



УДК 665.642.4

Влияние параметров процесса замедленного коксования асфальта на выход и качество жидких и твердофазных продуктов

Н.К.КОНДРАШЕВА, В.А.РУДКО[✉], М.Ю.НАЗАРЕНКО, Р.Р.ГАБДУЛХАКОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Исследовано влияние избыточного давления в процессе замедленного коксования асфальта, полученного процессом пропановой деасфальтизации гудрона, на выход и физико-химические свойства компонентов углеводородных топлив и твердофазного продукта – нефтяного кокса. Асфальт подвергали коксованию при температуре 500 °С и избыточном давлении 0,15-0,35 МПа на лабораторной установке замедленного коксования периодического действия. У сырья и полученных в ходе экспериментальных исследований компонентов легких (бензин), средних (легкий газойль) и тяжелых (тяжелый газойль) дистиллятов были определены физико-химические свойства: плотность, вязкость, коксуемость, содержание серы, йодное число, температуры застывания, вспышки и потери текучести, фракционный состав. Были также изучены количественные групповой углеводородный и микроэлементный составы и свойства полученных образцов нефтяного кокса (влажность, зольность, выход летучих, содержание серы и др.). Дана сравнительная оценка их качества в соответствии с требованиями ГОСТ 22898-78 «Коксы нефтяные малосернистые. Технические условия». Кроме того, выявлены закономерности изменения избыточного давления коксования на выход и показатели качества дистиллятных продуктов и нефтяного кокса. С увеличением избыточного давления процесса коксования с 0,15 до 0,35 МПа уменьшается содержание парафино-нафтеновых углеводородов в легком и тяжелом газойлях замедленного коксования. Общей закономерностью при коксовании асфальта является увеличение выхода кокса и углеводородного газа при увеличении избыточного давления с 0,15 до 0,35 МПа.

Ключевые слова: замедленное коксование; асфальт; нефтяной кокс; бензин; газойли; топлива

Благодарность. Работа выполнена в рамках Государственного задания «Развитие научных основ инновационных технологий переработки тяжелого углеводородного сырья в экологически чистые моторные топлива и новые углеродные материалы с регулируемой макро- и микроструктурной организацией мезофазы». Исследования проводились с привлечением лабораторной базы Центра коллективного пользования Санкт-Петербургского горного университета.

Как цитировать эту статью: Кондрашева Н.К. Влияние параметров процесса замедленного коксования асфальта на выход и качество жидких и твердофазных продуктов / Н.К.Кондрашева, В.А.Рудко, М.Ю.Назаренко, Р.Р.Габдулхаков // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 97-104. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.97

Введение. В Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 г. (распоряжение Правительства Российской Федерации от 22 декабря 2018 г. № 2914-р) в части создания новых технологий переработки нефти, относящейся ко второй группе значимых для страны полезных ископаемых (по количеству и качеству балансовых запасов минерального сырья в России), предусматривается необходимость увеличения глубины переработки нефти и осуществления комплексной модернизации нефтеперерабатывающей промышленности. Для этого в ближайшей перспективе в России будет продолжаться прирост мощностей по процессам переработки тяжелого нефтяного сырья, наиболее ликвидным из которых является термический процесс замедленного коксования, который позволяет углубить переработку на нефтеперерабатывающем заводе до 98 % [7]. Суммарная загрузка установок замедленного коксования по сырью в России к 2020 г. составит около 13,6 млн т [9]. При помощи данного процесса можно не просто увеличивать объем выпускаемых светлых (бензин, керосин, дизельное топливо) и темных (судовые и котельные топлива) нефтепродуктов, но и расширить ассортимент товарной продукции углеродными материалами, такими как нефтяной кокс, пек, коксующая добавка и др. [12]. Углеродные материалы – твердофазные продукты процесса замедленного коксования – получают широкое распространение в металлургии в качестве сырья для производства самообжигающихся анодов и электродов для электроплавки, а также в химической промышленности в качестве сорбентов и используются в других отраслях [4, 6].

Изучение влияния технологических параметров процесса замедленного коксования (давление, температура, время, коэффициент рециркуляции) в зависимости от качества используемого сырья на процесс его коксования позволит повысить выход и качество получаемых жидких и твердых продуктов [1, 10].

И.Р.Хайрудинов и др. [5] проводили исследования возможности увеличения производства малосернистого нефтяного кокса из гудрона, остатка висбрекинга, тяжелого газойля каталитического крекинга, экстракта селективной очистки масел, полученных переработкой смеси западно-сибирских нефтей на предприятии ПАО «Газпромнефть-ОНПЗ», в том числе влияние избыточного давления коксования (0,1 и 0,3 МПа) на выход и качество жидких компонентов топлив и нефтяного кокса. Результаты выхода жидких и твердофазных продуктов коксования, полученные на лабораторной установке, приведены в табл.1.

Таблица 1

Выход продуктов при коксовании сырья на лабораторной кубовой установке [5]

Сырьевые компоненты	Давление, МПа	Выход продуктов, % по массе		
		Кокс	Дистиллят	Газ + потери
Гудрон	0,3	27,0	57,9	15,1
	0,1	22,6	64,5	12,9
Остаток висбрекинга	0,3	28,2	58,7	13,1
	0,1	24,1	65,5	10,4
Тяжелый газойль каталитического крекинга	0,3	26,1	59,3	14,6
	0,1	21,8	68,9	9,3
Экстракты селективной очистки масел	0,3	16,5	68,6	14,9
	0,1	9,7	82,1	8,2

С повышением избыточного давления от 0,1 до 0,3 МПа возрастает выход кокса на 4,1-4,4 % для гудрона, остатка висбрекинга и тяжелого газойля каталитического крекинга и на 6,8 % для экстрактов селективной очистки масел. Выход суммы дистиллятов, наоборот, снижается: на 6,6 и 6,8 % для гудрона и остатка висбрекинга, на 9,6 и 13,5 % для тяжелого газойля каталитического крекинга и экстрактов селективной очистки масел. Соответственно повышается выход газа (с учетом потерь) на 2,2-6,7 %.

М.О.Андропов и др. [2] исследовали процесс термолитического разложения мазута при температуре 420 и 450 °С, давлении 0,01 и 0,20 МПа и времени термолитического разложения от 3,5 до 14,0 ч. Был получен материальный баланс процесса термолитического разложения мазута при различных условиях (табл.2).

Таблица 2

Выход продуктов при термолитическом разложении сырья с получением кокса [2]

Давление, МПа	Температура, °С	Выход продуктов, % по массе			Время, ч
		Кокс	Дистиллят	Газ	
0,01	420	8,28	76,67	15,05	12,0
	450	7,40	77,18	15,42	10,0
0,20	420	10,06	74,71	15,23	14,0
	450	9,56	73,71	16,73	13,5

В зависимости от продолжительности проведения процесса, температуры и давления можно извлечь высоковязкий жидкий остаток, пек или нефтяной кокс. Для получения кокса при температуре 420 и 450 °С, в качестве конечного твердофазного продукта, продолжительность термолитического разложения должна быть 10-12 ч при давлении 0,01 МПа и 13,5-14,0 ч при 0,20 МПа. Повышение давления термолитического разложения с 0,01 до 0,20 МПа при равной температуре процесса приводит к увеличению выхода кокса на 2,16 и 1,78 %, уменьшению суммы дистиллятов 1,96 и 3,47 %, а также к возрастанию

количества образующихся газов на 0,18 и 1,31 % соответственно при 420 и 450 °С. Повышение температуры с 420 до 450 °С при постоянном давлении приводит к увеличению суммарного выхода дистиллятов и углеводородного газа и к уменьшению выхода кокса.

В работе [3] приведены исследования влияния вида нефтяных остатков, полученных на Атырауском нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ), – мазута, полугудрона и гудрона при коксовании – в лабораторном реакторе на выход (табл.3) дистиллятных продуктов и сырых коксов при избыточном давлении 0,20 МПа, времени коксования 2,0-2,5 ч, отсчитываемого с момента появления паров в приемнике до окончания опыта, проводимого при температуре 460-470 °С с последующим поднятием температуры до 550-600 °С для подсушки кокса и выдерживанием в течение 30 мин. В результате коксования нефтяных остатков получено продуктов: сырого кокса 9,7-17,9 %, суммы дистиллятов коксования 72,9-80,0 %, а углеводородного газа около 7,9-8,9 %.

Цель данной работы – установление влияния избыточного давления процесса коксования асфальта пропановой деасфальтизации гудрона из смеси западно-сибирских нефтей на выход и показатели качества получаемых дистиллятных продуктов и нефтяного кокса.

Таблица 3

Выход продуктов (% по массе) при коксовании остатков Атырауского НПЗ [3]

Продукты коксования	Сырье коксования		
	Мазут	Полугудрон	Гудрон
Жирный газ	8,9	8,7	7,9
Бензин	15,4	14,7	13,1
Легкий газойль	39,6	37,5	38,6
Тяжелый газойль	25,0	23,4	21,2
Сырой кокс	9,7	14,2	17,9
Потери	1,7	1,5	1,3

Методология. Для проведения экспериментов использовали асфальт, полученный процессом пропановой деасфальтизации гудрона смеси западно-сибирских нефтей. Проводили три опыта по коксованию асфальта при постоянном давлении процесса: первый при 0,15 МПа, второй – 0,25 МПа, третий – 0,35 МПа. Температура конца процесса коксования во всех опытах составляла 500 °С. В каждом опыте были получены представительные образцы нефтяного кокса и суммы дистиллятов, последние впоследствии разгонялась при атмосферном давлении на бензиновую фракцию (н.к. – 180 °С), легкий (180-340 °С) и тяжелый (340 °С – к.к.) газойль.

Для проведения экспериментов по коксованию тяжелого нефтяного сырья (асфальта) использовали лабораторную установку, состоящую из реакционного блока и блока сбора дистиллятов. В реакционный блок входят стальной реактор коксования и электрическая печь с тремя независимыми нагревательными зонами для поддержания равномерной температуры по высоте коксующегося слоя, реактор оснащен манометром для контроля давления. Отвод газожижкостной продуктовой смеси осуществлялся по трубке, расположенной в крышке реактора, через игольчатый клапан, откуда поступал в теплообменник типа «труба в трубе» и в колбу сбора дистиллятов, а углеводородный газ – в вытяжную систему. Подробнее устройство установки и процесса коксования описано в работе [8]. Загрузка по сырью не превышала 2/3 объема реактора.

Сырье процесса коксования – асфальт анализировали по следующим показателям качества: плотность, коксуемость, вязкость по Брукфильду, содержание золы, серы, микроэлементов, температуры вспышки и потери текучести, фракционный состав и групповой углеводородный состав.

Для легких дистиллятных продуктов – бензиновых фракций были определены: плотность, йодное число, содержание серы, сероводорода, фракционный состав, кинематическая вязкость, групповой углеводородный состав.

Для среднедистиллятных фракций – легких газойлей коксования определяли: плотность, содержание серы, йодное число, групповой углеводородный состав, фракционный состав, кинематическую вязкость, температуры застывания и вспышки.



Для тяжелых дистиллятов (газойлей) коксования были определены следующие физико-химические свойства: плотность, коксуемость, содержание серы, кинематическая вязкость, температуры вспышки и потери текучести, групповой углеводородный состав, фракционный состав.

Анализ группового углеводородного состава асфальта, а также полученных средних и тяжелых дистиллятов проводили на хроматографе «Градиент-М» (АО «ГУП «ИНХП РБ», Россия) с детектором по теплопроводности методом жидкостно-адсорбционной хроматографии на стеклянных колонках высотой 30 см и диаметром 1,2-1,4 мм. В качестве адсорбента использовали модифицированный силикагель АСК, а в качестве элюатов – сложную смесь растворителей с градиентно-вытеснительным режимом подачи. Исследуемые объекты разделяются на следующие семь групп: парафино-нафтенy, ароматика (легкая, средняя и тяжелая), смолы (I и II) и асфальтены.

Исследованы физико-химические свойства образцов сырого нефтяного кокса, полученные в ходе каждого из трех опытов. Определяли влажность, зольность, выход летучих веществ, пористость, действительную и кажущуюся плотность (без предварительной прокалки), содержание серы и микроэлементов.

Определение серы и микроэлементов в полученных образцах сырого нефтяного кокса проводили с помощью рентгенофлуоресцентной спектromетрии без предварительного озоления образцов с применением метода добавок на последовательном волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре XRF-1800 Shimadzu (Центр коллективного пользования Санкт-Петербургского горного университета). Аппарат оснащен рентгеновской трубкой с анодом из меди мощностью 2,7 кВт. Подробный способ определения серы и микроэлементов показан в работе [11].

Обсуждение. Качество сырья коксования оценивали по показателям, которые напрямую или косвенно характеризуют его способность быть превращенным в нефтяной кокс при высокотемпературном термоллизе.

Показатели качества асфальта следующие:

Физико-химические свойства.....	Значения
Плотность при 20 °С, кг/м ³	1024,0
Коксуемость, %	15,32
Содержание серы, %.....	1,60
Вязкость по Брукфильду при 80 °С, с	391
Содержание золы, %.....	0,18
Температура вспышки, °С.....	> 344
Температура потери текучести, °С.....	60
Фракционный состав, % по объему:	
Температура начала кипения, °С.....	457
5 % выкипает при температуре	512
10 % выкипает при температуре	532
Температура конца кипения, °С.....	543
Выход, % по объему	14

Косвенно оценить склонность к коксообразованию нефтепродуктов можно по значениям показателей плотности и вязкости – чем они выше, тем выше этот показатель. Однако и его, и физико-химические показатели качества сырья коксования определяет групповой углеводородный состав (табл.4). Плотность и вязкость нефтепродуктов возрастают в ряду следующих групп углеводородов: парафино-нафтеновые, ароматические (легкие, средние, тяжелые), смолы (I и II), асфальтены.

Результат влияния избыточного давления в процессе коксования на выход получаемых продуктов представлен в табл.5. В процессе коксования асфальта при температуре 500 °С были получены углеводородный газ, нефтяной кокс и сумма дистиллятов, которая впоследствии разгонялась на бензиновую фракцию (н.к. –180 °С), легкий газойль (180-340 °С) и тяжелый газойль (340 °С – к.к.) коксования.

Таблица 4

Групповой углеводородный состав сырья и дистиллятных продуктов коксования (% по массе)

Вещество	Давление, МПа (изб.)	Парафино-нафтеновые углеводороды	Олефины	Ароматические углеводороды			Смолы		Асфальтены
				легкие	средние	тяжелые	I	II	
Асфальт	–	8,7	–	8,6	10,5	40,6	16,2	12,2	3,2
Бензин	0,15	66,0	19,4		14,6		–	–	–
	0,25	67,4	18,9		13,7		–	–	–
	0,35	68,0	18,5		13,5		–	–	–
Легкий газойль	0,15	60,5	–	16,0	11,9	8,1	1,7	1,8	–
	0,25	59,3	–	15,7	12,8	8,2	1,8	2,2	–
	0,35	57,6	–	15,1	14,6	8,2	1,8	2,7	–
Тяжелый газойль	0,15	44,9	–	12,1	9,5	25,0	4,2	4,3	–
	0,25	42,0	–	16,1	8,1	25,3	3,9	4,6	–
	0,35	38,6	–	19,6	7,9	25,7	3,5	4,7	–

Таблица 5

Выход продуктов при коксовании асфальта

Давление, МПа (изб.)	Выход продуктов, % по массе				
	Жирный газ (+ потери)	Бензин	Легкий газойль	Тяжелый газойль	Нефтяной кокс
0,15	15,00	7,59	26,87	21,87	28,67
0,25	15,27	8,50	29,72	16,51	30,00
0,35	16,27	9,02	31,38	12,33	31,00

Общей закономерностью при коксовании асфальта является увеличение выхода кокса и углеводородного газа при росте избыточного давления от 0,15 до 0,35 МПа. При повышении давления степень испарения реакционноспособных молекул уменьшается, так как замедляется самоиспарение, увеличивается время пребывания их в жидкой фазе, что приводит к снижению выхода жидких продуктов и увеличению выхода кокса. Данная закономерность вызвана протекающими реакциями крекинга образующихся жидких дистиллятов до углеводородных газов и реакциями термополиконденсации полициклических ароматических углеводородов до кокса. При этом соответственно с увеличением давления коксования уменьшается выход суммы дистиллятов, а именно тяжелого газойля.

Анализ результатов выхода отдельных фракций дистиллятов показал, что при изменении давления коксования с 0,15 до 0,35 МПа увеличивается выход бензина на 5,09 % (от первоначального), легкого газойля – на 5,78 %, а тяжелого газойля снижается на 31,99 % (от его первоначального содержания при давлении коксования 0,15 МПа).

Анализ результатов физико-химических свойств бензина, коксования (табл.6) асфальта показал, что при увеличении избыточного давления с 0,15 до 0,35 МПа снижается содержание олефиновых углеводородов с 19,4 до 18,5 %, что подтверждает значение показателя йодного числа, характеризующее содержание ненасыщенных связей, которое также уменьшается с 64,7 до 57,8 г I₂/100 г.

При анализе результатов значений показателей качества легких газойлей коксования гудрона и асфальта (табл.6), полученных при различном давлении, можно отметить некоторые закономерности: с увеличением давления с 0,15 до 0,35 МПа улучшаются низкотемпературные свойства легкого газойля коксования асфальта: температура застывания снижается на 5 °С (до –29 °С). Содержание серы при увеличении давления коксования незначительно уменьшается для легкого газойля коксования. Значения вязкости и плотности проходят через экстремум с минимумом при давлении 0,25 МПа. Йодное число проходит через экстремум с максимумом при избыточном давлении процесса коксования асфальта 0,25 МПа.

С увеличением избыточного давления процесса коксования с 0,15 до 0,35 МПа содержание парафино-нафтенных углеводородов в легком газойле уменьшается с 60,5 до 57,6 % (см. табл.4).



Таблица 6

Показатели качества дистиллятов коксования асфальта

Физико-химические свойства	Бензин			Легкий газойль			Тяжелый газойль		
Давление процесса, МПа	0,15	0,25	0,35	0,15	0,25	0,35	0,15	0,25	0,35
Плотность при 20°C, кг/м ³	768,1	755,7	756,9	859,5	856,9	859,2	945,0	954,6	962,2
Коксуемость по Конрадсону, % по массе	—	—	—	—	—	—	0,12	0,42	0,51
Содержание общей серы, %	0,41	0,41	0,41	1,07	1,06	1,01	1,49	1,52	1,54
Содержание сероводорода, %	—	—	0,0020	—	—	—	—	—	—
Йодное число, г I ₂ /100 г	64,7	65,0	57,8	38,2	38,9	37,6	—	—	—
Вязкость при 20 °С, мм ² /с	0,88	0,88	0,91	3,74	3,65	3,95	—	—	—
Вязкость при 100 °С, мм ² /с	—	—	—	—	—	—	5,54	5,76	5,65
Температура застывания, °С	—	—	—	–22	–25	–29	—	—	—
Температура потери текучести, °С	—	—	—	—	—	—	12	14	16
Температура вспышки, °С	—	—	—	70	71	64	203	207	205
Фракционный состав, % по объему:									
температура начала кипения, °С	69	71	70	168	169	174	329	335	332
5 %	88	92	91	196	192	188	344	342	341
10 %	105	109	107	208	205	201	373	373	372
50 %	137	132	132	266	256	252	392	393	389
90 %	181	182	185	331	321	315	410	406	405
95 %	195	191	193	345	346	336	439	435	431
температура конца кипения, °С	208	207	210	353	359	348	484	480	477

В то же время показатели качества легкого газойля меняются несущественно, значения параметров качества тяжелого газойля коксования асфальта заметно меняются (табл.6) по групповому углеводородному составу и коксуемости. Все это связано с усиленной деструкцией газойлевых компонентов сырья при более длительном пребывании в зоне коксования (из-за повышения давления), что проявляется в резком снижении выхода тяжелого газойля (см. табл.5) и увеличении содержания ароматических углеводородов в этой фракции (см. табл.4).

Как и в случае с легкими газойлями, с увеличением избыточного давления коксования с 0,15 до 0,35 МПа снижается содержание парафино-нафтеновых углеводородов. Содержание смол практически не меняется в процессе коксования (8,2-8,5 %) с изменением в изучаемом интервале избыточного давления.

Результаты изучения физико-химических свойств полученных образцов нефтяного кокса из асфальта при различном избыточном давлении процесса приведены в табл.7.

Таблица 7

Свойства нефтяного кокса процесса коксования асфальта

Физико-химические свойства	Давление, МПа (изб.)		
	0,15	0,25	0,35
Влажность, %	0,90	0,95	1,0
Выход летучих, %	4,8	4,4	4,1
Зольность, %	0,44	0,43	0,45
Действительная плотность, г/см ³	1,61	1,59	1,73
Кажущаяся плотность, г/см ³	0,75	0,84	0,83
Общая пористость, %	53,0	47,0	52,0
Микроструктура, балл	2,5	2,6	2,6
Содержание ванадия, ppm	210	190	190
Содержание серы, %	1,80	1,76	1,72

Содержание влаги в нефтяном коксе (табл.7), полученном из асфальта при давлении 0,15; 0,25 и 0,35 МПа, составляет 0,90; 0,95 и 1,0 % соответственно. Выход летучих для нефтяного кокса находится в пределах 4,1-4,8 % по массе. Зольность не более 0,45 %. Содержание ванадия



от 190 до 210 ppm показывает, что данный кокс может быть использован в качестве сырья для его извлечения. Данному процессу посвящена отдельная работа [14]. Полученные значения влажности, выхода летучих веществ и зольности удовлетворяют требованиям ГОСТ 22898-78 «Коксы нефтяные малосернистые. Технические условия»: влажность $\leq 3,0\%$, выход летучих $\leq 6-8\%$ и зольность $\leq 0,30-0,80\%$.

Закключение. Полученные данные показывают, что при направленном ведении процесса коксования тяжелого нефтяного сырья (на примере асфальта), можно управлять составом и качеством легких, средних и тяжелых дистиллятных продуктов в интервале давлений от 0,15 до 0,35 МПа.

При целевом назначении процесса коксования для производства средних и тяжелых дистиллятов, например для использования их в качестве компонентов судовых топлив, рациональным является ведение процесса при более низком давлении (в изучаемом интервале – это 0,15 МПа). При таком давлении выход тяжелого газойля коксования асфальта составил 21,87 %. Однако склонность к пенообразованию существенно ограничивает возможность снижения давления в промышленном процессе замедленного коксования, поэтому при промышленной реализации необходимо контролировать степень заполнения коксовой камеры во избежание переброса вспенивающейся массы во фракционирующую колонну.

Результаты анализа выхода и качества нефтяных коксов из асфальта смеси западно-сибирских сернистых нефтей, перерабатываемых на НПЗ России, подтвердили возможность улучшения данных параметров за счет увеличения давления на установках замедленного коксования до 0,35 МПа. Высокое значение содержания серы (1,72-1,80 %) не позволяет классифицировать полученные образцы кокса по ГОСТ 22898-78 «Коксы нефтяные малосернистые. Технические условия». Существует высокая вероятность несоответствия стандарту на малосернистые электродные коксы даже после прокалики при 1100 °С, при котором содержание серы уменьшается вплоть до 50 % от ее содержания в сыром коксе. Однако сернистый кокс из асфальта может быть использован, например, в качестве топлива при производстве портландцемента, поскольку допустимое содержание оксида серы (IV) в нем должно быть от 1 до 4 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анчита Х. Технология HYDRO-IMP для переработки тяжелой нефти // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 229-234. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.229
2. Исследование термолитиза сибирского усредненного мазута марки М-40 / М.О.Андропов, В.В.Жук, А.Н.Третьяков, Р.А.Чуркин, В.А.Яновский // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 382. С. 225-229.
3. Карабасова Н.А. Зависимость количества нефтяного кокса от характеристики разведенного углеводородного сырья / Н.А.Карабасова, Г.А.Оразова, И.Р.Хайрудинов // Геология, география и глобальная энергия. 2010. № 4. С. 67-72.
4. Кондрашева Н.К. Влияние химического состава и качества тяжелой ярегской нефти на выбор технологии ее переработки / Н.К.Кондрашева, Х.Анчита // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 833-838. DOI: 10.18454/PMI.2016.6.833
5. Пути увеличения производства малосернистого кокса из остатков западно-сибирских нефтей на примере ОАО «Газпромнефть-Омский НПЗ» / И.Р.Хайрудинов, А.А.Тихонов, С.А.Мустафина, Э.Г.Теляшев // Башкирский химический журнал. 2009. Т. 16. № 4. С. 139-144.
6. Bazhin V.Y. Structural modification of petroleum needle coke by adding lithium on calcining // Coke and Chemistry. 2015. Vol. 58. № 4. P. 138-142. DOI: 10.3103/S1068364X15040043
7. Decant-oil coking gasoils for production of industrial carbon / V.P.Zaporin, G.G.Valyavin, I.V.Rizvanov, A.F.Akhmetov // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2007. Vol. 43. № 4. P. 326-329. DOI: 10.1007/s10553-007-0058-y
8. Effect of Delayed Coking Pressure on the Yield and Quality of Middle and Heavy Distillates Used as Components of Environmentally Friendly Marine Fuels / N.K.Kondrasheva, V.A.Rudko, D.O.Kondrashev, R.R.Gabdulkhakov, I.O.Derkunskii, R.R.Konoplin // Energy & Fuels. 2019. Vol. 33. № 1. P. 636-644. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b03756
9. Kapustin N.O. Exploring the implications of Russian Energy Strategy project for oil refining sector / N.O.Kapustin, D.A.Grushevenko // Energy Policy. 2018. Vol. 117. P. 198-207. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.03.005
10. Kondrasheva N.K. Technology of the oil shale processing to obtain products and semi-products for the chemical and metallurgical industries / N.K.Kondrasheva, S.N.Saltykova, M.Yu.Nazarenko // XVIII International Coal Preparation Congress. 2016. P. 513-518. DOI: 10.1007/978-3-319-40943-6_78
11. Kondrasheva N.K. Determination of Sulfur and Trace Elements in Petroleum Coke by X-Ray Fluorescent Spectrometry / N.K.Kondrasheva, V.A.Rudko, V.G.Povarov // Coke and Chemistry. 2017. Vol. 60. № 6. P. 247-253. DOI: 10.3103/S1068364X17060035
12. Properties and Applications of Distillate Fractions from Highly Stable Dispersions of Liquid Pyrolysis Products / A.A.Alaseeva, S.I.Khusnutdinov, S.M.Petrov, I.S.Khusnutdinov, A.G.Safiulina, N.Y.Bashkirtseva // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2018. Vol. 54. № 3. P. 271-277. DOI: 10.1007/s10553-018-0923-x



13. Influence of Parameters of Delayed Coking Process and Subsequent Calculation on the Properties and Morphology of Petroleum Needle Coke from Decant Oil Mixture of West Siberian Oil / N.K.Kondrasheva, V.A.Rudko, M.Yu.Nazarenko, V.G.Povarov, I.O.Derkunskii, R.R.Konoplin, R.R.Gabdulkhakov // *Energy & Fuels*. 2019. Vol. 33. № 7. P. 6373-6379. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b01439

14. Influence of leaching parameters on the extraction of vanadium from petroleum coke / N.K.Kondrasheva, V.A.Rudko, R.E.Lukonin, I.O.Derkunskii // *Petroleum Science and Technology*. 2019. Vol. 37. № 12. P. 1455-1462. DOI: 10.1080/10916466.2019.1590406

Авторы: **Н.К.Кондрашева**, д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой, natalia_kondrasheva@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **В.А.Рудко**, канд. техн. наук, ассистент, rva1993@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **М.Ю.Назаренко**, канд. техн. наук, ассистент, mah.nazarenko@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **Р.Р.Габдулхаков**, аспирант, renat18061995@gmail.com (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 30.04.2019.

Статья принята к публикации 30.08.2019.