

УДК 665.642.2

**КАВИТАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА
ВЫСОКОВЯЗКИЕ НЕФТИ****Толстая С.У., Литвинова Т.А.***ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»,**e-mail: susanna.tolstaya@mail.ru*

Рассмотрены состав и свойства тяжелых высоковязких нефтей, а также актуальность их переработки. Приведены российская классификация нефти и классификация Американского нефтяного института по плотности. Раскрыты понятия «синтетическая нефть», «тяжелая нефть», «облагораживание», «полусинтетическая нефть», «УПТН». Проанализированы мировые запасы тяжелой нефти, географическое расположение крупных месторождений и доля высоковязких нефтей из всего объема российской нефти. Перечислены типовые схемы переработки тяжелого углеводородного сырья и возможности их комбинирования. Перечислены основные физические и химические методы интенсификации процессов переработки тяжелой нефти. Рассмотрен процесс «Висбрекинг-ТЕРМАКАТ®», обеспечивающий максимальную конверсию мазута в бензино-дизельные фракции, его параметры и возможные пути интенсификации. Рассмотрено кавитационно-акустическое воздействие на данный процесс, генерируемое гидродинамическими излучателями (кавитационно-акустическими насосами) и позволяющее подводить к реакционной массе энергию в высокопотенциальном виде. Проанализированы основные достоинства процесса и свойства получаемых продуктов.

Ключевые слова: тяжелая нефть, кавитационно-акустическое воздействие**CAVITATION-ACOUSTIC IMPACT ON HIGH-TYPED OIL****Tolstaya S.U., Litvinova T.A.***Kuban State Technological University, Krasnodar; e-mail: susanna.tolstaya@mail.ru*

The composition and properties of heavy oils, as well as the urgency of their processing, are considered. The Russian classification of oil and the classification of the American Petroleum Institute by density are given. The concepts «synthetic oil», «heavy oil», «refinement», «semisynthetic oil», «UPTN» are disclosed. The world reserves of heavy oil, the geographical location of large deposits and the share of high-viscosity oils from the total volume of Russian oil are analyzed. Typical schemes for processing heavy hydrocarbon raw materials and the possibility of combining them are listed. The main physical and chemical methods of intensification of heavy oil processing are listed. The domestic process «Visbreaking-TERMAKAT®», which provides the maximum conversion of fuel oil to gasoline-diesel fractions. The cavitation-acoustic effect on this process, generated by hydrodynamic radiators (cavitation-acoustic pumps), is considered and allows to supply energy to the reaction mass in a high-potential form.

Keywords: heavy oil, cavitation-acoustic impact

Снижение запасов и объемов добычи маловязких, так называемых «легких» нефтей во многих нефтедобывающих регионах мира, в том числе и российских, вызывает необходимость вовлечения в хозяйственный оборот нетрадиционных, сравнительно новых для нефтепереработки источников углеводородного сырья, в первую очередь – тяжелых нефтей и природных битумов.

Россия считается третьей после Канады и Венесуэлы страной по запасам тяжелых углеводородных ресурсов, которые, по различным оценкам, составляют 6,3–13,4 млрд. тонн.

Возрастающая доля тяжелых нефтей в общем объеме мировой нефтедобычи, а также необходимость увеличения объемов производства нефтепродуктов обуславливают создание новых способов переработки такого сырья. Эти процессы должны быть направлены на увеличение выхода дистиллятных фракций для последующего производства моторных топлив и масел.

Одной из причин трудности переработки тяжелого нефтяного сырья, является высокое содержание в них высокомолекулярных соединений – смол, асфальтенов и карбоидов, в молекулах которых концентрируется большая часть гетероатомов, присутствующих в исходном сырье.

Тяжелую нефть в ее природном состоянии невозможно выкачивать обычными методами. В большинстве случаев для того, чтобы обеспечить течение горючей жидкости подобного типа по трубопроводу или поступление ее в скважину, необходимо провести ее предварительное растворение или нагревание [1].

Количество смол и асфальтенов в тяжелых нефтях и нефтяных остатках определяет свойства и их дисперсионной среды, и диспергированной фазы, а также агрегативную устойчивость сырья в условиях термоллиза. Эти соединения имеют высокую молекулярную массу, склонны к конденсации и образованию кокса при переработке,

дезактивируют катализаторы. С помощью каталитических технологий сложно увеличить глубину переработки, потому что высокомолекулярные компоненты тяжелых нефтей и нефтяных остатков закоксовывают поверхность любого катализатора. В связи с этим, получение из тяжелых нефтей и нефтяных остатков более легкой «синтетической» нефти с уменьшенным содержанием смол и асфальтенов, гетеросоединений является одной из важнейших задач нефтепереработки. Для углубления переработки тяжелого нефтяного сырья предлагаются различные подходы с использованием термических, каталитических процессов, и нетрадиционных методов [2].

Российская классификация нефтей, подготовленная к транспортированию по магистральным нефтепроводам и наливным транспортом, разделяет нефть по плотности на пять типов:

- 1) особо легкая;
- 2) легкая;
- 3) средняя;
- 4) тяжелая;
- 5) битуминозная.

К тяжелым нефтям (ТН) относят нефти с плотностью более 870 кг/м³, к битуминозным нефтям (БН) – с плотностью более 895 кг/м³. Квалификация сверхтяжелых нефтей не определена. Американский нефтяной институт классифицирует тяжелые нефти по плотностям с более высокими показателями:

- 1) тяжелые нефти (ТН): плотностью 20–14 °API (934–972 кг/м³);
- 2) сверхтяжелые нефти (СТН): плотностью 14–10 °API (972–1000 кг/м³);
- 3) природные битумы (ПБ): плотностью <10 °API (> 1000 кг/м³).

В отечественной научно-исследовательской нефтяной практике до настоящего момента еще не сложилась терминология относительно квалификации и технологических манипуляций с тяжелыми нефтями.

Рассмотрим терминологию более определенно:

«Облагораживание» – термин, относящийся в целом к химическим реакциям, технологическим процессам и способам понижения удельной плотности обрабатываемой нефти, путем перевода тяжелых углеводородов в облегченные дистиллятные фракции. Термин не является ограничительным конкретным значением плотности или диапазоном значений плотностей облагораживаемой нефти.

«Синтетическая нефть» (СН) – облегченная (ОСН), маловязкая, не содержащая

недистиллируемых остатков, технологически полученная в процессе(ах) облагораживания тяжелой нефти, с выделением тяжелых остатков в виде отдельной фазы. Свойства СН зависят от технологического способа их производства. Плотность синтетической нефти, как правило, должна классифицироваться как легкие или средние нефти, т.е. должна быть менее 850 кг/м³ или менее 870 кг/м³. Недистиллируемый остаток от тяжелой нефти выводится в виде полупродукта или подвергается дальнейшей технологической переработке.

«Полусинтетическая нефть» (ПСН) – облегченная, маловязкая, содержащая недистиллируемые остатки, технологически полученная в процессе(ах) облагораживания тяжелой нефти, без отдельного выделения тяжелых остатков, т.е. по безостаточной технологии. Чаще всего смесь дистиллятных и остаточных фракций называют ПСН. «БСН» – битумный завод синтетической нефти, – технологический комплекс процессов облагораживания природных битумов (тяжелых нефтей) в синтетическую или полусинтетическую нефть.

«УПТН» – установка переработки тяжелой нефти, – технологический комплекс процессов облагораживания тяжелых нефтей на получение облегченной синтетической или полусинтетической нефти. В классификации тяжелых нефтей, СН и ПСН помимо плотности целесообразно выделять и содержание в них дистиллируемых фракций, поскольку именно их потенциал определяет коммерческую ценность нефти [1].

В России тяжелые нефти относят к альтернативным источникам углеводородного сырья, поскольку они отличаются от обычных нефтей не только повышенной плотностью, но и компонентным составом. Кроме углеводородов тяжелые нефти содержат нафтеновые кислоты, сульфокислоты, простые и сложные эфиры, а также редкие цветные металлы в кондиционных концентрациях.

Ванадий и никель, извлекаемые из тяжелой высоковязкой нефти, качественно превосходят аналоги, получаемые из руды. Поэтому развитые страны предпочитают использовать именно «нефтяной» металл в инновационных технологиях, где требуется более высокая чистота, чем в литейном производстве.

В тяжелых высоковязких нефтях содержатся и такие уникальные компоненты, как нафтеновые кислоты, сульфокислоты, простые и сложные эфиры, которые можно

извлечь при переработке по специальной схеме. Стоимость этих компонентов в объеме товарной продукции, получаемой в результате переработки, может превосходить стоимость нефтепродуктов.

Создание новых эффективных технологий подготовки и переработки тяжелого нетрадиционного углеводородного сырья является актуальной задачей, решение которой позволит значительно улучшить воспроизводство сырьевой базы России за счет экономически рентабельного вовлечения в разработку месторождений высоковязких нефтей и природных битумов [2].

Бассейны с высоковязкой нефтью распространены повсеместно на территории Евразии и на севере Африки – всего 25 нефтегазоносных бассейнов (НГБ), что составляет около 1/6 части от общего числа бассейнов мира. На рис. 1 представлено распределение высоковязкой нефти по странам, расположенным в Африке и Евразии.

которых, самая низкая. Бассейны с высоковязкой нефтью распространены в основном на европейской территории России: Волго-Уральский, Днепровско-Припятский, Прикаспийский и Тимано-Печорский. [1].

В настоящее время разработанные в мире технологии по переработке тяжелых высоковязких нефтей в основном базируются на комбинировании классических методов переработки нефтяных остатков, таких как: коксование, крекинг, гидроочистка, удаление серы. Типовые схемы переработки тяжелого углеводородного сырья на начальной стадии, как правило, включают блок атмосферной и вакуумной перегонки, откуда гудрон направляется в зависимости от технологических целей на какой-либо из вторичных процессов: деасфальтизация, коксование, висбрекинг, или их комбинацию, с последующей гидроочисткой полученных газойлей и газификацией кубового остатка.

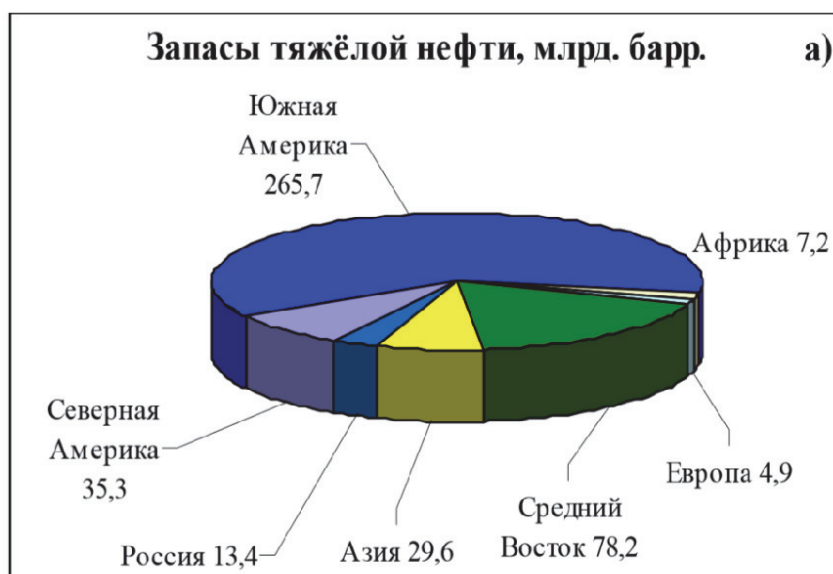


Рис. 1. Мировые запасы тяжелой нефти

Россия обладает значительными запасами высоковязких тяжелых нефтей и их объем составляет около 55 % в общем объеме запасов российской нефти.

В самой «старой» нефтегазовой провинции Волго-Уральской самая высокая доля тяжелых нефтей. Наиболее легкие нефти сосредоточены в Восточной Сибири и Дальнем Востоке, степень разработки,

В последние годы появились и более новые варианты схем переработки природных битумов, основу которых стали составлять гидрогенизационные процессы, в том числе гидрокрекинг. Использование легкого гидрокрекинга тяжелого нефтяного сырья исключает необходимость в дорогостоящей последующей гидроочистке дистиллятов, образующих «синтетическую» нефть.

Наиболее простым в техническом отношении способом конверсии тяжелых нефтей и нефтяных остатков в легкие углеводороды является каталитическое крекирование. В то же время многие учёные сходятся во мнении, что специфические свойства и сложный состав тяжёлого углеводородного сырья указывают на то, что классические способы вторичной переработки лёгких нефтей малоэффективны.

Российскими и зарубежными исследователями предлагаются различные способы и технологии позволяющие увеличить выход светлых нефтепродуктов. Основными технологиями переработки нефти и нефтепродуктов являются перегонка и крекинг. Воздействовать на кинетику этих процессов можно химическими веществами (катализаторами, поверхностно-активными веществами – ПАВ, присадками и т.д.) и физическими полями (тепловыми, кавитационными, электромагнитными и т.д.). В результате такого вмешательства изменяется радиус ядра и толщина адсорбционно-сольватной оболочки сложной структурной единицы, которая является элементом нефтяной дисперсной системы [2].

Среди отечественных разработок заслуживает внимание процесс «Висбрекинг-ТЕРМАКАТ®», обеспечивающий максимальную конверсию мазута в бензино-дизельные фракции. В табл. 1 приведено сравнение «Висбрекинг-ТЕРМАКАТ®» с традиционным висбрекингом.

В технологии «Висбрекинг-ТЕРМАКАТ®» разработчики вышли на управление процессом термополиконденсации, что позволяет получать в остатке высококачественные дорожные битумы заданных свойств. В зависимости от исходного содержания асфальтенов в нефти выход битумов может колебаться от 15 до 40%, при этом выход бензино-дизельных фракций, квалифицируемых как синтетическая нефть (СН) плотностью менее 860 кг/м³, составляет 55–80%. При отсутствии потребности в битумах производится котельное топливо и СН, а при их смешении полусинтетическая нефть (ПСН) с плотностью <895 кг/м³.

Энергозатраты на процесс сравнимы с вакуумной перегонкой мазута, которая, кстати, в этом случае совершенно не нужна. Висбрекинг мазута протекает мягче и глубже, нежели для гудрона, и процесс надежнее в эксплуатации – исключается закоксовывание оборудования, что в случае с гудроном является основным отрицательным фактором.

«Термакат» приведена на рисунке 2. Выход бензино-дизельных дистиллятов плотностью 800–810 кг/м³ составляет 75–80% от тяжелого сырья. Тяжелая нефть поступает на интегрированный блок АП+В6 Термакат+ ТПК, откуда суммарные бензино-дизельные дистилляты направляются на гидроочистку и выводятся как малосернистая нефть с плотностью менее 810 кг/м³. Остаточный продукт ТПК по качеству

Таблица 1

Сравнение «Висбрекинг-ТЕРМАКАТ®» с традиционным процессом

	Висбрекинг традиционный	Висбрекинг-ТЕРМАКАТ® новая редакция
Назначение	Уменьшение вязкости гудрона	Получение светлых топлив до 60-80% на мазут
Продукты	Газ, бензин – до 5–8%, мазут М-100	Газ, бензин, дизтопливо, неокисленный битум
Решает задачи	Повышение качества нефтяного остатка	Одностадийная переработка тяжелых фракций – в светлые, остаточных фракций – в битум
Эффективность	Затратный процессинг	Повышает рентабельность на 40–60%

(плотностью 990–1000 кг/м³) соответствует наиболее ликвидным маркам дорожных битумов. Установка очистки кислых газов необходима в плане экологической очистки топливных газов. Сера, выделяемая на этой установке, направляется на производство дорожных битумов. Водород производится из природного газа.

иногда встречается также термин «термо-акустический висбрекинг».

Качественный и количественный состав конечных продуктов технологии «Висбрекинг-ТЕРМАКАТ®», как и любого термического процесса, прежде всего, зависит от структурно-группового состава исходного сырья. Проводя процесс с учетом

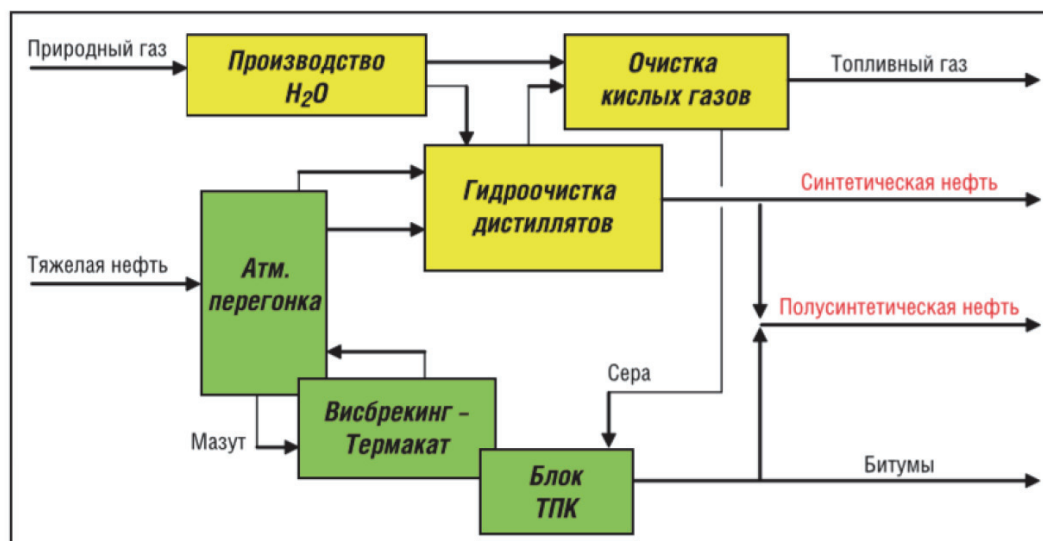


Рис. 2. Схема процесса «Термакат»

Вариант интегрированной атмосферной перегонки нефти совмещенной с висбрекинг – технологией мазута получил название «Висбрекинг-ТЕРМАКАТ®». В его основе лежит мягкий термический крекинг в сокинг-камерах, а на ряде стадий термолиты используются технологические методы дополнительного подвода физической энергии в виде акустической кавитации – «акустический катализ». Поэтому в литературе

химических и физико-химических закономерностей термических превращений углеводородов, варьируя температуру процесса, давление в зоне реакции, время пребывания сырья в реакционной зоне, меняя агрегатное состояние реакционной массы за счет рециркулирующих потоков, получают дистиллятные и остаточные продукты желаемого качества и ассортимента, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Состав продуктов процесса «Висбрекинг-ТЕРМАКАТ®»

Показатель	Нефть					
	Тораяевская	Иреляхская	Ульяновская	Варандейская	Донская	Караганбасская
Плотность при 15 °С, г/см ³	0,842	0,861	0,869	0,897	0,926	0,942
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	25,7	19,2	15,5	28,9	129	1091
Содержание серы, % масс.	—	—	1,7	2,1	3,45	2,2
Содержание асфальтенов, % масс.	2	0,5 + 0,8	4	5	9	6
Фракционный состав: Н.К., °С	69	64	58	51	50	85
Выкипает, % об. при 180 °С	19	11,5	19	15,3	13	1
240 °С	30,5	21	31	26,1	20	6,5
300 °С	43	34	45	40,5	32	19,5
360 °С	61,5	46	53	60	44,5	31,0
Переработка до остаточного котельного топлива						
Газ	5	3	3	3	3	4
Фракция Н.К.–180 °С	15	17	27	20	11	14
Фракция 180–360 °С	46	51	40	44	42	32
Фракция > 360 °С	34	29	30	33	44	50
Переработка до неокисленного битума						
Газ	4	2	5	5	3	4
Фракция Н.К.–180 °С	21	21	25	19	13	17
Фракция 180–360 °С	57	55	55	59	50	49
Фракция > 360 °С	—	9	—	—	—	—
Битумы	16	13	15	17	34	30

Таблица 3

Показатели качества дорожных битумов

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА НЕОКИСЛЕННЫХ ДОРОЖНЫХ БИТУМОВ, ГАРАНТИРУЕМЫЕ ПРОЦЕССОМ «ВИСБРЕКИНГ-ТЕРМАКАТ®»

Показатели качества, единицы измерения	Гарантируемые значения показателей качества	Метод испытаний	Назначение, область применения продуктов и стандарт России
Пенетрация, 0,1 мм при температуре: 25 °С 0 °С, не менее	40–200 12–40	ГОСТ 11501-78	Вязкие дорожные битумы по ГОСТ 22245-90 Битумы дорожные неокисленные по ТУ 0256096-00121807-97 Битумы строительные по ГОСТ 6617-76 Битумы кровельные по ГОСТ 9548-74 Битумы изоляционные по ГОСТ 9812-74
Температура размягчения, °С по КиШ, не ниже	45	ГОСТ 11506-73	
Температура хрупкости, °С не выше	-6	ГОСТ 11507-78	
Температура вспышки, °С, не ниже	220	ГОСТ 4333-87	
Дуктильность при 25 °С, см, не менее	>100	ГОСТ 11505-75	
Изменение температуры размягчения после прогрева, °С, не более	5	ГОСТ 11506 ГОСТ 11954	
Сцепление, по образцу №: с песком/с гранитом после прогрева с песком/с гранитом	1/1–2 ¼–3	ГОСТ 18180-72	

Кавитационно-акустическое воздействие, генерируемое гидродинамическими излучателями (кавитационно-акустическими насосами), позволяет подводить к реакционной массе энергию в высокопотенциальном виде.

Энергетический поток, компенсирующий поглощение тепла в эндотермических процессах, передается в данном случае непосредственно в жидкую среду, минуя стенку аппарата. При схлопывании микропузырьков-разрывов сплошности жидкой фазы, – вокруг и внутри них возникает локальное повышение температуры (до 5000°С) и кратковременное повышение давления до 10 000 кгс/см² абс. Можно сказать, что каждый микропузырек на несколько наносекунд превращается в мини-реактор, где происходят деструктивные термохимические процессы. Кроме того, такое физическое воздействие вносит ощутимые изменения в гидродинамику и дисперсионную стабильность жидких сред, по-разному влияя на процессы, протекающие в реакционной среде. Заметно интенсифицируются одни процессы (деструкция) и резко замедляются другие (коксообразование).

Поток энергии, передаваемой реакционной среде за счет кинетической энергии движения стенок схлопывающихся кавитационных пузырьков, весьма велик, что позволяет в нашем варианте висбрекинга снизить температуру процесса на 50–80°С. Термоллиз идет практически вне области

температур коксования. Агрегативная стабильность реакционной среды сохраняется даже при повышенной концентрации асфальтенов. Химический процесс может идти не минуты, а десятки минут. Результат – максимальная глубина превращения тяжелых углеводородов нефтяного сырья в светлые среднестиллятные фракции и малый выход остаточного продукта – концентрированного коллоидного раствора смол и асфальтенов – идеальной основы для производства битумов или пеков [3].

Углубление процесса приводит к увеличению концентрации асфальтенов и получению битума или пеков без применения технологии окисления. Свойства полученных остаточных неокисленных битумов могут регулироваться в широком диапазоне значений, что гарантирует выпуск товарных битумов заранее заданной марки, их показатели приведены в табл. 3.

В технологии «Висбрекинг-ТЕРМАКАТ®» разработчики вышли на управление процессом термополиконденсации, что позволяет получать в остатке высококачественные дорожные битумы заданных свойств. Кавитационно-акустическое воздействие, генерируемое гидродинамическими излучателями (кавитационно-акустическими насосами), позволяет подводить к реакционной массе энергию в высокопотенциальном виде.

Главное достоинство данной технологии: простота аппаратно-технологических решений, минимально требуемый

инвестиционный бюджет на строительство установки, высокая универсальность по круглогодичному производству всегда востребованной продукции. Процессы гидроочистки дистиллятов в совокупности с установкой по производству водорода являются дорогостоящими, однако, именно эти процессы гарантируют получение высококачественной малосернистой синтетической нефти. Для исходных малосернистых нефтей производство полусинтетической нефти, с включением в ее состав тяжелых

остаточных компонентов будет более высококорентабельным [3].

Список литературы

1. Курочкин А.К. Синтетическая нефть. Безостаточная технология переработки тяжелых российских нефтей на промыслах // Переработка нефти и газа. – 2008. – №2. – С.92–104.
2. Тяжелая нефть // <https://petrodigest.ru/articles/neft/heavy-crude-oil>.
3. Халикова Д.А. Обзор перспективных технологий переработки тяжелых высоковязких нефтей и природных битумов / Д.А. Халикова, С.М. Петров // Вестник КТУ. – 2013. – № 3. – С. 220 – 221.