

Асфальтены (не растворимые в гептане), % мас.	0,05
Коксуемость, % мас., не более	0,30

Обеспечение указанных требований позволяет получить продукты самого высокого качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хавкин В.А., Чернышева Е.А., Гуляева Л.А. Гидрогенизационные процессы получения моторных топлив.

Библиотека нефтепереработчика. — Уфа, ГУП ИНХПРБ, 2013. — 259 с.

2. Каминский Э.Ф., Хавкин В.А. Глубокая переработка нефти: технологический и экологические аспекты. — М.: Тума ГРУПП: Техника, 2001. — 384 с.

3. Хавкин В.А., Гуляева Л.А. Перспективы развития процесса гидрокрекинга на НПЗ России // Нефтепереработка и нефтехимия. — 2016. — № 2. — С. 8-15.

УДК 665.637.66

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССА КОКСОВАНИЯ НЕФТЯНОГО СЫРЬЯ (обзор)

О.Ф. ГЛАГОЛЕВА, В.М. КАПУСТИН, И.А. ГОЛУБЕВА

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

Основной вклад в повышение конверсии нефти вносят процессы переработки тяжёлого остаточного сырья, главный из которых — коксование. Этому процессу в настоящее время во всем мире придаётся большое значение как по причине необходимости утилизации тяжёлых остатков с получением максимального количества дистиллятов и последующего производства моторных топлив, так и для получения кокса заранее заданного качества с использованием его в различных отраслях промышленности. До сего времени коксование остаётся экономически успешной технологией переработки нефтяных остатков. Процесс достаточно гибкий, чтобы его можно было интегрировать в самые разные технологические схемы НПЗ. В странах с развитой нефтепереработкой мощности коксования сбалансированы с мощностями каталитического крекинга и гидрокрекинга, что обеспечивает практически безостаточную переработку нефти и позволяет существенно экономить сырую нефть.

Ведущие мировые фирмы, работающие в области коксования, — *Conoco Philips* (ныне входит в состав фирмы *BECHTEL*), *Foster Wheeler* (обе развивают технологию замедленного коксования) и *Exxonmobil* (технология непрерывного коксования). Опыт этих компаний в проектировании и эксплуатации установок позволил существенно улучшить экономику, надёжность и гибкость процесса. Отечественные НПЗ, имеющие в своём составе установки замедленного коксования, также накопили большой практический опыт их эксплуатации.

За последнее годы мировые мощности установок коксования выросли с 2 до 13 млн барр. в сутки. До

2011 г. по объёму продаж нефтяного кокса лидировали США, позже на первое место вышел Китай. Другими крупными производителями нефтяного кокса являются Венесуэла, Индия, Бразилия.

По данным источника «Анализ мирового рынка нефтяного кокса», подготовленного *BusinesStat* в 2019 г., с 2014 по 2018 гг. его продажи в мире выросли на 7,4%: с 126,5 до 135,9 млн т. По мнению экспертов рынка в ближайшие годы наибольший рост спроса на нефтяной кокс ожидается в сегменте обожжённых анодов, необходимых при выплавке алюминия. Ежегодный рост здесь составит в среднем 5-7%. Продажи нефтяного кокса в качестве топлива для тепловых электростанций и цементных заводов будут расти в среднем на 4-5% в год. В 2023 г. продажи нефтяного кокса в мире достигнут 150 млн т, что превысит значение показателя за 2018 г на 10,2%. Лидировать в продажах нефтяного кокса будет Индия, на долю которой будет приходиться в среднем 18,2% мировых продаж в ближайшее пятилетие [1-3].

В России в течение многих лет общий годовой объём сырья коксовых установок держался на уровне 6,0-6,5 млн т в год, в 2016 г. эта цифра возросла до 9,6 млн т. Однако потребности в коксе отечественной металлургии (в частности, алюминиевой) и других отраслей постоянно растут. По этой причине объёмы производства кокса планируется повышать, особенно анодного и электродного. Низкосортные нефтяные коксы в мире широко используются в качестве топлива. Порошкообразный нефтяной кокс находит применение как топливо, в частности, в цементной промышленности. За рубежом в послед-

ние годы всё более активно проводится сжигание кокса в котлах с циркулирующим кипящим слоем (компания Foster Wheeler) для производства тепловой энергии, однако в России топливный кокс не находит применения, что тормозит развитие процесса коксования в стране.

В ближайшее время в РФ намечено строительство новых и реконструкция существующих установок коксования. Однако намеченные сроки, по ряду причин, выдерживаются не полностью.

Известно, что именно те НПЗ, которые имеют в своём составе установки коксования, характеризуются величинами глубины переработки нефти, превышающими средний показатель по стране — 83%. В процессе коксования может перерабатываться тяжёлое сырьё с высоким содержанием серы и металлов, для чего больше подходит технология непрерывного коксования. Однако для получения кускового кокса как целевого продукта с заранее заданными свойствами сырьё необходимо подбирать или специально готовить, к чему постоянно призывают потребители кокса [4].

Кроме прямогонного остатка атмосферной перегонки нефти, а также остатка вакуумной перегонки на НПЗ образуется ещё целый ряд остатков и тяжёлых фракций: крекинг-остатки, тяжёлые газойли, тяжёлая смола пиролиза, асфальт деасфальтизации гудрона, экстракты масляного производства и др. Все эти продукты (в большинстве побочные) представляют собой сложное в технологическом смысле сырьё. Такие виды сырья отличаются ярко выраженной склонностью к физическим межмолекулярным взаимодействиям, что обусловлено повышенной концентрацией смолисто-асфальтеновых веществ, высокой коксуетемостью, высоким содержанием серы, азота, тяжёлых металлов. Кроме того — это высоковязкие свобододисперсные, а иногда структурированные связнодисперсные системы. Всё это требует научного подхода к переработке таких систем, к проблеме их смешения для использования в качестве исходного сырья, а также в качестве товарной продукции. В частности, весьма серьёзным является вопрос о создании стабильных композиций как исходного сырья, так и получаемых продуктов, устойчивых к расслоению на фазы и другим нежелательным явлениям: к повышенному коксоотложению в трубах нагревательной аппаратуры, к закоксовыванию и отравлению катализаторов и т.п.

Разработка способов воздействия на степень дисперсности тяжёлых видов сырья, а, следовательно, на их макросвойства — стабильность, структурно-механические (реологические) и другие свойства — открывает возможности влиять на физико-химические процессы термических и термокаталитических превращений при переработке нефтяных остатков. Воздействуя на степень дисперсности, можно управлять выходом и качеством образующихся продуктов. Большую проблему составляет опасность закоксовывания труб нагревательной аппаратуры при

переработке такого сырья. Известно, что основой сырья коксования является гудрон, к которому можно добавлять имеющиеся на данном НПЗ остатки или тяжёлые фракции деструктивного происхождения. Таким путём можно влиять как на работу нагревательной аппаратуры, так и добиваться снижения содержания серы и металлов в коксе, а также влиять на его структуру, технологичность оборудования, обеспечивая стабильную работу печи за счёт снижения её закоксовывания и продления межремонтного пробега как самой печи, так и установки в целом. Таким образом, наряду с задачей подавления коксоотложений существует и задача управления процессами образования кокса определённой структуры и качества с целью получения углеродистого продукта с заранее заданными свойствами [5].

Коксование позволяет не только получать ценный продукт — кокс, востребованный во многих отраслях промышленности, но реализовать целый ряд технологий, которые обеспечивают широкое применение этого процесса в производстве моторных топлив, улучшения экологической обстановки и санитарных условий НПЗ. Процесс коксования является мощным «санитаром» на НПЗ. Образующиеся нефтешламы и другие отходы перерабатываются на установках замедленного коксования с получением топливного кокса. При использовании нефтяного кокса в качестве энергетического топлива резко снижается загрязнение окружающей среды. Например при сжигании 6 млн т топочного мазута с содержанием серы 3% мас. в окружающую среду выбрасывается 180 тыс.т в год серы в виде сернистых соединений. При коксовании такого же количества мазута образуется около 700 тыс.т в год нефтяного кокса с содержанием серы 3,5% мас., при сжигании которого получается 49 тыс.т в год серы в виде сернистых соединений, что значительно ниже объёма выбросов в окружающую среду при сжигании мазута. Это обстоятельство используется заводами, и многие строят собственные энергетические установки, применяя кокс в качестве топлива. В США около 30 тепловых электростанций переведено на сжигание нефтяного кокса в смеси с каменным углём, что полностью решает проблему сбыта нефтяного кокса, гарантирует круглогодичную бесперебойную работу заводов. Кроме того, кокс может храниться довольно длительное время, проблема его вывоза не столь актуальна по сравнению с вывозом мазута.

Процесс коксования может рассматриваться как процесс деасфальтизации и деметаллизации нефтяных остатков. Если исходное сырьё имеет коксуетость 25-30%, то продукты коксования — не более 0,3-0,55%. При исходном содержании металлов в сырьё до 300 ppm в дистиллятных продуктах коксования этот показатель не превышает 3-5 ppm, т.е. практически все металлы переходят в кокс и могут быть извлечены из коксовой золы по имеющимся

и используемым в некоторых странах технологиям [6].

Таким образом, путём жёсткого, глубокого термического крекинга (до кокса) за счёт концентрации в коксе углерода исходного сырья образуются продукты, более лёгкие, чем сырьё, и остатки полностью преобразуются в кокс и более ценные газообразные и жидкие продукты.

В промышленности используются три технологии: периодическое, замедленное коксование (полунепрерывное) и полностью непрерывное — *Fluid-coking* в кипящем слое кокса-теплоносителя и *Flexicoking* (с газификацией кокса). Наиболее распространён и освоен в мировой и отечественной практике способ замедленного коксования. В России пока работают только установки замедленного коксования (УЗК). Замедленное коксование — это технологический процесс, который обеспечивает экономичный способ переработки тяжёлых нефтяных остатков при давлении, близком к атмосферному (до 6 атм макс.), не требуя высоких капитальных затрат, применения катализаторов, водорода и реагентов.

Основные аппараты установки замедленного коксования — трубчатые печи, реакторы (коксовые камеры), теплообменники.

Печь на УЗК представляет собой нагреватель до 350–370°C первичного (свежего) и вторичного сырья (свежее сырьё плюс рециркулят) до температуры собственно коксования (490–510°C). Сам процесс с образованием продуктов термического разложения и коксообразования должен происходить в пустотелом необогреваемом реакторе (коксовом барабане, или коксовой камере) за счёт тепла, аккумулированного сырьём в печи. Для того, чтобы задержать (замедлить) процесс в печи, в меевик подаётся турбулизатор (как правило, это водяной пар). Отсюда, кстати, название процесса — замедленное коксование (*delayed coking*, от англ. *delay* — задержка, запаздывание, замедление). Большую роль в бесперебойной работе печи играет коллоидное состояние сырья. Для придания ему однородности, устойчивости к осаждению асфальтенов в неподвижную фазу с последующим превращением их в кокс и соответственно закоксовыванием труб печи, необходимо заранее регулировать кинетическую устойчивость сырья, что позволяет продлить работу печи и избежать аварийной остановки. Поскольку асфальтены в большой степени имеют ароматическую природу, то и растворимость их в ароматизированной среде можно повысить, повышая степень ароматичности дисперсионной среды и таким образом диспергируя асфальтеновые надмолекулярные структуры. Известно, что на нерастворимости асфальтенов в нормальных алканах основан процесс пропановой (или бутановой, бензиновой) деасфальтизации гудрона. В парафинистой лиофобной дисперсионной среде асфальтеновые частицы дисперсной фазы коагулируют, образуют флоккулы, которые выпадают

в виде рыхлого осадка и оседают на стенках нагревательной аппаратуры. Происходит фазовое расслоение системы. При нагреве асфальтенового сырья, особенно в парафинистой среде, неустойчивость системы влечёт за собой закоксовывание меевиков печи и других аппаратов технологических установок. При выделении асфальтенов из раствора в случае «плохого» растворителя в парафинистой дисперсионной среде образование кокса ускоряется [7]. Таким образом, поведение агрегатов асфальтенов в значительной степени зависит от состава и свойств дисперсионной среды, которые можно регулировать, используя принцип смешения компонентов сырья. Уменьшение коксообразования в трубах печи коксовой установки может быть достигнуто оптимальным соотношением компонентов в сырьевой смеси, а также повышением (в определённых пределах) коэффициента рециркуляции [8] или добавлением высокоароматизированных продуктов (крекинг-остатков, тяжёлых газойлей деструктивных процессов, экстрактов маслблока, тяжёлой смолы пиролиза и др.). Эффект добавления таких продуктов может объясняться как их высокой термической стабильностью, так и диспергированием асфальтеновых надмолекулярных структур [7,9,10]. Так, на УЗК Ангарского НПЗ в целях выдерживания содержания серы в коксе на уровне 1,5% к гудрону добавляли тяжёлый газойль каталитического крекинга и тяжёлую смолу пиролиза [11], что, как было замечено, привело одновременно к повышению технологичности печи, стабильности её работы при нагреве подготовленного таким образом сырья. Однако в этой публикации не дано объяснения такого эффекта. Между тем, это хорошо объясняется с позиций физикохимии нефти [12]. Таким образом, наряду с задачей подавления коксоотложений существует и задача управления процессами образования кокса определённой структуры и качества с целью получения углеродистого продукта с заранее заданными свойствами, так как подготовка сырья в значительной степени влияет не только на работу печи, но и на структуру кокса. Сырьё для кокса анизотропной структуры должно быть не только высокоароматизированным, низкосернистым и не иметь в своём составе тяжёлых металлов, но и содержать конденсированные ароматические молекулы с короткими боковыми цепями. Такими видами сырья являются, например, дистиллятные крекинг-остатки, декантированные (отделённые от катализаторной пыли) тяжёлые газойли каталитического крекинга. Благоприятная молекулярная структура сырья способствует формированию совершенной гексагональной углеродной сетки, близкой к структуре графита [13].

Длинные алкильные цепи алкилароматических углеводородов сырья препятствуют образованию упорядоченной решётки кокса. Напротив, формированию анизотропной структуры кокса способствуют би- и трициклические ароматические углеводороды с короткими боковыми цепями. Такие углеводороды

содействуют формированию жидкокристаллической фазы — мезофазы, образование и рост которой в дисперсионной среде является предпосылкой будущей упорядоченной (в идеале игольчатой) структуры кокса.

Для получения наиболее ценного игольчатого кокса рекомендовано использовать синергетические смеси декантоля с термически крекированными газойлями установок каталитического, термического крекинга и др. [14].

Высокие требования предъявляются к стабильности сырья термических и термокаталитических процессов (в частности сырья для производства не только кокса, но и технического углерода), а также к продуктам нефтепереработки, например, таким, как крекинг- и висбрекинг-остатки, используемых в качестве бункерного, котельного, печного топлив. На примере висбрекинга и коксования можно показать, что конечная температура нагрева остаточного сырья в печи висбрекинга и коксования не должна превышать определённого максимально допустимого значения, выше которого происходит забивание труб печи коксом. Следует отметить также, что, например, если получаемый на установках висбрекинга топочный мазут нестабилен, это приводит к закоксовыванию топливных форсунок в процессе их эксплуатации. Стабильность также весьма важна при получении многоступенчато-сверхтонкораспылённого остаточного топлива (*MSAR*), водо-битумных, парафиновых эмульсий и пр.

Во многих работах [7,10,12] показано, что введение ароматических компонентов в нефтяной остаток (в определённой концентрации) позволяет повышать устойчивость, (стабильность, однородность) нефтяной системы.

Следует отметить, что использование ультразвука определённой частоты, магнитного поля, электроимпульсного и других видов воздействий на сырьё также могут способствовать диспергированию структурных единиц в нефтяных дисперсных системах, влиять на выход и структуру кокса, а также понижать его адгезию к внутренней стенке реактора, что позволит облегчить гидрозрезку и выгрузку кокса [15,16].

Большие возможности в регулировании устойчивости нефтяных систем открываются при использовании различных поверхностно-активных веществ, присадок, которые уже в малых концентрациях значительно изменяют свойства нефтяной дисперсной системы [17,18].

Ряд исследований посвящён влиянию твёрдых добавок — измельчённых частиц кокса, торфа, отработанных катализаторов, отходов обогащения руд и др. на процессы коксообразования. В этом случае при нагреве сырья кокс откладывается на поверхности частиц твёрдой фазы, которая выносится из печи вместе с жидким потоком, что уменьшает закоксовывание змеевика. Кроме того, при термодеструкции органоминеральных добавок обра-

зуются соединения — доноры водорода, которые насыщают непредельные углеводороды и к тому же могут способствовать снижению содержания серы в коксе [19,20]. Однако следует учитывать, что подобного рода воздействие на сырьё может привести к существенному изменению структуры кокса (в сторону снижения или повышения степени её анизотропии), а это потребует пересмотра сферы применения кокса. Тем не менее, потребность кокса в различных областях техники остаётся высокой, в связи с чем это обстоятельство не может служить препятствием к использованию подобного воздействия на исходное сырьё коксования.

Определение и регулирование кинетической устойчивости необходимы для оценки склонности асфальтенсодержащих нефтепродуктов к расслоению на фазы при хранении (задача повышения устойчивости) или при деасфальтизации гудрона (напротив, задача понижения устойчивости). Существенное значение имеет определение устойчивости в условиях температур крекинга, при которых происходит непрерывное изменение состава нефтяного сырья, накопление вторичных асфальтенов. Критерием высокотемпературной устойчивости (или термоустойчивости) сырья может служить время до начала образования твёрдых сажеобразных частиц — карбоидов, появление которых в системе совпадает с началом интенсивной коагуляции асфальтенов и выделением их в отдельную фазу. Этот момент фиксируется при определённой для данного сырья минимально допустимой стабильной температуре, устанавливающейся на выходе из реактора по мере его закоксовывания. Таким образом, термоустойчивость сырья тем выше, чем выше минимальная стабильная температура [7,21].

Важно подчеркнуть, что, повышая фактор устойчивости по асфальтенам (отражающий склонность асфальтенов к осаждению, определяемый при комнатной температуре по соотношению концентрации асфальтенов в верхнем и нижнем слое образца) [9], можно повысить и термическую устойчивость сырья, т.е. допустимую температуру нагрева без заметного коксообразования. Повышая коллоидную устойчивость сырья различными приёмами, можно в значительной степени снизить коксообразование на поверхности нагревательной аппаратуры. В то же время устойчивое к расслоению однородное сырьё даёт кокс более упорядоченной структуры и более однородный по своим физическим свойствам по всему объёму коксового слоя в реакторе установки замедленного коксования. Всё это улучшает экономические показатели процесса и положительно влияет на энергосбережение.

Кроме всего вышесказанного, необходимо, чтобы в печи УЗК разогреваемое сырьё как можно быстрее проходило через змеевики для минимизации отложения кокса на внутренней поверхности нагревательных труб. Известно, что слой кокса внутри труб змеевика не только снижает эффективность теплообмена,

но и приводит к падению внутреннего давления и повышению температуры металла труб, чреватым их скорым разрушением. Кстати, именно температура металла труб сигнализирует о том, что срок службы змеевика подходит к концу и скоро потребуются его чистка или вообще замена.

Изначально трубы нагревателя прочищали механическим способом с помощью специальных инструментов, что требовало отключения и охлаждения печи и занимало много времени. Внедрение методов быстрой очистки путём парового и водного впрыскивания позволило усовершенствовать расположение змеевика внутри камеры печи и повысить её эффективность. В последние годы на зарубежных и отечественных НПЗ стали применять пробочную механическую очистку змеевиков, так называемый «пиггинг» (от англ. *pig* — свинья, чушка). Давлением воздуха по трубам проталкивают пластиковые скреперы с металлическими боковыми шипами (рис. 1), которые соскребают коксовый налёт со стенок змеевика.

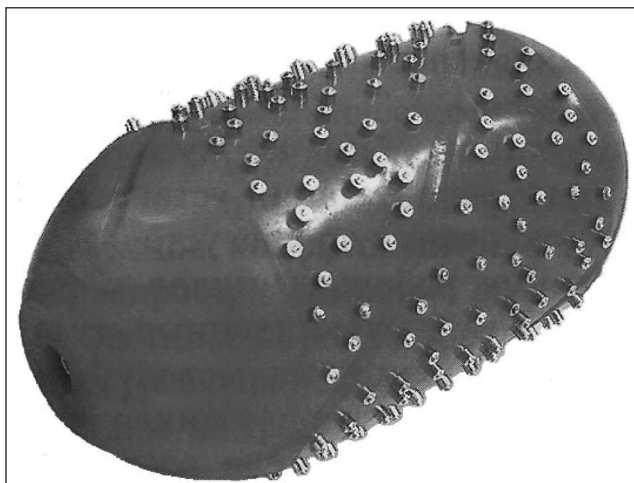


Рис. 1. Пробка с шипами для механической прочистки труб

Поскольку пробочная очистка проводится при более низкой температуре, чем паровое или водяное впрыскивание, она является более щадящей для внутренней поверхности труб. При этом эффективность этого способа значительно выше. Как и предыдущие методы, данная технология требует отключения и охлаждения печи.

Для безостановочной очистки был разработан и внедрён метод онлайн-спаллинга (от *spall* — дробить), использующий разницу в коэффициентах термического расширения отложившегося кокса и металла. При этом кокс распадается на куски и отсоединяется от стенок. Как показала практика, допускается проведение нескольких циклов онлайн-спаллинга перед отключением печи для механической очистки. Конечной целью совершенствования методов очистки было доведение срока службы печей до четырёх лет, чтобы совместить их обслуживание с плановым ремонтом установки.

Был разработан метод онлайн-пиггинга, который требует использования многокамерной печи. Пока в одной камере горелки отключены, а трубы проходят пробочную механическую очистку, остальные камеры продолжают работать [22].

В России метод гидромеханической очистки (или деоксификации) проводит отечественная фирма «МАГИКРОТ» (*MagiCrot*) из группы компаний ЦТК-ЕВРО. Специалистами этой компании предложены разные типы скреперов — пробивной скрепер для начала работ, твёрдый скрепер для удаления твёрдого кокса. Кроме того, предусмотрена схема прохождения скрепером крутоизогнутых отводов и ретурбентов. Результаты компьютерных тестов по изменению скорости потока внутри трубы до и после очистки показывают увеличение проходимости потоков. Таким образом, гидромеханическая чистка позволяет вернуть потокам в печи проектную пропускную способность, зачастую при первой чистке удаляя механические преграды — остатки арматуры, иногда остающиеся при первичном монтаже.

Фирма «МАГИКРОТ» использует быстрый метод диагностирования труб, сокращающий время простоя в сравнении с традиционными методами неразрушающего контроля и диагностирует 100% поверхности труб как радиантной, так и конвекционной секций печи. Гидромеханическая очистка продлевает срок службы труб, сокращает затраты пара и воды, сокращает время простоя печи, что даёт существенную экономию средств. Этот метод безопасен не только для очищаемого оборудования, но и для обслуживающего персонала, и для окружающей среды. Фирма предлагает также способ химической очистки наружной поверхности труб огневых печей и котлов-утилизаторов в режиме «без останова».

Главный аппарат УЗК — реактор (пустотелая коксовая камера). Для сокращения времени рабочего цикла УЗК можно ускорить процесс охлаждения реактора перед выгрузкой кокса. Однако чем быстрее идёт охлаждение и нагревание реактора, тем меньше срок его службы, тем выше вероятность возникновения деформаций, вздутий, трещин и разломов на корпусе. Эти дефекты обычно возникают в местах сварных швов. Специалистами были испробованы различные методы снижения отрицательных последствий температурного воздействия на металл реактора (увеличение толщины стенок, подбор сварных электродов для уравнивания коэффициента температурного расширения металлического листа и материала сварного шва, нанесение покрытия и др.). Наилучшим вариантом оказалось предложение американской инженеринговой компании CB&I по изменению раскроя металлического листа реактора таким образом, чтобы максимально сократилась длина наиболее уязвимых, подверженных трещинам и расколам кольцевых швов (рис. 2) [22].

Известно, что теплообменники УЗК, в которых осуществляется предварительный нагрев вязкого

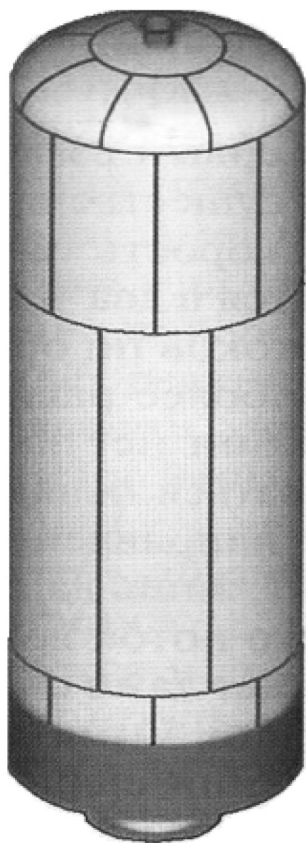


Рис. 2. Продольный раскрой стального листа для сварки реактора

сырья с высокой коксуетостью, довольно быстро забиваются. Замедлить его засорение и продлить срок службы в три-четыре раза можно, применив патент США 6827138, в котором предлагается повернуть сегменты трубных решёток так, чтобы они были расположены по спирали (рис. 3).

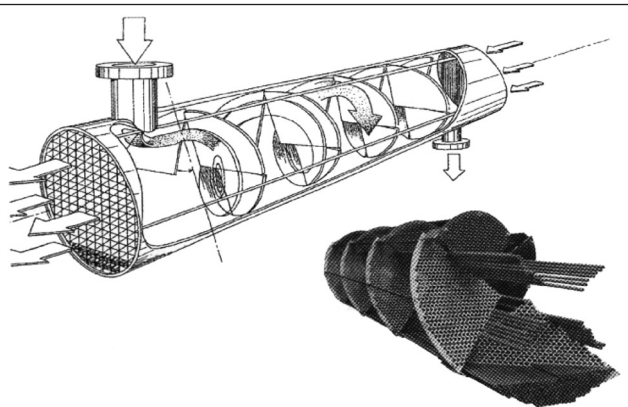


Рис. 3. Спиральный теплообменник

Ускорить выгрузку кокса, улучшить экологию, повысить безопасность и улучшить условия труда персонала помогают современные гидроинструменты фирмы Ruhrpumpen с дистанционным управлением, а также специальные задвижки фирмы Delta Valve, Sulzer, с дистанционным управлением, которые уже применяются на отечественных УЗК. В

последнее время была предложена закрытая система выгрузки и внутриустановочной обработки кокса — *Close Coke Slurry System*, лицензиар TRIPLAN. Эта система позволяет значительно сократить как время обработки кокса, так и численность персонала. Всё это не только повышает эффективность замедленного коксования, но и улучшает экологию и условия труда обслуживающего персонала. На ряде установок замедленного коксования используется метод послойной выгрузки кокса: механический бур с вращающимся гидрорезаком периодически перемещают от верха до основания слоя и обратно. При этом кокс вырезается по направлению от центра к стенкам камеры. Такой способ сокращает время вырезания, даёт меньше коксовой мелочи и исключает проблемы заклинивания бура [23].

В целом развитие техники и технологии замедленного коксования идёт в направлении совершенствования оборудования, автоматизации, повышения безопасности и экологичности, несмотря на ухудшение качества исходного сырья. Однако ещё раз следует подчеркнуть, что для получения качественного кокса необходимо специально готовить сырьё, используя получаемые на НПЗ крекированные продукты, обеспечивая оптимальное соотношение компонентов с высокой степенью ароматичности и высокой кинетической и термической устойчивостью, что положительно сказывается как на работе печи, так и теплообменников и реактора.

Итак, кроме упомянутых выше способов совершенствования технологии коксования (подготовки сырья, совершенствования конструкции коксовой камеры, теплообменников, использования современных приёмов деоксификации труб нагревателей), рекомендуются и другие меры энергосбережения:

- предварительный подогрев воздуха для горения, что повышает эффективность использования топлива (до 92% по сравнению с 87% для варианта с выработкой пара), а также снижает расход топлива;
- улучшение рекуперации тепла фракционирующей колонны, например, с использованием теплоты циркулирующего газойля для выработки пара низкого давления и для предварительного подогрева технологических потоков [14].

Подводя итоги вышесказанного, можно перечислить основные меры для энергосбережения и повышения экологической безопасности на установке замедленного коксования, а именно:

- подготовка сырья различными способами внешнего воздействия, прежде всего оптимального смешения соответствующих компонентов с достижением максимальной однородности сырья;
- применение современного эффективного неразрушающего гидромеханического способа очистки труб печи;
- предварительный подогрев воздуха горения для печей;
- улучшение рекуперации тепла потоков ректификационной колонны;

- совершенствование конструкции теплообменников и коксовых реакторов;

- использование автоматических систем выгрузки кокса из камер и закрытой системы внутри-установочной обработки кокса.

В случае применения технологии непрерывного коксования вариант *Flexicoking* обеспечивает газификацию полученного низкокачественного порошкообразного кокса с превращением его в флексигаза. Технология *Flexicoking*, потребляя низкокачественное остаточное сырьё, даёт значительный выход чистого топливного газа, тепловая энергия которого составляет 450 МВт с установки производительностью 30 тыс.барр. в сутки при ничтожном выходе кокса. Потребителями флексигаса могут быть трубчатые печи, котлы-утилизаторы, перегреватели пара, бойлеры электростанций и др.

Кроме того, следует учитывать, что (как уже указывалось) нефтяной кокс как побочный, а не целевой продукт любых коксовых установок является хорошим топливом для производства пара и электроэнергии и успешно используется в этом качестве во всем мире. Компания Foster Wheeler предлагает технологию сжигания кокса и других твёрдых теплоносителей (каменного угля, сланцев, торфа, биомассы) в котлах с циркулирующим кипящим слоем (технология ЦКС). Преимущества этой технологии — низкие выбросы NO_x , захват серы в топке, широкий диапазон топлива, низкий риск шлакования, гибкость по топливу, простая система подачи, равномерный теплообмен, эффективное выгорание топлива, а также эффективное использование материала для связывания серы. Это надёжная и экологически безопасная технология получения пара и электроэнергии из нефтяного кокса.

При изменении цен на природный газ нефтяной кокс может представлять собой конкурентоспособное сырьё для производства пара и электроэнергии как для нефтеперерабатывающих заводов, так и для предприятий энергетики.

Подводя итоги, можно сказать, что в современных условиях отечественный вариант глубокой переработки нефти с учётом рационального использования тяжёлого (в том числе и низкокачественного) сырья должен предусматривать включение в поточные схемы НПЗ различных технологий коксования с получением кокса не только как целевого продукта, но и как недорогого энергоносителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://ria-news.ru/economics/prodazhi-neftyanogo-koksa-v-mire-s-2014-po-2018-g>.
2. Анализ мирового рынка нефтяного кокса в 2009-2013 гг. и прогноз на 2018 г. // Отчет BusinesStat от 18.02.2014.
3. ИнфоТЭК. — 2017. — № 2. — С. 26.
4. Ахметов С.А., Ишмияров М.Х., Вережкин А.П. Технология, экономика и автоматизация процессов переработки нефти и газа. — М.: Химия, 2005. — 796 с.

5. Сюняев З.И. Нефтяной углерод. — М.: Наука, 1979. — 272 с.

6. Мановян А.К. Технология переработки природных энергоносителей: Учебное пособие. — М.: Химия, КолосС, 2004. — 456 с.

7. Магарил Р.З. Образование углерода при термических превращениях индивидуальных углеводородов и нефтепродуктов. — М.: Химия, 1973. — 144 с.

8. Смидович Е.В. Технология переработки нефти и газа. Крекинг нефтяного сырья и переработка углеводородных газов. — М.: ИД Альянс, 2011. — 328 с.

9. Глаголева О.Ф. Определение и регулирование устойчивости нефтяных дисперсных систем // Нефтепереработка и нефтехимия. — 2012. — № 6. — С. 16-19.

10. Капустин В.М., Глаголева О.Ф. Физико-химические аспекты формирования нефтяного кокса (обзор) // Нефтехимия. — 2016. — № 1. — С. 3-14.

11. Кузора И.Е., Ёлшин А.И., Славкин Л.Г. Выход продуктов при коксовании нефтяных остатков различного происхождения // Нефтепереработка и нефтехимия. — 2005. — № 2. — С. 20.

12. Сафиева Р.З. Физикохимия нефти. Физико-химические основы технологии переработки нефти. — М.: Химия, 1998. — 448 с.

13. Рогачев С.Г., Хайбуллин А.А. Влияние молекулярной структуры сырья на показатели процесса коксования и качество нефтяного кокса. — М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1977. — 52 с. — (Тематический обзор).

14. Мейерс Р.А. Основные процессы нефтепереработки. Справочник: Пер. с англ. / Под ред. О.Ф. Глаголевой, О.П. Лыкова — СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. — 944 с.

15. Сюняев З.И., Сафиева Р.З., Сюняев Р.З. Нефтяные дисперсные системы. — М.: Химия, 1990. — 224 с.

16. Киташов Ю.Н., Назаров А.В., Крестовников М.П., Глаголева О.Ф., Клокова Т.П., Бейлина Н.Ю. Влияние электромагнитной активации сырья на процесс коксования // Экологический вестник России. — 2017. — № 5. — С. 16-21.

17. Клокова Т.П., Глаголева О.Ф., Матвеева Н.К., Володин Ю.А. Поверхностно-активные вещества в процессах переработки нефти // ХТТМ. — 1997. — № 1. — С. 20-21.

18. Клокова Т.П., Володин Ю.А., Глаголева О.Ф. Влияние ультразвука на коллоидно-дисперсные свойства нефтяных систем // ХТТМ. — 2006. — № 1. — С. 32-34.

19. Глаголева О.Ф., Смидович Е.В., Янсон Е.Ф. Влияние природы и концентрации твёрдых добавок на формирование структуры нефтяного кокса // ХТТМ. — 1978. — № 9. — С. 27.

20. Гюльмисарян Т.Г., Горлов Е.Г., Горлова С.Е. Термическая переработка нефтяных остатков в дистиллятные фракции в присутствии активирующих добавок // Наука и технология углеводородов. — 2000. — № 1. — С. 13-17.

21. Доменичи В.Е., Сиэли Г.М. Процесс висбрекинга // ХТТМ. — 1998. — № 1. — С. 39.

22. Рожин И. Ускоряя замедленное коксование // Нефть России. — 2010. — № 5. — С. 88-90.

23. Дж.Х. Гэри, Г.Е. Хэндверк, М.Дж. Кайзер Технологии и экономика нефтепереработки: Пер. с англ. 5-го изд. / Под ред. О.Ф. Глаголевой. — СПб.: ЦОП «Профессия», 2013. — 440 с.