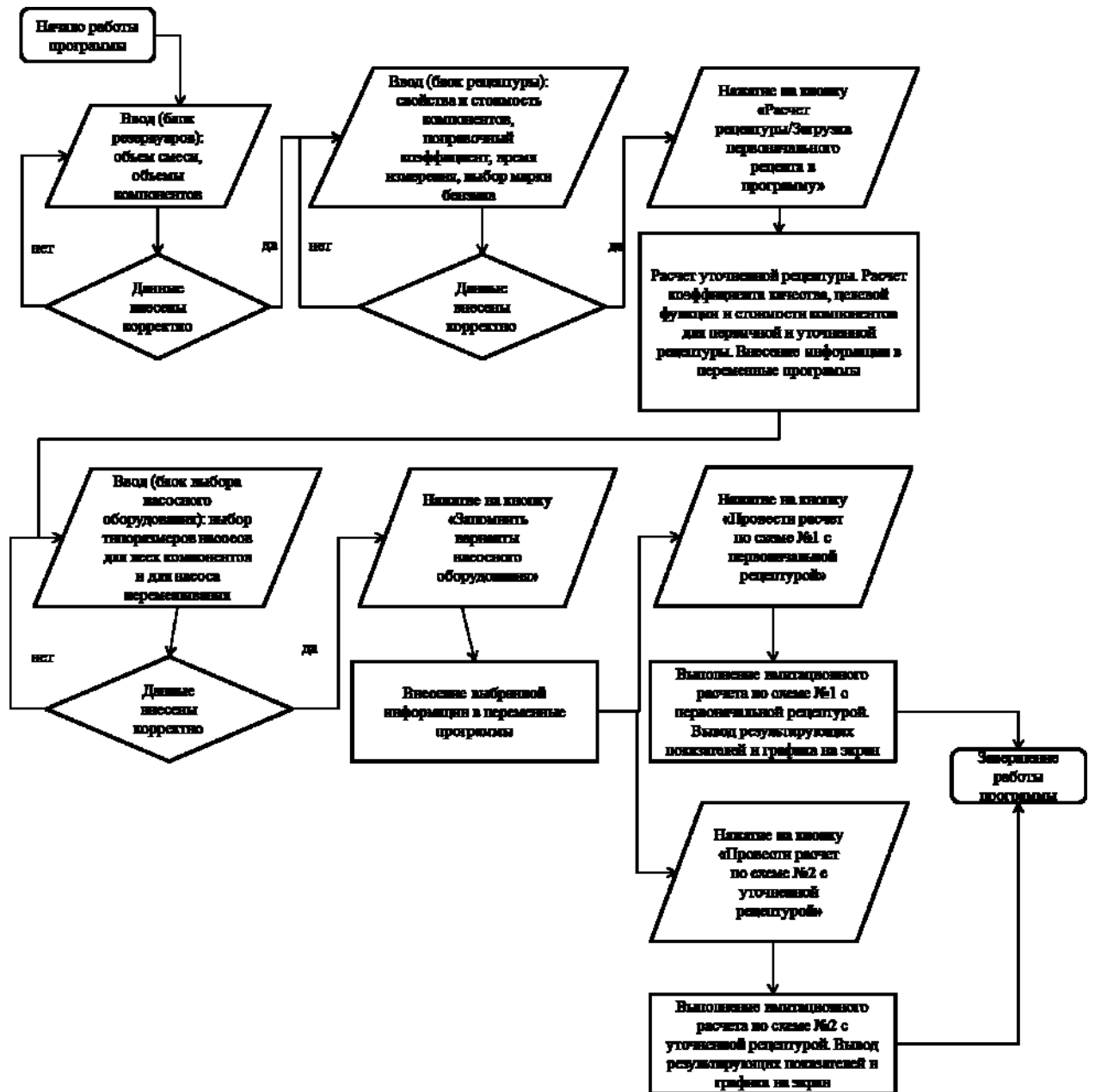


Рисунок 3.5 – Блок-схема взаимодействия пользователя с программой

В блоке резервуаров пользователь вносит данные по целевому объему получаемой смеси (объем бензина, м³) и ограничения по доступным к смешению объемам компонентов - алкилата, катализата, изомеризата и МТБЭ. После нажатия кнопки «Расчет рецептуры / Загрузка первоначального рецепта в программу» внесенные пользователем значения хранятся в следующих переменных:

- VolGoalBlend – целевой объем готовой продукции;

- VolRecAlk, VolRecIzo, VolRecKat, VolRecMTBE – объемы алкилата, изомеризата, катализата и МТБЭ соответственно.

В состав модели включен блок расчета рецептуры компаундирования. За основу данного блока взят программный модуль по оптимизации рецептуры компаундирования, описанный в разделе 3.1. Входными данными для расчета являются значения, вносимые пользователем в соответствующие ячейки модели (для удобства пользователя в ячейках указаны предустановленные значения, которые можно скорректировать):

- первичная рецептура компаундирования – объемное процентное соотношение компонентов для использования в смеси – вносится в переменные AlkVol, KatVol, IzoVol, MTBEVol для алкилата, катализата, изомеризата и МТБЭ соответственно;
- октановое число по исследовательскому методу каждого из компонентов – вносятся в переменные AlkRON, KatRON, IzoRON, MTBERON для алкилата, катализата, изомеризата и МТБЭ соответственно;
- стоимость или себестоимость каждого из компонентов (выраженная в руб/кг) – вносится в переменные CostAlk, CostIzo, CostKat, CostMTBE для алкилата, изомеризата, катализата и МТБЭ соответственно;
- плотность компонентов при 15 °С в кг/м³ – вносится в переменные AlkRO, KatRO, IzoRO, MTBERO для алкилата, катализата, изомеризата и МТБЭ соответственно;
- давление насыщенных паров компонентов в кПа – вносится в переменные AlkDNP, KatDNP, IzoDNP, MTBEDNP для алкилата, катализата, изомеризата и МТБЭ соответственно.

Подбор рецептуры производится при изменении объемов компонентов смеси путем минимизации целевой функции Ψ , определенной в Главе 2 по формуле (2.15). Целевая функция содержит в себе комплексный показатель качества компаундирования бензина (формула (2.14)), разработанный автором и

являющийся научной новизной работы, а также стоимость компонентов, входящих в смесь. Оптимизация производится с помощью функции поиска решения нелинейных задач методом обобщенного понижающего градиента, встроенного в MS Excel, с учетом следующих ограничений:

- суммарный объем компонентов должен быть равным целевому объему резервуара для готовой смеси;
- плотность смеси, вычисляемая как отношение массы смеси к объему смеси, находится в диапазоне от 725 до 780 кг/м³.

В блоке рецептуры сохраняются данные по первичному (первоначально внесенному) и по уточненному (скорректированному на основании оптимизации) рецептам.

В качестве справочных данных, модель выводит пользователю информацию о расчетном комплексном показателе качества компаундирования бензина, расчетной целевой функции, расчетному октановому числу смеси, расчетной плотности смеси и расчетному давлению насыщенных паров смеси по первичному и уточненному рецептам.

Октановое число полученной смеси вычисляется как средневзвешенное по массе значение октановых чисел компонентов с применением поправочного коэффициента α , определенного в соответствии с формулой (2.8) Главы 2. Модель позволяет корректировать коэффициент α с учетом наличия у пользователя результатов лабораторных анализов. Давление насыщенных паров смеси вычисляется по формуле (2.13) Главы 2.

В результате проведения расчетов обновленная рецептура компаундирования вносится в переменные AlkVolNew, KatVolNew, IzoVolNew, MTBEVolNew для алкилата, катализата, изомеризата и МТБЭ соответственно (в объемном процентном соотношении к общему объему смеси). Дополнительно сохраняется информация о выбранной марке бензина для смешения (переменная GasClass, принимающая значение равное 92 или 95) и о стоимости товарного бензина в зависимости от выбранной марки (переменная CostBlend92 для марки

АИ-92-К5 и CostBlend95 для марки АИ-95-К5). В переменную timeLab вносится информация о длительности проведения лабораторных исследований физико-химических свойств компаунда в заводской лаборатории (дискретная величина).

3.3 Выводы и рекомендации

В заключение третьей главы был разработан алгоритм, позволяющий принимать управленческие решения по оптимизации компонентного состава для целей применения в технологии производства автомобильного бензина. На базе разработанного алгоритма был создан алгоритм принятия концептуального управленческого решения по оптимизации загрузки технологического оборудования.

Полученная имитационная модель цеха компаундирования прошла апробацию на АО «Куйбышевский НПЗ». Применение предложенного метода структурного моделирования ресурсов в цехе на основе комплексного показателя качества процесса компаундирования бензинов позволяет оптимизировать рецептуры компаундирования с учетом сокращения суммарной себестоимости вовлекаемых компонентов до 1,5%. В части реорганизации цеха компаундирования бензинов за счет внедрения автоматической станции смешения с применением поточных анализаторов качества одновременно с применением методологии управления качеством продукции, реализация предложенных мероприятий позволят повысить условную прибыль при компаундировании в расчете на 1 тонну автомобильного бензина на сумму до 4% (расчет произведен без учета амортизации капитальных вложений, необходимых для проведения реконструкции).

Выводы и результаты апробации подтверждаются актом внедрения от 05.04.2023 (Приложение А).

4 МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РЕАЛИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ НА КОНКРЕТНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ

4.1 Методические подходы к реализации имитационной модели

Взаимодействие с пользователем происходит через нажатие кнопок на форме программы, путем отображения результатов расчетов в соответствующих ячейках на форме программы, выделенных серым цветом без возможности их корректировки, и путем выдачи предупреждающих сообщений в случае ввода некорректных данных. Например, программа проводит анализ корректности внесенных значений в стоимости и в физико-химические свойства компонентов в соответствии с их физическими свойствами: все значения должны быть положительными, октановые числа компонент не должны превышать 140 единиц для алкилата, катализата и изомеризата, и 150 единиц для МТБЭ, плотности не должны превышать 1000, давление насыщенных паров не должно превышать 150. Сумма объемного процентного соотношения компонент должна быть равной 100. Программа делает проверку на наличие выбора марки бензина. Во всех случаях, когда введенные значения выходят за указанные рамки, выдается сообщение об ошибке.

В блоке выбора насосного оборудования пользователь выбирает типоразмеры насосов из реестра введенных в модель типоразмеров насосов для перекачки компонентов из компонентного резервуарного парка. Исходные данные по типоразмерам насосов внесены на закладке «Исходные данные» файла с программой, содержащие информацию о марке насоса, подаче в м³/ч и максимальной мощности в кВт. В случае отсутствия необходимого типоразмера насоса, у пользователя имеется возможность добавить еще один самостоятельно путем нажатия на кнопку «Добавить насос» и внесения корректных данных в форму запроса (рисунок 3.6).

The image shows a standard Windows-style dialog box with a title bar that reads 'Добавление нового насоса' and a close button (X) in the top right corner. The main area of the dialog is light gray and contains three text labels at the top: 'Наименование', 'Подача, м3/ч', and 'Макс. мощность, кВт'. Each label is positioned above a white rectangular input field. At the bottom of the dialog, there are two buttons: 'Добавить насос' on the left and 'Закрыть форму' on the right.

Рисунок 3.6 – Внешний вид формы для добавления нового типоразмера насоса

При нажатии на кнопку «Добавить насос» программа проверяет корректность внесенной информации (положительность значений для подачи и максимальной мощности) и в случае прохождения проверки вносит информацию в исходную таблицу, добавляя ее последней строкой после заполненных, либо выводит интерактивное сообщение на экран пользователю о необходимости корректировки данных.

Пользователю необходимо выбрать из выпадающего списка типоразмер насоса для каждого насоса перекачки компонентов из парка, а также необходимо выбрать типоразмер насоса перемешивания в резервуаре готовой продукции. В соответствии с выбранной маркой насоса, программа проставляет значения подачи и максимальной мощности в ячейки формы и вносит информацию о максимальной подаче насосов по перекачке из резервуаров с алкилатом, катализатором, изомеризатором и МТБЭ в переменные VolPumpBlendAlk, VolPumpBlendKat, VolPumpBlendIzo, VolPumpBlendMTBE соответственно (в неизменном виде) и о максимальной мощности насосов в соответствующие переменные EnPumpAlk, EnPumpKat, EnPumpIzo, EnPumpMTBE одновременно с переводом в размерность м³/мин путем деления на 60. Дополнительно

пользователь выбирает типоразмер насоса для перемешивания готовой продукции в резервуаре с бензином (EnPumpBlender).

В переменную CostEn из соответствующей ячейки, значение в которой предустановлено, но может быть изменено пользователем, вносится информация о стоимости электроэнергии в руб/кВтч для проведения дальнейших экономических расчетов.

На каждом из вышеуказанных этапов программа проверяет наличие внесенной информации и допускает до запуска самой имитационной модели только после сохранения всех необходимых данных. Проверка осуществляется путем изменения параметров двоичных флагов, характеризующих успешное завершение внесения корректной информации на этапе расчета рецептуры и на этапе заполнения параметров насосного оборудования.

Пользователь может ознакомиться со схемами смешения, применяемыми в модели, путем нажатия на кнопки «Показать схему №1 (циркуляционное смешение)» и «Показать схему №2 (онлайн смешение)» (в результате откроются формы, показанные на рисунке 3.7 и рисунке 3.8 соответственно).

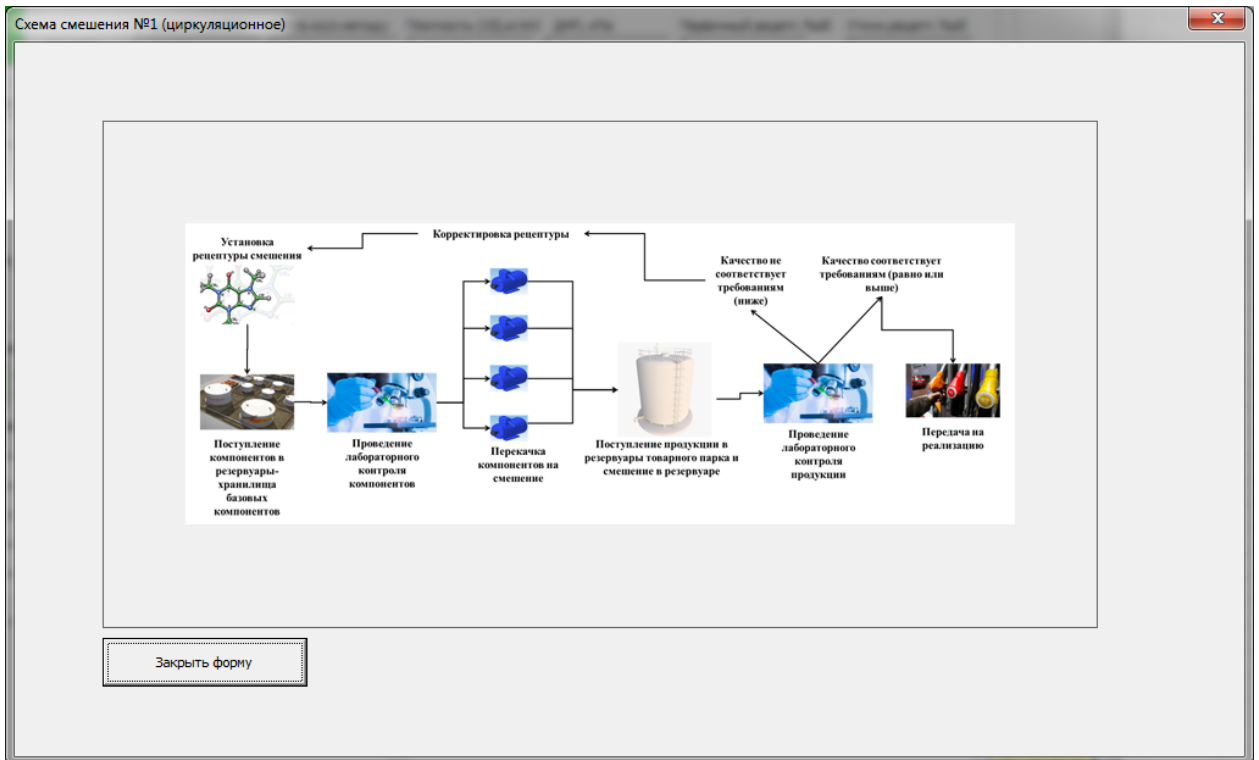


Рисунок 3.7 – Внешний вид информационной формы для описания схемы №1 (циркуляционного смешения)

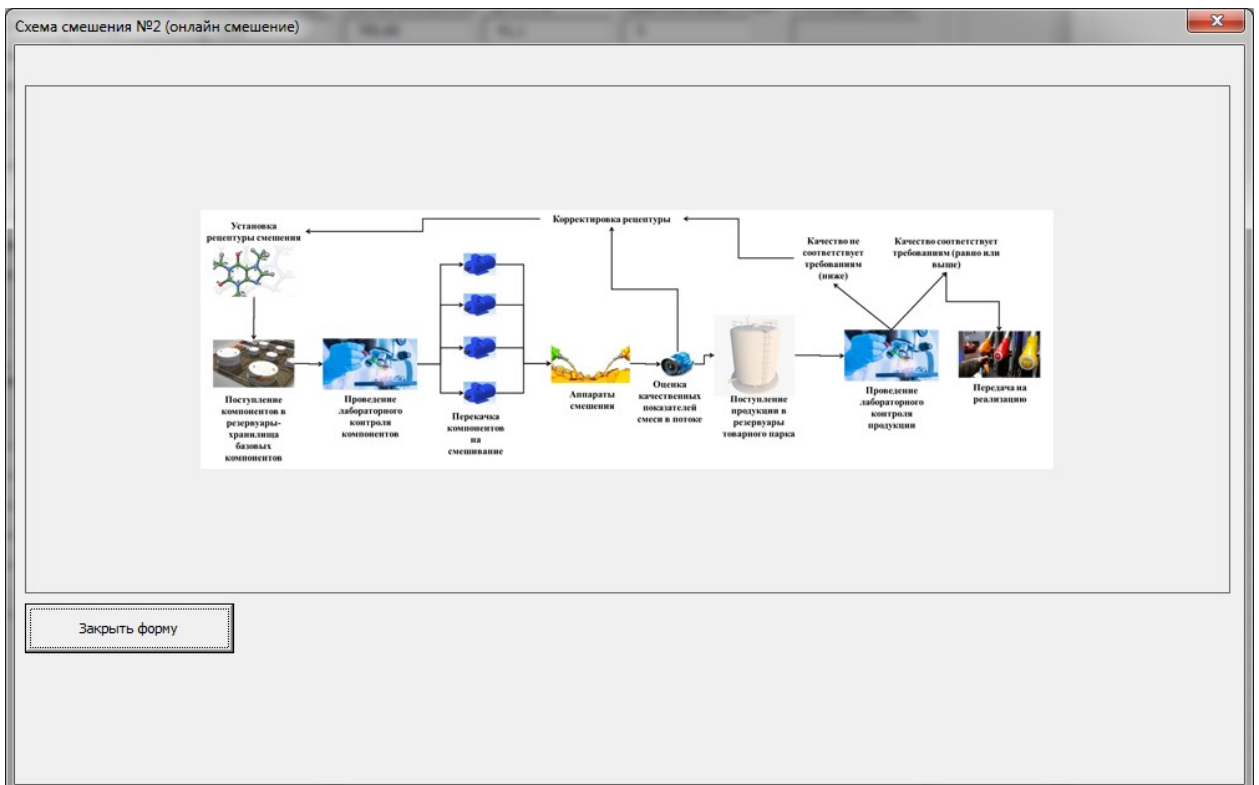


Рисунок 3.8 – Внешний вид информационной формы для описания схемы №2 (онлайн смешения)

В программе имеются две кнопки для проведения собственно имитационной части модели с расчетами в соответствии со схемой №1 (циркуляционное смешение) с применением первоначальной рецептуры компаундирования и в соответствии со схемой №2 (онлайн смешение) с применением уточненной рецептуры компаундирования. Расчеты в программе вызываются нажатием соответствующих кнопок на основной форме программы.

В основе имитационной модели лежит накопление объема компонентов и затрачиваемой электроэнергии на работу насосного оборудования на каждом шаге модели для каждой из применяемых схем смешения.

Рассмотрим проведение расчета по схеме №1 (циркуляционное смешение) с применением первоначальной рецептуры компаундирования. Блок-схема проведения данного расчета приведена на рисунке 3.9. В переменные VolRecAlk, VolRecIzo, VolRecKat и VolRecMTBE (на блок-схеме данные переменные обозначены $V_{\text{КОМП}}^{\text{рецепт}}$) вносятся целевые значения объемов алкилата, изомеризата, катализата и МТБЭ соответственно по первоначальной рецептуре, вычисленной через ранее внесенные переменные процентного соотношения параметров в рецепте (AlkVol, IzoVol, KatVol, MTBEVol) и целевой объем смеси (VolGoalBlend). В цикле по переменной времени от 1 до максимально допустимого времени, принятого в модели равным 3000 минут, с шагом 1 минута итерационно изменяются следующие переменные модели:

- VolCurAlk, VolCurIzo, VolCurKat, VolCurMTBE (на блок-схеме данные переменные обозначены $V_{\text{КОМП}}^{\text{ДОСТ}}$) – изначально в данные переменные заносится значение максимально допустимого объема компонентов (алкилата, изомеризата, катализата и МТБЭ соответственно) и с каждым шагом расчета по мере вовлечения компонентов в смешение исходный объем компонентов уменьшается соответственно использованному для компаундирования;
- VolBlAlk, VolBlIzo, VolBlKat, VolBlMTBE (на блок-схеме данные переменные обозначены $V_{\text{КОМП}}^{\text{бленд}}$) – изначально нулевые объемы

компонентов (алкилата, изомеризата, катализата и МТБЭ соответственно), вовлеченные в смешение на данном шаге;

- EnSumBlAlk, EnSumBlIzo, EnSumBlKat, EnSumBlMTBE (на блок-схеме данные переменные обозначены $E_{\text{комп}}^{\text{сумм}}$) – изначально нулевые значения суммарно затраченной электроэнергии на работу насосного оборудования по закачке компонентов из резервуаров алкилата, изомеризата, катализата и МТБЭ соответственно.

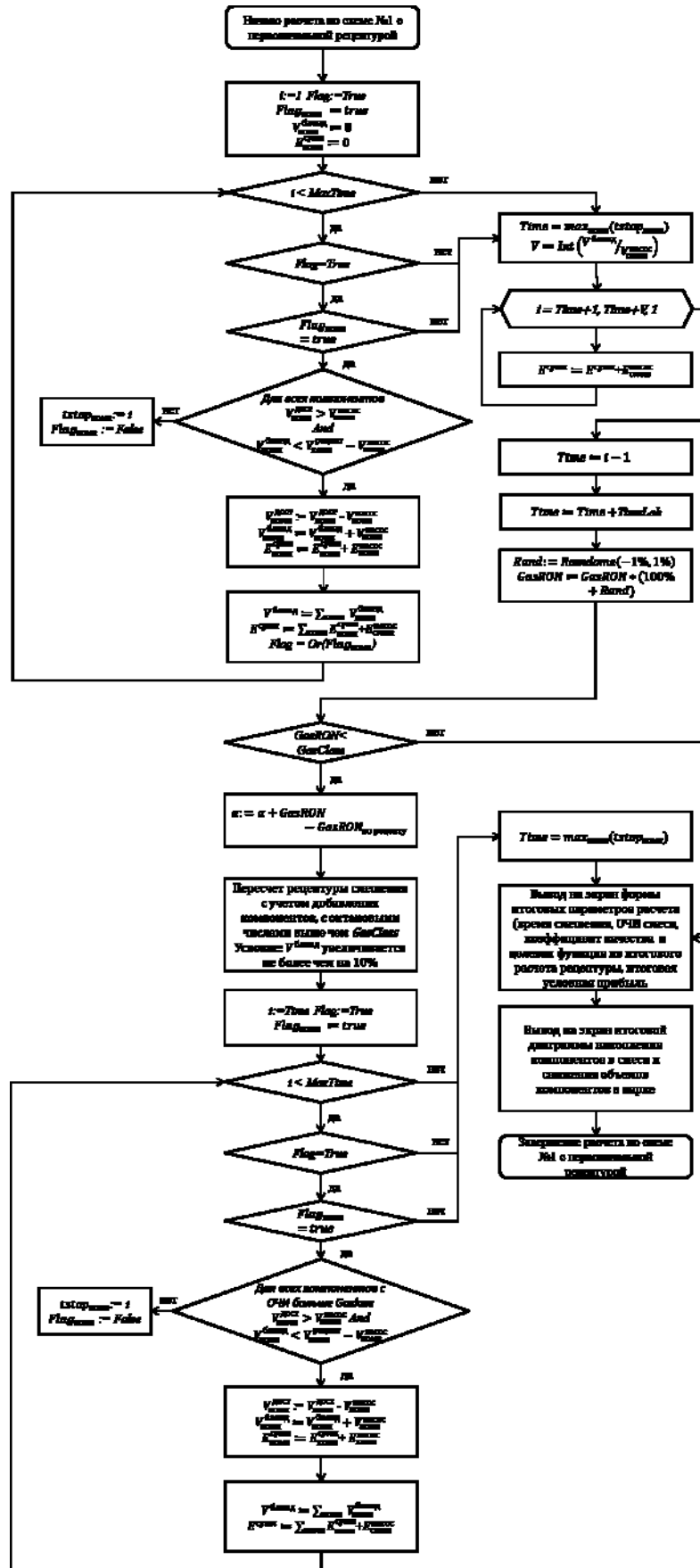


Рисунок 3.9 – Блок-схема имитационного расчета по схеме смешения №1 с первоначальной рецептурой смешения

На каждом шаге расчета к объемам компонентов прибавляется объем, соответствующий подаче насоса для соответствующего компонента в переводе в м³/мин (на блок-схеме данные переменные обозначены $V_{\text{КОМП}}^{\text{насос}}$); к затраченной электроэнергии прибавляется значение электроэнергии, потребляемой соответствующим насосом, приведенная к минутам (кВт*мин) (на блок-схеме данные переменные обозначены $E_{\text{КОМП}}^{\text{насос}}$); при этом на каждом модельном шаге добавляются затраты электроэнергии, затрачиваемые насосом перемешивания в резервуаре готовой продукции (EnPumpBlender – на блок-схеме обозначен $E_{\text{СМЕШ}}^{\text{насос}}$). В цикле проверяется доступность компонентов (переменные VolCurAlk, VolCurIzo, VolCurKat, VolCurMTBE должны быть больше чем объем смешения соответствующего компонента в минуту) и соответствие рецептуре – текущее значение накопленного объема компонента не должно превышать переменные VolRecAlk, VolRecIzo, VolRecKat, VolRecMTBE.

Для каждого компонента проводится проверка на указанные выше ограничения, по мере достижения одного из указанных ограничений устанавливается флаг остановки накопления и фиксируется модельное время, на котором эта остановка произошла (в блок-схеме модельное время остановки обозначается $tstop_{\text{КОМП}}$). По мере прохождения всех шагов расчета программа вычисляет максимальное из значений модельного времени, на котором произошла остановка, таким образом, вычисляется итоговое время смешения резервуара на данном этапе (в блок-схеме обозначается *Time*). На каждом шаге модельного времени результаты расчетов (объемы и затраты электроэнергии) вносятся в файл Excel на закладку «Графики» для возможности последующего построения графика наполнения резервуара готовой продукции, снижения объемов в резервуарах компонентного парка и накопления затраченной электроэнергии. Итоговый объем товарной продукции рассчитывается в модели как сумма компонентов, вовлеченных в смешение (на блок-схеме итоговый объем товарной продукции обозначен $V^{\text{бленд}}$):

$$\text{VolCurBlend} = \text{VolBlAlk} + \text{VolBlIzo} + \text{VolBlKat} + \text{VolBlMTBE}.$$

Особенностью циркуляционного смешения является необходимость дополнительного перемешивания смеси в резервуаре готовой продукции, поскольку компоненты в резервуар добавляются постепенно и не в полном объеме могут быть тщательно компаундированы в процессе наполнения резервуара. Необходимое для достижения нужной консистенции время вычисляется в соответствии с максимальной подачей насоса, выбранного для перемешивания в резервуаре готовой продукции, сохраненной в переменной VolPumpBlender. Количество минут, необходимых для перемешивания готовой продукцией вычисляется по формуле: целое число от $(VolCurBlend / VolPumpBlender)$ (на блок-схеме обозначено переменной V). На вычисленное количество минут в модели увеличиваются затраты электроэнергии на работу насоса перемешивания и увеличивается итоговое время приготовления смеси.

После проведения итогового перемешивания в резервуаре готовой продукции, проводится лабораторный контроль смеси на соответствие требованиям ГОСТ/ТУ. Имитация проведения лабораторного контроля в модели проводится путем увеличения итогового модельного времени на величину, равную значению переменной timeLab, сохраненной ранее из формы программы.

Модель имитирует сопоставление полученных результатов лабораторного анализа октанового числа смеси по исследовательскому методу (ОЧИ) с требуемым значением в соответствии с ГОСТ/ТУ, поскольку октановое число является наиболее важным контролируемым параметром бензина. Как описывалось ранее, по различным причинам итоговое ОЧИ смеси может отличаться от расчетного. В модели имитация расхождения полученного ОЧИ с требуемым для выбранной марки бензина реализована через применение случайного отклонения итогового ОЧИ смеси от расчетного в пределах 1%. Для этого в программе используется переменная Rand, вычисляемая как случайная величина от -1% до 1%, выбираемая методом Randomize (RandBetween). Итоговое ОЧИ вычисляется как расчетное ОЧИ, умноженное на $100\% + Rand$ и вносится в переменную GasRON. Итоговое ОЧИ сравнивается с требуемым для выбранной марки бензина, сохраненным в переменной GasClass. В случае, когда $GasRON \geq$

GasClass, программа завершает работу и выдает итоговые результаты в форме, поскольку качество смеси выше, чем требуемое по ГОСТ/ТУ. В случае, когда $\text{GasRON} < \text{GasClass}$, программа анализирует, у каких компонентов смешения ОЧИ выше, чем требуемое ОЧИ смеси, после чего выполняет повторный пересчет рецептуры ранее указанным способом, при этом изменяемыми ячейками являются только объемы компонентов, у которых ОЧИ выше, чем GasClass. При расчете рецептуры добавляется ограничение снизу по уже вовлеченному объему компонентов, а также по ограничению сверху по итоговому объему получаемой смеси, равному 110% от целевого объема смеси, установленного изначально в переменной VolGoalBlend. После определения скорректированной рецептуры происходит имитация процесса домешивания выбранных компонентов по аналогии с ранее описанным процессом самого смешения с внесением информации об объемах на лист «Графики» и накоплением общих затрат электроэнергии.

После всех проведенных вычислений программа выводит на пользовательскую форму итоговое полученное октановое число смеси, равное либо переменной GasRON в случае, если домешивание компонентов не потребовалось, либо вычисленное на шаге обновления рецептуры для целей домешивания компонентов, полученные значения коэффициента качества, целевой функции, плотности смеси, а также выводит значение условной прибыли, вычисляемой как отношение разности произведения итогового объема бензина на его плотность и стоимость и суммы произведения объемов компонентов, вовлеченных в смешение, на плотность и стоимость соответствующих компонентов, и произведения объема затраченной электроэнергии, к производству объема бензина на его плотность.

Рассмотрим проведение расчета по схеме №2 (онлайн смешение) с применением уточненной рецептуры компаундирования. Аналогично расчету для схемы №1, в переменные VolRecAlk, VolRecIzo, VolRecKat и VolRecMTBE вносятся целевые значения объемов алкилата, изомеризата, катализата и МТБЭ соответственно, но в отличие от схемы №1 в данном расчете применяется

уточненная рецептура. В связи с этим вычисление объемов компонентов происходит через ранее внесенные переменные процентного соотношения параметров в уточненном рецепте (AlkVolNew, IzoVolNew, KatVolNew, MTBEVolNew) и целевой объем смеси (VolGoalBlend).

При онлайн смешении подразумевается, что компоненты смешиваются не в резервуаре готовой продукции, как при схеме циркуляционного смешения, а в смесителе, после чего уже готовая продукция подается в резервуар готовой продукции. Следовательно, в каждый момент времени необходимо передавать в смеситель именно тот объем компонентов, который требуется в соответствии с рецептурой. Для реализации такой схемы необходимо сбалансировать подачу насосов, применяемых для транспортировки компонентов из компонентного резервуарного парка. Балансировка происходит путем пересчета подачи насосов на листе «Рецептура» основного файла программы в формате MS Excel. В таблицу с исходными данными по объемам вовлечения компонентов в смешение, в соответствии с уточненной рецептурой, добавляется информация о максимальной подаче насосов для перекачки этих компонентов, выбранных пользователем в блоке насосов. Далее выбирается, какой компонент является «основным», т.е. определяется компонент, объем вовлечения в смешение которого максимальный. Для «основного» компонента подача насоса для его перекачки принимается равной максимальной подаче выбранного типоразмера насоса, подача для всех остальных компонентных насосов рассчитывается как произведение подачи насоса для «основного» компонента на объем рассматриваемого компонента, вовлекаемого в смешение, поделенный на объем «основного» компонента, вовлекаемого в смешение. В случае если расчетная подача насоса для компонента превышает максимальную подачу в соответствии с выбранным пользователем типоразмером насоса, программа выбирает компонент, по которому несоответствие максимально и нормирует подачу всех применяемых насосов с учетом данного значения. В результате подбирается набор значений для подачи насосов для перекачки каждого компонента, позволяющий при выбранных параметрах в каждую единицу модельного времени производить смешение

компонентов в пропорциях, соответствующих уточненной рецептуре смешения. Полученные значения подачи насосов вносятся в переменные VolPumpBlendAlkNew, VolPumpBlendKatNew, VolPumpBlendIzoNew, VolPumpBlendMTBENew для перекачки алкилата, катализата, изомеризата и МТБЭ соответственно. В модели принимается допущение о том, что энергопотребление насосов прямо пропорционально подаче, в связи с чем производится перерасчет мощности насосов при использовании с указанной выше подачей путем умножения максимальной мощности на отношение расчетной и максимальной подачи. Результаты расчета вносятся в переменные EnPumpAlkNew, EnPumpKatNew, EnPumpIzoNew, EnPumpMTBENew для насосов перекачки алкилата, катализата, изомеризата и МТБЭ соответственно.

Блок-схема расчета по схеме №2 приведена на рисунке 3.10.

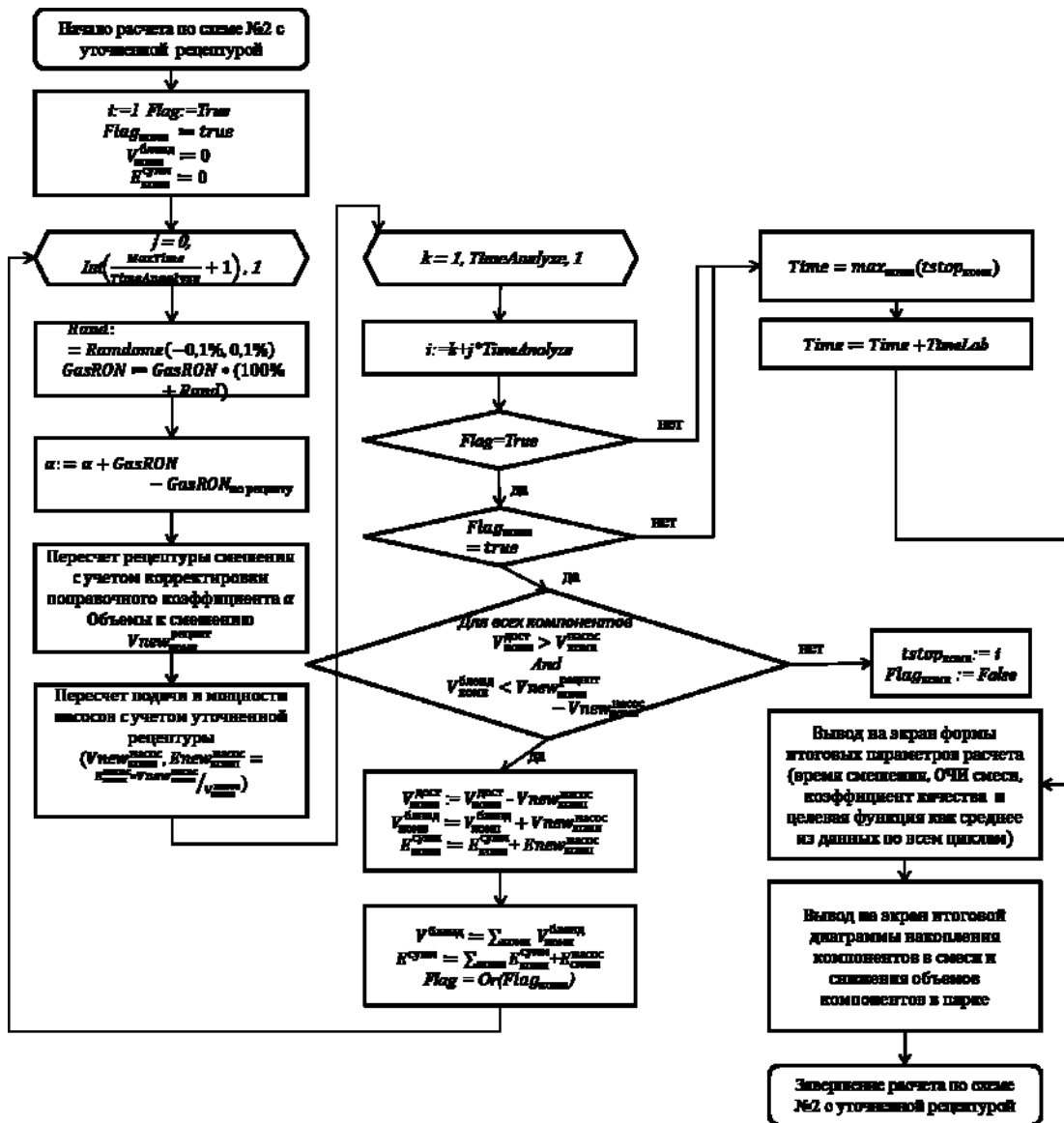


Рисунок 3.10 – Блок-схема имитационного расчета по схеме смешения №2 с уточненной рецептурой смешения

С формы программы в переменную TimeAnalyze вносится целое значение, внесенное пользователем, обозначающее время проведения одного замера октанового числа смеси при помощи поточного анализатора в минутах. В соответствии с принципиальной схемой онлайн смешения по прошествии данного времени возможно проведение корректировки рецептуры смешения в том случае, если полученное ОЧИ смеси не соответствует требуемому по ГОСТ/ТУ. Имитация данного технологического процесса в модели реализована путем проведения расчетов в двух вложенных друг в друга циклах – верхний цикл идет

по блокам времени, которое занимает процесс проведения замера онлайн анализатором, вложенный цикл проводится от 1 до TimeAnalyze. Каждый раз, после получения замера с поточного анализатора, проводится пересчет рецептуры смешения.

Аналогично расчету схемы №1, для моделирования результатов замера ОЧИ поточным анализатором, вносится переменная Rand как случайная величина между -0,1% и 0,1%. Величина замерного ОЧИ смеси GasRON рассчитывается как произведение ОЧИ смеси в соответствии с рассчитанным в рецептуре значением, умноженное на $(100\% + \text{Rand})$. После чего производится корректировка показателя α на листе с расчетом рецептуры, поскольку предполагается, что ОЧИ смеси по фактическому замеру отличается от расчетного значения, что позволяет скорректировать коэффициент для последующего расчета. Следом проводится перерасчет рецептуры смешения с последующим повторным перерасчетом значений подачи и мощности насосов. С использованием всех полученных данных проводится цикл расчетов от 1 до TimeAnalyze по имитации проведения смешения бензина по аналогии с процедурой, описанной для схемы №1. По завершению вложенного цикла снова проводится поиск случайной величины отклонения фактического замера от расчетной величины ОЧИ смеси и цикл запускается заново. На каждом шаге модели объемы компонентов, вовлеченных в смешение, а также полученное расчетное значение ОЧИ смеси, расчетный коэффициент качества и значение целевой функции вносятся на лист «Графики2» для последующего построения графиков и расчетов.

При расчете суммарных затрат электроэнергии на каждом шаге модели, по аналогии с расчетом по схеме №1, происходит включение затрат на работу перемешивающего насоса в резервуаре готовой продукции. Также по аналогии с расчетом по схеме №1 добавляется время, необходимое для проведения лабораторного анализа готовой смеси.

После всех проведенных вычислений программа выводит на пользовательскую форму итоговое полученное октановое число смеси, равное

среднему значению ОЧИ, занесенных на лист «Графики2», полученные значения коэффициента качества и целевой функции, равные средним значениям соответствующих величин, внесенных на лист «Графики2», плотности, а также выводит значение условной прибыли, вычисляемой по формуле, аналогичной примененной в схеме №1.

Далее приведем описание последовательности действий пользователя для взаимодействия с программой.

Для корректной работы программы необходимо скопировать файл на персональный компьютер пользователя. Программа запускается нажатием кнопки «Включить программу» на листе «Титул» файла «Имитационная модель цеха компаундирования бензина» (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Первое диалоговое окно программы

Главное окно программы представляет собой форму, состоящую из следующих блоков (рисунок 3.12):

- блок резервуаров (1);
- блок рецептуры (2);
- блок насосного оборудования (3);
- блок расчетов (4);
- блок отображения графиков (5).

Имитационная модель цеха компаундирования бензина

1 Блок резервуаров

Парк готовой продукции
Объем бензина, м3: 2000

Парк компонентов
Компонент / Первоначальное заполнение резервуара, м3
Алкилат: 500 Катализат: 2000 Изомеризат: 2000 МТБЭ: 500

2 Блок рецептуры

Рассчет рецептуры / Загрузка первоначального рецепта в программу

Марка товарного бензина
Стоимость, руб/кг
 АИ-92-К5
 АИ-95-К5

Поправочный коэф. к ОЧИ: -0,9
Время на измерение параметров, мин: 30

Параметры компонентов	Стоимость, руб/кг	ОЧ по иссл.методу	Плотность (15), кг/м3	ДНП, кПа	Первичный рецепт, %об	Уточн.рецепт, %об
Алкилат		95,6	700,80	41,1	5	
Катализат		95,5	772,15	81,6	68	
Изомеризат		88,01	646,10	103,0	27	
МТБЭ		118,00	745,90	27,1	0	

Расчеты модели (параметры бензина)

	Первичный рецепт	Уточненный рецепт	Первичный рецепт	Уточненный рецепт
Коэффициент качества			Октановое число	
Целевая функция			Плотность, кг/м3	
Итоговая стоимость, млн.р			ДНП, кПа	

3 Блок выбора насосного оборудования

Запомнить варианты насосного оборудования

Стоимость электроэнергии, руб/кВтч: 3,38 Добавить насос

Насос с резервуара, содержащего:	Типоразмер насоса	Подача, м3/ч	Макс. мощность, кВт
Алкилат			
Катализат			
Изомеризат			
МТБЭ			
Насос переключения			

4 Результаты расчетов

	Схема №1	Схема №2
Объем бензина		
Условная прибыль, тыс.руб./тонна		
Время смешения, мин.		
ОЧИ бензина		
Плотность бензина, кг/м3		
Коэффициент качества		
Целевая функция		

Период замера поточного анализатора, мин: 10

5 Показать схему (циркуляционное смешение)
Показать схему №2 (онлайн смешение)

Рисунок 3.12 – Внешний вид основной формы программы при включении

Первым шагом является внесение объемов резервуаров компонентов смешения (алкилата, катализата, изомеризата и МТБЭ) и объем резервуара готовой продукции. Данные вносятся в ячейки белого цвета (рисунок 3.13).

Блок резервуаров

Парк готовой продукции
Объем бензина, м3: 2000

Парк компонентов
Компонент / Первоначальное заполнение резервуара, м3
Алкилат: 500 Катализат: 2000 Изомеризат: 2000 МТБЭ: 500

Рисунок 3.13 – Заполнение данных в блоке резервуаров

Объемы резервуаров должны быть целыми величинами. Для удобства пользователя в блоке резервуаров предустановлены значения.

Вторым шагом необходимо заполнить блок рецептуры (рисунок 3.14).

Блок рецептуры

Расчет рецептуры / Загрузка первоначального рецепта в программу

Марка товарного бензина
Стоимость, руб/кг

АИ-92-К5

АИ-95-К5

Поправочный коэф. к ОЧИ

Время на измерение параметров, мин

Параметры компонентов

	Стоимость, руб/кг	ОЧ по иссл.методу	Плотность (15),кг/м3	ДНП, кПа	Первичный рецепт, %об	Уточн.рецепт, %об
Алкилат	<input type="text"/>	95,6	700,80	41,1	5	<input type="text"/>
Катализат	<input type="text"/>	95,5	772,15	81,6	68	<input type="text"/>
Изомеризат	<input type="text"/>	88,01	646,10	103,0	27	<input type="text"/>
МТБЭ	<input type="text"/>	118,00	745,90	27,1	0	<input type="text"/>

Расчеты модели (параметры бензина)

	Первичный рецепт	Уточненный рецепт	Первичный рецепт	Уточненный рецепт
Кoeffициент качества	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Октановое число	<input type="text"/>
Целевая функция	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Плотность, кг/м3	<input type="text"/>
Итоговая стоимость, млн.р	<input type="text"/>	<input type="text"/>	ДНП, кПа	<input type="text"/>

Рисунок 3.14 – Заполнение данных в блоке рецептуры

Аналогично, белым цветом указаны ячейки, в которые можно внести информацию. Для удобства пользователя в них внесены предустановленные значения из производственного примера. Разделителем в значениях используется запятая.

Внесению подлежат следующие данные (параметры и единицы изменения указаны над ячейками; компоненты, к которым относятся данные параметры, указаны слева от ячеек для заполнения – рисунок 3.15):

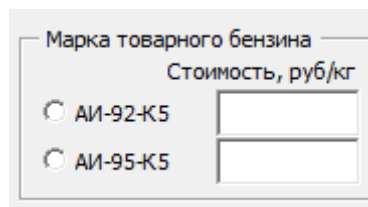
- стоимость компонентов (себестоимость или цена закупки), руб/кг;
- ОЧ (октановое число) по исследовательскому методу, ед.;
- плотность при 15 градусах Цельсия, кг/м3;
- ДНП (давление насыщенных паров), кПа;
- первичный рецепт – процентное соотношение в объемном эквиваленте компонента в смеси, %.

Параметры компонентов

	Стоимость, руб/кг	ОЧ по иссл.методу	Плотность (15),кг/м3	ДНП, кПа	Первичный рецепт, %об	Уточн.рецепт, %об
Алкилат	<input type="text"/>	95,6	700,80	41,1	5	<input type="text"/>
Катализат	<input type="text"/>	95,5	772,15	81,6	68	<input type="text"/>
Изомеризат	<input type="text"/>	88,01	646,10	103,0	27	<input type="text"/>
МТБЭ	<input type="text"/>	118,00	745,90	27,1	0	<input type="text"/>

Рисунок 3.15 – Заполнение параметров компонентов

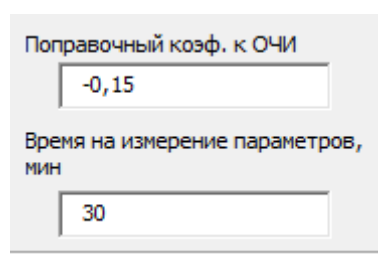
В ячейках напротив марок бензина (рисунок 3.16) вносится стоимость реализации готовой смеси в руб/кг. Пользователь должен выбрать нажатием радиокнопки марку изготавливаемого бензина (выбор между АИ-92 экологического класса К5 или АИ-95 экологического класса К5).



The screenshot shows a form titled "Марка товарного бензина" (Brand of commodity gasoline). It contains two radio buttons for selection: "АИ-92-К5" and "АИ-95-К5". To the right of these buttons are two empty input fields for entering the price in rubles per kilogram ("Стоимость, руб/кг").

Рисунок 3.16 – Выбор марки бензина и внесение его стоимости

Пользователю необходимо внести информацию о поправочном коэффициенте, применяемом при вычислении октанового числа аддитивным методом (рисунок 3.17). Если у пользователя нет такой информации, следует оставить предустановленный коэффициент. Дополнительно в этом же блоке устанавливается время в минутах, требуемое на измерение октанового числа бензина в центральной заводской лаборатории. Предустановленное значение указано в ячейке. Значение должно быть целочисленным.



The screenshot shows a form with two input fields. The first field is labeled "Поправочный коэф. к ОЧИ" (Correction coefficient to OCH) and contains the value "-0,15". The second field is labeled "Время на измерение параметров, мин" (Time for parameter measurement, min) and contains the value "30".

Рисунок 3.17 – Введение поправочного коэффициента и времени измерения

После заполнения всех указанных выше данных из блока рецептуры, необходимо нажать кнопку «Расчет рецептуры» (рисунок 3.18).

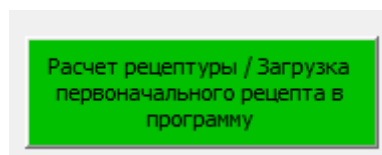


Рисунок 3.18 – Кнопка расчета рецептуры

В результате нажатия кнопки программа проверяет корректность ввода значений, как было указано ранее: при вводе отрицательных значений, значений октановых чисел, превышающих 140 единиц для компонентов кроме МТБЭ и 150 для МТБЭ, плотностей свыше 1000 кг/м³, давлений насыщенных паров свыше 150 кПа, программа выдает ошибку (рисунок 3.19).

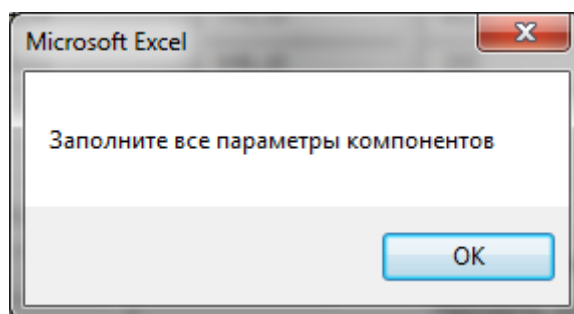


Рисунок 3.19 – Пример сообщения об ошибке при заполнении значений компонентов

При отсутствии выбора со стороны пользователя марки бензина, программа выдает требование выбора марки бензина (рисунок 3.20).

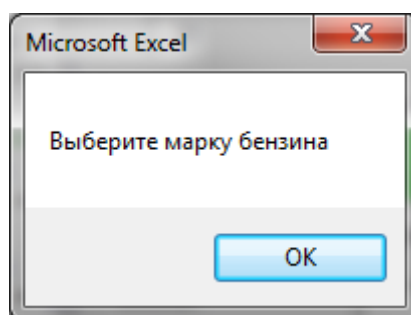


Рисунок 3.20 – Сообщение программы о необходимости выбора марки бензина для смешения

В случае отличия суммы процентных соотношений компонентов от 100%, программа так же выдаст ошибку (рисунок 3.19).

В результате корректного ввода всех данных, программа пересчитывает рецептуру с учетом применения коэффициента качества при помощи минимизации целевой функции. Подбор значений происходит на листе MS Excel «Рецептура» с применением функции «Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ» с ограничением по сумме объемов компонентов (в виде равенства), изменяемыми параметрами являются объемы компонентов, с ограничением расчетной плотности смеси минимальным и максимальным значением, закрепленных ГОСТ. Результаты пересчитываются как процентное объемное соотношение и указываются в серых ячейках под надписью «Уточн.рецепт, %об» - уточненная рецептура. Также вносятся расчетные данные по первичному и уточненному рецепту: коэффициент качества, целевая функция, итоговая стоимость смеси, октановое число, плотность и ДНП полученной смеси, все значения соответствуют расчетам, произведенным на листе MS Excel «Рецептура». Пример результатов расчетов приведен на рисунке 3.21.

Блок рецептуры

Расчет рецептуры / Загрузка первоначального рецепта в программу

Марка товарного бензина
Стоимость, руб/кг

АИ-92-К5
 АИ-95-К5

Поправочный коэф. к ОЧИ
-0,9

Время на измерение параметров, мин
30

Параметры компонентов

	Стоимость, руб/кг	ОЧ по иссл.методу	Плотность (15), кг/м3	ДНП, кПа	Первичный рецепт, %об	Уточн.рецепт, %об
Алкилат	95,6	700,80	41,1	5	4,65	
Катализат	95,5	772,15	81,6	68	60,58	
Изомеризат	88,01	646,10	103,0	27	34,77	
МТБЭ	118,00	745,90	27,1	0	0	

Расчеты модели (параметры бензина)

	Первичный рецепт	Уточненный рецепт	Первичный рецепт	Уточненный рецепт
Коэффициент качества	1,13	0,55	Октановое число	92,58 / 92,00
Целевая функция	1,50	0,91	Плотность, кг/м3	734,55 / 725,00
Итоговая стоимость, млн.р			ДНП, кПа	85,35 / 87,16

Рисунок 3.21 – Пример проведенного расчета в блоке рецептуры

В случае необходимости корректировки данных или уточнения первоначальной рецептуры, имеется возможность скорректировать значения в белых ячейках и снова нажать кнопку «Расчет рецептуры». Если данные будут

скорректированы без нажатия кнопки, программа будет использовать ранее заполненные данные для расчета.

В блоке выбора насосного оборудования пользователь может скорректировать стоимость электроэнергии, применяемой при экономических расчетах на предприятии (рисунок 3.22).

Рисунок 3.22 – Ячейка ввода стоимости электроэнергии

Далее, для каждого из насосов, который будет использоваться при перекачке компонента из его резервуара в блок смешения продукции, необходимо выбрать из выпадающего меню наименование насоса (рисунок 3.23).

Рисунок 3.23 – Пример выпадающего меню для выбора насоса на алкилат

Параметры насосов и их количество можно заблаговременно скорректировать на листе «Исходные данные». После ввода марок насосов для всех компонентов и для насоса перемешивания, который работает непосредственно в резервуаре смешения готовой продукции, необходимо нажать кнопку «Запомнить варианты насосного оборудования» (рисунок 3.24).

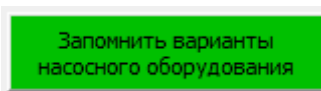


Рисунок 3.24 – Кнопка внесения данных по выбранному насосному оборудованию

При необходимости внесения дополнительных типоразмеров насосов можно воспользоваться кнопкой «Добавить насос».

В результате, в серых ячейках для справки отразятся значения подачи и максимальной мощности для выбранных насосов, которые далее будут использоваться в расчетах (рисунок 3.25).

Блок выбора насосного оборудования

Запомнить варианты насосного оборудования

Стоимость электроэнергии, руб/кВтч

Насос с резервуара, содержащего:	Типоразмер насоса	Подача, м ³ /ч	Макс. мощность, кВт
Алкилат	ЦН 90/100а (80м ³ /ч)	80	45
Катализат	ЦН 160/112б (135м ³ /ч)	135	54
Изомеризат	ЦН 160/112а (150м ³ /ч)	150	67
МТБЭ	ЦН 160/112 (160 м ³ /ч)	160	85
Насос перемешивания	Тайфун-20-Р (перемешивания)	8000	15

Рисунок 3.25 – Пример заполненного блока насосного оборудования

Далее пользователь переходит к выбору периода замера поточного анализатора в минутах, а именно периодичность, с которой поточный анализатор качества может выдавать замерные значения октанового числа смеси (значение должно быть целочисленное) и последовательно нажимает кнопки «Провести расчет по схеме №1» и «Провести расчет по схеме №2» (рисунок 3.26).

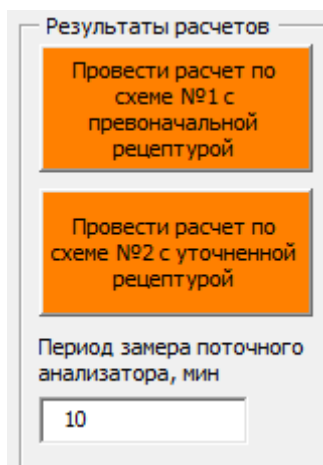


Рисунок 3.26 – Корректировка периода замера поточного анализатора и кнопки расчетов

В результате расчетов в блоке расчетов отображаются текущие значения для каждой из схем основных показателей вычислений (в серых ячейках): итоговый объем бензина, условная прибыль, время смешения, октановое число полученного бензина, плотность полученного бензина, коэффициент качества, целевая функция (рисунок 3.27).

Результаты расчетов		Схема №1	Схема №2
<p>Провести расчет по схеме №1 с первоначальной рецептурой</p> <p>Провести расчет по схеме №2 с уточненной рецептурой</p>	Объем бензина	1995,23	1996,29
	Условная прибыль, тыс.руб./тонна	3,49	3,68
<p>Период замера поточного анализатора, мин</p> <p>10</p>	Время смешения, мин.	292,00	371,00
	ОЧИ бензина	93,50	92,09
	Плотность бензина, кг/м3	734,55	726,54
	Коэффициент качества	2,05	0,55
	Целевая функция	2,42	0,91

Рисунок 3.27 – Пример результатов расчетов

Динамика накопления в резервуаре бензина и снижения объемов резервуаров компонентов показывается в блоке графиков (рисунок 3.28).

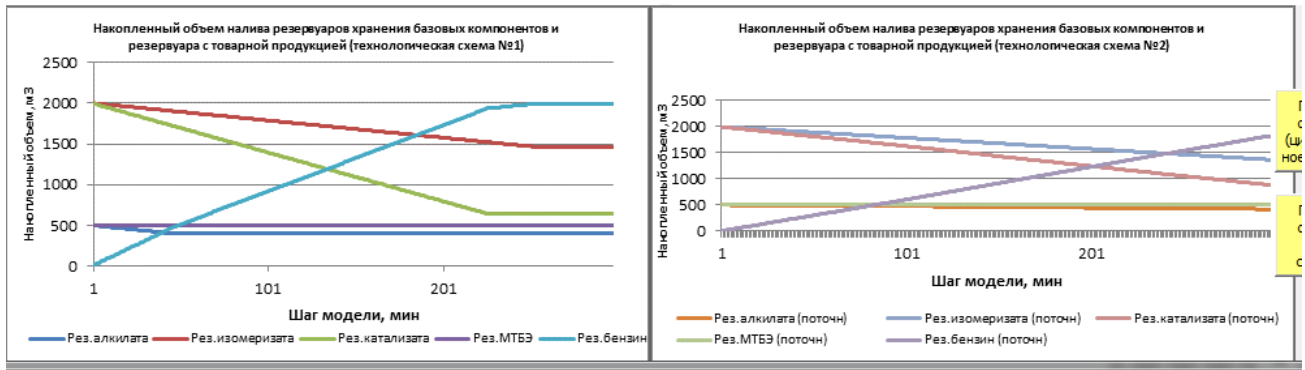


Рисунок 3.28 – Пример отображаемых графиков

4.2 Реализация имитационной модели на конкретном производстве

Разработанная имитационная модель была апробирована в условиях действующего производства в цехе компаундирования бензинов АО «Куйбышевский НПЗ».

Пример применения имитационной модели приведен на рисунке 3.29. В данном примере проводится имитационный расчет компаундирования бензина марки АИ-92-К5 с первоначальной рецептурой: 5,00% об. алкилата, 68,00% об. катализата, 27,00% об. изомеризата, МТБЭ не вовлекается в смешение. Целевой объем товарной продукции установлен 2000 м³, объем компонентов, доступных для смешения: алкилат – 500 м³, катализат 2000 м³, изомеризат 2000 м³, МТБЭ 500 м³. Поправочный коэффициент к октановому числу принят равным -0,9 единиц.

В результате работы модели была получена обновленная рецептура компаундирования: 4,65% об. алкилата, 60,58% об. катализата, 34,77% об. изомеризата, МТБЭ не вовлекается в смешение. При этом октановое число получаемого бензина при применении первичной рецептуры составило 93,50, при применении уточненного рецепта – 92,09, в результате итоговая себестоимость бензина с учетом уточненного рецепта ниже на 1,5%, чем при первоначальной рецептуре.

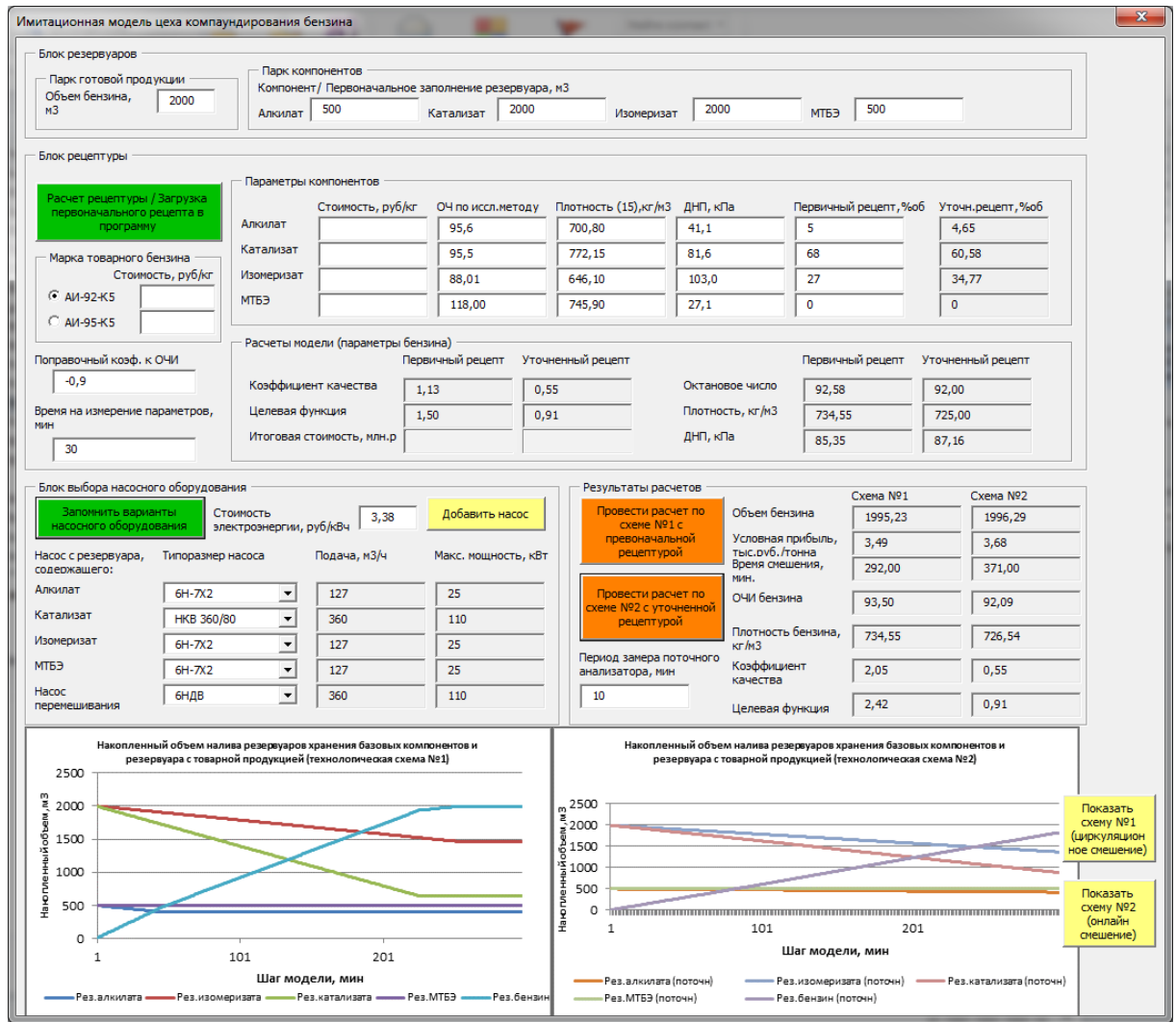


Рисунок 3.29 – Итоговый пример работы программы

В процессе имитационного моделирования принято применение насосов 6Н-7Х2 с максимальной подачей 127 м³/ч и мощностью 25 кВт для перекачки в резервуар готовой продукции с резервуаров с алкилатом и изомеризатом. Для перекачки катализата применен насос НКВ 360/80 с максимальной подачей 360 м³/ч и мощностью 110 кВт. Принято, что для проведения лабораторного анализа требуется 30 минут, для проведения замеров поточным анализатором станции смешения требуется 10 минут.

Таким образом, за счет уточнения рецептуры смешения и за счет применения схемы смешения в потоке (схема №2) октановое число ближе к требуемому (92,09 против 93,50 при расчете по схеме смешения №1), комплексный коэффициент качества так же ближе к идеальному варианту (0,55

против 2,05 в схеме №1), целевая функция так же лучше (0,91 против 2,42, целевая функция стремится к минимуму). Все эти факторы дают лучший результат по условной прибыли предприятия на тонну продукции – при реализации схемы смешения №2 условная прибыль на 4% выше, чем при реализации схемы №1.

Выводы и результаты апробации подтверждаются актом внедрения от 05.04.2023 (Приложение А).

4.3 Выводы и рекомендации

В заключение четвертой главы была проведена апробация разработанной имитационной модели цеха компаундирования для условий действующего производства на АО «Куйбышевский НПЗ».

Применение предложенного метода структурного моделирования ресурсов в цехе на основе комплексного показателя качества процесса компаундирования бензинов позволяет оптимизировать рецептуры компаундирования с учетом сокращения суммарной себестоимости вовлекаемых компонентов до 1,5%. В части реорганизации цеха компаундирования бензинов за счет внедрения автоматической станции смешения с применением поточных анализаторов качества одновременно с применением методологии управления качеством продукции, реализация предложенных мероприятий позволят повысить условную прибыль при компаундировании в расчете на тонну автомобильного бензина на сумму до 4% (расчет произведен без учета амортизации капитальных вложений, необходимых для проведения реконструкции).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практика внедрения систем управления компаундированием автомобильного бензина на нефтеперерабатывающих предприятиях открывает возможность повышения эффективности производства в целом, прежде всего, за счет организации рациональной работы цеха, ликвидации «узких» мест производственной системы, минимизации суммарной стоимости вовлекаемых в компаундирование компонентов, оптимизации применяемого технологического оборудования и планировки цеха.

В ходе диссертационного исследования были получены следующие результаты и сделаны выводы.

1. Проведен анализ существующих моделей и методик организации производственных систем цехов компаундирования бензинов, которые нашли применение в организации производства в рамках внедрения системы управления качеством продукции предприятий нефтеперерабатывающего профиля, что позволило выявить основные проблемы организации в данных условиях на цеховом уровне, связанные с отсутствием возможности автоматизированного контроля показателей качества продукции, неоптимальным применением технологического оборудования и трудовых ресурсов.

2. Обоснован подход к построению интегральной модели ПС с последовательно-параллельной организацией на основе подбора рецептуры смеси в процессах компаундирования бензинов на уровне цеха, с учетом комплексного показателя качества для создания формальной модели организации производственного процесса, учитывающей узел оптимизации рецептуры компаундирования и загрузку технологического оборудования на каждой операции.

3. Сформирована модель структурного анализа и интеграции технологических процессов и элементов ПС в условиях нефтепереработки на основе объединения качественных (октановое число, плотность) и количественных (объем) характеристик. Разработанная модель производственных процессов в цехе учитывает «узкие» места в цехе и позволяет моделировать работу элементов ПС с учетом оптимизации насосного оборудования и планировки цеха.

4. Сформировано концептуальное управленческое решение для повышения результативности работы цеха компаундирования бензинов на нефтеперерабатывающем предприятии на основе прогнозной модели функционирования цеха с последовательно-параллельной организацией ПС, позволяющее адекватно учитывать все параметры производственной системы для максимальной загрузки технологического оборудования на каждой операции путем выявления формализованных параметров технологического процесса компаундирования на уровне цеха и путем внедрения формализованного параметра контроля качества продукции.

5. Разработана имитационная модель рациональной работы цеха компаундирования автомобильных бензинов по принятому управленческому решению в условиях необходимости управления качеством продукции на предприятиях нефтеперерабатывающего профиля с учетом комплексного показателя качества смеси и ликвидации «узких» мест на основе прогнозного концептуального управленческого решения.

6. Эффективность организации ПС цеха компаундирования автомобильных бензинов оценивалась средними показателями условной себестоимости автомобильного бензина из расчета себестоимости вовлекаемых в компаундирование компонентов и показателями условной прибыли при компаундировании в расчете на тонну производимого автомобильного бензина с учетом всех вовлекаемых ресурсов, в том числе электроэнергии, затрачиваемой на работу технологического оборудования. В результате экспериментов получены следующие значения: без проведения реконструкции цеха снижение условной

себестоимости автомобильного бензина до 1,5%, повышение условной прибыли при компаундировании на 1 тонну продукции до 4% при внедрении в работу автоматизированной станции смешения одновременно с применением методологии управления качеством продукции (без учета амортизации капитальных вложений).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капустин В.М., Рудин М.Г., Кукес С.Г. Справочник нефтепереработчика. - М.: Химия, 2018. - 416 с.: ил.
2. Бочаров В.Н. и др. Исследование многомерных абсорбционных аналитических сигналов бензинов в среднем ИК-диапазоне //Журнал аналитической химии. – 2019. – Т. 74. – №. 5. – С. 356-364.
3. Купцов А.Х., Жижин Г.Н. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров / Москва: Техносфера, 2013. – 696 с.
4. Егоров А.С. Электронное учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 40 с.
5. Казакова Н.Р. и др. Идентификация автомобильных бензинов методами атомно-силовой микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния //Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2015. – №. 2. – С. 38-44.
6. Скворцов Б.В., Скворцов Д.Б., Малышева-Стройкова А.Н. Теоретические основы комплексных измерений показателей качества нефтепродуктов методом ядерного магнитного резонанса //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – №. 6-1.
7. Артемьев Д.Н., Головина Е.С. Определение октанового числа по исследовательскому методу автомобильных бензинов и их компонентов смешения при помощи спектров комбинационного рассеяния (рамановской спектроскопии) //Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2022. – Т. 1. – №. 1-2. – С. 46-55.
8. Voigt M. et al. Using fieldable spectrometers and chemometric methods to determine RON of gasoline from petrol stations: A comparison of low-field ^1H NMR@ 80 MHz, handheld RAMAN and benchtop NIR //Fuel. – 2019. – Т. 236. – С. 829-835.

9. Cooper J.B., Wise K.L., Groves J., Welch W.T. Determination of Octane Numbers and Reid Vapor Pressure of Commercial Petroleum Fuels Using FT-Raman Spectroscopy and Partial Least-Squares Regression Analysis // *Analytical Chemistry*. 1995. Vol. 67. No. 22. P. 4096–4100.
10. Flecher P.E., Welch W.T., Albin S., Cooper J.B. Determination of Octane Numbers and Reid Vapor Pressure in Commercial Gasoline Using Dispersive Fiber-Optic Raman Spectroscopy // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 1997. No. 53. P. 199–206.
11. Jorge Armando Ardila, Frederico Luis Felipe Soares, Marco Antônio dos Santos Farias & Renato Lajarim Carneiro (2016): Characterization of Gasoline by Raman Spectroscopy with Chemometric Analysis, *Analytical Letters*.
12. Астапов В.Н. Лазерный оптико-акустический октанометр в системах оптимизации процесса компаундирования товарных бензинов // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика СП Королёва (национального исследовательского университета)*. – 2009. – №. 1.
13. Астапов В.Н., Виноградов А.Н. Исследование и анализ электродинамических характеристик углеводородных топлив // *Школа Науки*. – 2018. – №. 3. – С. 8-14.
14. Астапов В.Н. Аналитический обзор электрофизических характеристик углеводородных жидкостей и применение их в информационно-измерительных системах для контроля качества топлив // *Научное обозрение. Технические науки*. – 2016. – №. 5. – С. 5-27.
15. Щербакова А.А. Информационно-измерительная система определения состава и октанового числа бензинов в промышленных условиях на основе параметрического квантового генератора // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2015. – №. 4 (14). – С. 10-15.
16. Qin X., Dai L. Determination of gasoline octane number using Raman spectroscopy and least squares support vector machines // *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (IEEE Cat. No. 04EX788)*. – IEEE, 2004. – Т. 5. – С. 3805-3809.

17. Li S., Dai L. Classification of gasoline brand and origin by Raman spectroscopy and a novel R-weighted LSSVM algorithm //Fuel. – 2012. – Т. 96. – С. 146-152.
18. Liu W., Dai L. Raman spectral analysis of low-content benzene concentration in gasoline with partial least squares based on interference peak subtraction //Analytical Sciences. – 2016. – Т. 32. – №. 8. – С. 861-866.
19. Brereton R.G. Introduction to Multivariate Calibration in Analytical Chemistry // Analyst. 2000. No. 125. P. 2125–2154.
20. Savitzky A., Golay M.J. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // Analytical Chemistry. 1964. No. 36. P. 1627–1639.
21. Мусаев А.А., Никитин В.А. Оценивание качества управления процессами на основе многомерного статистического контроля //Методы менеджмента качества. – 2006. – №. 12. – С. 38-46.
22. Gorban A., Kegl B., Wunsch D.C., Zinovyev A. Principal Manifolds for Data Visualization and Dimensionality Reduction. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 340 p.
23. Щербакова А.А., Соловьев В.А. Принцип искусственных нейронных сетей в промышленной системе идентификации компонентов бензина, определения его состава и детонационной стойкости //Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2015. – №. 2 (14).
24. Щербакова А.А., Соловьев В.А., Артамонов Д.В. Искусственная нейронная сеть для идентификации компонентов, определения состава топлива по спектральным коэффициентам поглощения //Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – №. 3 (35). – С. 36-45.
25. Chen X., Wang N. Optimization of short-time gasoline blending scheduling problem with a DNA based hybrid genetic algorithm //Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2010. – Т. 49. – №. 10. – С. 1076-1083.

26. Singh E., Waqas M., Johansson B., Sarathy M. Simulating HCCI blending octane number of primary reference fuel with ethanol // SAE Technical Paper. - 2017-01. DOI: 10.4271/2017-01-0734.
27. Shane R. Daly, Kyle E. Niemeyer, William J. Cannella, and Christopher L. Hagen. FACE gasoline surrogates formulated by an enhanced multivariate optimization framework // *Energy and Fuels*. - 2018. - vol. 32.
28. Daly S.R. et al. Predicting fuel research octane number using Fourier-transform infrared absorption spectra of neat hydrocarbons // *Fuel*. – 2016. – Т. 183. – С. 359-365.
29. Chèbre M. et al. Scalable integrated solution for real time estimation, control and optimization of the quality of fuels manufactured in refineries: an industrial story // *IFAC-PapersOnLine*. – 2017. – Т. 50. – №. 1. – С. 3488-3492.
30. DeWitt C. W. et al. OMEGA: An improved gasoline blending system for Texaco // *Interfaces*. – 1989. – Т. 19. – №. 1. – С. 85-101.
31. Клим О.В. Промышленные анализаторные комплексы. Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2015. – 65 с.
32. Егорова Н.И. и др. Особенность применения спектрометрических экспресс-октанометров для контроля октанового числа бензинов-компаундов в процессе их производства // *Башкирский химический журнал*. – 2019. – Т. 26. – №. 3.
33. Егорова Н.И. и др. Особенность применения спектрометрических экспресс-октанометров для контроля октанового числа бензинов-компаундов в процессе их производства // *Башкирский химический журнал*. – 2019. – Т. 26. – №. 3.
34. Da Silva N.C. et al. NIR-based octane rating simulator for use in gasoline compounding processes // *Fuel*. – 2019. – Т. 243. – С. 381-389.
35. Дрогов С.В. Автоматизированная система компаундирования нефтепродуктов в производстве товарных бензинов: дис. – 2004.
36. Golovina E.S. et al. Digital reality of oil refining // *Oil Industry Journal*. – 2021. – Т. 2021. – №. 11. – С. 67-71.

37. Лаврентьев В.А. и др. Методы повышения точности моделей виртуальных анализаторов показателей качества фракции 80... 180 С для колонны К-2 установки атмосферно-вакуумной перегонки нефти //Автоматизация в промышленности. – 2021. – №. 7. – С. 25-29.
38. Кувыкин В.И., Мелешкевич М.А., Наумова С.В. Системный подход к оптимизации управления смешением //Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – №. 10-2 (52).
39. Трахтенгерц Э.А., Степин Ю.П., Андреев А.Ф. Компьютерные методы поддержки принятия управленческих решений в нефтегазовой промышленности //М.: СИНТЕГ. – 2005. – Т. 576.
40. Nedelchenko S.I. et al. Criteria for choosing a process control system //Oil Industry Journal. – 2020. – Т. 2020. – №. 02. – С. 90-93.
41. Федоров Ю.Н. Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка. М.: Инфра-Инженерия. 2008. – 928 с.
42. Садыков Х.А., Хатаев Ю.К. Особенности построения АСУТП в нефтепереработке //Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – №. 2. – С. 87-91.
43. Лаврентьев В.А. Построение регрессионных уравнений для виртуальных анализаторов основных показателей качества процесса алкилирования / В.А. Лаврентьев, Е.С. Головина // Мир нефтепродуктов. – 2021. – № 3. – С. 6-10.
44. Недельченко С.И. и др. Система глобальной динамической оптимизации и система оптимизации в реальном времени: критерии выбора системы управления технологическими процессами //Территория Нефтегаз. – 2019. – №. 12. – С. 12-17.
45. Веревкин А.П. Системотехника «продвинутого» управления в нефтепереработке //Проблемы автоматизации технологических процессов добычи, транспорта и переработки нефти и газа: сб. тр. II Всерос. науч.-практ. интернет-конф.-Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2014.
46. Пискунов И.В., Шаманин М.В., Башкирцева Н.Ю. Вестник технологического университета // Вестник технологического университета

Учредители: Казанский национальный исследовательский технологический университет. – 2021. – Т. 24. – №. 10. – С. 62-71.

47. Голованов Ю.В., Храпов Д.В. Система управления качеством //Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2015. – №. 8. – С. 10-12.

48. Алаторцев Е.И. Комплексное совершенствование контроля качества на НПЗ //Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2016. – №. 2. – С. 21-25.

49. Алаторцев Е.И. Системные основы и методология комплексного совершенствования контроля качества нефтепродуктов: дис. – 2014.

50. Астапов В.Н. Методологические и схемотехнические решения в системах контроля и управления на нефтеперерабатывающем заводе (монография) //Международный журнал экспериментального образования. - 2015. - №5-2. - С. 218-219.

51. Nedelchenko S.I. et al. Applying dynamic advanced process control models in processes at Bashneft Oil Company refineries //Oil Industry Journal. – 2021. – Т. 2021. – №. 06. – С. 108-112.

52. Головина Е.С. Принципы построения систем управления технологическими процессами в нефтепереработке и нефтехимии на примере управления реактором алкилирования фенола и компаундирования топлив / Е.С. Головина, В.А. Лаврентьев // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2020. – № 9. – С. 34-38.

53. Сусарев С.В. Разработка быстродействующих алгоритмов и систем автоматизированного управления компаундированием бензинов: дис. – 2007.

54. Лычкина Н.Н. Имитационные модели в процедурах и системах поддержки принятия стратегических решений на предприятиях //Бизнес-информатика. – 2007. – №. 1.

55. Лисицын Н.В. Методология оптимизации интегрированных нефтеперерабатывающих производственных систем: Дис. д-ра техн. наук: 05.13.06. – 2003.

56. Хаймович И.Н., Рамзаев В.М. Разработка модели данных для функционирования производственных активных элементов на основе информационного взаимодействия //Информационные технологии и нанотехнологии. – 2018. – С. 2149-2158.
57. Pavlov V.A. et al. Prospects for applying virtual simulators to hazardous production //Oil Industry Journal. – 2020. – Т. 2020. – №. 11. – С. 70-72.
58. Golovina E.S. et al. Application of laser scanning technology at capital construction facilities //Oil Industry Journal. – 2019. – Т. 2019. – №. 11. – С. 43-45.
59. Скворцов Б.В., Головина Е.С. Основные проблемы и направления развития систем управления процессом компаундирования топлив //Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2020. – С. 107-109.
60. Li J., Karimi I.A., Srinivasan R. Recipe determination and scheduling of gasoline blending operations //AIChE journal. – 2010. – Т. 56. – №. 2. – С. 441-465.
61. Gao Y., Kar S. Uncertain solid transportation problem with product blending //International Journal of Fuzzy Systems. – 2017. – Т. 19. – №. 6. – С. 1916-1926.
62. Li W., Hui C.W., Li A.X. Integrating CDU, FCC and product blending models into refinery planning //Computers & chemical engineering. – 2005. – Т. 29. – №. 9. – С. 2010-2028.
63. Mendez C.A. et al. A simultaneous optimization approach for off-line blending and scheduling of oil-refinery operations //Computers & chemical engineering. – 2006. – Т. 30. – №. 4. – С. 614-634.
64. Jia Z., Ierapetritou M. Efficient short-term scheduling of refinery operations based on a continuous time formulation //Computers & chemical engineering. – 2004. – Т. 28. – №. 6-7. – С. 1001-1019.
65. Glismann K., Gruhn G. Short-term planning of blending processes: scheduling and nonlinear optimization of recipes //Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology. – 2001. – Т. 24. – №. 3. – С. 246-249.

66. Djukanovic M. et al. Fuzzy linear programming based optimal fuel scheduling incorporating blending/transloading facilities //IEEE Transactions on Power Systems. – 1996. – T. 11. – №. 2. – C. 1017-1023.
67. Singh A. et al. Model-based real-time optimization of automotive gasoline blending operations //Journal of process control. – 2000. – T. 10. – №. 1. – C. 43-58.
68. Li J., Xiao X., Floudas C. A. Integrated gasoline blending and order delivery operations: Part I. short-term scheduling and global optimization for single and multi-period operations //AIChE Journal. – 2016. – T. 62. – №. 6. – C. 2043-2070.
69. Castillo P. A. C., Mahalec V. Inventory pinch based, multiscale models for integrated planning and scheduling-part II: Gasoline blend scheduling //AIChE Journal. – 2014. – T. 60. – №. 7. – C. 2475-2497.
70. Castillo-Castillo P. A., Mahalec V. Improved continuous-time model for gasoline blend scheduling //Computers & Chemical Engineering. – 2016. – T. 84. – C. 627-646.
71. Tawarmalani M., Sahinidis N. V. A polyhedral branch-and-cut approach to global optimization //Mathematical programming. – 2005. – T. 103. – №. 2. – C. 225-249.
72. Castillo P.A., Castro P.M., Mahalec V. Global optimization of nonlinear blend-scheduling problems //Engineering. – 2017. – T. 3. – №. 2. – C. 188-201.
73. Li Y., Qiu T. Logarithm-transform piecewise linearization method for the optimization of gasoline blending processes //Chinese journal of chemical engineering. – 2018. – T. 26. – №. 8. – C. 1684-1691.
74. Sales L.P., Luna F.M., Prata B.A. An integrated optimization and simulation model for refinery planning including external loads and product evaluation //Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2018. – T. 35. – C. 199-215.
75. Wang W. et al. On-line optimization model design of gasoline blending system under parametric uncertainty //2007 Mediterranean Conference on Control & Automation. – IEEE, 2007. – C. 1-5.

76. Аносов А.А. Разработка и исследование динамических моделей составления расписаний в процессах смешения товарных нефтепродуктов: дис. – 2007.

77. Сапожников А. Британский производитель промышленного ПО Aveva объявил о сокращении деятельности в России [Электронный ресурс] // Kommersant.ru: новостной портал. 2022. 27 апреля. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5329279> (дата обращения: 13.12.2022).

78. Система AVEVA Refinery Off-sites: официальный сайт AVEVA. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aveva.com/ru-ru/products/off-sites-management/> (дата обращения: 13.12.2022).

79. AspenPIMS Brochure. [Электронный ресурс] // Aspentech.com: Официальный сайт компании AspenTech. URL: https://www.aspentech.com/-/media/aspentech/home/resources/brochure/pdfs/fy21/q3/at-03906-bro-aspen-pims.pdf?sc_lang=ru (дата обращения 12.12.2022).

80. Евдокимова Н.Г., Лунева Н.Н., Лунева М.Э. Совершенствование внутрифирменного планирования на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях на основе информационных технологий // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. – 2020. – №. 2 (32). – С. 56-67.

81. Aspen Refinery Multi-Blend Optimizer. [Электронный ресурс] // Aspentech.com: Официальный сайт компании AspenTech. URL: <https://www.aspentech.com/ru/products/msc/aspentech-refinery-multi-blend-optimizer> (дата обращения: 13.12.2022).

82. Астром Т., Арвикар К.Дж., Гильдеа Э. Точная смесь. [Электронный ресурс] // АББ Ревю. Корпоративный технический журнал группы АББ. – 2003. – №3. – С. 15-20. URL: https://library.e.abb.com/public/fe2e62031ccbe307c1256e68002793af/p15_20.pdf (дата обращения 10.12.2022).

83. Производитель электротехники и робототехники АБВ уйдет из России. [Электронный ресурс] // Rbc.ru: Новостной портал. 2022. 21 июля. URL:

<https://www.rbc.ru/business/21/07/2022/62d916709a7947c8538d9c60>

(дата

обращения 14.12.2022).

84. Аносов А.А. и др. Высокотехнологичные решения корпорации Honeywell на базе платформы Experion PKS //Автоматизация в промышленности. – 2011. – №. 8. – С. 29-37.

85. Anosov A.A., Efitov G.L., Zusman S.D. On-line gasoline blending optimization with in-flow blend quality analysis //Automation and Remote Control. – 2017. – Т. 78. – №. 3. – С. 515-524.

86. Кувыкин В.И., Матвеев А.Е. Использование интеграции информационных систем для повышения эффективности приготовления смесей //Современные наукоемкие технологии. – 2020. – №. 7. – С. 68-72.

87. Американская компания Honeywell приостановила деятельности в России и Белоруссии. [Электронный ресурс] // Tass.ru: Новостной портал. 2022. 09 марта. URL: <https://tass.ru/ekonomika/14016653> (дата обращения 14.12.2022).

88. NetBlend (web based blend optimizer). [Электронный ресурс] // Haverly.com: Официальный сайт компании Haverly. URL: <https://www.haverly.com/planning> (дата обращения 14.12.2022).

89. Haverly C.A. Behavior of recursion model-more studies //ACM SIGMAP Bulletin. – 1979. – №. 26. – С. 22-28.

90. Горбунов С.С. и др. Комплексная система планирования и оптимизации рецептур смешения бензинов // Математические методы в технике и технологиях-ММТТ. – 2019. – Т. 4. – С. 91-94.

91. Горбунов С.С. и др. Программный комплекс оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения бензинов и мазутов //Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2019. – №. 1. – С. 13-19.

92. Горбунов С.С. и др. Учет нелинейности рецептур смешения топлив в программном комплексе оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения топлив //Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2019. – №. 2. – С. 9-11.

93. Развернутое описание программного комплекса планирования и оптимизации рецептур бензинов. [Электронный ресурс] // mcee.ru: Официальный сайт ООО «МЦЭ-Инжиниринг». URL: <https://mcee.ru/programmnyij-kompleks-planirovaniya-i-optimizaczii-reczeptur-benzinov> (дата обращения 15.12.2022).

94. Сизиков А.П. Программный продукт СМОННП (Система оптимизации нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств) //Управление большими системами: сборник трудов. – 2009. – №. 24.

95. Смышляева Ю.А., Иванчина Э.Д. и др. Разработка базы данных по октановым числам для математической модели процесса компаундирования товарных бензинов // Известия Томского политехнического университета. - 2011. - Т. 318 №3. - С. 75-80.

96. Смышляева Ю.А. Моделирование процесса приготовления высокооктановых бензинов на основе углеводородного сырья в аппаратах циркуляционного типа : дис. – 2011.

97. Малецкий В.Ю. Математическое моделирование процесса компаундирования бензинов с использованием компьютерной моделирующей системы "Compounding" / В.Ю. Малецкий, И.М. Долганов, И.О. Долганова; науч. рук. И.М. Долганов // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К. И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина, Томск, 8-12 апреля 2019 г.: в 2 т. — Томск : Изд-во ТПУ, 2019. — Т. 2. — [С. 341-342].

98. Шишов Р.И., Григорьев Я.Ю. Оптимизация выбора рецептуры компонент для процесса компаундирования компонентов при производстве товарных бензинов //Постулат. – 2018. – №. 4.

99. Никитин В.А. и др. Оптимизация компаундирования углеводородных смесей //Труды СПИИРАН. – 2007. – №. 4. – С. 327-336.

100. Акопов А.С. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата / А.С. Акопов - М.: Издательство Юрайт, 2015. - 389 с. - Серия: Бакалавр. Академический курс.

101. Сидоренко В.Н., Красносельский А.В. Имитационное моделирование в науке и бизнесе: подходы, инструменты, применение //Бизнес-информатика. – 2009. – №. 2. – С. 52-57.
102. Григорьев И. AnyLogic за три дня. Практическое пособие по имитационному моделированию //Режим доступа: <https://www.anylogic.ru/resources/books/free-simulation-book-and-modeling-tutorials>. – 2017.
103. Борщев А. От системной динамики и традиционного ИМ–к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты //URL: <http://www.gpss.ru/paper/borshevarc.pdf>. – 2004.
104. Борщев А.В. Имитационное моделирование: состояние области на 2015 год, тенденции и прогноз //Труды седьмой Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД_2015). Том пленарных докладов. – 2015. – С. 14-22.
105. Жаров М.В. Моделирование оптимизации для организации производств цехов машиностроения в программной среде AnyLogic //В научно-техническом журнале "Вестник РГРТУ"(" Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета"). – 2020. – №. 71. – С. 151-161.
106. Моделирование процессов с помощью имитационной среды «Tecnomatix Plant Simulation» компании Siemens для дисциплины «Производственный менеджмент» [Электронный ресурс]: Электронные методические указания к лабораторным работам, практическим занятиям и курсовому проектированию / В.П. Глухов, М.В. Хардин, Е.В. Быковский, А.А. Заянчуковский; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (1,6 Мбайт). - Самара, 2013.
107. Якимов И.М. и др. Имитационное моделирование в системе Plant Simulation //Вестник Казанского технологического университета. – 2017. – Т. 20. – №. 2. – С. 107-111.
108. Bangsow S. Tecnomatix plant simulation. – Springer International Publishing, 2020.

109. Siemens уйдет с российского рынка [Электронный ресурс] // Rbc.ru: Новостной портал. 2022. 12 мая. URL: <https://www.rbc.ru/business/12/05/2022/627c9d869a7947e1d9ecd922> (дата обращения 27.12.2022).

110. Гусева Е.Н. Анализ результатов имитационного моделирования в среде Rockwell Software Arena //Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве (ТИМ'2016).—Екатеринбург, 2016. – 2016. – С. 194-198.

111. Якимов И.М., Кирпичников А.П. Имитационное моделирование вероятностных объектов в системе Flexsim //Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19. – №. 21. – С. 170-173.

112. Капустин Н.М. САПР технологических процессов. М.: Издательство ВЗПИ, 1992. – 287 с.

113. ГОСТ 32513-2013. Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия (Переиздание) – Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартинформ, 2019.

114. Технический регламент таможенного союза ТР ТС 013/2011. О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту (с изменениями на 19 декабря 2019 года) – Введ. 2011-10-01. – М.: Кодекс, 2019.

115. Кравцов А.В., Иванчина Э.Д., Смышляева Ю.А. Математическое моделирование процесса компаундирования товарных бензинов с учетом реакционной способности компонентов смеси // Известия Томского политехнического университета. - 2009. - Т. 314 №3. - С. 81-85.

116. Аносов А.А. Опыт использования ИК-спектрометрии для измерения свойств бензинов на НПЗ / Аносов А. А., Ефитов Г. Л. и Хусман С. Д. / Автоматизация в промышленности: 2012 - с. 41-47.

117. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – Рипол Классик, 1963.

118. Хорошко С.И., Хорошко А.Н. Сборник задач по химии и технологии нефти и газа, Москва: Книга по Требованию, 2012.

119. Жоров Ю.М., Гуреев А.А., Смидович Е.В. Производство высокооктановых бензинов. – М.: Химия, 1981. – 219 с.
120. Хафизов Ф.Ш., Краснов А.В. Давление насыщенных паров для нефтепродуктов //Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2012. – №. 3. – С. 406-412.
121. Стаскевич Н.Л., Северинец Г.Н., Вигдорчик Д.Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. - Л.: Недра, 1990. - 762 с.: ил.
122. Rigby B., Lasdon L.S., Waren A.D. The evolution of Texaco's blending systems: From OMEGA to StarBlend //Interfaces. – 1995. – Т. 25. – №. 5. – С. 64-83.
123. Golovina E.S., Khaimovich I.N. A simulation model for a compounding process for commercial gasolines //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Т. 2373. – №. 7. – С. 072029.
124. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680985. Имитационная модель цеха компаундирования бензина / Е.С. Головина. – Заявка № 2022680176. Дата поступления 21.10.2022. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 09.11.2022.
125. Астапов В.Н. Информационно-измерительные системы для адаптивного управления промышленными станциями поточного смешения товарных бензинов: дис. – 2013.
126. Недельченко С.И. и др. Критерии выбора системы управления технологическим процессом //Нефтяное хозяйство. – 2020. – №. 2. – С. 90-93.
127. Недельченко С.И. и др. Применение динамических моделей систем усовершенствованного управления технологическими процессами нефтепереработки в ПАО АНК «Башнефть» //Нефтяное хозяйство. – 2021. – №. 6. – С. 108-112.
128. Головина Е.С. Принципы построения систем управления технологическими процессами в нефтепереработке и нефтехимии на примере управления реактором алкилирования фенола и компаундирования топлив / Е.С. Головина, В.А. Лаврентьев // Актуальные задачи нефтегазохимического

комплекса: Материалы научно-практической конференции, Москва, 19-20 ноября 2020 года. – Москва: ОАО «ВНИПИнефть», 2020. – С. 17-18.

129. Павлов В.А. и др. Перспективы применения виртуальных тренажеров на опасных производствах // Нефтяное хозяйство. – 2020. – №. 11. – С. 70-72.

130. Golovina E.S. et al. Digital reality of oil refining // Oil Industry Journal. – 2021. – Т. 2021. – №. 11. – С. 67-71.

131. Головина Е.С. и др. Цифровая реальность нефтепереработки / Е. С. Головина, М. А. Литвиненко, Ю. А. Ергомышев [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 11. – С. 67-71.

132. Головина Е.С. и др. Применение технологии лазерного сканирования на объектах капитального строительства // Нефтяное хозяйство. – 2019. – №. 11. – С. 43-45.

133. Головина Е.С., Хаймович И.Н. Разработка и применение имитационной модели цеха компаундирования автомобильных бензинов / Е.С. Головина, И.Н. Хаймович // Известия Самарского научного центра Российской академии наук». – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 35-42.

Приложение А. Акт внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

АО «Куйбышевский

нефтеперерабатывающий завод»

В.А. Сидоров

« 5 » 04 2023 г.

АКТ

О внедрении в опытную эксплуатацию результатов кандидатской диссертации Головиной Евгении Сергеевны, связанной с разработкой моделей и методов оптимизации работы цеха компаундирования бензинов с учетом применения нового комплексного показателя качества

Мы, нижеподписавшиеся, представители АО «Куйбышевский нефтеперерабатывающий завод»: заместитель главного инженера по товарному производству Воронцов А.О., начальник производственного отдела Сютин П.Е., начальник цеха №10 Иванов Г.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Головиной Е.С., посвященной совершенствованию управления производственной системы цехов компаундирования бензинов на основе моделей и методов структурного анализа и интеграции производственных систем с применением комплексного показателя качества, внедрены в опытную эксплуатацию в АО «Куйбышевский нефтеперерабатывающий завод».

Применение предложенного автором метода структурного моделирования ресурсов в цехе на основе комплексного показателя качества процесса компаундирования бензинов, отражающего качественные и количественные отклонения в процессе смешения, позволяет оптимизировать рецептуры компаундирования с учетом сокращения суммарной

себестоимости вовлекаемых компонентов до 1,5% и снижения запаса по качеству (по октановому числу) в среднем на 0,1%*.

Реализация предложенных автором мероприятий в части реорганизации цеха компаундирования бензинов за счет внедрения автоматической станции смешения с применением поточных анализаторов качества одновременно с применением методологии управления качеством продукции позволяют повысить условную прибыль при компаундировании в расчете на 1 тонну автомобильного бензина на сумму до 4%* (расчет произведен без учета амортизации капитальных вложений, необходимых для проведения реконструкции).

Применение разработанных автором: методов структурного анализа и интеграции технологических процессов и элементов производственных систем на основе объединения качественных и количественных характеристик, моделей рациональной организации производственных процессов в цехе компаундирования бензинов с учетом оптимизации насосного оборудования и планировки цеха позволит повысить качество планирования выпуска автомобильных бензинов и повысить эффективность вовлекаемых трудовых и товарных ресурсов.

Примечание:

*по данным диссертационной работы.

Заместитель главного инженера
по товарному производству



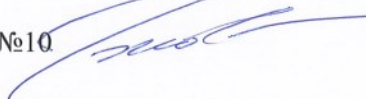
А.О. Воронцов

Начальник производственного отдела



П.Е. Сютин

Начальник цеха №10



Г.В. Иванов