

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ
ЦЕХА КОМПАУНДИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ БЕНЗИНОВ**© 2023 Е.С. Головина¹, И.Н. Хаймович²¹ АО «Самаранефтехимпроект», г. Самара, Россия² Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 19.05.2023

Компаундирование товарных топлив является важной завершающей стадией всей технологической цепочки производства нефтеперерабатывающего завода, определяющей итоговую экономическую эффективность всего производства. В данной работе рассматривается имитационная модель процесса компаундирования товарных бензинов, основанная на дискретном линейном программировании. Для оптимизационной модели в качестве целевой функции рассматривается отношение разности стоимости товарной продукции и понесенных затрат на компоненты и электроэнергию, нормированное на итоговый объем товарной продукции и время её приготовления. На основании оптимизационной модели делается вывод о целесообразности применения поточной схемы смешения, а также о необходимости выбора насосного оборудования, применяемого в схеме, в соответствии с рецептурой смешения. Оптимизационная модель может применяться для первичных расчетов экономической эффективности вариантов организации процесса компаундирования товарных бензинов.

Ключевые слова: имитационная модель, оптимизационная модель, компаундирование бензинов.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-35-42

EDN: KDDFQM

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс компаундирования товарных топлив, в том числе, автомобильных бензинов, является важной завершающей стадией всей технологической цепочки производства нефтеперерабатывающего завода (НПЗ). В процессе компаундирования происходит смешение различных компонентов, произведенных на технологических установках НПЗ или закупленных дополнительно. Компоненты компаундирования имеют различные качественные характеристики, такие как: октановое число, плотность, давление насыщенных паров, содержание ароматических углеводородов и прочее, а также имеют определенную себестоимость. Компаундирование товарных моторных топлив определяет итоговую экономическую эффективность всего производства [1, 2].

Различают два основных метода компаундирования – циркуляционный метод, который ранее получил широкое распространение (приготовление производится в смесительных резервуарах с применением аппаратов с перемешивающими устройствами) и метод поточного смешения (приготовление производится в не-

прерывном режиме в смесителе с последующим накоплением готовой продукции в резервуаре), который в настоящее время вытесняет циркуляционный метод. При поточном методе имеется возможность постоянного контроля характеристик товарных продуктов с помощью поточных анализаторов качества, а также возможность корректировки рецептуры компаундирования в процессе приготовления. Ряд исследований посвящен преимуществам применения метода поточного смешения и разработке методов и алгоритмов повышения маржинальности производства за счет увеличения точности процесса компаундирования [1-5]. Математические модели для описания процесса компаундирования товарных бензинов формулируются как задачи смешанного целочисленного линейного программирования [6, 7], однако с учетом того, что при смешении компонентов качественным характеристикам присуще нелинейное поведение, для повышения точности моделей применяется и смешанное целое нелинейное программирование, а также комбинации методов [8, 9].

Рассматриваемые в указанных выше статьях методики направлены на повышение точности планирования процесса компаундирования, в то время как имитационная модель, рассматриваемая в данной работе, дает возможность количественно оценить преимущества внедрения системы смешения в потоке для нефтеперерабатывающего предприятия. Дополнительно, оп-

Головина Евгения Сергеевна, аспирант.

E-mail: GolovinaES@snhp.rosneft.ru

Хаймович Ирина Николаевна, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением. E-mail: kovalek68@mail.ru

тимизационная модель, представленная далее, дает возможность осуществить подбор насосного оборудования, применяемого на предприятии, для повышения эффективности производства.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Задача исследования – оптимизация процессов при компаундировании товарных бензинов с увеличением прибыли предприятия за счет оптимизационных и технологических мероприятий. Задача может быть решена с помощью имитационного моделирования путем сравнения вариантов технологических процессов. Целью построения имитационной модели цеха компаундирования автомобильных 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.

3. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КОМПАУНДИРОВАНИЯ БЕНЗИНОВ

Цех компаундирования условно можно представить как совокупность следующих основных зон: парк базовых компонентов, заводская лаборатория, зона аппаратуры смешения, парк товарной продукции, зона размещения персонала.

Основу процесса компаундирования товарных бензинов составляет технологический процесс – комплекс последовательно выполняемых операций. Эффективность технологического процесса дает итоговую эффективность всего процесса. В работе рассматриваются две принципиальные схемы технологического процесса, описанные выше: схема №1 – стандартная схема с циркуляционным смешением (рис. 1), и схема №2 – с применением поточного смешения и поточных анализаторов качества продукции (рис. 2). Особенностью схемы №2 является возможность ежеминутной корректировки рецептуры смешения непосредственно в процессе компаундирования.

Для целей описания имитационной модели цеха компаундирования принято допущение, что в цехе происходит компаундирование из 4-х базовых компонентов: алкилат, катализат, изомеризат, метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ).

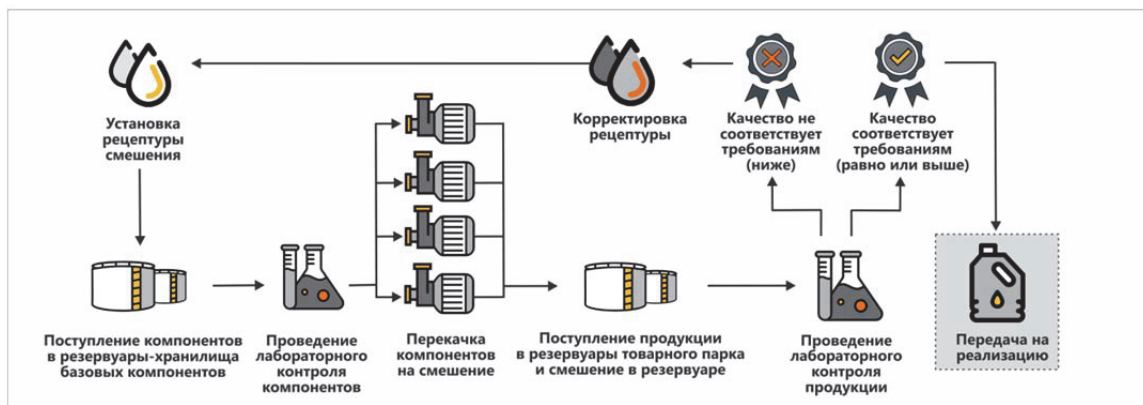


Рис. 1. Технологический процесс компаундирования по схеме №1



Рис. 2. Технологический процесс компаундирования по схеме №2

В общем случае для процесса может быть применено иное количество базовых компонентов.

Концептуальная модель процесса компаундирования автомобильных бензинов для обоих вариантов технологических схем представлена на рис. 3, 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 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 конкретной 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 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 или лучше них));

- S_5 – технологическая операция по проверке качества смеси в потоке;

- V – резервуар хранения товарной продукции;

- 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.

Различия 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 дорогостоящего базового компонента (объем дополнения приведен в допущениях модели);

- этап S_7 включает в себя время и энергозатраты на работу перемешивающего устройства, находящегося внутри резервуара с товарной продукцией;

- 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.

4. ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ И ДОПУЩЕНИЯ В ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Как было упомянуто ранее, для описания алгоритма работы имитационной модели процесса компаундирования товарных бензинов приняты следующие допущения. Число базовых компонентов примем равным 4.

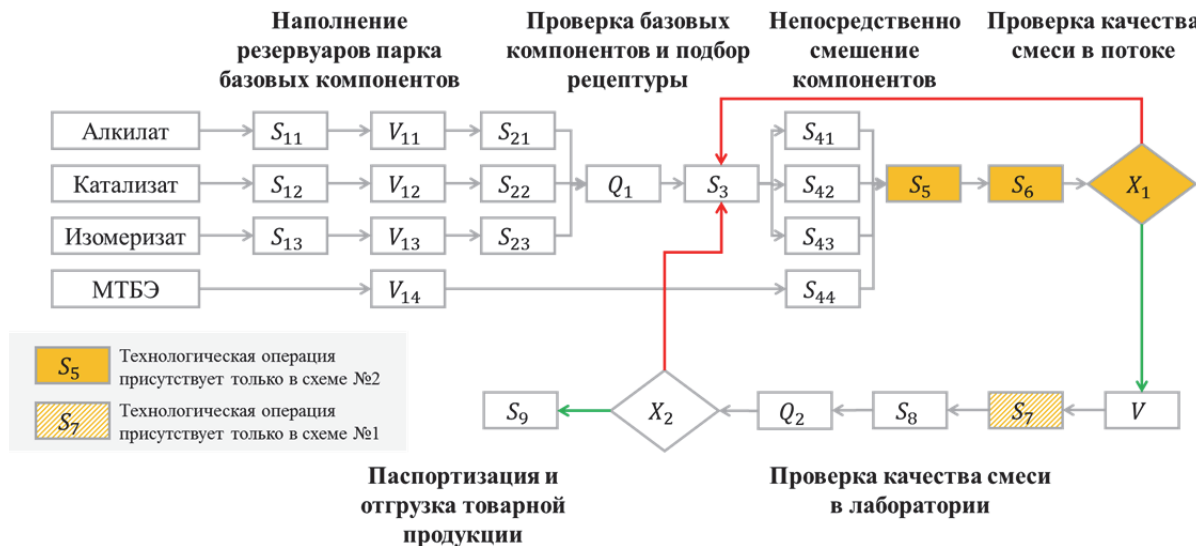


Рис. 3. Алгоритм работы имитационной модели процесса компаундирования товарных бензинов

Итоговые затраты рассматриваются по завершённой 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 наливе нескольких резервуаров товарной продукции. Объёмы готовой продукции сопоставим с суммарным объёмом базовых компонентов.

Для имитации несовершенства технологической схемы №1 принято, что по результатам компаундирования требуется добавление от 2,5% до 4% от объёма резервуара товарной продукции одного из компонентов, в данном случае – изомеризата. Конкретный процент добавления из указанного диапазона выбирается случайным образом.

Для имитации корректировки рецептуры при реализации технологической схемы №2 (с применением поточного метода) принято, что на каждом шаге объём базовых компонентов, поступающих в смеситель, меняется в пределах

от 97% до 103%, при этом суммарный объём более дорогостоящих продуктов (в данном случае – изомеризата и МТБЭ) уменьшается на 1,5%-3%, а более дешёвых компонентов (в данном случае – алкилата и катализата) – увеличивается на 1,5%-6%. Проценты из указанных диапазонов выбираются случайным образом на каждый расчет модели.

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

5. ОПИСАНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ И ПРИМЕР РАБОТЫ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Имитационная модель реализована при помощи языка программирования VBA, встроенного в MS Excel [10]. Модель реализована как пошаговый расчет процесса с накоплением необходимых данных (накопленные объёмы жидкости в резервуарах, накопленные затраты на электроэнергию для снабжения каждо-

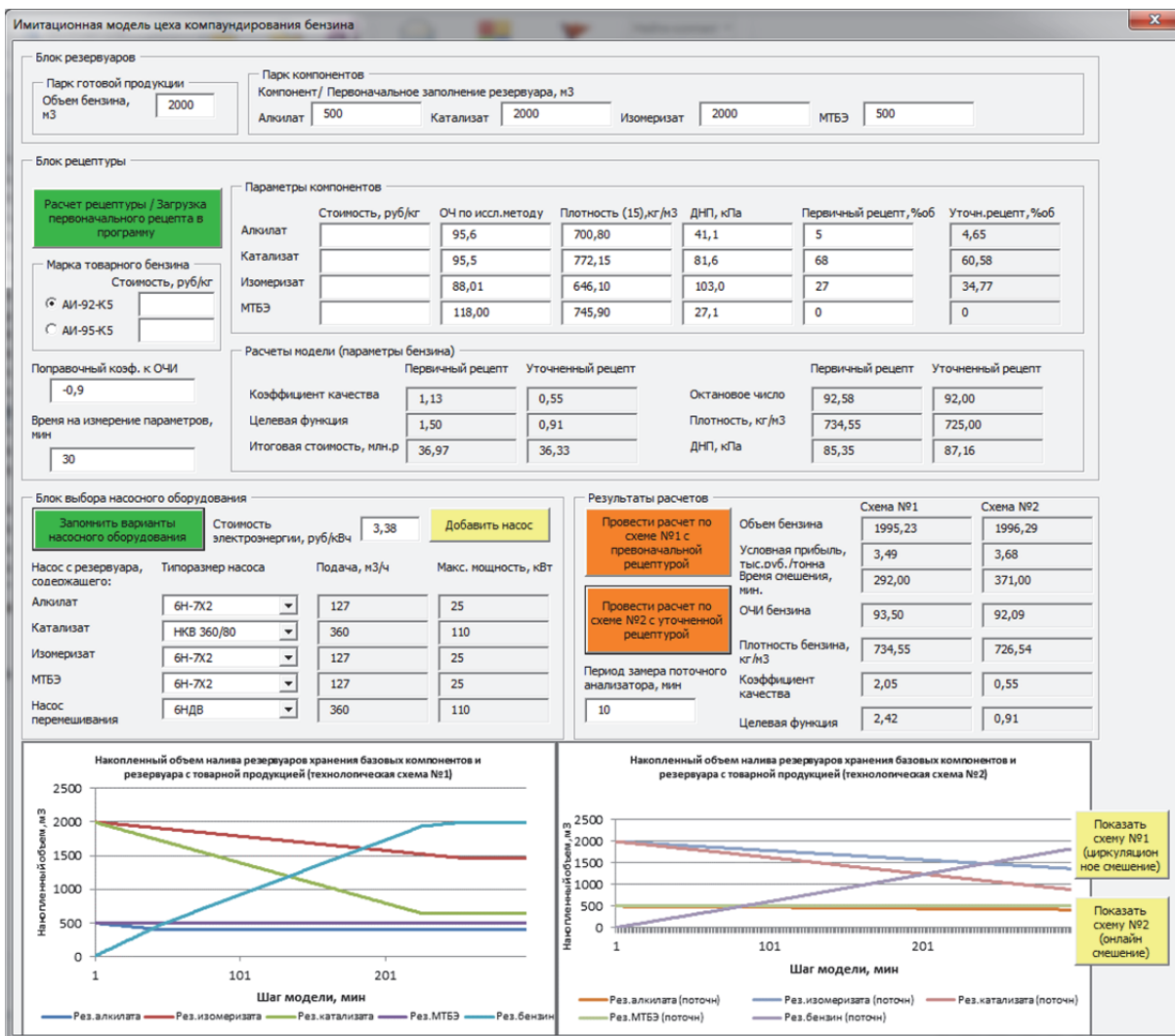


Рис. 4. Основная форма программного продукта реализации имитационной модели работы цеха компаундирования бензина

го 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 доход от реализации готовой продукции в единицу времени. Внешний вид программного продукта, в котором реализована описанная концепция, представлен на рис. 4.

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:

$$S = \frac{\sum W \cdot Z - \sum W_j \cdot F_j - E}{W * t}$$

где: t – итоговое время приготовления топлива начиная от стадии налива в резервуары базовых компонентов и завершая выдачей паспорта продукции на резервуар товарного бензина, мин;

W – объем подготовленного к реализации товарного бензина за время t , м³,

Z – стоимость товарного бензина в период производства, руб/м³;

W_j – объем j -го компонента смешения, использованного при производстве объема продукции W , м³,

F_j – стоимость j -го компонента смешения в период производства, руб/м³;

E – затраты на оплату электроэнергии 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.

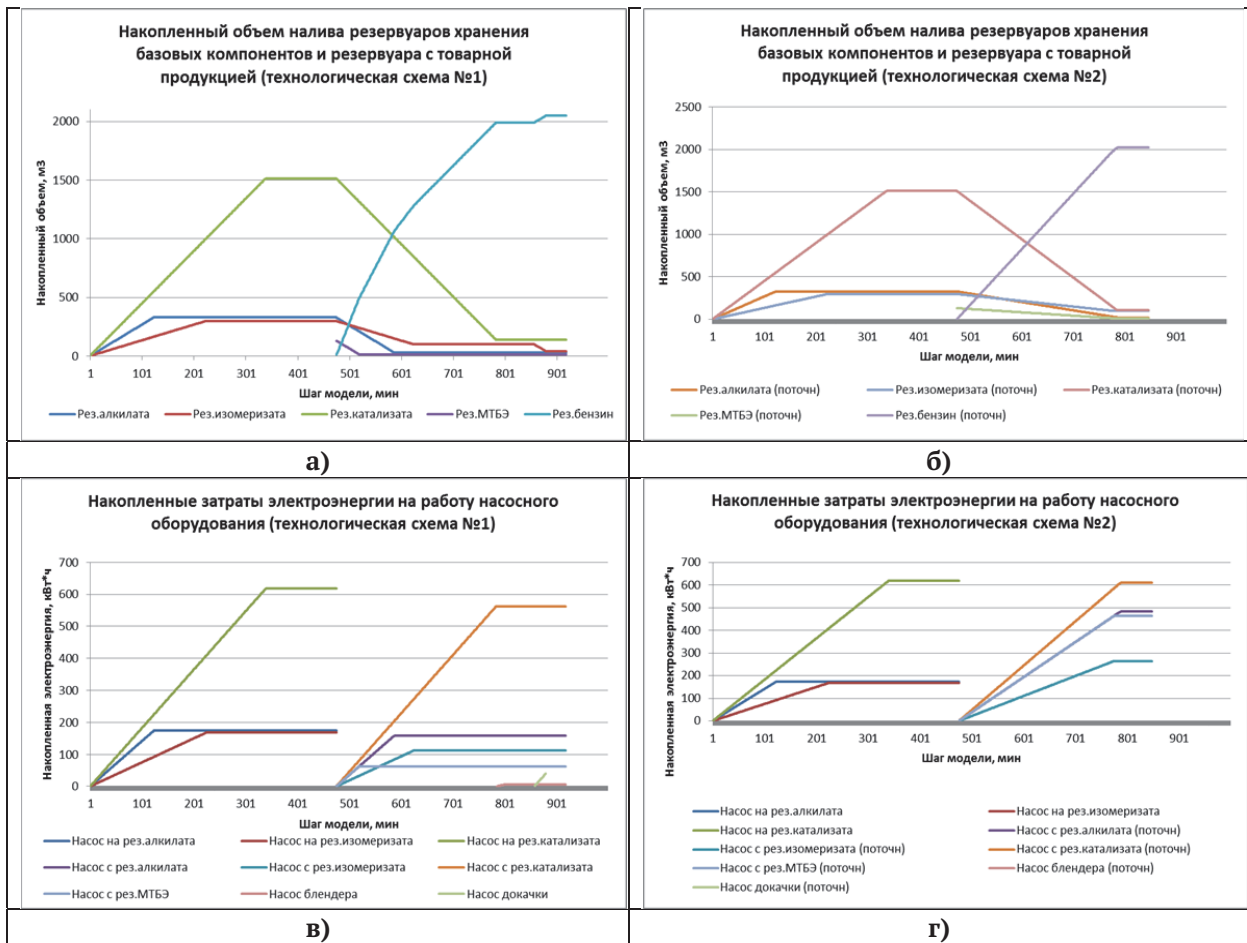


Рис. 5. Пример результатов имитационного моделирования для компаундирования бензина марки АИ-95-К5:

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

На основании разработанной имитационной модели проведено исследование по возможности оптимизации работы цеха компаундирования товарных бензинов с учетом заданных начальных условий. Поскольку в работе имитационной модели применяются случайные величины, для каждого набора насосного оборудования производился пятикратный пересчет имитационной модели с последующим осреднением результатов. Результаты выполнения вычислений были внесены в таблицу результатов.

Пример результата работы имитационной модели приведен на рис. 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.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет имитационной модели проводился для всех возможных наборов выбора насосного оборудования из модельного ряда для применения при наливе 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 усреднились.

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 при принятой рецептуре компаундирования – максимальный. Наиболее предпочтительным вариантом является реализация технологической схемы №2 (поточное смешение). На рис. 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 рис. 7 представлено, что имеется корреляция между изменением подачи 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, что соответствует современным трендам. Таким образом, разработанная оптимизационная модель может быть применена для первичных расчетов в части экономической эффективности и для определения конфигурации насосного оборудования при внедрении технологической схемы поточного компаундирования на нефтеперерабатывающих предприятиях.

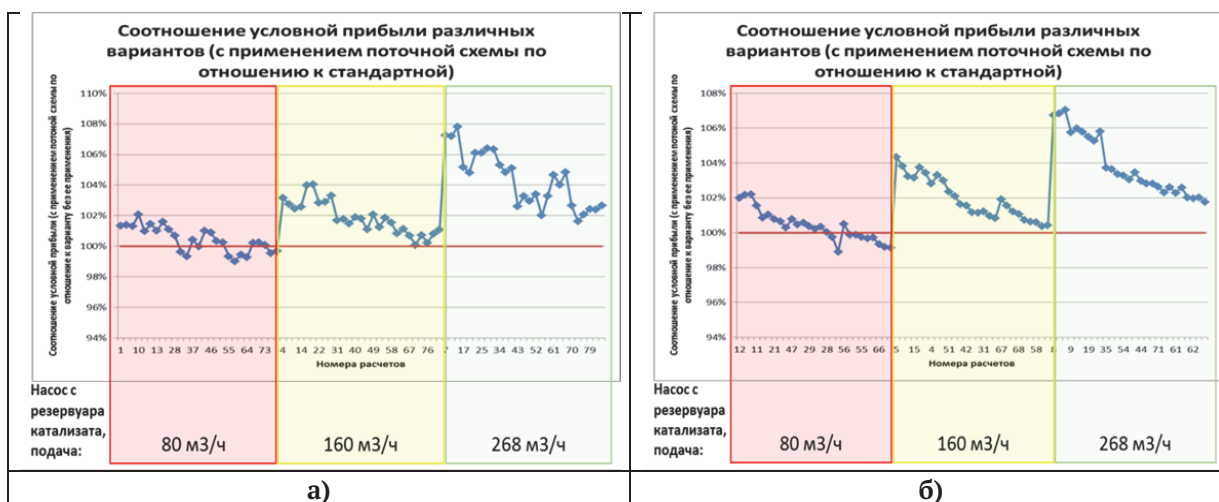


Рис. 6. Соотношение условной прибыли предприятия, расчет оптимизационной модели для получения товарного бензина марки:
а) АИ-92-К5, б) АИ-95-К5

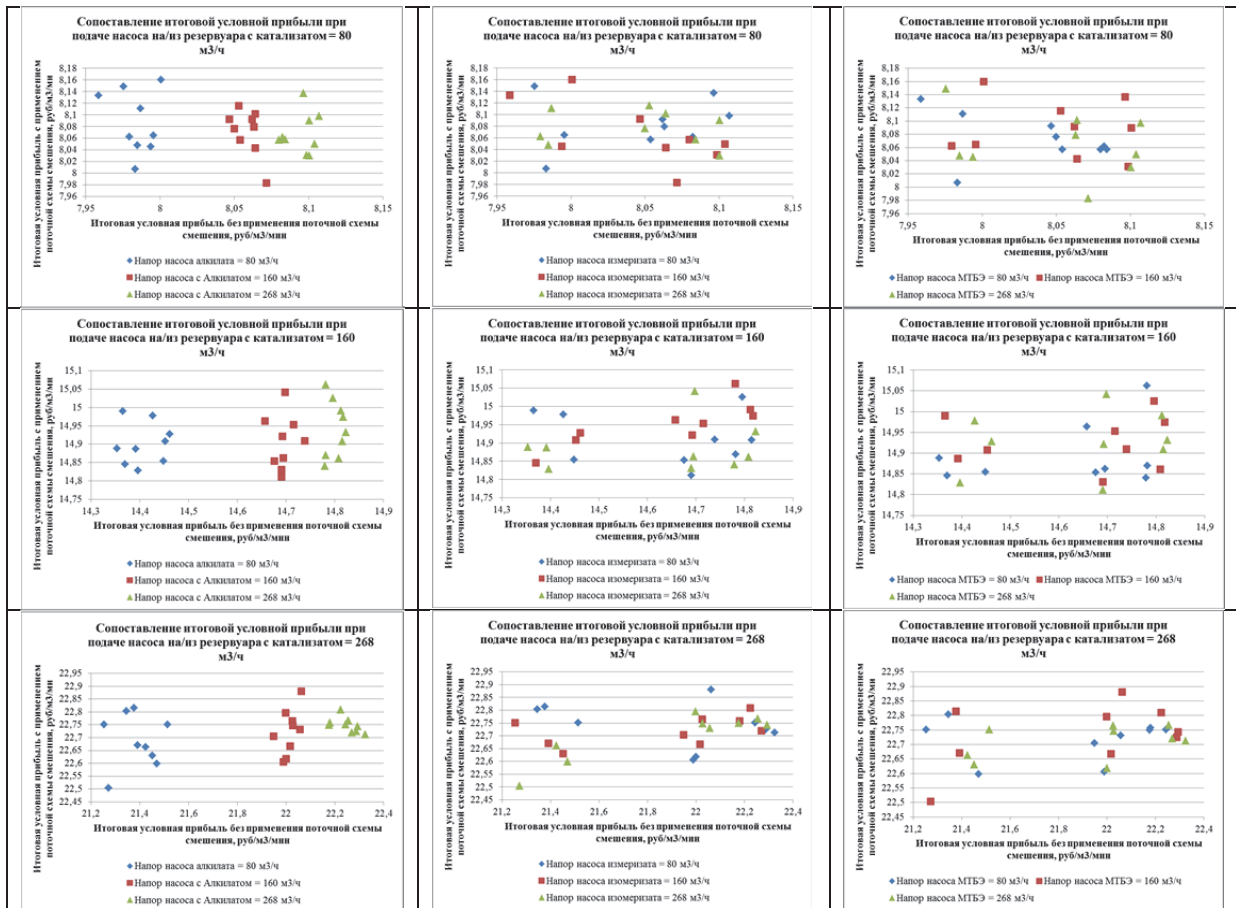


Рис. 7. Сопоставление итоговой условной прибыли при различных вариантах выбора насосного оборудования для процесса компаундирования товарного бензина марки АИ-95-К5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс компаундирования товарных бензинов является важной завершающей стадией всей технологической цепочки производства нефтеперерабатывающего завода. Выбор технологической схемы, а также подбор насосного оборудования для реализации схемы, напрямую влияет на экономическую эффективность работы цеха компаундирования. Для целей проведения сопоставления возможных вариантов процесса компаундирования была разработана имитационная и оптимизационная модели, позволяющие при определенных допущениях в короткие сроки провести экономическую оценку эффективности вариантов. Имитационная модель выполнена средствами линейного программирования VBA, встроенного в MS Excel, оптимизационная модель реализована путем последовательного запуска имитационной модели в автоматизированном режиме с условием перебора исходных данных с накоплением значений по функции оптимизации.

Оптимизационная модель может применяться для первичных расчетов экономической эффективности вариантов организации процесса компаундирования товарных бензинов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh A. et al. Model-based real-time optimization of automotive gasoline blending operations //Journal of process control. – 2000. – Т. 10. – №. 1. – С. 43-58.
2. DeWitt C. W. et al. OMEGA: An improved gasoline blending system for Texaco //Interfaces. – 1989. – Т. 19. – №. 1. – С. 85-101.
3. Wang W. et al. On-line optimization model design of gasoline blending system under parametric uncertainty //2007 Mediterranean Conference on Control & Automation. – IEEE, 2007. – С. 1-5.
4. Wang W. et al. On-line optimization model design of gasoline blending system under parametric uncertainty //2007 Mediterranean Conference on Control & Automation. – IEEE, 2007. – С. 1-5.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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. – Т. 62. – №. 6. – С. 2043-2070.
9. Castillo P.A.C., Castro P.M., Mahalec V. Global optimization of nonlinear blend-scheduling problems //Engineering. – 2017. – Т. 3. – №. 2. – С. 188-201.
10. Головина Е.С. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680985 от 09.11.2022. Имитационная модель цеха компаундирования бензина.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A SIMULATION MODEL FOR A COMPOUNDING PROCESS FOR MOTOR GASOLINES

© 2023 E.S. Golovina ¹, I.N. Khaimovich ²

¹ АО «Samaraneftechimproject», Samara, Russia

² Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

Compounding commercial fuels is an important final stage of the entire production process chain in an oil refinery which defines the economic effectiveness of the company's manufacturing activities. This paper addresses a simulation model for the compounding process for commercial gasolines. The Model is based on discrete linear programming. The target function for the optimization model is the ratio of the difference between the value of the salable product and the costs incurred by manufacturing components and electrical power to the final volume of the salable product, as well as the time it takes to prepare. The optimization model leads to the conclusion about the practicability of the in-flow blending, as well as of the necessity of selecting the right pumping equipment. The optimization model can be applied to primary calculations of economic effectiveness of the various options of organizing the process for the compounding of commercial gasolines.

Keywords: simulation model, optimization model, gasolines compounding.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-35-42

EDN: KDDFQM

REFERENCES

10. Golovina E.S. / Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2022680985 ot 09.11.2022. Imitacionnaya model' cekha kompaundirovaniya benzina.

Evgeniia Golovina, Graduate Student.

E-mail: GolovinaES@snhp.rosneft.ru

Irina Khaimovich, Doctor of Technics, Professor at the Department of Metal Forming. E-mail: kovalek68@mail.ru