

УДК 665.521.7: 66.092.89

МРНТИ 61.51.17

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108825>

Получена: 26.02.2025.

Одобрена: 17.04.2025.

Опубликована: 30.06.2025.

Оригинальное исследование

Анализ и прогнозирование процесса коксования нефтяных остатков Атырауского нефтеперерабатывающего завода

Н.А. Карабасова, Ф.Б. Кайрлиева

Атырауский университет нефти и газа имени Сафу Утебаева, г. Атырау, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Проблема глубокой переработки углеводородного сырья является одной из важных задач нефтепереработки. В настоящее время в мире существуют различные технологии переработки тяжёлых нефтяных остатков, позволяющие увеличить выход светлых нефтепродуктов. Одним из наиболее перспективных направлений переработки остатков нефти считается замедленное коксование.

Цель. С целью изучения влияния свойств перерабатываемого сырья на изменение количественных и качественных показателей продуктов коксования нами были опробованы в качестве сырья образцы мазута Атырауского нефтеперерабатывающего завода, полугудрона и гудрона, полученные вакуумной перегонкой с последующим коксованием на пилотной установке.

Материалы и методы. Для переработки тяжёлых нефтяных остатков была использована пилотная установка коксования. Также использована математическая обработка результатов проведённых экспериментов, позволяющая спрогнозировать изучаемый процесс.

Результаты. В статье представлены результаты исследований коксования мазута, полугудрона и гудрона Атырауского нефтеперерабатывающего завода: значение показателя выхода летучих веществ для «сырого» кокса, полученного из гудрона, снижается до 7,1%, а для «сырых» коксов, полученных из мазута и полугудрона, составляет 7,8% и 7,4%. Зольность кокса, полученного из гудрона, составляет 0,29%, а для образцов, полученных из мазута и полугудрона, имеет значение 0,23% и 0,26%. Полученные значения зольности, выхода летучих веществ, а также массовая доля кремния, железа, ванадия для кокса, полученного из гудрона, удовлетворяют техническим требованиям на кокс. Выполнено математическое прогнозирование процесса путём экспресс-определения качественных и количественных показателей продуктов коксования.

Заключение. На основании экспериментальных данных установки замедленного коксования Атырауского нефтеперерабатывающего завода при переработке гудрона получается кокс лучшего качества, чем при переработке мазута и полугудрона. Предлагаемую модель можно применять для прогнозирования процесса коксования путём экспресс-определения качественных и количественных показателей полученных продуктов. Разработанная модель может быть использована для обучения персонала в области моделирования технологических процессов, не требует углубленных знаний в программировании, что делает её подходящей для начальной подготовки специалистов.

Ключевые слова: нефтяные остатки, мазут, полугудрон, гудрон, кокс, замедленное коксование, математическое моделирование.

Как цитировать:

Карабасова Н.А., Кайрлиева Ф.Б. Анализ и прогнозирование процесса коксования нефтяных остатков Атырауского нефтеперерабатывающего завода // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2025. Том 7, №2. С. 96–105. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108825>.

UDC 665.521.7: 66.092.89

CSCSTI 61.51.17

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108825>

Received: 26.02.2025.

Accepted: 17.04.2025.

Published: 30.06.2025.

Original article

Analysis and Forecasting of the Coking Process of Oil Residues of the Atyrau Oil Refinery

Nagima A. Karabassova, Fazilat B. Kayrliyeva

Atyrau Oil and Gas University named after Safi Utebaev, Atyrau, Kazakhstan

ABSTRACT

Background: The deep processing of hydrocarbon raw materials represents the most significant challenge in the oil refining. Nowadays, there are various technologies available worldwide to process heavy oil residues, which enhance the yield of light petroleum products. Among these, delayed coking is regarded as one of the most promising approaches.

Aim: To investigate how the properties of processed raw materials affect the quantitative and qualitative indicators of coking products, we conducted tests using fuel oil samples from the Atyrau Oil Refinery, as well as flux and tar obtained through vacuum distillation followed by subsequent coking at the pilot unit.

Materials and methods: A pilot delayed coking unit was employed for the systematic processing of heavy oil residues. Additionally, mathematical modelling and analysis of the experimental results have been performed to predict the behaviour and outcomes of the coking process under investigation.

Results: The article presents the findings from studies conducted on the coking processes of fuel oil, flux and tar sourced from the Atyrau Oil Refinery. The volatile matter yield index for “crude” coke derived from tar decreases is observed to decrease to 7.1%, while for “crude” coke from fuel oil and flux are 7.8% and 7.4%, respectively. The ash content of coke obtained from tar is measured at 0.29%, whereas samples from fuel oil and flux yield ash contents of 0.23% and 0.26%. These measured values of ash content, volatile matter yield, and the mass fraction of silicon, iron, and vanadium for coke obtained from tar, meet the technical requirements for coke. Additionally, a mathematical prediction of the process was conducted, employing express determination to assess both qualitative and quantitative indicators of the resulting products.

Conclusion: Based on experimental data of the delayed coking unit of Atyrau oil refinery, better quality coke was obtained at the processing of tar compared to the processing of fuel oil and flux. The proposed model can be used to predict the coking process by express-determination of qualitative and quantitative indicators of the obtained products. The developed model can be used for personnel training in the field of modelling technological processes, since it does not require in-depth knowledge of programming, which makes it suitable for the initial training of specialists.

Keywords: *oil residues; heavy fuel oil; flux; tar; coke; delayed coking; mathematical modelling.*

To cite this article:

Karabassova NA, Kayrliyeva FB. Analysis and Forecasting of the Coking Process of Oil Residues of the Atyrau Oil Refinery. *Kazakhstan journal for oil & gas industry.* 2025;7(2):96–105.

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108825>.

ӨОЖ 665.521.7: 66.092.89

ГТАХР 61.51.17

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108825>

Қабылданды: 26.02.2025.

Мақұлданды: 17.04.2025.

Жарияланды: 30.06.2025.

Түпнұсқа зерттеу

Атырау мұнай өңдеу зауытының мұнай қалдықтарын кокстеу процесін талдау және болжау

Н.А. Қарабасова, Ф.Б. Қайырлиева

Сафи Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті, Атырау қаласы, Қазақстан

АННОТАЦИЯ

Негіздеу. Көмірсутек шикізатын терең қайта өңдеу мәселесі мұнай өңдеудің маңызды міндеттерінің бірі болып табылады. Қазіргі уақытта әлемде жеңіл мұнай өнімдерінің шығымдылығын арттыруға мүмкіндік беретін ауыр мұнай қалдықтарын қайта өңдеудің әртүрлі технологиялары бар. Мұнай қалдықтарын қайта өңдеудің ең перспективалы бағыттарының бірі баяу кокстеу болып саналады.

Мақсаты. Қайта өңделетін шикізат қасиеттерінің кокстеу өнімдерінің сандық және сапалық көрсеткіштерінің өзгеруіне әсерін зерделеу мақсатында біз шикізат ретінде Атырау мұнай қайта өңдеу зауытының мазутының, жартылай гудрон мен гудронның үлгілерін сынап көрдік, олар кейіннен пилоттық қондырғыда кокстеудің көмегімен вакуумдық айдау арқылы алынды.

Материалдар мен әдістер. Ауыр мұнай қалдықтарын қайта өңдеу үшін кокстеу пилоттық қондырғысы қолданылды. Зерттелетін процесті болжауға мүмкіндік беретін жүргізілген эксперименттердің нәтижелеріне математикалық өңдеу де қолданылды.

Нәтижелері. Мақалада Атырау мұнай өңдеу зауытының мазут, жартылай гудрон және гудронды кокстеу зерттеулерінің нәтижелері келтірілген: гудроннан алынған «шикі» кокс үшін ұшатын заттардың шығу көрсеткішінің мәні 7,1%-ға дейін төмендейді, ал мазут пен жартылай гудроннан алынған «шикі» кокстар үшін 7,8% және 7,4% құрайды. Гудроннан алынған кокстың күлі 0,29% құрайды, ал мазут пен жартылай гудроннан алынған үлгілер үшін 0,23% және 0,26% мәнге ие. Алынған күлдің мөндері, ұшатын заттардың шығымы, сондай-ақ гудроннан алынған кокс үшін кремний, темір, ванадийдің массалық үлесі кокстың техникалық талаптарын қанағаттандырады. Кокстеу өнімдерінің сапалық және сандық көрсеткіштерін экспресс-анықтау арқылы процестің математикалық болжауы орындалды.

Қорытынды. Зерттеудің негізгі тұжырымдары мыналар Атырау мұнай өңдеу зауытындағы баяу кокстеу қондырғысының тәжірибелік деректеріне сүйенсек мазут пен жартылай гудронды қайта өңдеуден гөрі гудронды қайта өңдеу кезінде ең жақсы сапалы кокс алынады. Ұсынылған модельді алынған өнімдердің сапалық және сандық көрсеткіштерін экспресс-анықтау арқылы кокстеу процесін болжау үшін пайдалануға болады. Өзірленген модель технологиялық процестерді модельдеу саласында қызметкерлерді дайындау үшін пайдаланылуы мүмкін және бағдарламалауда терең білімді қажет етпейді, бұл оны мамандарды бастапқы дайындау үшін қолайлы етеді.

Негізгі сөздер: мұнай қалдықтары, мазут, жартылай гудрон, гудрон, кокс, баяу кокстеу, математикалық модельдеу.

Дәйексөз келтіру үшін:

Қарабасова Н.А., Қайырлиева Ф.Б. Атырау мұнай өңдеу зауытының мұнай қалдықтарын кокстеу процесін талдау және болжау // Қазақстанның мұнай-газ саласының хабаршысы. 2025. 7 том, №2. 96–105 б. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108825>.

Введение

Нефтеперерабатывающие предприятия заинтересованы в увеличении глубины переработки нефти с выработкой максимального количества дистиллятных продуктов – бензина и дизельного топлива – с минимальными капитальными затратами.

В развитых промышленных странах, наряду с процессами гидрооблагораживания сырья, вторичных дистиллятов и остатков, продолжают углублять переработку нефти с помощью процесса коксования. Примерно треть мировых мощностей глубокой переработки нефтяных остатков приходится на замедленное коксование, из них около 50% мощностей сконцентрировано в США [1].

В схемах современных нефтеперерабатывающих предприятий коксование занимает важное значение не только как углубляющий процесс [2], но и как источник важного продукта – кокса, необходимого для цветной и чёрной металлургии. В отличие от каменноугольного кокса, нефтяной кокс обладает уникальными свойствами, обусловленными его происхождением. Он имеет более низкое содержание примесей, в т.ч. серы, что делает его особенно ценным в металлургической и химической промышленности. Нефтяной кокс используется для производства электродов, в качестве топлива, а также в различных технологических процессах, требующих высококачественного углеродного материала. Его плотная структура и высокая теплотворная способность делают нефтяной кокс незаменимым компонентом в производстве алюминия и других металлов, а также в энергетике [3].

Нефтеперерабатывающие заводы, имеющие в своей схеме замедленное коксование, могут использовать его как процесс вторичной переработки нефти, который при комбинировании с другими термическими, каталитическими и гидрогенизационными процессами может повысить глубину переработки нефти до 90–95% [4].

Популярность процесса замедленного коксования связана с тем, что в этом процессе, наряду с выработкой нефтяного кокса, можно получить газы, бензиновую фракцию и коксовые (газолейные) дистилляты, а выход дистиллятных продуктов в зависимости от свойств исходного сырья и условий проведения процесса может достигать величины порядка 60% [2].

На нефтеперерабатывающих заводах АО НК «КазМунайГаз» имеются установки замедленного коксования (далее – УЗК). Например, на Атырауском нефтеперерабатывающем заводе (далее – АНПЗ) такая установка была введена в эксплуатацию в 1980 г. и с тех пор неоднократно модернизировалась. В настоящее время её мощность составляет 1 млн т/г. сырья, что позволяет производить до 170 тыс. т кокса ежедневно. На Павлодарском нефтехимическом заводе УЗК была введена в эксплуатацию

в декабре 1986 г.; она перерабатывает тяжёлые остатки, такие как гудрон и мазут, в кокс, который используется в энергетике [5].

Материалы и методы

В рамках данной работы были исследованы нефтяные остатки переработки нефти на АНПЗ, основные показатели которых представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика остатков нефти АНПЗ
Table 1. Characteristics of oil residues of the Atyrau Oil Refinery

Показатели Indicators	Мазут Fuel oil	Полугудрон Flux	Гудрон Tar
Выход на нефть, %масс. Yield to oil, % mass	49,5	34,4	28,2
Качество остатков Quality of residuals			
плотность, кг/м³ density, kg/m³	906,8	937,7	944,5
коксуемость, % coking behavior, %	5,9	8,9	10,3
вязкость при 80°С, сСт viscosity at 80°С, cSt	28,9	163	360,2
содержание серы, % sulfur content, %	0,52	0,56	0,63
групповой химический состав, %масс. hydrocarbon type content, % mass.			
парафино-нафтеновые УВ paraffin naphthenic HCs	56,8	46,7	45,9
лёгкие ароматические УВ light aromatic HCs	6	12	10,9
средние ароматические УВ medium aromatic HCs	3,2	4,1	3,8
тяжёлые ароматические УВ heavy aromatic HCs	20,8	20,5	18,6
смолы tars	11	14	16,8
асфальтены asphaltenes	2,2	2,7	4
выкипает до 500°С, %об. boils off up to 500°С, % vol.	52	27	5

УВ / HCs – углеводороды / hydrocarbons

Для изучения продуктов процесса коксования сырьё – мазут, полугудрон и гудрон – коксовали на пилотной лабораторной установке, способной воспроизводить режим работы заводских установок. Схема пилотной установки коксования приведена на рис. 1.

Навеска сырья – 1 кг. Установка включает металлический кубик объёмом 2 л, помещаемый в электрическую печь. Нагрев содержимого кубика осуществляется после его опрессовки и присоединения через вентиль к системе сбора дистиллята, состоящей из воздушного холодильника и каплеотбойника.

Жидкий дистиллят улавливается в приёмнике и частично в каплеотбойнике, а газ коксования пропускается через газовые часы, где фиксируется его объём. При необходимости газ коксования отбирается в газометры для анализа

несколько раз в течение одного опыта. Давление в кубике 0,2 МПа. Время коксования, фиксируемое с момента появления паров в приемнике и до окончания опыта, составляет 2–2,5 ч.

Температура жидкой массы в кубике достигает 460–470°C. После окончания процесса коксования температуру в реакторе поднимали до 550–600°C для подсушки кокса в течение 30 мин.

После охлаждения кубика его освобождают от кокса, а дистиллят из приёмника и каплеотбойника сливают и подвергают фракционированию на аппарате АРН-2 с получением бензиновой, лёгкой и тяжёлой газойлевых фракций.

Обсуждение качества продуктов коксования

После анализа газа нами рассчитаны материальные балансы процесса коксования мазута, полугудрона и гудрона (табл. 2). Нужно отметить, что выход продуктов коксования при различном сырье практически одинаковый, за исключением выхода «сырого» кокса. При переработке мазута «сырого» кокса выход составил 9,7%масс., при переработке полугудрона и гудрона – 14,2 и 17,9%масс. соответственно.

Качественные параметры газов и дистиллятов коксования, представленные ниже, вполне соответствуют заводским данным, наблюдаемым в производственных условиях на АНПЗ.

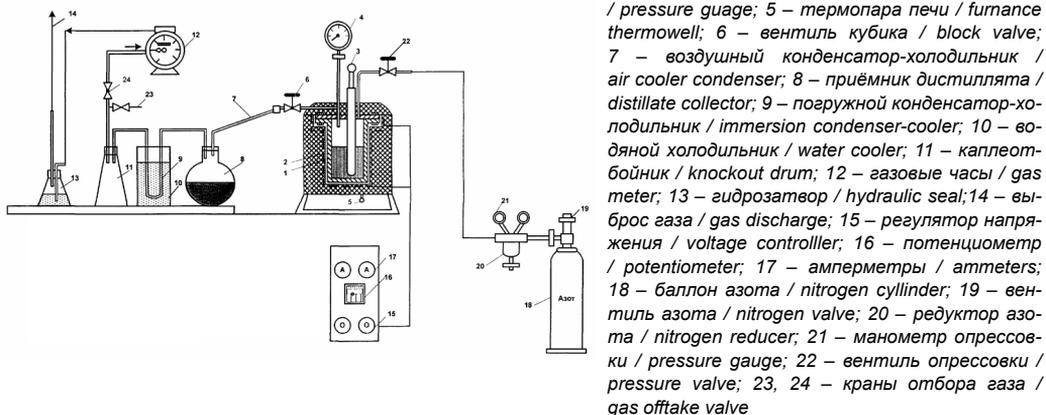


Рисунок 1. Схема установки коксования
Figure 1. Coking unit diagram

Таблица 2. Материальный баланс процесса коксования, %масс.

Table 2. Material balance of the coking process, % by mass.

Продукты коксования Coking products	Мазут АНПЗ AOR fuel oil	Полугудрон АНПЗ AOR flux	Гудрон АНПЗ AOR tar
Жирный газ Rich gas	8,9	8,7	7,9
Бензин Gasoline	15,4	14,7	13,1
ЛГ Light gas oil	39,6	37,5	38,6
ТГ Heavy gas oil	25	23,4	21,2
«Сырой» кокс Crude coke	9,7	14,2	17,9
Потери Loses	1,7	1,5	1,3
ВСЕГО TOTAL	100	100	100

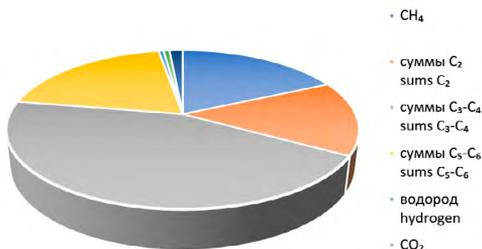


Рисунок 2. Состав газа коксования
Figure 2. Composition of coking gas

ЛГ / LGO – лёгкий газойль / Light gas oil; ТГ / HGO – тяжёлый газойль / Heavy gas oil

Таблица 3. Характеристика дистиллятов коксования
Table 3. Characteristics of coking distillates

Показатели Indicators	Из мазута From fuel oil			Из полугудрона From flux			Из гудрона From tar		
	бензин gasoline	ЛГ LGO	ТГ HGO	бензин gasoline	ЛГ LGO	ТГ HGO	бензин gasoline	ЛГ LGO	ТГ HGO
Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	746,1	833,7	891,6	754,5	836,9	894,2	747,6	838,2	900,1
Содержание серы, % Sulfur content, %	0,12	0,25	0,31	0,13	0,26	0,32	0,15	0,29	0,36
Йодное число, г I ₂ /100 г Iodine value, g I ₂ /100 g	67,5	43,3	-	64,4	41,2	-	58,4	38,1	-
Фракционный состав, %об. Fractional composition, % vol.									
начало кипения, °С boiling point, °C	62	183	314	64	179	320	58	170	317
10% выкипает при, °С 10% boils off at, °C	92	222	335	90	217	339	88	206	341
50% выкипает при, °С 50% boils off at, °C	136	281	375	133	276	391	126	267	405
90% выкипает при, °С 90% boils off at, °C	182	337	458	179	333	461	172	319	466
98% выкипает при, °С (конец кипения) 98% boils off at, °C	197	346	477	196	349	480	189	343	479
Цетановый индекс Cetane index	-	55	-	-	55	-	-	52	-
Температура застывания, °С Solidification temperature, °C	-	-10	26	-	-12	28	-	-9	30
Вязкость при 20°С, сСт Viscosity at 20 °C, cSt	0,7	4,6	-	0,68	4,5	-	0,66	4,2	-
Коксуюемость, % coking behavior, %	-	-	0,71	-	-	0,69	-	-	0,93
Вязкость при 80°С, сСт Viscosity at 80 °C, cSt	-	-	7,9	-	-	8,2	-	-	9,7

В газах коксования плотностью 1,42 кг/м³ содержится: H₂ – 0,54%, CO₂ – 0,65%, H₂S – 1,47%, CH₄ – 18,08%; суммы C₂ – 15,19%, суммы C₃–C₄ – 44,41%, суммы C₅–C₆ – 19,66% (рис. 2).

Характеристики дистиллятных продуктов (табл. 3) следующие:

– бензины коксования содержат 0,12–0,15% серы и отличаются высокими значениями йодного числа (58–67 г I₂/100 г);

– ЛГ коксования характеризуются хорошими значениями цетанового индекса (порядка 52);

– ТГ характеризуются низкими значениями вязкости при 80°С – 7,9; 8,2 и 9,7 сСт, соответственно, из мазута, полугудрона и гудрона.

По результатам (табл. 4) видно, что значение показателя выхода летучих веществ

для «сырого» кокса, полученного из гудрона, снижается до 7,1%, а для «сырых» коксов, полученных из мазута и полугудрона, составляет 7,8% и 7,4%. Зольность кокса, полученного из гудрона, составляет 0,29%, а для образцов, полученных из мазута и полугудрона, имеет значение 0,23% и 0,26%. Анализируя физико-химические свойства «сырых» коксов, можно отметить, что с утяжелением сырья коксования уменьшается выход летучих веществ и повышается зольность.

Полученные значения зольности, выхода летучих веществ, а также массовая доля кремния, железа, ванадия для кокса, полученного из гудрона «сырой» кокс, удовлетворяет требованиям ГОСТ 22898-78 «Коксы нефтяные малосернистые. Технические условия»¹ и соответствует спецификации качества АНПЗ [6].

¹ ГОСТ 22898-78 «Коксы нефтяные малосернистые. Технические условия». Дата введения 01.01.1979. GOST 22898-78. Low-sulphur petroleum cokes. Specifications. Dated 1979 Jan 1.

Таблица 4. Характеристика «сырых» коксов
Table 4. Characteristics of “crude” cokes

Показатели Indicators	Из мазута From flux	Из полугодрона From flux	Из гудрона From tar
Выход летучих веществ, %масс. Yield of volatile substances, % w/w.	7,8	7,4	7,1
Содержание, %: Content, %:			
серы sulfur	1,02	1,07	1,11
ванадия vanadium	0,021	0,022	0,025
железа iron	0,026	0,027	0,03
кремния silicon	0,012	0,011	0,016
Зольность, % Ash content, %	0,23	0,26	0,29
Действительная плотность (после прокалки), г/см ³ Actual density (after calcination), g/cm ³	2,07	2,08	2,08

Математическое моделирование процесса коксования

Для выполнения математического анализа процесса были использованы характеристики остатков нефти АНПЗ (табл. 1) и значения показателя коксуемости сырья. Был применён метод однофакторного анализа по регрессионным уравнениям (1):

$$y = a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (1)$$

где x – величина коксуемости сырья; y – величина выходов продуктов коксования, a_0, \dots, a_2 – корреляционные показатели.

По уравнению (1) были выполнены расчёты материального баланса процесса коксования, плотности сырья и продуктов, выход исходного нефтяного остатка на нефть и выход летучих веществ в коксе.

Для расчёта выходов продуктов коксования использовали следующие уравнения (2–6):

$$y_1 = -0,04743x^2 + 0,64668x + 8,10485 \quad R^2 = 0,90873 \quad (2)$$

$$y_2 = -0,14419x^2 + 1,84836x + 9,44073 \quad R^2 = 0,96242 \quad (3)$$

$$y_3 = 0,05058x^2 - 1,42560x + 46,28260 \quad R^2 = 0,99458 \quad (4)$$

$$y_4 = -0,04170x^2 + 0,07064x + 26,01627 \quad R^2 = 0,99820 \quad (5)$$

$$y_5 = 0,18274x^2 - 1,14009x + 10,15555 \quad R^2 = 0,99524 \quad (6)$$

где y_1 – выход газа и потерь, %; y_2 – выход бензина, %; y_3 – выход легкого газойля, %; y_4 – выход тяжёлого газойля, %; y_5 – выход сырого кокса, %; R^2 – коэффициент детерминации.

В табл. 5 сведены данные по выходу продуктов коксования, определённых по уравнениям регрессии (2–6):

Таблица 5. Расчётный выход продуктов коксования, %масс.
Table 5. Estimated yield of coking products, % by weight

Показатели Indicators	Обозначение Symbol	Мазут Fuel oil	Полугудрон Flux	Гудрон Tar
Газ + потери Gas+losses	y_1	10,269	10,104	9,734
Бензин Gasoline	y_2	15,327	14,470	13,181
ЛГ LGO	y_3	39,632	37,601	36,964
ТГ HGO	y_4	24,982	23,342	22,320
Сырой кокс Crude coke	y_5	9,790	14,484	17,800
ИТОГО TOTAL		100	100	100

Путём сравнения расчётных (табл. 5) и экспериментальных (табл. 1) данных определили процентные значения ошибки расчёта (табл. 6).

Таблица 6. Процентные значения ошибки по сравнению с экспериментом, %
Table 6. Percentage error values compared to experiment, %

Показатели Indicators	Мазут Fuel oil	Полугудрон Flux	Гудрон Tar
Газ + потери Gas+losses	0,29799	0,945712	0,351
Бензин Gasoline	0,4762	1,567883	0,62
ЛГ LGO	0,08101	0,268856	0,096
ТГ HGO	0,0735	0,246781	0,091
Сырой кокс Crude coke	0,93115	1,999066	0,559

По следующим уравнениям (6–9), полученным тем же методом, можно рассчитать плотность сырья и продуктов коксования:

$$y_6 = -1,05420x^2 + 25,93701x + 789,20380 \quad R^2 = 0,994 \quad (6)$$

$$y_7 = 0,06294x^2 - 0,57833x + 747,24903 \quad R^2 = 0,993 \quad (7)$$

$$y_8 = 0,12587x^2 - 1,15666x + 836,49805 \quad R^2 = 0,993 \quad (8)$$

$$y_9 = 0,54283x^2 + 6,86309x + 912,83536 \quad R^2 = 0,974 \quad (9)$$

где y_6 – плотность сырья, кг/м³, y_7 – плотность бензина, кг/м³, y_8 – плотность легкого газойля, кг/м³, y_9 – плотность тяжёлого газойля, кг/м³.

В табл. 7 сведены данные по плотности сырья и продуктов коксования, полученные расчётным путём:

Таблица 7. Расчётные данные показателей плотности сырья и продуктов коксования, кг/м³
Table 7. Calculated data of raw material and coking product density indicators, kg/m³

Показатели Indicators	Обозначение Symbol	Мазут Fuel oil	Полугудрон Flux	Гудрон Tar
Сырьё Raw materials	Y_6	905,535	936,540	944,515
Бензин Gasoline	Y_7	746,028	747,087	747,969
ЛГ LGO	Y_8	834,055	836,174	837,939
ТГ HGO	Y_9	891,239	894,752	899,735

Сравнение этих расчётных плотностей с экспериментальными значениями плотности показывает их хорошее совпадение.

По следующим уравнениям (10–11) в зависимости от коксуемости сырья определили выход исходного сырья (остатка) на нефть и выход летучих веществ в сыром коксе. Полученные результаты приведены в табл. 8.

$$y_{10} = 0,09384x^2 - 6,38570x + 83,96005 \quad R^2 = 0,99978 \quad (10)$$

$$y_{11} = -0,01337x^2 + 0,06039x + 7,90333 \quad R^2 = 0,997 \quad (11)$$

где y_{10} – выход исходного сырья на нефть, %; y_{11} – выход летучих веществ в сыром коксе, %.

Таблица 8. Выход исходного сырья на нефть и выход летучих веществ в коксе, % масс.
Table 8. Yield of feedstock in oil and yield of volatile substances in coke, % by weight

Показатели Indicators	Обозначение Symbol	Метод Technique	Мазут Fuel oil	Полугудрон Flux	Гудрон Tar
Выход сырья на нефть Yield of raw materials to oil	Y_{10}	эксперимент test	49,500	34,400	28,200
		расчёт calculation	49,551	34,561	28,143
Выход летучих в коксе Volatile yield in coke	Y_{11}	эксперимент test	7,8	7,4	7,1
		расчёт calculation	7,794	7,381	7,107

При составлении математической модели для расчёта содержания серы в продуктах коксования применим тот же метод описания (12–16):

$$z_1 = 0,27455x - 0,02318 \quad R^2 = 0,99895 \quad (12)$$

$$z_2 = 0,37273x + 0,05409 \quad R^2 = 0,98592 \quad (13)$$

$$z_3 = 0,47091x + 0,06136 \quad R^2 = 0,97184 \quad (14)$$

$$z_4 = 0,78364x + 0,62045 \quad R^2 = 0,95544 \quad (15)$$

$$z_5 = 0,03527x + 0,00291 \quad R^2 = 0,97756 \quad (16)$$

где x – содержание серы в исходном сырье, %; z_1 – содержание серы в бензине, %; z_2 – содержание серы в легком газойле, %;

z_3 – содержание серы в тяжёлом газойле, %; z_4 – содержание серы в сыром коксе, %; z_5 – содержание ванадия в коксе, %.

Сравнение полученных расчётных данных с экспериментальными представлено в табл. 9:

Таблица 9. Данные по содержанию серы в нефтепродуктах и ванадия в коксе, % масс.
Table 9. Data on the content of sulfur in petroleum products and vanadium in coke, % by weight

Показатели Indicators	Обозначение Symbol	Метод Technique	Мазут Fuel oil	Полугудрон Flux	Гудрон Tar
Бензин Gasoline	Z_1	эксперимент test	0,120	0,130	0,150
		эксперимент test	0,120	0,131	0,150
ЛГ LGO	Z_2	эксперимент test	0,250	0,260	0,290
		эксперимент test	0,248	0,263	0,289
ТГ HGO	Z_3	эксперимент test	0,310	0,320	0,360
		эксперимент test	0,306	0,325	0,358
Сырой кокс Crude coke	Z_4	эксперимент test	1,020	1,070	1,110
		эксперимент test	1,028	1,059	1,114
Ванадий Vanadium	Z_5	эксперимент test	0,021	0,023	0,025
		эксперимент test	0,0213	0,0227	0,0251

Результаты и обсуждение

На основании экспериментальных данных и возможности работы УЗК АНПЗ было определено, что при переработке гудрона получается кокс лучшего качества, чем при переработке мазута и полугудрона.

Точность расчётов по разработанной модели оценивалась по значениям коэффициента детерминации (R^2). Известно, что если значение коэффициента детерминации близко к единице, то модель является вполне адекватной. Поскольку в расчётах значение этого коэффициента варьирует в пределах 0,95544–0,99895, можно сказать, что данную модель можно использовать для прогноза процесса коксования путём экспресс-определения качественных и количественных показателей продуктов коксования.

Заключение

Экспериментально показано, что с углублением отбора вакуумного газойля из мазута и доведением коксуемости сырья коксования до 10% существенно увеличивается выход сырого кокса – с 9–10% до 17–18% – при одновременном сохранении его качества.

Разработана математическая модель для прогнозирования материального баланса процесса коксования и основных параметров

качества получаемых дистиллятных продуктов и сырого кокса по значениям показателей «коксуемость» и «содержание серы» в исходном сырье коксования.

Данная модель может быть эффективно использована для обучения персонала в области моделирования и прогнозирования качества выпускаемых коксов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Карабасова Н.А. – проведение опытов, анализ полученных продуктов, написание текста, иллюстрации; Кайрлиева Ф.Б. – концепция исследования, математическое моделирование, расчёт по полученным экспериментальным данным.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. The greatest contribution is distributed as follows: Nagima A. Karabassova – conducting experiments, analyzing the obtained products, writing, graphics; Fazilat B. Kayrliyeva – research concept, mathematical modeling, calculation based on experimental data obtained.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковальчук Р.С., Климов Д.С., Морозкин Ю.Г., Слепокуров И.И. Цели и задачи реконструкции и развития коксового производства ООО «Лукойл-Волгограднефтепереработка». Технико-экономический анализ // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2018. №7. С. 11–15.
2. Aubakirov Y.A., Sassykova L.R., Buzayev N.A., et al. Investigation of obtaining low-sulfur coke from heavy oil residues in the presence of a recycling agent // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 31, Part 3. P. 514–517. doi: [10.1016/j.matpr.2020.06.060](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.060).
3. Теляшев Э., Хайрудинов И. Нефтепереработка: новые-старые разработки // *Химический журнал*. 2004. №10–11. С. 68–71.
4. Шигапов Р.И., Нуриева Э.Н., Сигдеева Г.С. Оптимизация работы установок переработки тяжёлых нефтяных остатков в процессах замедленного коксования // *Бюллетень науки и практики*. 2024. Т. 10, №6. С. 446–453. doi: [10.33619/2414-2948/103/47](https://doi.org/10.33619/2414-2948/103/47).
5. Ахметов М.М., Карпинская Н.Н., Теляшев Э.Г. Нефтяной кокс: получение, качество, прокаливание, области использования. Уфа: АО «ИНХП», 2018. 584 с.
6. anpz.kz [интернет]. Кокс нефтяной прокаленный КП-1, КП-2 анодный для алюминиевой промышленности по ТУ 38.1011341-90 «Коксы нефтяные прокаленные. Технические условия». Доступ по ссылке: <https://www.anpz.kz/product/>. Дата обращения: 12.07.2024.

REFERENCES

1. Kovalchuk RS, Klimov DS, Moroshkin YG, Slepokurov II. Goals and tasks at reconstruction and development of coke production department in Lukoil-VolgoGradneftepererabotka OC. Technical and economic analysis. *World of oil products. The Oil Companies' Bulletin*. 2018;7:11–15.
2. Aubakirov YA, Sassykova LR, Buzayev NA, et al. Investigation of obtaining low-sulfur coke from heavy oil residues in the presence of a recycling agent. *Materials Today: Proceedings*. 2020;31(3):514–517. doi: [10.1016/j.matpr.2020.06.060](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.060).
3. Telyashev Y, Khayrudinov I. Neftpererabotka: novye-starye razrabotki. *The Chemical Journal*. 2004;10–11:68–71. (In Russ).
4. Shigapov R, Nurieva E, Sagdeeva G. Optimization of operation of heavy oil residue processing units in delayed coking processes. *Bulletin of Science and Practice*. 2024;10(6):446–453. doi: [10.33619/2414-2948/103/47](https://doi.org/10.33619/2414-2948/103/47).
5. Akhmetov MM, Karpinskaya NN, Telyashev EG. Neftyanoy koks: polucheniye, kachestvo, prokalivaniye, oblasti ispolzovaniya. Ufa: INHP; 2018. 584 p. (In Russ).
6. anpz.kz [Internet]. Koks neftyanoy prokalenny KP-1, KP-2 anodnyy dlya alyuminiyevoy promyshlennosti po TU 38.1011341-90 «Koksy neftyanye prokalennyye. Tekhnicheskkiye usloviya» [cited 2024 Jul 12]. Available from: <https://www.anpz.kz/product/>. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ***Карабасова Нагима Асылбековна**ORCID [0000-0001-6121-1125](https://orcid.org/0000-0001-6121-1125)e-mail: nagima@inbox.ru.**Кайрлиева Фазилат Басаровна**

канд. техн. наук

ORCID [0000-0001-5323-0916](https://orcid.org/0000-0001-5323-0916)e-mail: kairliyeva.fazi@mail.ru.**AUTHORS' INFO*****Nagima A. Karabassova**ORCID [0000-0001-6121-1125](https://orcid.org/0000-0001-6121-1125)e-mail: nagima@inbox.ru.**Fazilat B. Kayrliyeva**

Cand. Sc. (Engineering)

ORCID [0000-0001-5323-0916](https://orcid.org/0000-0001-5323-0916)e-mail: kairliyeva.fazi@mail.ru.

*Автор, ответственный за переписку/Corresponding Author