

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

¹Тугашова Л. Г. ORCID ID 0000-0001-9331-3142,

²Затонский А. В. ORCID ID 0000-0003-1863-2535

¹Государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Алметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти»,
Алметьевск, Российская Федерация, e-mail: tugashova@yandex.ru;

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, Российская Федерация

Объекты топливно-энергетического комплекса являются энергозатратными. Важной проблемой является повышение энергоэффективности объектов различных классов. Целью исследования является разработка структуры системы управления объектами топливно-энергетического комплекса на примере установок переработки нефти с применением эксергетического критерия эффективности. Предложен комплексный показатель эффективности, представляющий собой сумму эксергетического коэффициента полезного действия кожухотрубчатого теплообменника и эксергетического коэффициента полезного действия атмосферной колонны с весовыми коэффициентами. Приведены этапы методики, позволяющей перейти от расчета энергетического и эксергетического балансов к упрощенной модели, что позволит сократить затраты на анализ систем. В результате исследования существующая система управления первичной переработки нефти дополняется подсистемой на основе моделей, включающей модуль формирования аппроксимирующей зависимости (с составлением балансов, формированием обучающей выборки и получением зависимости критерия от факторов); модуль управления технологическими параметрами на основе полученной зависимости (с решением задачи оптимизации и формированием уставок регуляторов); модуль имитационной модели процесса ректификации нефти. Обмен данными между существующей системой управления и подсистемой осуществляется по интерфейсу Open Platform Communications. Решение может быть внедрено как надстройка к действующим системам управления объектами топливно-энергетического комплекса.

Ключевые слова: эксергия, ректификация нефти, моделирование, коэффициент полезного действия, управление

DEVELOPMENT OF THE STRUCTURE OF THE PRIMARY OIL REFINING FACILITIES MANAGEMENT SYSTEM USING THE EXERGETIC EFFICIENCY CRITERION

¹Tugashova L. G. ORCID ID 0000-0001-9331-3142,

²Zatonskiy A. V. ORCID ID 0000-0003-1863-2535

¹State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Almetyevsk State Technological University “Higher School of Petroleum”,
Almetievsk, Russian Federation, e-mail: tugashova@yandex.ru;

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Perm National Research Polytechnic University Berezniki Branch”, Perm, Russian Federation

Fuel and energy complex facilities are energy-consuming. An important problem is to increase the energy efficiency of facilities of various classes. The purpose of the study is to develop a structure of the fuel and energy complex facilities management system on the example of oil refining plants using the exergy efficiency criterion. A complex efficiency indicator is proposed, which is the sum of the exergy efficiency coefficient of the shell-and-tube heat exchanger and the exergy efficiency coefficient of the atmospheric column with weight coefficients. The stages of the technique are given, which allows to pass from calculation of energy and exergy balances to a simplified model, which will reduce the costs of systems analysis. As a result of the study, the existing control system of primary oil refining is supplemented with a subsystem based on models, which includes a module for forming an approximating dependence (with the compilation of balances, the formation of a training sample and obtaining a dependence of the criterion on factors); a module for controlling technological parameters based on the obtained dependence (with the solution of the optimization problem and the formation of setpoints for regulators); a module for the simulation model of the oil rectification process. Data exchange between the existing control system and the subsystem is carried out via the Open Platform Communications interface. The solution can be implemented as an add-on to existing control systems for fuel and energy complex facilities.

Keywords: exergy, oil rectification, modeling, efficiency coefficient, control

Введение

Объекты топливно-энергетического комплекса (ТЭК) можно разделить на следующие классы: теплотехнологические и энергетические объекты и системы. Теплотехнологические объекты и системы можно разделить на две группы: классические и современные. Классические объекты – это установки нефтяной и газовой промышленности, основанные на типовых схемах (первый класс). Например, к этому классу относятся объекты комплексной подготовки и первичной переработки нефти и газа. Современные объекты предполагают использование альтернативного сырья, расширение ассортимента выпускаемой продукции (второй класс). Сюда можем отнести объекты «зеленой энергетики». Такими примерами являются установка получения микробного белка из природного газа, установка быстрого пиролиза для получения бионефти, в которой сырьем является древесная биомасса [1].

Энергетические объекты, в свою очередь, делятся на теплоэнергетические и электроэнергетические. Теплоэнергетические системы разделяются на источники тепловой энергии – теплогенерирующие объекты, например трубчатые печи, котельные установки, теплообменники (четвертый класс). Электроэнергетические объекты служат для передачи и преобразования энергии – это электростанции, электролизеры (пятый класс).

Общей характеристикой объектов перечисленных классов, в частности установок комплексной подготовки и первичной переработки нефти и газа, является наличие процессов теплопередачи и преобразования энергии, для которых можно применить второе начало термодинамики. Объекты функционируют в условиях взаимодействия с окружающей средой. Окружающая среда характеризуется тем, что ее параметры не зависят от параметров окружающей системы [2, с. 10]. В этом случае существует возможность анализа термодинамического совершенства установок.

Целью настоящего исследования является разработка структуры системы управления объектами ТЭК на примере установок первого класса с применением эксергетического критерия эффективности. В качестве эксергетического критерия эффективности предлагается применять эксергетический коэффициент полезного действия (КПД) атмосферной колонны и кожухотрубчатого теплообменника. Эксергетический КПД позволяет учесть качество энергии. Применение эксергетического критерия позволит

не только поддерживать параметры процесса в заданных пределах, но и минимизировать необратимые потери в динамике, повысить качество переходных процессов. Совершенствование структуры системы управления объектом состоит в дополнении существующей системы управления подсистемой на основе моделей.

Материалы и методы исследования

При моделировании объектов первичной нефтепереработки используются строгие и статистические модели. В публикациях [3; 4] приведены примеры применения математических моделей нефтепереработки и нефтехимии. В работах [5-7] авторами предложены имитационные модели процессов подготовки и переработки нефти на основе программ технологического моделирования. В статьях [8; 9] разработаны гибридные модели. На сегодня актуальным является применение методов, которые позволяют строить упрощенные модели на основе сложных и тем самым сокращают время и затраты на проектирование и анализ систем. Одним из таких подходов является суррогатное моделирование [10-12]. Суррогатная модель заменяет сложную имитационную модель на более простую, но при этом обладающую достаточной точностью.

Примерами критериев эффективности функционирования технологических установок являются выход продукции при требуемом качестве продукции [13], энергетические затраты [14]. Применяются различные схемы управления объектами: типовые регуляторы, компенсаторы возмущений и перекрестных связей, каскадные системы, системы усовершенствованного управления. Компенсаторы возмущений [15] и перекрестных связей, а также прогнозирующие динамические модели характеризуются сложностью реализации.

Существующая система управления объектами нефтепереработки дополняется модулями с использованием аппроксимирующих зависимостей. В качестве усовершенствования предлагается добавить в существующую систему управления дополнительные модули: формирования аппроксимирующей зависимости; управления параметрами на основе полученной аппроксимирующей зависимости.

Первый модуль включает составление материальных, энергетических и эксергетических балансов; формирование обучающей выборки и матрицы планирования эксперимента; получение аппроксимирующей зависимости критерия от факторов. Вторым модулем является решение задачи оптимизации и формирование уставок регуляторам

с учетом возмущающих воздействий и показателей качества сырья и продукции; разработку алгоритмов управления технологической установкой.

При управлении параметрами на основе полученной аппроксимирующей зависимости предлагается применять многокритериальную оптимизацию. При изменении возмущающих воздействий или требований к показателям качества сырья и продукции вычисляются оптимальные параметры, поступающие на входы регуляторов в качестве уставок.

Эксергетические КПД кожухотрубчатого теплообменника $\eta_{\text{ТО}}$ и атмосферной колонны $\eta_{\text{АК}}$ определяются следующим образом:

$$\eta_{\text{ТО}} = E_{\text{ТО.ВЫХ}} / E_{\text{ТО.ВХ}},$$

$$\eta_{\text{АК}} = E_{\text{АК.ВЫХ}} / E_{\text{АК.ВХ}} \quad (1)$$

где $E_{\text{ТО.ВЫХ}}$, $E_{\text{ТО.ВХ}}$ – эксергия на выходе и входе теплообменника, кДж/с; $E_{\text{АК.ВЫХ}}$, $E_{\text{АК.ВХ}}$ – эксергия на выходе и входе атмосферной колонны, кДж/с.

Комплексный критерий эффективности сформирован в виде:

$$\eta = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \eta_i(X) \rightarrow \max, \quad (2)$$

где k – весовой коэффициент, η – эксергетический КПД; X – искомые параметры; n – число частных критериев ($n=2$).

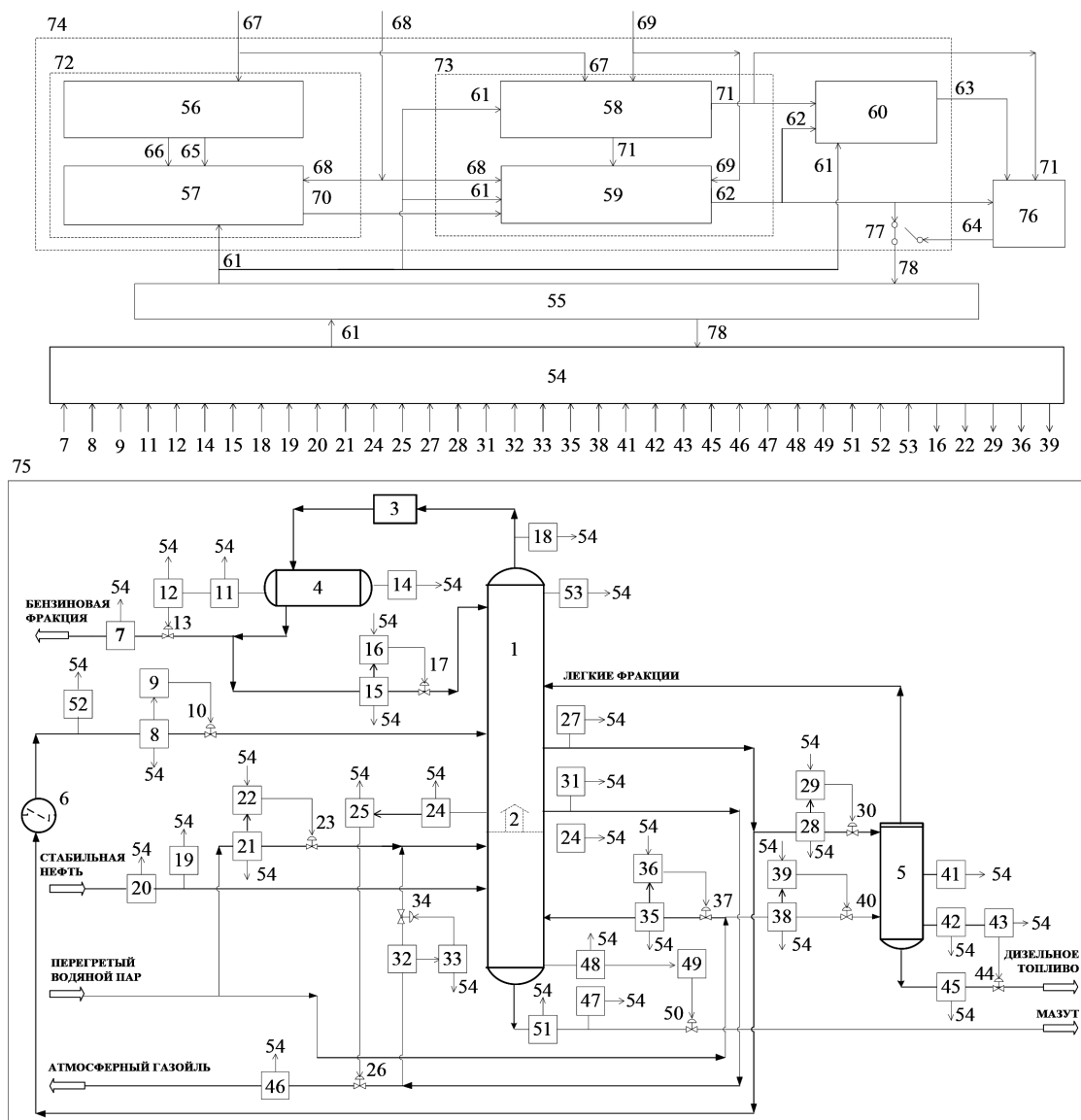
При осуществлении управления установкой на первом уровне определяется комплексный критерий эффективности (2), в котором искомыми параметрами X являются температуры нефтепродуктов (температура бензина $T_{\text{Б}}$, дизельного топлива $T_{\text{ДТ}}$, мазута $T_{\text{М}}$). С учетом ограничений находится оптимум. Полученные оптимальные значения температур в качестве уставок передаются на экстремальные регуляторы. Экстремальные регуляторы на локальном уровне корректируют управляющие воздействия (расходы острого и циркуляционного орошений, расход теплоносителя) с учетом изменения возмущающих воздействий, тем самым поддерживая определенный режим.

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке приведена подробная структура системы управления атмосферной установкой ректификации нефти малой мощности на основе вышеприведенной методики. Существующая система содержит атмосферную колонну с глухой тарелкой, отпарную колонну, аппарат воздушного охлаждения, флегмовую емкость, кожухотрубный теплообменник, датчики расходов

материальных потоков системы, датчик давления верха атмосферной колонны, датчики уровней в кубе атмосферной и отпарной колонн, во флегмовой емкости и на глухой тарелке, датчики температур паров верха атмосферной колонны, дизельного топлива и атмосферного газойля на отборных тарелках, мазута на выходе из куба атмосферной колонны, бензиновой фракции, поступающей во флегмовую емкость, дизельного топлива в отпарной колонне.

В состав системы управления входят атмосферная колонна 1, глухая тарелка 2, аппарат воздушного охлаждения 3, флегмовая емкость 4, отпарная колонна 5, кожухотрубный теплообменник 6, датчик 7 расхода бензиновой фракции (отбор), датчик 8 расхода циркуляционного орошения (дизельное топливо), регулятор 9 расхода циркуляционного орошения (дизельное топливо), регулирующий клапан 10 расхода циркуляционного орошения (дизельное топливо), датчик 11 уровня бензиновой фракции во флегмовой емкости, регулятор 12 уровня бензиновой фракции во флегмовой емкости, регулирующий клапан 13 на линии отбора бензиновой фракции, датчик 14 температуры бензиновой фракции во флегмовой емкости, датчик 15 расхода бензиновой фракции на верхнее орошение атмосферной колонны, локальный регулятор 16 расхода бензиновой фракции на верхнее орошение атмосферной колонны, регулирующий клапан 17 на линии верхнего орошения атмосферной колонны, датчик 18 температуры паров верха атмосферной колонны, датчик 19 температуры стабильной нефти на входе в атмосферную колонну, датчик 20 расхода стабильной нефти на входе в атмосферную колонну, датчик 21 расхода перегретого водяного пара под глухую тарелку атмосферной колонны, локальный регулятор 22 расхода перегретого водяного пара под глухую тарелку атмосферной колонны, регулирующий клапан 23 на линии перегретого водяного пара под глухую тарелку атмосферной колонны, датчик 24 уровня атмосферного газойля на глухой тарелке атмосферной колонны, регулятор 25 уровня атмосферного газойля на глухой тарелке атмосферной колонны, регулирующий клапан 26 на линии отбора атмосферного газойля из атмосферной колонны, датчик 27 температуры дизельного топлива в атмосферной колонне, датчик 28 расхода дизельного топлива из атмосферной колонны в отпарную колонну, локальный регулятор 29 расхода дизельного топлива из атмосферной колонны в отпарную колонну, регулирующий клапан 30 на линии подачи дизельного топлива из атмосферной колонны в отпарную колонну,



Структурная схема системы управления атмосферной установкой
ректификации нефти малой мощности

Примечание: составлено авторами по результатам исследования

датчик 31 температуры атмосферного газойля в атмосферной колонне, датчик 32 расхода циркуляционного орошения (атмосферный газойль), регулятор 33 расхода циркуляционного орошения (атмосферный газойль), регулирующий клапан 34 расхода циркуляционного орошения (атмосферный газойль), датчик 35 расхода перегретого водяного пара в куб атмосферной колонны, локальный регулятор 36 расхода перегретого водяного пара в куб атмосферной колонны, регулирующий клапан 37 на линии перегретого водяного пара в куб атмосферной колонны, датчик 38 расхода перегретого водяного пара в куб от-

парной колонны, локальный регулятор 39 расхода перегретого водяного пара в куб отпарной колонны, регулирующий клапан 40 на линии перегретого водяного пара в куб отпарной колонны, датчик 41 температуры дизельного топлива в отпарной колонне, датчик 42 уровня дизельного топлива в отпарной колонне, регулятор 43 уровня дизельного топлива из отпарной колонны, регулирующий клапан 44 на линии отбора дизельного топлива из отпарной колонны, датчик 45 расхода дизельного топлива из отпарной колонны (отбор), датчик 46 расхода атмосферного газойля из атмосферной колонны (отбор), датчик 47 температуры ма-

зута в кубе атмосферной колонны, датчик 48 уровня мазута в атмосферной колонне, регулятор 49 уровня мазута в атмосферной колонне, регулирующий клапан 50 на линии отбора мазута в атмосферной колонне, датчик 51 расхода мазута из атмосферной колонны, датчик 52 температуры циркуляционного орошения (дизельное топливо), датчик 53 давления верха атмосферной колонны, SCADA-система 54, OPC-сервер 55, блок кривой истинных температур кипения (ИТК) 56, блок теплового/эксергетического балансов 57, блок виртуальных анализаторов показателей качества 58, блок аппроксимирующей зависимости и оптимизации 59, модуль имитационной модели процесса ректификации нефти 60, измеренные технологические параметры 61, уставки на локальные регуляторы 62, прогнозная информация оператору 63, информация от оператора об уставках 64, физико-химические свойства (ФХС) нефти и светлых нефтепродуктов, фракционный состав нефти 65, критерий 66, данные химико-аналитической лаборатории (ХАЛ) 67, ограничения на показатели качества нефтепродуктов и интервалы налегания смежных фракций 68, ограничения на технологические параметры 69, результаты 70, показатели качества нефтепродуктов 71, модуль формирования аппроксимирующей зависимости 72, модуль управления параметрами на основе полученной аппроксимирующей зависимости 73, подсистема управления на основе моделей 74, существующая система управления 75, рабочая станция оператора 76, переключение режимов 77, уставки на локальные регуляторы 78.

Подсистема управления на основе моделей 74 состоит из модуля формирования аппроксимирующей зависимости 72, модуля управления параметрами на основе полученной аппроксимирующей зависимости 73, модуля имитационной модели процесса ректификации нефти 60. Подсистема управления на основе моделей 74 получает измерительную информацию (значения технологических параметров) 61 из существующей системы 75 и передает информацию (задания на регуляторы) 78 в существующую систему 75 с помощью OPC-сервера 55. В блоке 59 определяются оптимальные задания по комплексному эксергетическому критерию эффективности. При изменении возмущений, заданий на показатели качества оптимальные задания пересчитываются. Уставки 62 поступают в блок имитационного моделирования 60.

Оператор, основываясь на полученной прогнозной информации 63 из блока 60,

принимает решение о передаче управляющих воздействий на локальные регуляторы и имеет возможность корректировать управляющие воздействия в существующую систему 75. При этом существует возможность переключения режимов 77: автоматический или ручной. Значения уставок 78 выдаются на локальные регуляторы 9, 16, 22, 36, 39 расходов.

Заключение

Усовершенствование системы управления состоит в дополнении существующей системы управления подсистемой на основе упрощенных моделей. Подсистема содержит следующие модули: формирование аппроксимирующей зависимости, управление параметрами на основе полученной аппроксимирующей зависимости по эксергетическому критерию, имитационная модель процесса ректификации нефти. Обмен информацией между существующей системой управления и подсистемой управления на основе моделей осуществляется по OPC-интерфейсу. Имитационная модель процесса ректификации с выводом информации на мнемосхему позволяет оценить качество управления при поступлении на вход объекта управляющих и возмущающих воздействий и соответствие технологических параметров и показателей качества нефтепродуктов требованиям.

Дальнейшие исследования могут быть связаны с детализацией формирования эксергетического критерия эффективности и аппроксимирующей зависимости, разработкой унифицированного алгоритма для классов объектов ТЭК, тестированием методики на данных промышленных объектов.

Список литературы

1. Тугашова Л. Г. Управление сушильной установкой на основе эксергетического критерия и регрессионных методов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2026. Т. 88. № 1. С. 114–122. DOI: 10.20914/2310-1202-2026-1-114-122.
2. Сажин Б. С., Булеков А. П. Эксергетический метод в химической технологии. Москва: Химия, 1992. 204 с. ISBN: 5-7245-0237-2.
3. Заикин П. В., Лысенкова С. А., Микшина В. С. Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений математической модели кинетики процесса нефтепереработки // Вестник кибернетики. 2018. № 2 (30). С. 120–126. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_36919936_76701791.pdf (дата обращения 02.06.2026). EDN: YWISIH.
4. Ивашкина Е. Н., Иванчина Э. Д., Назарова Г. Ю. Математическое моделирование процесса каталитического крекинга // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2019. № 9 (93). С. 114–120. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/pererabotka/498049-matematicheskoe-modelirovanie-protessa-kataliticheskogo-krekinga> (дата обращения 02.06.2026). EDN: NEIQBF.

5. Тугашова Л. Г., Гапонцев А. Д. Применение программ технологического моделирования в задачах управления процессами подготовки нефти // Системный анализ в науке и образовании. 2023. № 2. С. 36–44. URL: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/577/531> (дата обращения 02.06.2026). EDN: FIGZKY.
6. Хохлов А. С., Городнова М. В. Имитационный подход к решению задачи календарного планирования и построения расписаний в нефтепереработке // Автоматизация в промышленности. 2018. № 12. С. 55–62. EDN: YPVYWL.
7. Капустин Н. О. Применение имитационного моделирования в нефтепереработке с учетом изменения технологий, применяемых на НПЗ // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2018). Материалы одиннадцатой международной конференции. В 2-х томах / Под общей редакцией С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. 2018. С. 460–463. EDN: YRCJUD.
8. Панкрушина А. В., Перерва О. В., Гартман Т. Н. Инициализация параметров расчета и оценка эффективности комплексов с частично и полностью связанными тепловыми и материальными потоками // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2017. Т. 4. С. 66–68. EDN: ZGWKMT.
9. Сластенов И. В., Кушников В. А., Богомолов А. С., Иващенко В. А. Идентификация колонного оборудования химико-технологических установок при управлении процессами газодифракционирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. Т. 25. № 12. С. 656–665. DOI: 10.17587/mau.25.656-665.
10. Пономарев Р. Ю., Мигманов Р. Р., Зиязев Р. Р. Оценка возможностей применения гибридного моделирования для оптимизации добычного потенциала нефтегазового месторождения // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 5 (98). С. 64–68. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-5-64-68.
11. Никулин А. С., Жедяевский Д. Н., Поборцов Е. М. Применение суррогатного моделирования для оптимизации производства сжиженного природного газа по технологии C3MR // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2024. № 9 (614). С. 64–75. EDN: JVDXNJ. DOI: URL: <https://journal.gubkin.ru/journals/automation/2024/9-614/64-75>.
12. Xiong Y., Shi X., Ma Y., Chen Y. Optimization design of crude oil distillation unit using bi-level surrogate model // Frontiers in Control Engineering. 2023. № 4. P. 1162318. DOI: 10.3389/fcteg.2023.1162318.
13. Тугашова Л. Г. Оптимизация процесса ректификации нефти по критерию отбора светлых нефтепродуктов // Автоматизация. Современные технологии. 2022. Т. 76. № 8. С. 347–352. EDN: BKRBTB.
14. Тугашова Л. Г., Затонский А. В. Снижение энергетических затрат при управлении установкой ректификации нефти // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2020. Т. 20. № 1. С. 120–132. EDN: XBJAEE.
15. Патент РФ № 2176149. Система автоматического управления процессом ректификации / Г. М. Марушак, В. С. Кудряшов, Б. Г. Энтин, М. В. Алексеев, В. В. Кузьменко; заявитель и патентообладатель Воронежское открытое акционерное общество «Синтезкаучукпроект». Оpubл. 27.11.2001. Бюл. № 33.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена за счет средств гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение № 9/2025 ПД-ВШН).

Financing: The study was supported by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, aimed at fostering human resource development in higher education and research institutions through the promotion of doctoral defences and research projects (Agreement No. 9/2025 PD-VSHN).