

МЕХАНОДЕСТРУКЦИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ НЕФТИ С ПОМОЩЬЮ ДЕЗИНТЕГРАТОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

С.И. Воробьев, В.Н. Торховский, И.А. Тупторский, И.К. Казмалы*

*Нефтеперерабатывающая компания «Инвест-Ойл»

Проведены исследования по изучению изменений структуры и свойств нефтяного сырья, происходящих при его течении под влиянием высокого давления. Механохимическое воздействие создавали новым отечественным устройством дезинтеграционным агрегатом высокого давления ДА-1. Объектами исследования служили образцы сырых нефтей и отдельных фракций нефтепереработки.

Согласно прогнозным оценкам, сделанным в 80–90-х годах прошлого века, основным сырьем для нефтеперерабатывающей промышленности в XXI веке будут тяжелые высоковязкие смолистые нефти [1]. Ресурсы такого сырья будут пополняться и за счет извлечения остаточных нефтей при воздействии на продуктивные пласты на поздней стадии их разработки. По данным [2] остаточные нефти месторождений Западной Сибири и Урало-Поволжья характеризуются повышенными (до 0.92–0.99 г/см³ при 20 °С) значениями плотности, концентрация асфальтенов в них в 3–9 раз, а смол в 1.5–3 раза выше, чем в извлекаемых нефтях. Средние молекулы смол остаточных нефтей крупнее в 1.1–1.15 раз за счет увеличения доли парафиновых фрагментов.

Переработка тяжелых фракций с целью увеличения глубины переработки нефти – важнейшая задача нефтеперерабатывающей промышленности. Тяжелые нефти и их фракции (особенно высококипящие) уже при обычных комнатных температурах являются структурированными дисперсными системами, обладающими определенной структурно-механической прочностью [3]. К таким системам, кроме уже упомянутых нефтей с высоким содержанием смолисто-асфальтеновых веществ (САВ), относятся нефти и нефтепродукты с высоким содержанием высокоплавких парафинов. Образование структуры вызвано стремлением системы к минимуму свободной энергии за счет сцепления отдельных её частиц. Общим свойством пространственно-структурированных систем является сопротивляемость деформации и разрушению под действием внешней механической нагрузки. При достижении определенного значения механической нагрузки (предельного напряжения сдвига) структура разрушается. Проявлением этого эффекта является изменение вязкости и плотности системы.

Изложенные выше положения объясняют

причины, по которым в научных исследованиях все большее внимание уделяется вопросам модификации сырья путем механического воздействия (механохимической активации) на нефтяные дисперсные системы с использованием аппаратов (реакторов) различной конструкции и нетрадиционными принципами влияния на сырье. Привлекательность такого рода аппаратов заключается в том, что они способны обеспечить высокую концентрацию энергии в единице рабочего объема и значительную производительность при относительно малых габаритах [4].

Не ставя перед собой задачу подробного рассмотрения существующих принципов организации механохимического воздействия на компоненты нефтеподобных систем, остановимся на двух работах [4, 5] из этой области. В каждой из них, в свою очередь, приводятся примеры реализованных подходов. В работе [4] исследовали направление и глубину превращения индивидуальных углеводородов и прямогонных нефтяных фракций в центробежно-планетарной мельнице со стальными шарами диаметром 8 мм. Длительность воздействия составляла 5–10 мин. За счет центробежной силы в зонах механического воздействия между шарами и стенками барабана создаются импульсы давления. Механической обработке подвергается трехфазная смесь: твердая фаза, которая вносится в аппарат (катализатор, песок и т.п.) или образуется за счет «натирки» с поверхности шаров и стенок барабана, жидкая углеводородная среда и распределенная в ней газовая фаза. Локальная концентрация напряжений может превысить энергию разрыва связей в молекуле и привести к образованию свободных радикалов, вступающих в обычные химические реакции. Кроме того, импульс давления приводит к сжатию пузырьков газовой фазы и локальному повышению температуры до 450 °С и выше.

Общие выводы из рассматриваемой работы заключаются в том, что основными направлениями механохимических превращений молекул углеводородов, в первую очередь насыщенных, является деструкция, изомеризация, циклизация и присоединение. Образуются соединения как с меньшей, так и с большей молекулярной массой. Процессы циклизации при глубоких превращениях приводят к образованию ароматических структур. Глубина превращений возрастает по мере увеличения молекулярной массы и пределов выкипания нефтяных фракций. На примере прямогонного мазута показано, что увеличение температуры (предварительный нагрев) снижает выход фракции, выкипающей до 350 °С, с 8.6 масс.% (при 20 °С) до 4.8–3.3 масс.% (при 250–350 °С). При этом увеличивается так называемый «нафтенный горб» – смесь хроматографически «неразделяемых» нефтяных углеводородов, также возрастает содержание нафтенев.

В исследованиях, результаты которых изложены в работе [5], впервые для обработки высокопарафинистого остаточного компонента Астраханского стабильного конденсата (кипит в интервале 254–550 °С) использован аппарат вихревого слоя (АВС). На обрабатываемый в этом аппарате нефтепродукт в течение 10–30 с влияет ряд факторов – механическое воздействие, магнитострикционный эффект, кавитация, акустическое воздействие и др. Рабочим телом АВС служат ферромагнитные элементы (иголки) из углеродистой стали, движущиеся с большой скоростью. Под воздействием перечисленных факторов в аппарате с вихревым слоем нефтепродукт меняет свои свойства в зависимости от температуры. При температуре более 110 °С плотность образцов возрастает и при 330 °С ее значение составляет 941.5 кг/м³ (у исходного образца 939.0 кг/м³). Увеличение содержания асфальтенов в составе модифицированных нефтепродуктов от 2 масс.% (исходный образец) до 13 масс.% (температура активации 330 °С) в совокупности с изменением плотности свидетельствует о глубоких структурных и химических изменениях обработанного сырья. Эти изменения связаны с преимущественным протеканием вторичных реакций дегидроконденсации и уплотнения с образованием САВ. В модифицированных образцах в количестве 5–9 об.% появляется фракция, выкипающая выше 550 °С, которая отсутствует в исходном образце. Сделан вывод о том, что обработка

высокопарафинистого остатка конденсата в АВС приводит к одновременному разрушению дисперсной структуры сырья, частичному крекингу и необратимому упорядочению (под действием ферромагнитных частиц) полярных компонентов сырья с формированием новой структуры.

При явном различии способов механоактивации (МА) нефтяного сырья, использованных в [4, 5], полученные результаты схожи в том, что в обоих случаях повышение температуры снижает эффективность воздействия в части увеличения выхода легких дистиллятных фракций. Вероятно, это можно объяснить тем, что с повышением температуры вязкость и степень структурирования нефтяного сырья снижаются. Напротив, наблюдавшееся в работе [4] увеличение глубины превращения при МА более высокомолекулярных нефтепродуктов при 20 °С связано с высокой степенью структурирования и, следовательно, со снижением их кинетической устойчивости.

Нами проведены поисковые исследования по выявлению возможности увеличения выхода легких фракций при переработке жидкого нефтяного сырья под механохимическим воздействием на новом отечественном устройстве – дезинтеграционном агрегате высокого давления ДА-1.

Дезинтеграционной агрегат высокого давления ДА-1 (экструзионный диспергатор) представляет собой аппарат для диспергирования (измельчения) нефтепродуктов на молекулярном уровне вплоть до разрушения сложных органических молекул на более простые составляющие. Принцип действия дезинтеграционного агрегата высокого давления основан на скоростном течении диспергируемых (экструдированных) веществ в узких каналах под действием высоких и сверхвысоких давлений (от 100 до 1500 атм). При этом в процессе обработки возникают большие напряжения сдвига, кавитационные явления при резком переходе обрабатываемых веществ из зоны высокого давления в зону нормального атмосферного давления, кроме этого возникают ударные нагрузки, связанные с торможением скоростного потока диспергируемых веществ неподвижным экраном. Конструкция дезинтеграционного агрегата высокого давления ДА-1 обеспечивает подачу углеводородного сырья из расходной ёмкости в камеру высокого давления и далее с помощью поршневого механизма в диспергирующую головку, где происходит сжатие до

установленного давления. Далее происходит вытеснение обрабатываемых веществ через сопловой блок диспергирующей головки, состоящий из пары сопло–заслонка, в приёмную ёмкость. Диспергирующая головка испытывает на себе сверхвысокие нагрузки от статического давления экструдированного вещества и динамического воздействия скоростного потока. Продавливание нефтепродуктов с помощью поршневого механизма (или насоса) через узкую гомогенизирующую микрощель с регулирующим зазором шириной ~25–500 мкм из области высокого давления в

область нормального атмосферного давления приводит к разрушению нефтепродуктов под действием кавитационного удара, развивающегося при резком перепаде давлений, сил гидравлического трения, возникающих при высокоградиентном течении жидкости. Аппарат работает как в непрерывном, так и в циклическом режиме.

Объектами исследования служили образцы западно-сибирских нефтей с различной плотностью, а также прямогонный мазут, выработанный из товарной смеси нефтей Западной Сибири и Татарстана.

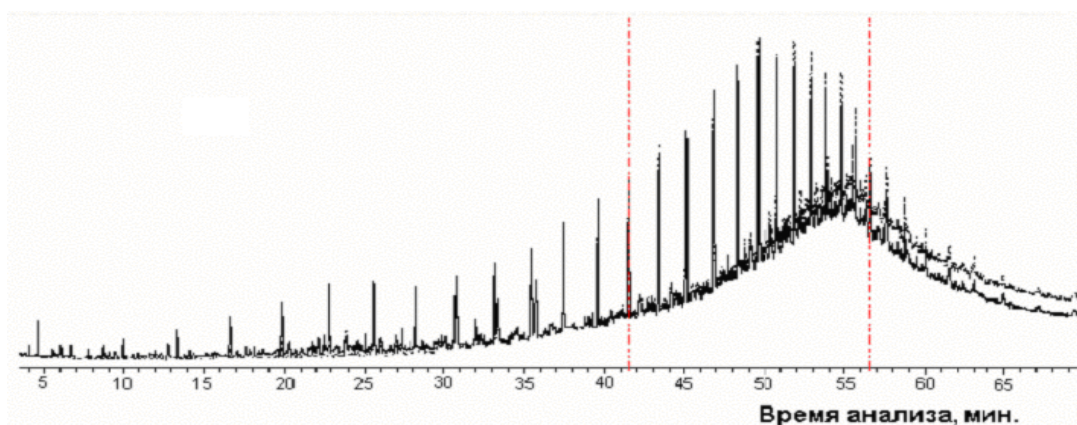


Рис. 1. Совмещенные хроматограммы образцов исходного и преобразованного мазутов (время удерживания: $n\text{-C}_7$ – 4.09 мин; $n\text{-C}_{15}$ – 28.26 мин; $n\text{-C}_{16}$ – 30.75 мин; $n\text{-C}_{32}$ – 55.65 мин; $n\text{-C}_{33}$ – 56.57 мин; $n\text{-C}_{40}$ – 67.11 мин).

Хроматографические исследования¹ проводили до и после обработки нефти и ее отдельных фракций, в том числе мазута, с использованием хроматографа Clarus 500 (Perkin Elmer, США). Применяли аналитическую колонку Elit-1 (30 м x 0.32 мм x 0.25 мкм). Детектор – пламенноионизационный, газ-носитель – азот. При анализе нефтей и нефтепродуктов проводили программирование температуры от 40 °C (изотерма 2 мин) до 260 °C со скоростью нагрева 5°/мин, затем до 335 °C (изотерма 15 мин) со скоростью нагрева 8°/мин. Температура детектора 335 °C, инжектора 260 °C. На анализ направляли 1 мкл пробы, разбавленной хлористым метиленом (1:10 по объему).

Идентификацию компонентов проводили по временам удерживания индивидуальных соединений. Определение концентраций осуществляли методом внутренней нормализации по площадям пиков.

В качестве нефтяного сырья с наибольшей

степенью структурирования использовали прямогонный мазут, выработанный из товарной смеси нефтей Западной Сибири и Татарстана. Образец мазута с температурой 35–45 °C подавали в диспергирующую головку лабораторного варианта устройства ДА-1 (охлаждение рабочей камеры не проводили) и обрабатывали под давлением 200 атм (5 кавитационных ударов в циклическом режиме).

На рис. 1 приведены наложенные друг на друга хроматограммы исходного мазута и мазута, подвергнутого обработке в агрегате ДА-1. При таком совмещении наглядно видно уменьшение после кавитационного воздействия относительного содержания уже упоминавшегося при рассмотрении работы [4] «нафтенного горба» – смеси «неразделяемых» нефтяных углеводородов. Площадь «нафтенного горба» преобразованного мазута (91.50 отн.%) меньше, чем исходного (96.45 отн.%).

¹ Хроматографические исследования проводились в Учебно-научном аналитическом центре природопользования Югорского государственного университета под руководством к.х.н. Ю.В. Коржова.

Из информации, приведенной в работе [6], можно установить, что в составе неразделяемой смеси важную роль играют Т-образные насыщенные углеводороды – алканы (линейного и изопреноидного строения) и цикланы (моно- и полициклические) состава C_{11} – C_{25} . Сообщается также, что Т-образные структуры, где все три радикала обладают изопреноидным строением, могут иметь 30–40 атомов углерода. В качестве характерной черты отмечается способность этилзамещенных Т-образных структур (в отличие от метилзамещенных) при охлаждении не

кристаллизоваться, а застывать в виде стекол, что свойственно для углеводородов смазочных масел. Снижение площади «нафтенного горба» в наших исследованиях связано с разрушением его структуры и выделением углеводородов меньшей молекулярной массы.

На рис. 2 и в табл. 1 представлены данные, иллюстрирующие характер молекулярно-массового распределения соответственно только *n*-алканов и суммы *n*-алканов и алканов изопреноидного строения (C_{14} , C_{15} , C_{19} и C_{20}) в образцах исходного и преобразованного в агрегате ДА-1 мазута.

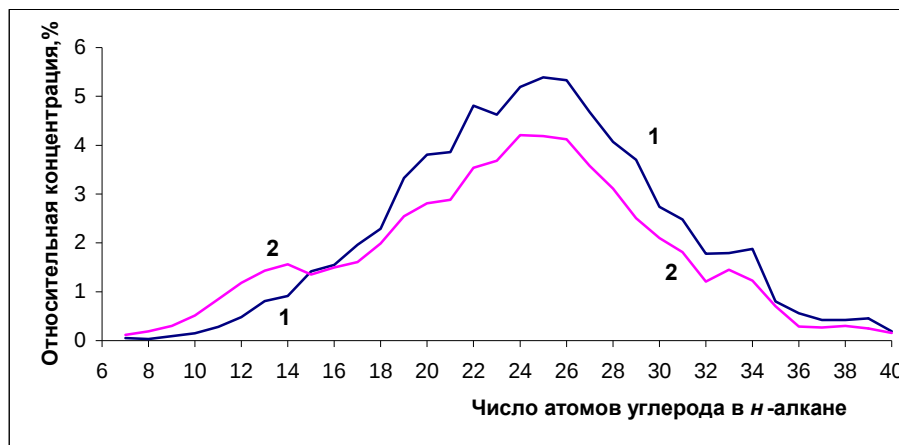


Рис. 2. Содержание *n*-алканов в исходном (1) и преобразованном (2) высоким давлением мазуте.

Из данных рис. 2 и табл. 1 видно, что основным источником относительно низкокипящих алканов C_7 – C_{15} и углеводородов других классов (нафтен, аромат) является преимущественно алканы C_{16} – C_{32} и, в меньшей степени, более высококипящие углеводороды этого ряда. Доля алканов C_7 – C_{15} относительно алканов C_{16} – C_{40} увеличивается в 2 раза.

Один из возможных маршрутов превращения (крекинга), например, 2,6,10,14-тетраметилгексадекана (фитана – *изо*- C_{20}) с образованием 2,6,10-триметилдодекана (фарнезана – *изо*- C_{15}) принципиально представляется в виде брутто-реакции:

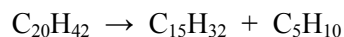


Таблица 1. Содержание алканов нормального и изопреноидного строения в исходном и преобразованном высоким давлением мазуте.

Углеводороды	Содержание в мазуте, %	
	исходном	преобразованном (200 атм, 5 ударов)
Алканы C_7 – C_{15} (т. кип. 98–271 °C), в том числе <i>изо</i> - C_{14} / <i>изо</i> - C_{15}	4.80 0.29/0.29	8.37 0.34/0.54
Алканы C_{16} – C_{32} (т. кип. 287–475 °C), в том числе <i>изо</i> - C_{19} / <i>изо</i> - C_{20}	64.45 1.05/1.80	49.65 0.87/1.38
<i>n</i> -Алканы C_{33} – C_{40} (т. кип. 484–540 °C)	6.51	4.65
Всего алканов,	75.76	62.67
в том числе изопреноидов	3.43	3.13
Представители других классов	24.24	37.33
Всего	100.00	100.00
$\sum C_7$ – $C_{15} / \sum C_{16}$ – C_{40}	0.07	0.15

Аналогичные превращения могут претерпевать как *n*-алканы, так и другие алканы изопреноидного строения.

За счет олигомеризации олефинов и последующей дегидроциклизации образуются циклические (нафтеновые и затем ареновые) структуры.

Таким образом, под воздействием кавитационных ударов и сил гидравлического трения в агрегате ДА-1, вероятно, происходит разрушение дисперсной структуры мазута, частичный крекинг алкильных цепей и образование как относительно низкомолекулярных алканов (в первую очередь C_7-C_{15}), так и соединений других классов.

Под вакуумом (при остаточном давлении 1 мм рт. ст.) в колбе Кляйзена провели фракционирование исходного и преобразованного образцов мазута². Для фракций, выкипающих до 480 °С, определили коэффициент преломления (n_D^{20}), плотность (при 20 °С) и рассчитали среднюю молекулярную массу. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Из представленной таблицы видно, что после обработки содержание фракции, выкипающей выше 480 °С, заметно снижается при одновременном увеличении доли более

легких (особенно кипящих при 350–480 °С) фракций. Произошла деструкция высококипящих компонентов мазута.

Судя по содержанию алканов C_7-C_{15} в обоих образцах мазута (см. табл. 1), выход фракции, в пределах кипения которой находятся эти углеводороды, должен составлять не менее 4.80 и 8.37 масс.%, соответственно. Однако реальные показатели по выходу фракции, выкипающей до 350 °С (см. табл. 2), заметно ниже, а потери при фракционировании под вакуумом существенно выше обычно получаемых при атмосферной перегонке (~1 масс.%). Такой дисбаланс может быть объяснен тем, что часть углеводородов, кипящих ниже 234 (262) °С при атмосферном давлении, в условиях глубокого вакуума не сконденсировались и не были уловлены. Из этого также следует, что после кавитационного воздействия выход фракции НК–350 °С должен увеличиться минимум на 3.57 масс.%, а не на 0.81 масс.%, как это следует из табл. 2. Соответственно суммарное увеличение концентрации углеводородов, выкипающих до 480 °С, должно составлять не 11.26, а 14.02 масс.%.

Таблица 2. Влияние обработки в агрегате ДА-1 (при давлении 200 атм) на фракционный состав мазута.

Показатели	Мазут	
	Исходный	После обработки (200 атм, 5 ударов)
Плотность (20 °С), г/см ³	0.956	0.949
Начало кипения (НК), °С	262	234
Выход фракций, масс.%		
НК–350 °С (до <i>n</i> -C ₂₀)	1.73	2.54
350–480 °С (<i>n</i> -C ₂₁ –C ₃₂)	16.77	27.22
Σ (НК–480 °С)	18.50	29.76
>480 °С (> <i>n</i> -C ₃₂)	77.22	61.80
Потери	4.28	8.44
Всего	100.00	100.00
Δ (НК–480 °С)	–	11.26 (14.02)
Фракция НК–350 °С		
n_D^{20}	1.4814	1.4755
d_4^{20} , г/см ³	0.8741	0.8698
Средняя молек. масса	262	248
Фракция 350–480 °С		
n_D^{20}	1.4965	1.4998
d_4^{20} , г/см ³	0.9021	0.9085
Средняя молек. масса	324	343

² В работе принимала участие к.х.н. А.Н. Богачева.

Менее структурированным нефтепродуктом является отбензиненная нефть, полученная путем отбора из образца исходной нефти с плотностью 0.8324 г/см^3 (при 20°C) фракции, выкипающей в пределах $49.8\text{--}127.0^\circ\text{C}$. Образец отбензиненной нефти был подвергнут обработке в циклическом режиме на лабораторной установке ДА-1 при температуре 23°C при давлении 300 атм (3 кавитационных удара). Характеристика обоих образцов представлена в табл. 3.

При фракционировании в стандартных условиях в аппарате для разгонки нефтепродуктов (АРНП-1) было зафиксировано

количество отбираемых фракций (об.%) при повышении температуры от НК до 312°C через каждые 20° . Дифференциальные кривые выхода этих фракций (см. рис. 3) показывают, что повышение выхода дистиллята в результате обработки высоким давлением обеспечивается в основном за счет фракции, выкипающей в пределах до 200°C . Дополнительное количество углеводородов этой фракции в количестве 2 масс.% (1.9 об.%) образовалось за счет разложения более высокомолекулярных соединений, выкипающих выше 312°C .

Таблица 3. Характеристика образцов отбензиненной нефти до и после обработки в агрегате ДА-1.

Показатели	Нефть отбензиненная	
	До обработки	После обработки (300 атм, 3 удара)
Плотность (при 20°C), г/см^3	0.8720	0.8702
Начало кипения (НК), $^\circ\text{C}$	127.0	109.0
До 312°C выкипает, масс.% / об.%	21.4 / 23.0	23.3 / 25.0
Выше 312°C выкипает, масс. %	77.5	75.5
Потери, масс. %	1.1	1.2
Всего	100.0	100.0
Фракция НК– 312°C		
n_D^{20}	1.4550	1.4542
Плотность (при 20°C), г/см^3	0.8220	0.8200

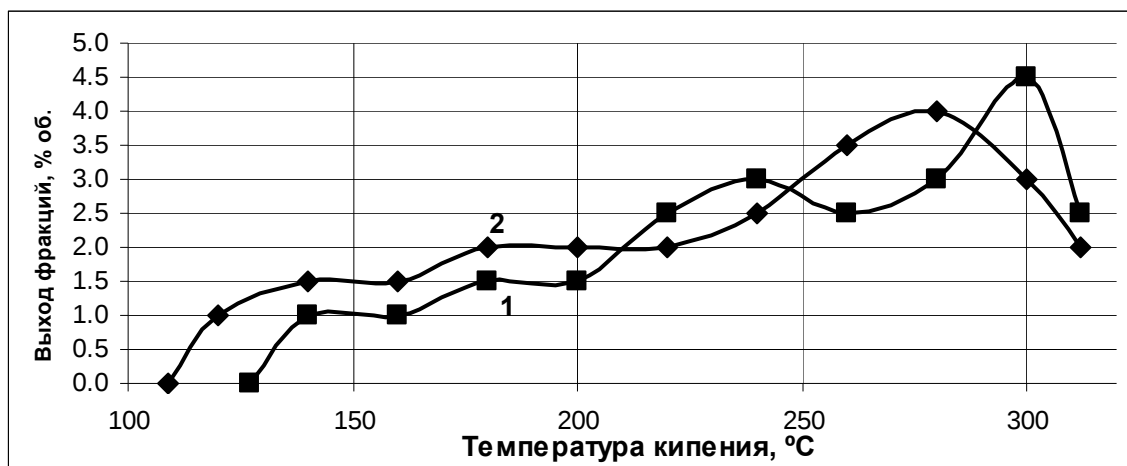


Рис. 3. Дифференциальные кривые выхода 20-ти-градусных фракций при атмосферной разгонке отбензиненной нефти (1 – исходная нефть; 2 – после обработки).

Из табл. 3 видно, что несмотря на более жесткое воздействие (300 атм), существенного увеличения выхода легкокипящих нефтепродуктов по сравнению с мазутом не

наблюдается. В этом случае мы, вероятно, имеем более высокий уровень (меньшее время) релаксации объекта, подвергающегося внешнему механическому воздействию.

В табл. 4 и на рис. 4 приведены результаты, полученные при обработке нефти марки «Западно-Сибирская». Особенностью этих экспериментов является одновременное изменение двух параметров (цикличности обработки и температуры сырья) при сохранении постоянным давления. Установлено, что сразу после воздействия на нефть при температуре 2 °С плотность составила 0.8763 г/см³. Значение плотности, указанное в табл. 4, было получено спустя неделю после хранения при комнатной температуре, т.е. был зафиксирован эффект последействия, который связан, вероятно, с протеканием цепных реакций долгоживущих радикалов, возникших в структурированной среде (плотность нефти при температуре 2 °С – 0.8973 г/см³). Значение плотности образца, обработанного при 23 °С, в течение недели не изменилось, т.к. среда была менее структурирована (плотность нефти при температуре 23 °С – 0.8304 г/см³). В

стандартных условиях на установке АРНП-1 был определен фракционный состав (до 300 °С) исходного и обработанных образцов.

Из данных табл. 4 можно установить, что под действием сил кавитации и гидравлического трения выход фракции, выкипающей до 300 °С, увеличился на 2.1 об.% (5 кавитационных ударов при 23 °С) и 3.9 об.% (1 кавитационный удар при 2 °С), а температура начала кипения снизилась соответственно на 4 и 9 °С по сравнению с исходным образцом. Более глубокое фракционирование и определение массы отобранных фракций не проводилось, поэтому для прогнозной оценки выхода (масс.%) фракций НК–180 °С и НК–360 °С (более важные показатели с практической точки зрения) были проведены расчеты по уравнениям, предложенным в работе [7]. Выход бензиновой фракции (НК–180 °С), как показывают расчеты, увеличивается в 1.2 раза.

Таблица 4. Влияние режимов обработки (количество кавитационных ударов) на характеристики нефти.

Показатели	Исходная нефть	Нефть, обработанная при 300 атм	
		5 кавитационных ударов при 23 °С	1 кавитационный удар при 2 °С
Плотность (20 °С), г/см ³	0.8838	0.8733	0.8730
Начало кипения (НК), °С	54	50	45
до 300 °С выкипает, об.%	36.0	38.1	39.8
Выход фракций, масс.%	Расчетные данные [7]		
НК–180 °С	13.3	15.9	16.0
НК–360 °С	43.5	46.7	46.8

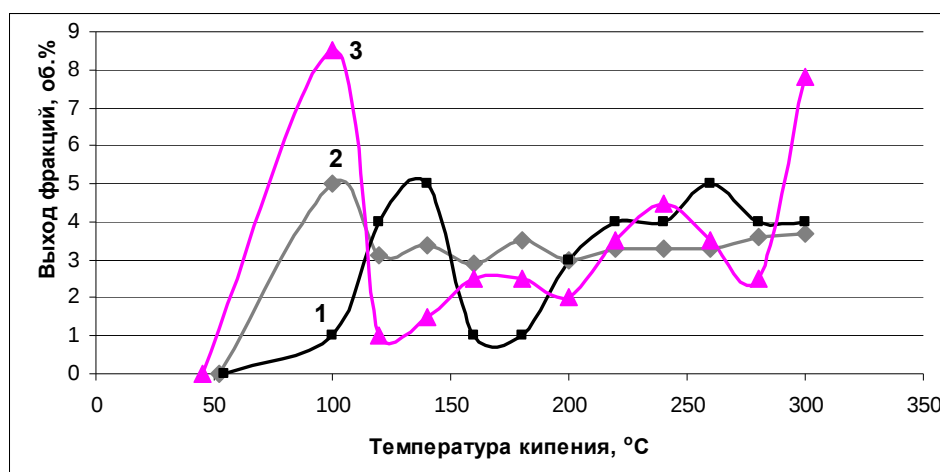


Рис. 4. Дифференциальные кривые выхода 20-ти-градусных фракций в процессе атмосферной разгонки нефти марки «Западно-Сибирская»: 1 – исходная нефть; 2 – нефть после пятикратной обработки при давлении 300 кг/см², температура 23 °С; 3 – нефть после однократной обработки при том же давлении, температура нефти 2 °С (температура воздуха – отрицательная при полевых испытаниях установки ДА-1).

На рис. 4 представлены дифференциальные кривые атмосферной разгонки образцов нефти, обработанной при температуре около 0 °С, при полевых испытаниях полупромышленной установки ДА-1 в Ханты-Мансийском автономном округе. Видно, что в результате совокупного воздействия кавитации и сил гидравлического трения заметно увеличилось содержание углеводородов, выкипающих до 100 °С. Имеются предпосылки (резкое увеличение выхода продуктов, выкипающих в диапазоне 280–300 °С) к тому, что при выделении более высококипящих фракций эффективность воздействия в условиях относительно низкой температуры окажется выше.

Таким образом, впервые для механо-

химической активации жидких нефтепродуктов различного фракционного состава успешно использован дезинтеграционный агрегат высокого давления (экструзионный диспергатор) как в лабораторных, так и в полевых условиях. Показано, что в условиях непрерывной и циклической работы при температуре от 0 до 25 °С за счет совместного воздействия сил кавитации и гидравлического трения происходит частичное разрушение структуры дисперсной системы и крекинг высококипящих компонентов сырья, приводящие к увеличению содержания легкокипящих углеводородов. Эффективность воздействия зависит от условий обработки (давления, цикличности) и степени структурированности нефтепродукта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворец, Н. Л. Новая база нефтяного бизнеса / Н. Л. Дворец, К. И. Мангушев. – М. : Мысль, 1986. – 256 с.
2. Сагаченко, Т. А. Особенности состава остаточных нефтей / Т. А. Сагаченко, Н. Н. Герасимова, Е. Ю. Коваленко // Труды Всесоюзн. конф. по проблемам комплексного освоения природных битумов и высоковязких нефтей (извлечение и переработка). – Казань : 1992. – С. 289–297.
3. Технология переработки нефти. В 2-х частях. Ч. 1. Первичная переработка нефти / Под ред. О. Ф. Глаголевой и В. М. Капустина. – М. : Химия, КолосС, 2005. – 400 с.
4. Днепровский, К. С. Механохимические превращения углеводородов нефти : дисс.... канд. техн. наук : 02.00.13 : защищена 08.10.03 : утв. 13.02.04 / Днепровский Константин Сергеевич. – Томск, 2003. – 102 с.
5. Страхова, Н. А. Механохимическое воздействие на остаточные компоненты Астраханского газоконденсата / Н. А. Страхова, Д. А. Розенталь, Л. П. Кортюченко // Нефтехимия. – 2003. – Т. 43, № 1. – С. 55–59.
6. Воробьева, Н. С. «Неразделяемая» смесь углеводородов нефти / Н. С. Воробьева, Ал. А. Петров // Нефтехимия. – 2003. – Т. 43, № 1. – С. 3–6.
7. Шабалина, Т. Н. Прогнозирование потенциала светлых фракций и содержания в них серы / Т. Н. Шабалина, К. М. Бадышкова, О. М. Елашева // Химия и технол. топлив и масел. – 1999. – № 3. – С. 6–7.