

Статья поступила в редакцию: 18.08.2026

Статья принята к публикации: 25.08.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 621.039.59

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23342

**Математическое моделирование и многокритериальная оптимизация
кожухотрубного теплообменного аппарата с комбинированной
интенсификацией теплообмена**

Юсупов Рустам Атхамович

д-р филос. техн. наук (PhD), соискатель
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: kotlonadzor@scizs.uz

Исаматова Джамия Нигматуллаевна

д-р филос. техн. наук (PhD), начальник отдела контроля за качеством образования Филиала
Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в городе
Ташкенте
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: jamilyechka@mail.ru

Исмаилов Ойбек Юлибаевич

д-р техн. наук
вед. науч. сотр., института общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: ismoilovntpi@mail.ru

Саттаров Зафар Муродович

канд. техн. наук, проф.
Ташкентский архитектурно-строительный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Математическое моделирование и многокритериальная оптимизация кожухотрубного теплообменного аппарата с комбинированной интенсификацией теплообмена // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Юсупов Р.А. [и др.]. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23342>

Mathematical modeling and multi-criteria optimization of a shell-and-tube heat exchanger with combined heat transfer intensification

Yusupov Rustam

*doctor of Philosophy of Engineering Sciences (PhD)
Applicant at the Tashkent Institute of Chemical Technology
Uzbekistan, Tashkent*

Isamatova Djamila

*doctor of Philosophy of Technical Sciences (PhD)
Head of the Department of Quality Control of Education at Gubkin Russian State University of Oil
and Gas (SRU) in Tashkent
Uzbekistan, Tashkent*

Ismailov Oybek

*doctor of Technical Sciences, Senior Researcher
at the Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the
Republic of Uzbekistan; Uzbekistan, Tashkent*

Sattorov Zafar

*candidate of Technical Sciences, Professor
Tashkent University of Architecture and Civil Engineering
Uzbekistan, Tashkent*

Аннотация

В работе разработан и исследован физико-статистический подход к математическому моделированию и многокритериальной оптимизации кожухотрубного теплообменного аппарата при комбинированной интенсификации теплообмена. Рассмотрены четыре конструктивных режима: традиционный, со стержнем во внутренней трубе, с тангенциальной подачей горячего потока и стержнево-тангенциальный. Модель построена на уравнениях сохранения массы и энергии, критериальных зависимостях для определения коэффициентов теплоотдачи и эмпирических коэффициентах интенсификации. Экспериментальная база сформирована для нефти и газового конденсата в диапазонах расходов холодного потока 5–25 л/мин и горячего потока 10–40 л/мин; суммарно использовано 160 наблюдений. Для каждой среды и каждого конструктивного режима получены регрессионные модели второго порядка. Коэффициент детерминации для нефти составил 0,9693–0,9904, для газового конденсата — 0,9719–0,9923; RMSE находился соответственно в пределах 0,529–0,826 и 0,396–0,793 °C. Наиболее высокая температура выхода достигнута для стержнево-тангенциальной конструкции. При этом многокритериальный анализ показал, что максимум интегрального критерия может соответствовать стержневой конструкции. Практическая значимость состоит в возможности выбора рационального режима эксплуатации по совокупности тепловых и гидравлических показателей в пределах экспериментально подтвержденного диапазона.

Abstract

A physical-statistical approach to mathematical modeling and multi-criteria optimization of a shell-and-tube heat exchanger with combined heat transfer enhancement is developed and investigated. Four configurations are considered: conventional, rod-insert, tangential-flow, and combined rod-tangential configurations. The model is based on mass and energy conservation equations, heat-transfer correlations, and empirical enhancement coefficients. The experimental

database covers crude oil and gas condensate at cold-flow rates of 5–25 L/min and hot-flow rates of 10–40 L/min; 160 observations were used in total. Second-order regression models were obtained for each working medium and configuration. The coefficient of determination ranged from 0.9693 to 0.9904 for oil and from 0.9719 to 0.9923 for gas condensate; RMSE values were 0.529–0.826 and 0.396–0.793 °C, respectively. The highest outlet temperature was obtained for the combined rod-tangential configuration. At the same time, the multi-criteria analysis showed that the maximum integral criterion may correspond to the rod configuration. The practical significance is the possibility of selecting a rational operating regime using both thermal and hydraulic performance indicators within the experimentally validated range.

Ключевые слова: кожухотрубный теплообменник, математическое моделирование, интенсификация теплообмена, стержневая вставка, тангенциальный поток, регрессионная модель, многокритериальная оптимизация.

Keywords: shell-and-tube heat exchanger, mathematical modeling, heat transfer enhancement, rod insert, tangential flow, regression model, multi-criteria optimization.

Введение

Кожухотрубные теплообменные аппараты являются одним из основных типов оборудования для нагрева и охлаждения технологических потоков в нефтегазовой и химической промышленности. Их эффективность определяется не только площадью теплообменной поверхности, но и режимом движения рабочих сред, физическими свойствами углеводородов, гидравлическим сопротивлением и конструктивной организацией потоков [1, 2, 5].

Одним из наиболее результативных направлений повышения интенсивности теплообмена является изменение структуры потока с помощью внутренних вставок, закручивающих элементов, профилированных поверхностей и тангенциальной подачи теплоносителя [3, 4, 7, 8]. Такие решения позволяют разрушать пограничный слой и увеличивать коэффициент теплоотдачи, однако одновременно могут повышать перепад давления и мощность насосного оборудования. Поэтому выбор режима должен рассматриваться как многокритериальная задача.

Для углеводородных сред проблема особенно актуальна вследствие изменения вязкости и теплофизических свойств с температурой. Экспериментальные исследования с нефтью и газовым конденсатом показывают, что применение стержневых вставок способно существенно изменить гидродинамику и интенсивность теплообмена [10, 6]. Современные исследования также развивают методы численного и статистического моделирования теплообменников и оптимизации их конструкций [11–14].

В представленной работе развивается подход, основанный на объединении распределенной физико-математической модели, экспериментально-статистической регрессии и многокритериальной оптимизации. Такой подход соответствует структуре исследования, представленного в основном документе: модель строится по экспериментальным данным, а затем используется для выбора рациональных расходов и конструктивного режима [6, 9].

Цель исследования — разработать расчетно-статистическую модель кожухотрубного теплообменного аппарата с комбинированной интенсификацией теплообмена и определить рациональные режимы его работы по совокупности тепловых и гидравлических критериев.

Для достижения цели решены следующие задачи: сформирована физико-математическая модель; определены геометрические и гидравлические параметры стержневой конструкции; получены регрессионные модели температуры выхода; проведена оценка их адекватности; исследовано влияние расходов; выполнена многокритериальная оптимизация в экспериментально подтвержденном диапазоне.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в разработке физико-статистического подхода к математическому моделированию кожухотрубного теплообменного аппарата с учётом четырёх конструктивных режимов интенсификации теплообмена: традиционного, стержневого, тангенциального и стержнево-тангенциального. На основе экспериментальных данных для нефти и газового конденсата получены квадратичные регрессионные модели температуры выхода в диапазонах расходов холодного потока 5–25 л/мин и горячего потока 10–40 л/мин. Установлена высокая адекватность моделей: R^2 составляет 0,9693–0,9904 для нефти и 0,9719–0,9923 для газового конденсата при RMSE 0,529–0,826 и 0,396–0,793 °C соответственно. Показано, что стержнево-тангенциальная конструкция обеспечивает наибольшую расчётную температуру выхода — 53,08 °C для нефти и 57,01 °C для газового конденсата, тогда как максимальные значения интегрального критерия многокритериальной оптимизации достигаются для стержневой конструкции. Таким образом, установлена зависимость выбора рационального режима от совокупности тепловых и гидравлических критериев, что позволяет определять оптимальные режимы эксплуатации в пределах экспериментально подтверждённой области.

Материалы и методы

Объект и диапазон исследования

Объектом исследования является кожухотрубный теплообменный аппарат с семью внутренними трубами. Общая длина кожуха составляет 1,2 м, рабочая длина внутренних труб — 1,0 м, внутренний диаметр трубы — 0,02 м, диаметр стержня — 0,01 м. Холодный поток изменялся в диапазоне 5–25 л/мин, горячий — 10–40 л/мин. Рассматривались четыре режима: традиционный ($P=0$), стержневой ($P=1$), тангенциальный ($P=2$) и стержнево-тангенциальный ($P=3$). Эти диапазоны и геометрические характеристики непосредственно приведены в основном документе [9].

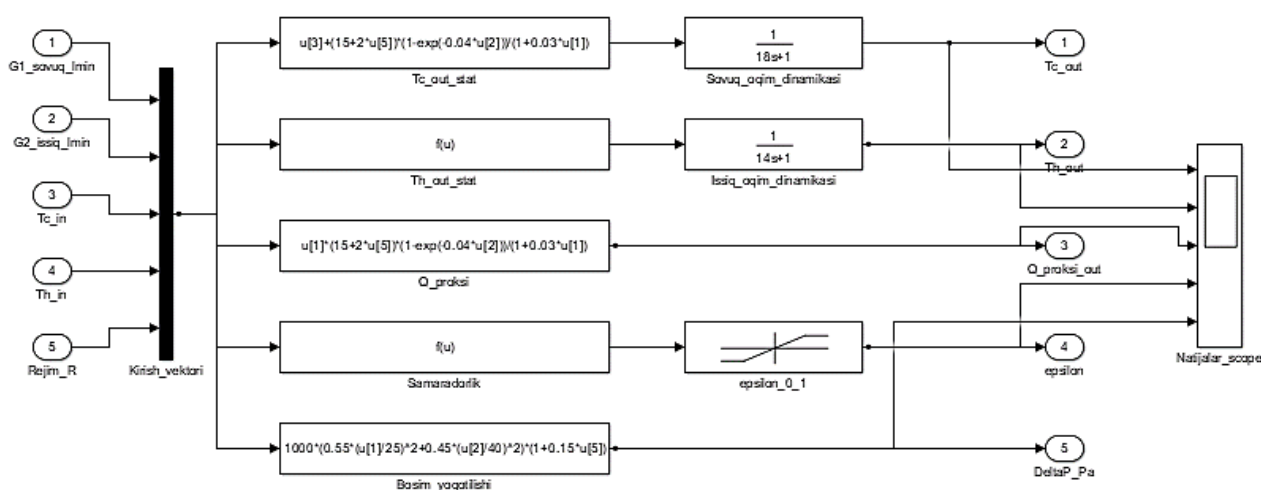


Рисунок 1. Регрессионная MATLAB/Simulink-модель кожухотрубного теплообменного аппарата

Для оценки динамических характеристик упрощённой модели расчёт выполнялся в течение 120 с при номинальной рабочей точке $G_1 = 15 \frac{l}{min}$, $G_2 = 25 \frac{l}{min}$, $T_{c, in} = 20^\circ C$, $T_{h, in} = 80^\circ C$, и в стержнево-тангенциальном режиме $P = 3$. Каналы холодного и горячего потоков соответственно представлялись звеньями первого порядка с постоянными времени 18 с и 14 с. До подтверждения этих постоянных времени экспериментальной идентификацией они рассматриваются как предварительно настроенные параметры модели.

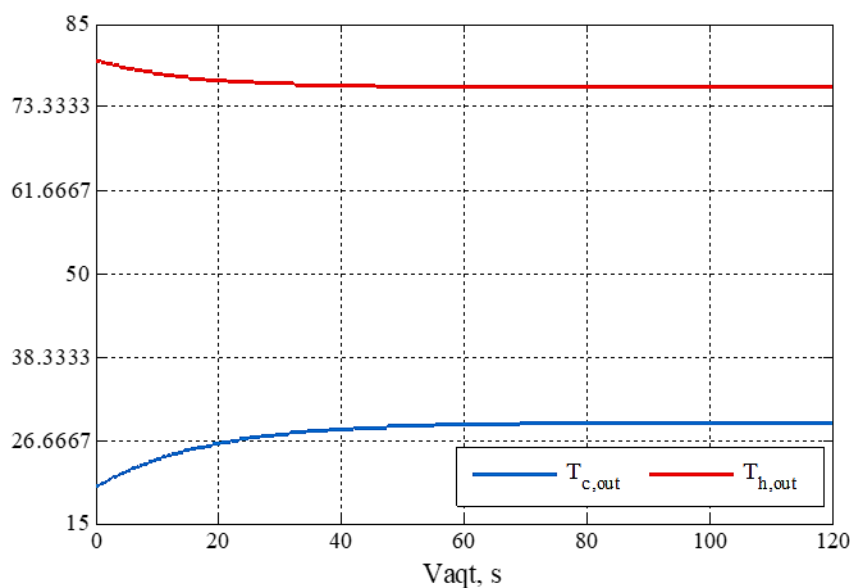


Рисунок 2. Динамика температур выходящих потоков холодного и горячего теплоносителей в номинальном режиме

Результаты и обсуждение

Регрессионные модели для нефти и газового конденсата

Таблица 1.

Показатели адекватности моделей для нефти

Режим	Модель температуры выхода нефти	R_2	RMSE, °C	MARE%
Традиционная	$45.7750 - 0.54140G_1 + 0.3740G_2 + 0.00071G_1^2 - 0.00020G_1 G_2 - 0.00250G_2^2$	0,9693	0,823	1,41
Стержневая	$52.9750 - 0.5343G_1 + 0.3490G_2 + 0.00786G_1^2 + 0.00420G_1 G_2 - 0.00400G_2^2$	0,9763	0,826	1,49
Тангенциальная	$48.5500 - 0.5543G_1 + 0.4370G_2 + 0.00286G_1^2 + 0.00120G_1 G_2 - 0.00450G_2^2$	0,9806	0,710	1,24
Стержнево-тангенциальная	$56.2500 - 0.57140G_1 + 0.2680G_2 + 0.00429G_1^2 + 0.00200G_1 G_2 - 0.00100G_2^2$	0,9904	0,529	0,81

Для всех моделей нефти значение R^2 находилось в диапазоне 0,9693–0,9904, а RMSE — в диапазоне 0,529–0,826 °C. Полученные результаты показывают, что нелинейная зависимость между расходами потоков и температурой на выходе с достаточной точностью описывается моделью второго порядка.

Для газового конденсата значение R^2 находилось в диапазоне 0,9719–0,9923, а RMSE — в диапазоне 0,396–0,793 °C. В традиционном и тангенциальном режимах соответствие экспериментальным данным особенно высокое: значение R^2 превышает 0,99.

Таблица 2.

Показатели адекватности моделей для газового конденсата

Режим	Модель температуры выхода газового конденсата	R_2	RMSE, °C	MARE%
Традиционная	$51.1500 - 0.7143G_1 + 0.3380G_2 + 0.00714G_1^2 - 0.00120G_1 G_2 - 0.00200G_2^2$	0,9923	0,396	0,66
Стержневая	$53.2750 - 0.4371G_1 + 0.6180G_2 + 0.00643G_1^2 + 0.00180G_1 G_2 - 0.00950G_2^2$	0,9719	0,793	1,20
Тангенциальная	$53.4000 - 0.7186G_1 + 0.4440G_2 + 0.00429G_1^2 + 0.00040G_1 G_2 - 0.00500G_2^2$	0,9907	0,455	0,74
Стержнево-тангенциальная	$58.3750 - 0.4329G_1 + 0.3750G_2 + 0.00357G_1^2 + 0.00340G_1 G_2 - 0.00200G_2^2$	0,9844	0,642	0,90

Для нефти R^2 изменялся от 0,9693 до 0,9904, а RMSE — от 0,529 до 0,826 °C. Наилучшее согласование с экспериментом получено для стержнево-тангенциального режима. Для газового конденсата R^2 составил 0,9719–0,9923, а RMSE — 0,396–0,793 °C. Полученные показатели подтверждают пригодность квадратичной регрессии для интерполяционного описания экспериментальной области [9]

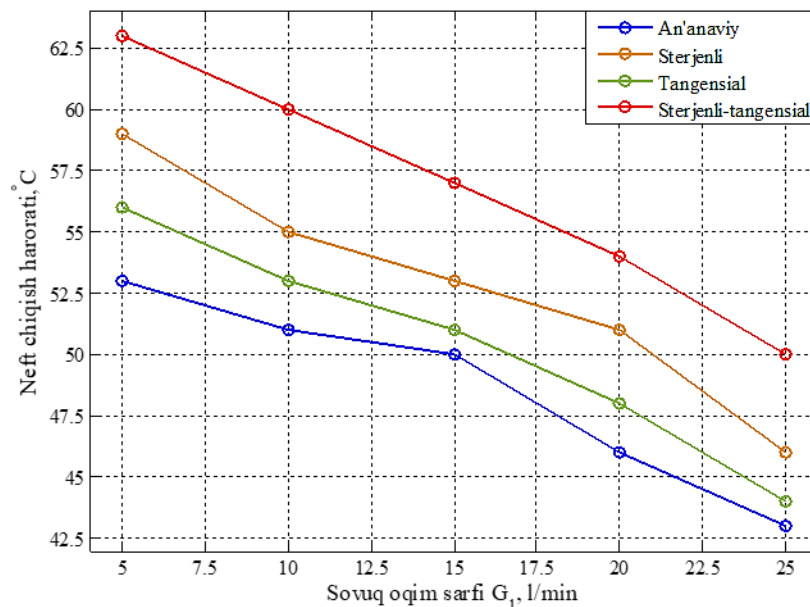


Рисунок 3. Влияние конструкции аппарата на температуру выхода нефти при $G_2 = 40$ л/мин

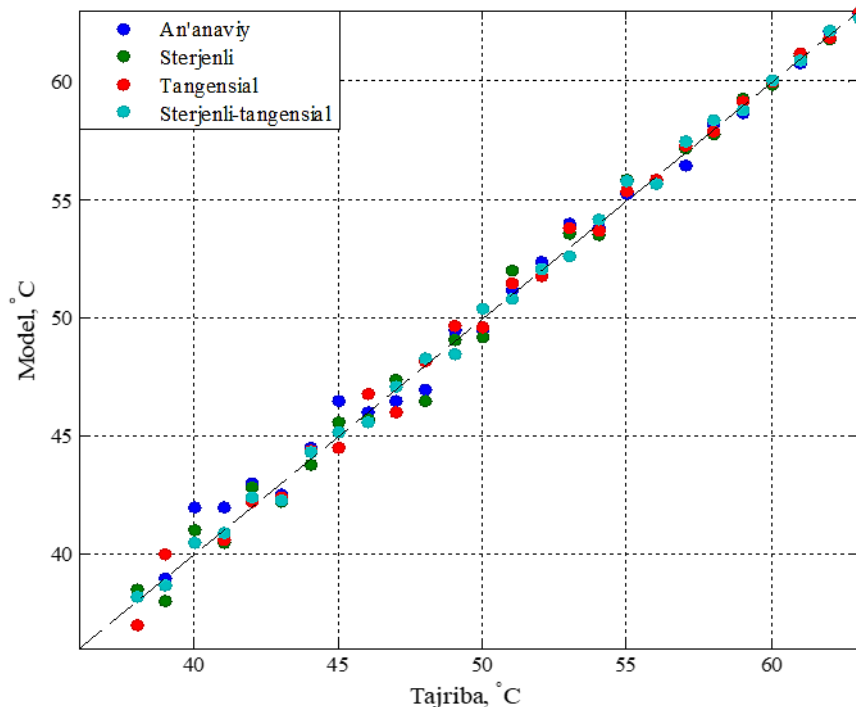


Рисунок 4. Сопоставление экспериментальных и модельных результатов для нефти

Влияние расходов и конструкции

На рисунке 3 видно, что при фиксированном расходе горячего потока $G_2 = 40$ л/мин температура выхода нефти снижается с увеличением G_1 . При $G_1 = 5$ л/мин наиболее высокая температура получена для стержнево-тангенциальной конструкции; по мере роста расхода различия между режимами сохраняются, но уменьшаются.

Физически это объясняется уменьшением времени пребывания нагреваемого потока при росте $G_1 G_2$. Одновременно увеличение повышает тепловую мощность горячего потока и способствует росту температуры выхода. Такой знак чувствительности подтвержден исходным анализом регрессионных моделей [6].

Поверхность отклика на рисунке 5 показывает нелинейную зависимость температуры выхода нефти от обоих расходов. В исследованной области увеличение G_2 повышает температуру, тогда как увеличение G_1 действует противоположно. Наличие квадратичных и перекрестных членов позволяет описать кривизну поверхности

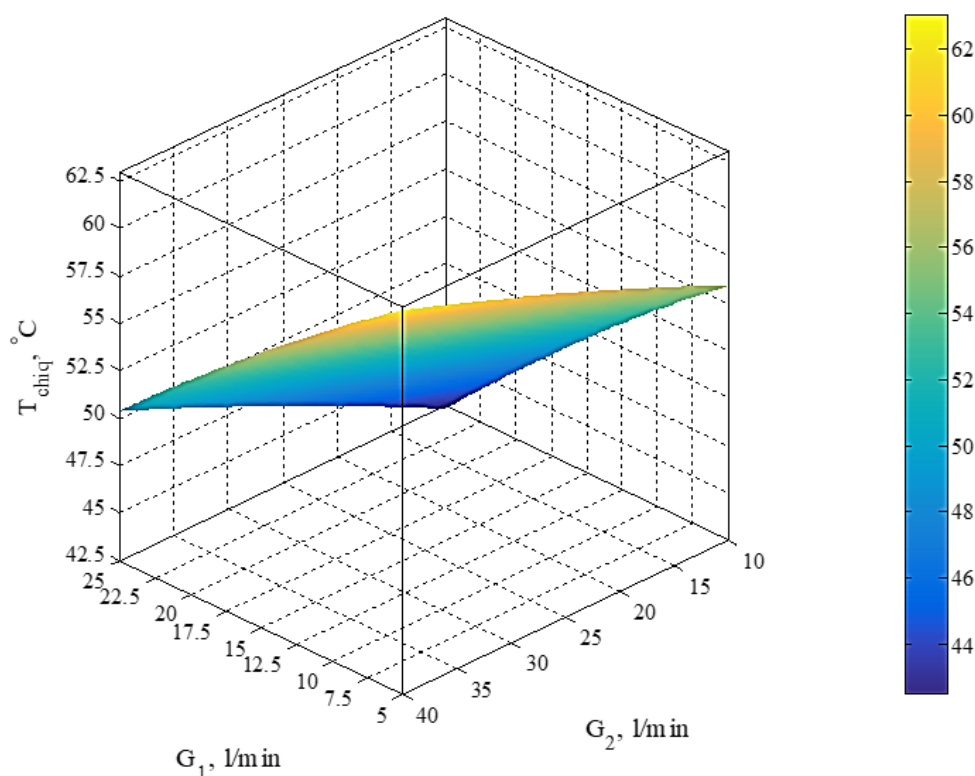


Рисунок 5. Поверхность отклика температуры выхода нефти для стержнево-тангенциального режима

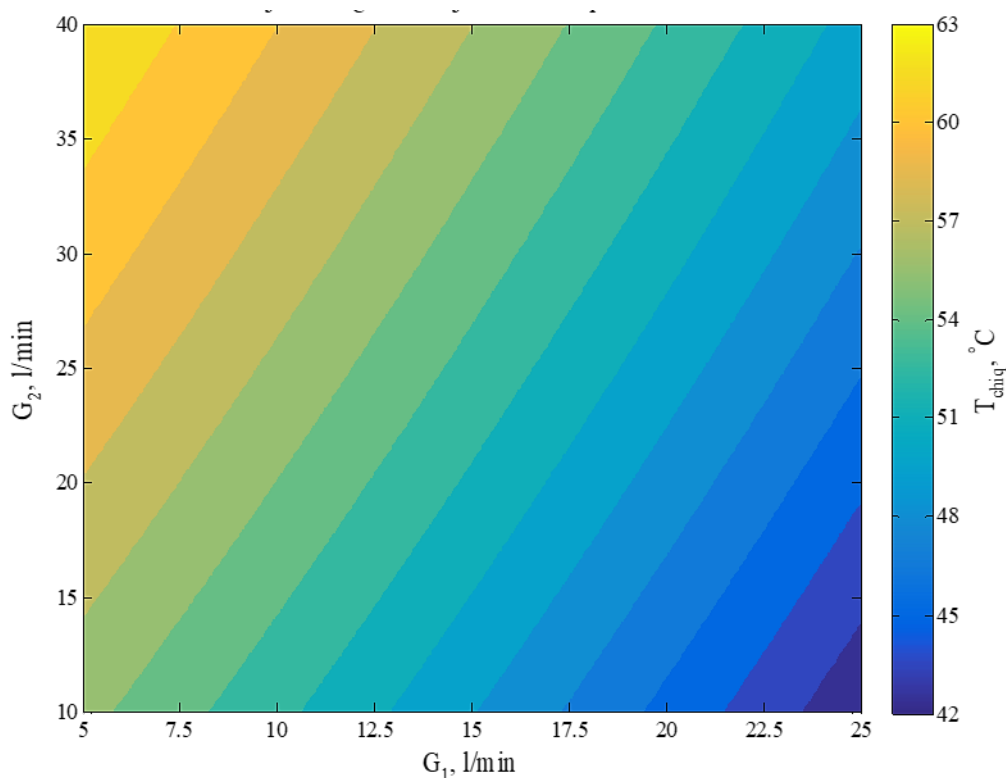


Рисунок 6. Контурная диаграмма температуры выхода нефти в зависимости от расходов G_1 и G_2

Проверка адекватности и пределы применимости

На рисунке 4 экспериментальные и расчетные значения расположены близко к линии идеального совпадения. Высокие значения R^2 и небольшие RMSE подтверждают точность аппроксимации в исследованном диапазоне. Вместе с тем высокая точность аппроксимации сама по себе не заменяет независимую валидацию на новых режимах. В исходном исследовании отмечена необходимость кросс-валидации и проверки модели за пределами использованных точек [9].

Следует также учитывать, что гидравлическая составляющая оптимизации на данном этапе представлена прокси-показателем. Полная экспериментальная валидация должна включать измерения перепада давления для каждого конструктивного режима. Это особенно важно, поскольку внутренние вставки увеличивают скорость и интенсивность теплообмена одновременно с ростом сопротивления.

Многокритериальная оптимизация

Таблица 3.

Расчетные рациональные режимы по данным исходного исследования

Среда	Конструкция	G_1^* , л/м	G_2^* , л/м	$T_{чик}$, °C	Q прокси	P прокси	J max
Нефть	Традиционная	22,12	40,00	44,93	551,5	0,831	0,4797
Нефть	Стержневая	20,25	38,83	49,76	602,6	0,704	0,5012
Нефть	Тангенциальная	20,62	38,50	47,01	557,1	—	0,4878
Нефть	Стержнево-тангенциальная	21,12	40,00	53,08	698,7	—	0,4979

Среда	Конструкция	G_1^* , л/м	G_2^* , л/м	$T_{\text{чик}}$, °C	Q прокси	P прокси	J_{max}
Газовый конденсат	Традиционная	25,00	40,00	46,88	671,9	—	0,4568
Газовый конденсат	Стержневая	20,88	30,50	52,51	678,6	—	0,5048
Газовый конденсат	Тангенциальная	23,50	35,50	48,67	673,9	—	0,4614
Газовый конденсат	Стержнево-тангенциальная	20,50	40,00	57,01	758,8	—	0,4697

Для нефти максимальная температура выхода в таблице 3 относится к стержнево-тангенциальной конструкции и составляет 53,08 °C. Однако максимальное значение интегрального критерия $J = 0,5012$ получено для стержневой конструкции. Для газового конденсата стержнево-тангенциальный режим дает максимальную температуру выхода 57,01 °C, тогда как максимальный $J = 0,5048$ относится к стержневой конструкции [9]. Это принципиально важный результат: режим, обеспечивающий максимальную температуру, не обязательно является оптимальным по совокупности критериев

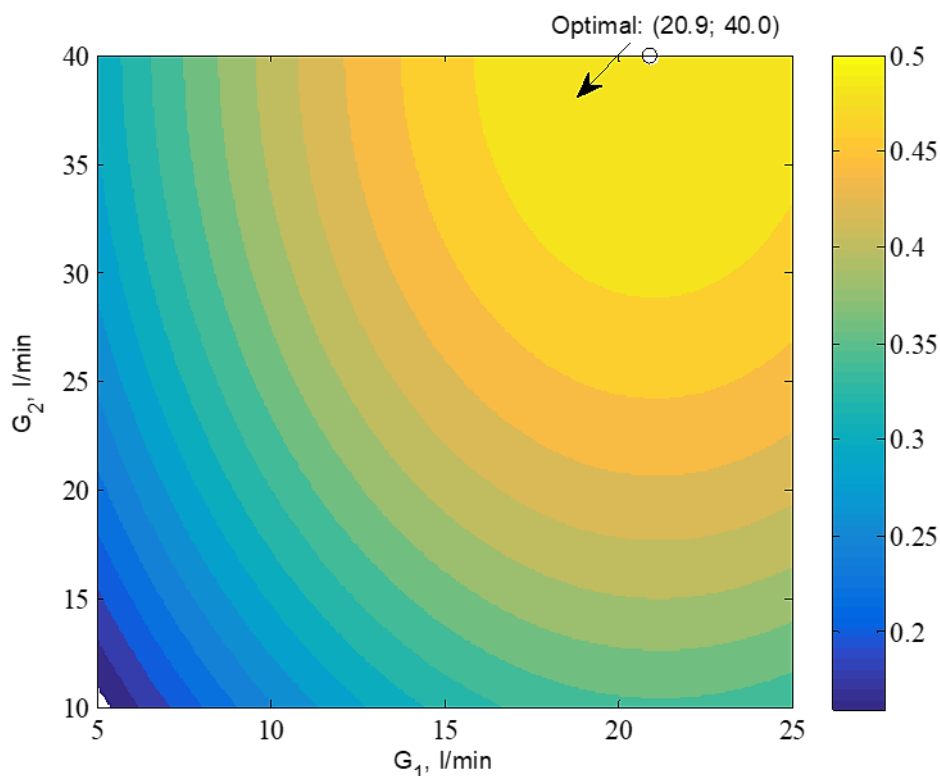


Рисунок 7. Контурная диаграмма интегрального критерия оптимизации для стержнево-тангенциального режима

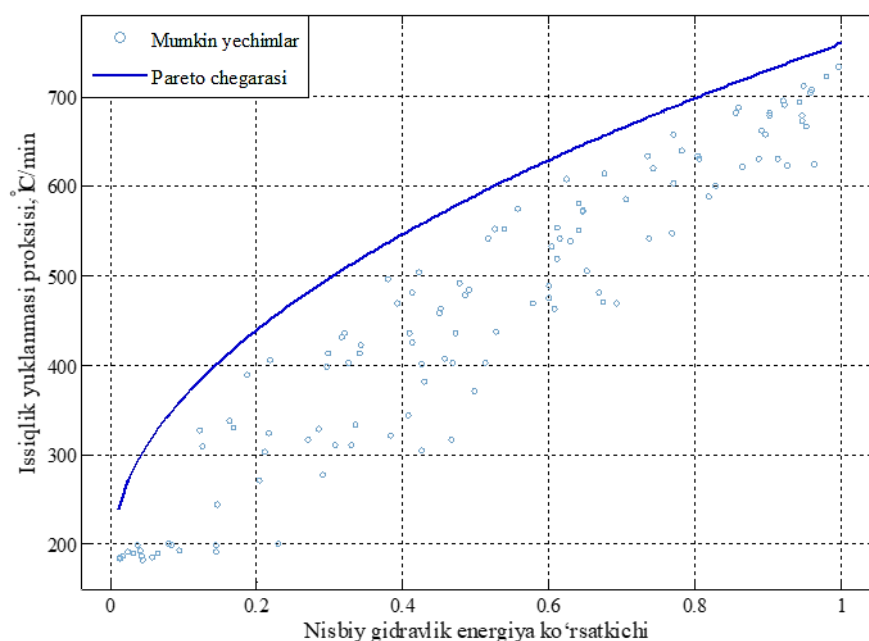


Рисунок 8. Парето-граница между тепловой нагрузкой и относительной гидравлической энергией

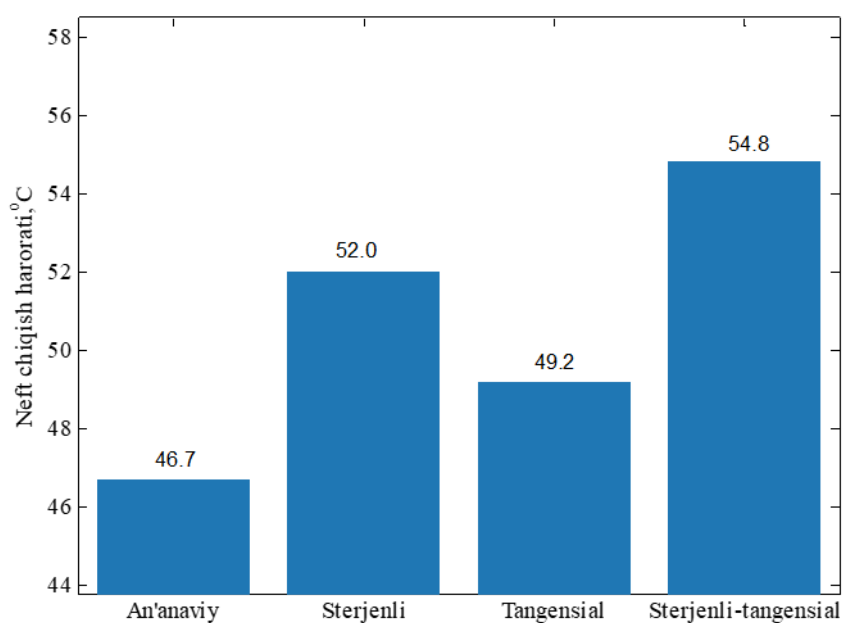


Рисунок 9. Сравнительная эффективность конструктивных режимов в оптимальной точке

Контур интегрального критерия показывает наличие области предпочтительных режимов, а Парето-граница демонстрирует компромисс между ростом тепловой нагрузки и увеличением относительной гидравлической энергии. Таким образом, оптимальный режим следует выбирать не по одному показателю, а с учетом технологического назначения аппарата и допустимого энергетического бюджета.

Заключение

1. Разработан физико-статистический подход к моделированию кожухотрубного теплообменного аппарата с четырьмя конструктивными режимами, включая стержневую, тангенциальную и комбинированную интенсификацию.

2. В качестве управляемых факторов использованы расходы холодного и горячего потоков в диапазонах 5–25 и 10–40 л/мин соответственно. Экспериментальная база составила 160 наблюдений.

3. Для каждой среды и конструктивного режима получены квадратичные регрессионные модели. Для нефти $R^2 = 0,9693$ – $0,9904$, для газового конденсата $R^2 = 0,9719$ – $0,9923$. Наименьшие значения RMSE составили 0,529 и 0,396 °C соответственно.

4. Стержнево-тангенциальная конструкция обеспечила наибольшие расчетные температуры выхода — 53,08 °C для нефти и 57,01 °C для газового конденсата. При этом максимальный интегральный критерий получен для стержневой конструкции, что подтверждает необходимость многокритериальной оптимизации.

5. Полученные зависимости применимы только в пределах экспериментально исследованных диапазонов. Для промышленного использования требуется независимая валидация, прежде всего по перепаду давления, насосной мощности и устойчивости оптимального режима.

6. Практическая ценность разработанного подхода состоит в возможности предварительного выбора рациональных расходов и конструктивного режима до проведения расширенной серии испытаний.

Список литературы

1. Чэнгель Ю.А., Гаджар А.Дж. Çengel Y.A., Ghajar A.J. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. 6th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2020. – 1018 P.
2. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P. DeWitt D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 8th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2017. – 992 P.
3. Chang S.W., Yang T.L., Liou J.S. Heat transfer and pressure drop in tubes fitted with compound enhancement elements // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007.
4. Gnielinski V. New Equations for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow // International Chemical Engineering. – 1976.
5. Green D.W., Southard M.Z. eds. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 9th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2019. – 2272 P.
6. Ismailov O., Auesbaev A., Yusupov R., Abdurakhmonov I., Baltabaeva M. Experimental investigation of heat transfer enhancement in a double-pipe heat exchanger using solid rod inserts with crude oil and gas condensate. Discover Mechanical Engineering. 2025. Vol. 4. Article 64. DOI: 10.1007/s44245-025-00150-2.
7. Kakac S., Liu H., Pramuanjaroenkij A. Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design. 4th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2020. – 528 P.
8. Kays W.M., London A.L. Compact Heat Exchangers. 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 1984. – 335 P.

9. Khurmamatov A., Ismailov O., Yusupov R., Isamatova J., Aminova G. Study of hydrodynamics of the condensation process in heat exchanger devices. E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 497. Article 01022. 11 P. DOI: 10.1051/e3sconf/202449701022.
10. Moon H., Boyina K., Miljkovic N., King W.P. Heat Transfer Enhancement of Single-Phase Internal Flows using Shape Optimization and Additively Manufactured Flow Structures. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 177. Article 121510. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121510.
11. Obaid A.J., Hameed V.M. An experimental and numerical comparison study on a heat sink thermal performance with new fin configuration under mixed convective conditions // South African Journal of Chemical Engineering. – 2023. – DOI: 10.1016/j.sajce.2023.01.009.
12. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. – 197 P.
13. Shah R.K. Sekulić D.P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. – 941 P.
14. Speight J.G. Handbook of Petroleum Processing. 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2023. – 415 P.

References

1. Cengel Y.A., Ghajar A.J. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. 6th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2020. – 1018 P.
2. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P. DeWitt D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 8th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2017. – 992 P.
3. Chang S.W., Yang T.L., Liou J.S. Heat transfer and pressure drop in tubes fitted with compound enhancement elements // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007.
4. Gnielinski V. New Equations for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow // International Chemical Engineering. – 1976.
5. Green D.W., Southard M.Z. eds. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 9th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2019. – 2272 P.
6. Ismailov O., Auesbaev A., Yusupov R., Abdurakhmonov I., Baltabaeva M. Experimental investigation of heat transfer enhancement in a double-pipe heat exchanger using solid rod inserts with crude oil and gas condensate. Discover Mechanical Engineering. 2025. Vol. 4. Article 64. DOI: 10.1007/s44245-025-00150-2.
7. Kakac S., Liu H., Pramuanjaroenkij A. Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design. 4th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2020. – 528 P.
8. Kays W.M., London A.L. Compact Heat Exchangers. 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 1984. – 335 P.
9. Khurmamatov A., Ismailov O., Yusupov R., Isamatova J., Aminova G. Study of hydrodynamics of the condensation process in heat exchanger devices. E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 497. Article 01022. 11 P. DOI: 10.1051/e3sconf/202449701022.

10. Moon H., Boyina K., Miljkovic N., King W.P. Heat Transfer Enhancement of Single-Phase Internal Flows using Shape Optimization and Additively Manufactured Flow Structures. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 177. Article 121510. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121510.
11. Obaid A.J., Hameed V.M. An experimental and numerical comparison study on a heat sink thermal performance with new fin configuration under mixed convective conditions // South African Journal of Chemical Engineering. – 2023. – DOI: 10.1016/j.sajce.2023.01.009.
12. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. – 197 P.
13. Shah R.K., Sekulic D.P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. – 941 P.
14. Speight J.G. Handbook of Petroleum Processing. 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2023. – 415 P.