Статья поступила в редакцию: 11.08.2026
Статья принята к публикации: 28.08.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 621.039.59

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23351

Влияния магнитного поля и скорости потока нефти на образование отложений на поверхности 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 Джамиля Нигматуллаевна
д-р филос. техн. наук (PhD), начальник
E-mail: jamilyechka@mail.ru

Исмаилов Ойбек Юлибаевич
д-р техн. наук
вед. науч. сотр. институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: ismoilovntmpi@mail.ru

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

Библиографическое описание: Влияния магнитного поля и скорости потока нефти на образование отложений на поверхности теплообмена // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Юсупов Р.А. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23351

The influence of magnetic field and oil flow speed on the formation of deposits on the heat exchange surface

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 исследовано влияние постоянного магнитного поля на интенсивность образования отложений на внутренней поверхности теплообменной трубы при термической обработке нефтяного сырья. Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке при температуре горячего теплоносителя 120 °C, давлении 200 кПа и начальной температуре нефтяного потока 20 °C. Скорость потока изменялась от 0,396 до 1,59 м/с, а продолжительность эксперимента составляла до 200 ч.

Полученные результаты показали существенное снижение массы отложений при использовании магнитной обработки. При скорости потока 0,396 м/с и времени 200 ч масса отложений уменьшилась с 0,884 г при традиционном нагревании до 0,0191 г при воздействии магнитного поля, что соответствует сокращению в 46,28 раза. При скорости 0,79 м/с масса отложений составила соответственно 0,693 и 0,0184 г, а сокращение достигло 37,66 раза. При скорости 1,19 м/с данные показатели составили 0,480 и 0,0131 г, сокращение — 36,64 раза. При максимальной скорости 1,59 м/с масса отложений снизилась с 0,321 до 0,0089 г, то есть в 36,06 раза.

Таким образом, постоянное магнитное поле обеспечивает значительное снижение интенсивности образования отложений во всём исследованном диапазоне режимов. Наибольшая эффективность наблюдается при длительном времени работы и низкой скорости потока. Магнитная обработка может быть рекомендована как эффективный безреагентный способ защиты теплообменных поверхностей от образования отложений.

Abstract

The study investigates the effect of a constant magnetic field on the intensity of deposit formation on the inner surface of a heat-exchange tube during the thermal treatment of petroleum feedstock. Experimental studies were carried out on a laboratory setup at a hot heat-transfer medium temperature of 120 °C, a pressure of 200 kPa, and an initial petroleum stream temperature of 20 °C. The flow velocity varied from 0.396 to 1.59 m/s, while the experiment lasted up to 200 h.

The results demonstrated a significant reduction in deposit formation when magnetic treatment was applied. At a flow velocity of 0.396 m/s and a duration of 200 h, the deposit mass decreased from 0.884 g under conventional heating to 0.0191 g under magnetic-field treatment, corresponding to a 46.28-fold reduction. At a flow velocity of 0.79 m/s, the deposit masses were 0.693 g and 0.0184 g, respectively, with a reduction of 37.66 times. At 1.19 m/s, the corresponding values were 0.480 g and 0.0131 g, with a 36.64-fold reduction. At the maximum flow velocity of 1.59 m/s, the deposit mass decreased from 0.321 g to 0.0089 g, representing a 36.06-fold reduction.

Thus, the application of a constant magnetic field significantly reduces the intensity of deposit formation across the entire range of investigated operating conditions. The highest efficiency was observed at longer operating times and lower flow velocities. Magnetic treatment can therefore be considered an effective reagent-free method for protecting heat-exchange surfaces against deposit formation.

Ключевые слова: нефтяное сырьё, отложения, теплообменная труба, постоянное магнитное поле, магнитная обработка, скорость потока, термическая обработка.

Keywords: petroleum feedstock, deposits, heat-exchange tube, constant magnetic field, magnetic treatment, flow velocity, thermal treatment.

Введение

отдела контроля за качеством образования Филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина в городе Ташкенте

В процессе термической обработки углеводородного сырья асфальтены, смолы, парафины и соли, содержащиеся в его составе, с течением времени образуют отложения на поверхностях теплообмена. Слой данных отложений увеличивает термическое сопротивление оборудования, одновременно уменьшая площадь поперечного сечения труб, что приводит к снижению их пропускной способности и увеличению гидравлического сопротивления. Наряду с этим резко возрастают энергетические и тепловые затраты [1-3].

Для предотвращения накопления отложений в технологических процессах и их удаления применяются химические и механические методы. Однако эти методы не в полной мере оправдывают себя, поскольку отсутствует возможность их применения непосредственно во время работы оборудования.

Одним из современных способов предотвращения накопления слоя отложений является пропускание потока через постоянное магнитное поле. Магнитная обработка жидких углеводородов перед их термической обработкой изменяет структурно-реологические

свойства среды и предотвращает образование твёрдых отложений и минеральных солей. Данный метод действует без применения химических реагентов — за счёт снижения вязкости и изменения процесса кристаллизации [4-7].

При воздействии магнитного поля на жидкие углеводороды перед их термической обработкой происходит поляризация микрочастиц парафинов и асфальтенов, что способствует их кристаллизации. Образовавшиеся крупные структурные соединения не осаждаются на металлических стенках, а свободно перемещаются вместе с потоком. Магнитное воздействие способствует образованию центров кристаллизации непосредственно в объёме жидкости, а не на нагретой поверхности теплообменного оборудования. В результате формируются мягкие отложения, которые легко смываются потоком и не закрепляются прочно на стенках оборудования [8-10].

Образование отложений в теплообменных аппаратах происходит в течение определённого периода времени. Низкая скорость потока в трубах, длительное тепловое воздействие на сырьё и высокая температура ускоряют образование на поверхностях оборудования отложений и минеральных солей, содержащихся в нефти. В результате тепловые потери в оборудовании увеличиваются в пределах от 2 до 60 %.

Основную часть отложений, образующихся в теплообменных аппаратах, работающих при сравнительно низких температурах — от 25 до 50 °С, составляет карбонат кальция ($CaCO_3$) [1].

Одним из современных способов предотвращения образования отложений в теплообменном оборудовании является магнитная обработка потока теплоносителя.

При прохождении жидкости по трубопроводу через магнитное поле на содержащиеся в ней заряженные частицы действует сила Лоренца:

$$F_{\text{Л}} = Q(V \bullet B)$$

где: Q — заряд иона; V — скорость потока; B — магнитная индукция.

Под действием силы Лоренца молекулы в потоке жидкости начинают совершать колебательные движения, вследствие чего возникает резонанс.

Магнитная индукция зависит от максимальной плотности магнитного потока: чем выше её значение, тем сильнее магнитное поле. С повышением температуры среды магнитная индукция постепенно уменьшается. Если температурный коэффициент равен 0,1, то повышение температуры магнита до 100 °С приводит к снижению его магнитной индукции на 10 %.

Материалы и методы

С целью изучения влияния постоянного магнитного поля на процесс накопления отложений на поверхностях теплообмена при нагревании нефтяного сырья была разработана лабораторная установка. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 1.

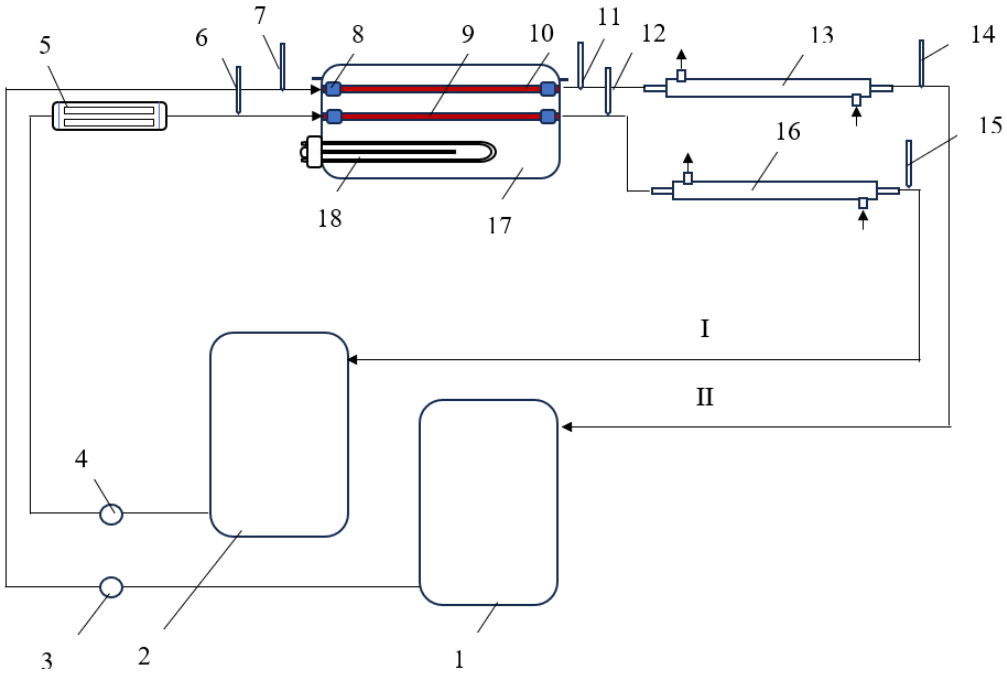


Рисунок 1. Принципиальная схема установки для применения постоянного магнитного поля в процессе нагревания нефтяного сырья:

I — линия потока, подвергаемого воздействию магнитного поля; II — линия обычного потока; 1, 2 — ёмкости для нефти; 3, 4 — центробежные насосы; 5 — *постоянное магнитное поле*, 40 Н; 6, 7 — термометры для измерения начальной температуры потока; 8 — гайка крепления трубы; 9, 10 — экспериментальные трубы; 11, 12 — термометры для измерения температуры потока на выходе из труб; 13, 16 — холодильники; 14, 15 — термометры для измерения температуры холодного потока; 17 — водяная баня; 18 — нагревательный элемент.

Экспериментальные исследования проводились в следующем порядке. В ёмкости для сырья 1 и 2 заливали по 25 литров нефти. В ёмкость 17 устанавливали экспериментальные трубы 9 и 10, после чего её заполняли водой и герметично закрывали. Затем включали нагревательный элемент 18 с автоматическим регулированием температуры мощностью 1,0 кВт. После достижения температуры 120 °С запускали насосы 3 и 4. Потоки, прошедшие термическую обработку, охлаждались водой в холодильниках 13 и 16, после чего возвращались в приёмные ёмкости. Процесс осуществлялся параллельно на линии I, оснащённой постоянным магнитом, и линии II — без магнитного воздействия.

Для создания постоянного магнитного поля использовался ферромагнитный материал. Он представляет собой высокоэнергетический постоянный магнит, изготовленный из сплава редкоземельных элементов. Его кристаллическая структура обладает тетрагональной формой и описывается химической формулой $Nd_2Fe_{14}B$, как указано в таблице 1.

Согласно паспортным данным, ферромагнит класса 40Н сохраняет свою магнитную индукцию до температуры 120 °С. При превышении этой температуры магнитная индукция уменьшается на 2 % на каждые 5 °С. Использование ферромагнита класса 40Н не рекомендуется при температурах выше 120 °С.

Таблица 1. Параметры ферромагнита

Показатели	Величина
Класс	40Н
Индукция магнитного поля, миллитесла (мТл)	1250-1280
Магнитная энергия, килоджоуль на кубический метр (кДж/м³)	302-326
Геометрические размеры, мм	20x10x3
Рабочая температура, °С	120
Масса, г	4,6
Внешний вид	

В лабораторных условиях была собрана конструкция с магнитным полем, устанавливаемая на пути потока углеводородного сырья перед его нагреванием на теплообменных поверхностях (рисунок 2)

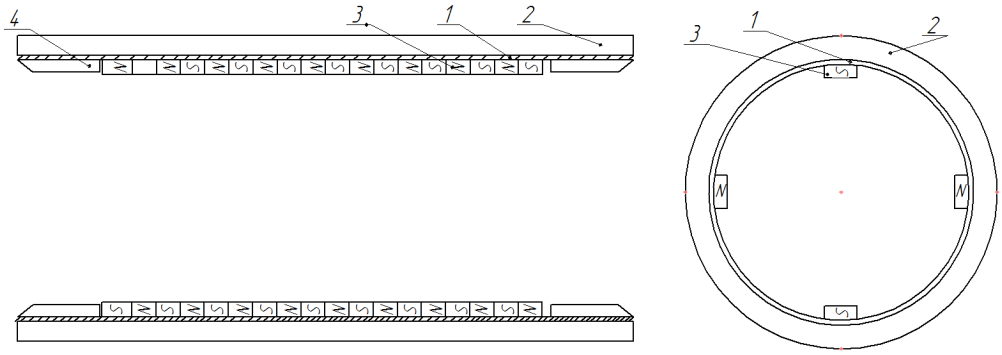


Рисунок 2. Принципиальная схема магнитного проточного устройства:

1 — цилиндрический внутренний корпус; 2 — наружная труба; 3 — секции постоянных магнитов; 4 — крепёжная резьба.

Магнитное проточное устройство включает цилиндрический корпус, выполненный из нержавеющей стали и находящийся внутри наружной трубы. Внутри цилиндрического корпуса расположены 20 постоянных ферромагнитов, размещённые на расстоянии 10 мм друг от друга. Паспортные данные указывают, что магнитная индукция каждого ферромагнита составляет 1270 мТл.

При расчёте гидродинамических режимов течения в трубах важным параметром является их абсолютная шероховатость. Со временем этот показатель увеличивается вследствие накопления слоя отложений на внутренней поверхности труб. Обычно абсолютная шероховатость стальных труб составляет 0,02–0,05 мм. Для труб, изготовленных из нержавеющей стали, данный показатель не превышает 0,01 мм.

Для экспериментального исследования процесса образования отложений на теплообменных поверхностях была выбрана труба из нержавеющей стали марки AISI 304 с низкой абсолютной шероховатостью.

Эксперименты проводились при температуре горячего теплоносителя 120 °С. давлении Р = 200 кПа. Данное значение температуры было выбрано с учётом температуры общего потока нафты, поступающего в теплообменный аппарат. Начальная температура нагреваемого нефтяного потока составляла 20 °С.

При указанных технологических и конструктивных параметрах исследовались процесс накопления отложений за время пребывания сырья с заданными вязкостью и плотностью в нагревательной трубе, а также влияние на этот процесс постоянного магнитного поля.

Объемный расход потока нефти варьировался в пределах 1 4 л/мин. Соответственно, скорость потока в трубе определялась по следующей формуле:

$\omega = \frac{4 \cdot V}{\pi d^2}$ м/с

где: V- объёмный расход нефти, м^3/с; d -внутренний диаметр трубы, d = 0,008 м.

В зависимости от скорости движения потока в трубе температура на её выходе составила: при 0,396 м/с — 101 °С; при 0,79 м/с — 89 °С; при 1,19 м/с — 71 °С; при 1,59 м/с — 56 °С.

Эксперимент на лабораторной установке проводился в течение 200 часов, при этом динамика накопления отложений исследовалась через каждые 50 часов.

(1) При определении накопления накиипи на тепловой поверхности после каждых 50 часов работы устройства трубу снимали со стенда, полностью очищали от остатков нефти, сушили в сушильном шкафу при температуре 120 °С в течение 30 минут и определяли массу накипи, накопленной на поверхности трубы как разность начального и конечного веса трубы. Вес определяли путем взвешивания на электронных весах. При взвешивании использовались лабораторные весы марки OHAUS с максимальным весом груза 100 граммов и дискретностью от 0.0001 до 0.1 грамма.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментального исследования динамики изменения массы отложений в экспериментальной трубе с внутренним диаметром 0,008 м в процессе нагревания представлены в таблице 2.

Таблица 2. Изменения массы отложений на внутренней поверхности трубы при различных режимах

№	Режим работы установки		Масса отложений, г				Сокращение отложений, $\Delta = \frac{m_1}{m_2}$
	скорость потока м/с	*время, t,* ч.	при традиционном нагревании		при воздействии магнитного поля		
			абсолютн m_1	прирост	абсолютн m_2	прирост	
1	0,396	50	0,212		0,0132		16,06
		100	0,435	0,223	0,0151	0,0019	28,81
		150	0,648	0,213	0,0177	0,0026	36,61
		200	0,884	0,236	0,0191	0,0014	46,28
2	0,79	50	0,168		0,0095		17,68
		100	0,326	0,158	0,0106	0,0011	30,75
		150	0,475	0,149	0,0112	0,1014	42,41
		200	0,693	0,218	0,0184	0,1728	37,66
3	1,19	50	0,112		0,0061		18,36
		100	0,255	0,143	0,0082	0,0021	31,09
		150	0,312	0,57	0,0097	0,0076	32,16
		200	0,480	0,168	0,0131	0,0034	36,64

№	Режим работы установки		Масса отложений, г				Сокращение отложений, $\Delta = \frac{m_1}{m_2}$
	скорость потока м/с	*время, t,* ч.	при традиционном нагревании		при воздействии магнитного поля		
			абсолютн m_1	прирост	абсолютн m_2	прирост	
4	1,59	50	0,067		0,0045		14,88
		100	0,141	0,074	0,0068	0,0023	20,73
		150	0,219	0,78	0,0074	0,0006	29,59
		200	0,321	0,102	0,0089	0,0015	36,06

При всех исследованных скоростях потока и продолжительности работы установки применение магнитного поля приводит к существенному снижению массы отложений на внутренней поверхности трубы по сравнению с традиционным нагреванием. Масса отложений при магнитном воздействии составляет примерно 0,0045–0,0191 г, тогда как при традиционном нагревании — 0,067–0,884 г.

Наиболее выраженный эффект наблюдается при низкой скорости потока 0,396 м/с: за 200 ч масса отложений снижается с 0,884 до 0,0191 г, то есть примерно в 46,3 раза. При скорости 0,79 м/с максимальное сокращение составляет 30,75–42,41 раза, при 1,19 м/с — 18,36–36,64 раза, а при 1,59 м/с — 14,88–36,06 раза.

Кроме того, при традиционном нагревании с увеличением времени работы наблюдается практически устойчивый рост массы отложений. При воздействии магнитного поля абсолютная масса отложений также постепенно увеличивается, однако темп их накопления значительно ниже. Это свидетельствует о выраженном ингибирующем воздействии магнитного поля на процессы образования и закрепления отложений.

В целом повышение скорости потока от 0,396 до 1,59 м/с само по себе способствует уменьшению количества отложений при обоих способах нагрева. Однако магнитная обработка сохраняет преимущество во всём исследованном диапазоне режимов. Следовательно, комбинация увеличения скорости потока и воздействия магнитного поля является наиболее эффективным режимом снижения интенсивности образования отложений, что позволяет существенно увеличить продолжительность работы теплообменной поверхности без значительного загрязнения.

Заключение

Проведённые исследования показали, что применение постоянного магнитного поля перед нагреванием нефтяного сырья значительно снижает образование отложений на внутренней поверхности теплообменных труб. При магнитной обработке масса отложений была в несколько десятков раз ниже по сравнению с традиционным нагреванием, а максимальное сокращение достигало 46,28 раза.

Увеличение скорости потока также способствует снижению интенсивности отложений. В целом результаты подтверждают эффективность магнитной обработки как безреагентного метода защиты теплообменного оборудования, позволяющего уменьшить загрязнение поверхностей и повысить эффективность его работы.

Список литературы

1. Исмаилов, О.Ю. Иссиқлик юзаларида дашқол ҳосил бўлиш жараёнига магнит майдонининг таъсири / О.Ю. Исмаилов, Р.А. Юсупов, М.Х. Исмаилов, Д.Н. Исаматова. – Наманган: Muhandis noshr, 2025. – 125 с.
2. Исмаилов, О.Ю. Иссиқлик ташувчи ҳароратини конденсатор узунлиги бўйича тақсимлаш / О.Ю. Исмаилов, Р.А. Юсупов, А.М. Хурмаматов // Инновационные подходы к локализации: материалы Международной конференции (г. Карши, 14 октября 2023 г.). – 2023. – С. 255–257.
3. Исмаилов О.Ю., Юсупов Р.А., Исмаилов М.Х., Исаматова Д.Н. Иссиқлик юзаларида дашқол ҳосил бўлиш жараёнига магнит майдонининг таъсири. Monografiya. “Muhandis noshr” Наманган, С. 125. – 2025.
4. Alabi A., Chiesa M., Garlisi C., Palmisano G. Advances in anti-scale magnetic water treatment // Environmental Science: Water Research & Technology. – 2015. – Т. 1, № 4. – P. 408–425. – DOI: 10.1039/C5EW00052A.
5. Polley G.T., Wilson D.I., Yeap B.L., Pugh S.J. Use of crude oil fouling threshold data in heat exchanger design // Applied Thermal Engineering. – 2002. – Т. 22, № 7. – P. 763–776. – DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00021-2.
6. Khalaf M.H., Mansoori G.A., Yong C.W. Magnetic treatment of petroleum and its relation with asphaltene aggregation onset (an atomistic investigation) // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Т. 176. – P. 926–933. – DOI: 10.1016/j.petrol.2019.01.059.
7. Исмаилов О.Ю., Юсупов Р.А., Хурмаматов А.М. Иссиқлик ташувчи ҳароратини конденсатор узунлиги бўйича тақсимлаш. Материалы международной конференции “Инновационные подходы к Локализацию”. 14 октября г.Карши, С. 255–257. – 2023.
8. Kozic V., Lipus L.C. Magnetic Water Treatment for a Less Tenacious Scale // Journal of Chemical Information and Computer Sciences. – 2003. – Т. 43, № 6. – P. 1815–1819. – DOI: 10.1021/ci0102719.
9. Ben Latifa, S. Cheap-Charpentier, H., Perrot, H., Ben Amor, Y. Effects of Magnetic Field on Homogeneous and Heterogeneous Precipitation of Calcium Carbonate // ChemElectroChem. – 2023. – DOI: 10.1002/celc.202300105.
10. Oybek Ismoilov, Fozilbek Shomansurov, Rustam Yusupov. Kumush Akhmedova,Isroiljon Abdurakhmanov, Mavluda Baltabayeva. The influence of liquid hydrocarbon flow recirculation on the efficiency of heat exchange in a shell-and-tube apparatus. Chemical Papers. Received: 14 May 2025/Accepted: 3 August 2025 The Author(s), under exclusive licence to the Institute of Chemistry, Slovak Academy of Sciences – 2025. DOI: 10.1007/s11696-025-04374-0.

References

1. Ismailov O.Yu., Yusupov R.A., Ismailov M.Kh., Isamatova D.N. The Effect of Magnetic Field on the Process of Crack Formation on Heat-Affected Surfaces. Monograph. 'Muhandis Publisher' Namangan,] (In Uzb.). – 2025. – 125 P.

2. Ismailov O.Yu., Yusupov R.A., Khurmamatov A.M., Issiқlik tashuvchi ҳaroratini kondensator uzunligi bojicha taқsimlash. [Materials of the International Conference 'Innovative Approaches to Localization'. October 14, 2023. Karshi, P. 255–257] (In Uzb.).
3. Ismailov O.Yu., Yusupov R.A., Ismailov M.Kh., Isamatova D.N. [The Effect of Magnetic Field on the Process of Crack Formation on Heat-Affected Surfaces. Monograph. 'Muhandis Publisher' Namangan,] (In Uzb.). – 2025. – 125 P.
4. Alabi A., Chiesa M., Garlisi C., Palmisano G. Advances in anti-scale magnetic water treatment // Environmental Science: Water Research & Technology. – 2015. – Vol. 1, No. 4. – P. 408–425. – DOI: 10.1039/C5EW00052A.
5. Polley G.T., Wilson D.I., Yeap B.L., Pugh S.J. Use of crude oil fouling threshold data in heat exchanger design // Applied Thermal Engineering. – 2002. – Vol. 22, No. 7. – P. 763–776. – DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00021-2.
6. Khalaf M.H., Mansoori G.A., Yong C.W. Magnetic treatment of petroleum and its relation with asphaltene aggregation onset (an atomistic investigation) // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 176. – P. 926–933. – DOI: 10.1016/j.petrol.2019.01.059.
7. Oybek Ismoilov, Fozilbek Shomansurov, Rustam Yusupov. Kumush Akhmedova,Isroiljon Abdurakhmanov, Mavluda Baltabayeva. The influence of liquid hydrocarbon flow recirculation on the efficiency of heat exchange in a shell-and-tube apparatus. Chemical Papers. Received: 14 May 2025/Accepted: 3 August 2025 The Author(s), under exclusive licence to the Institute of Chemistry, Slovak Academy of Sciences 2025 (In Uzb.) [Электронный ресурс]. – URL: https://doi.org/ (accessed: 11.08.2026).
8. Kozic V., Lipus L.C. Magnetic Water Treatment for a Less Tenacious Scale // Journal of Chemical Information and Computer Sciences. – 2003. – Vol. 43, No. 6. – P. 1815–1819. – DOI: 10.1021/ci0102719.
9. Ben Latifa, S. Cheap-Charpentier, H., Perrot, H., Ben Amor, Y. Effects of Magnetic Field on Homogeneous and Heterogeneous Precipitation of Calcium Carbonate // ChemElectroChem. – 2023. – DOI: 10.1002/celc.202300105.
10. Oybek Ismoilov, Fozilbek Shomansurov, Rustam Yusupov. Kumush Akhmedova,Isroiljon Abdurakhmanov, Mavluda Baltabayeva. The influence of liquid hydrocarbon flow recirculation on the efficiency of heat exchange in a shell-and-tube apparatus. Chemical Papers. Received: 14 May 2025/Accepted: 3 August 2025 The Author(s), under exclusive licence to the Institute of Chemistry, Slovak Academy of Sciences – 2025. DOI: 10.1007/s11696-025-04374-0.