

УДК 665.6/7

УГЛУБЛЕННАЯ ПЕРЕРАБОТКА НЕФТЯНЫХ ОСТАТКОВ КАК СТРАТЕГИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ в 2010–2020 гг.

© 2010 г. **Б.К. Нефедов**

ФГУ «Республиканский исследовательский
научно-консультационный центр экспертизы»
Министерства образования и науки Российской Федерации, Москва

Введение

В условиях невозможности наращивания добычи нефти и постоянного роста потребностей в традиционных источниках энергии переработка тяжелых остатков и высоковязких нефтей, природных битумов, угля и биомассы становится стратегическим направлением развития нефтеперерабатывающей промышленности России и стран СНГ.

Наряду с основными определяющими факторами переработки нефтяных остатков в России и странах СНГ (необходимость повышения эффективности нефтеперерабатывающих заводов за счет повышения степени конверсии улучшения качества продуктов для выполнения повышенных международных требований, а также более строгих требований на внутреннем рынке, необходимость снижения производства высокосернистого котельного топлива, тенденция к переработке более тяжелой нефти и нефти с более высоким содержанием серы) перед нефтеперерабатывающими компаниями возникают новые актуальные задачи, связанные с пересмотром стратегических решений в финансировании перспективных проектов, позволяющих осуществлять процессы с большей эффективностью и с меньшими потерями в условиях продолжающегося финансового кризиса.

В настоящее время не существует простых решений на НПЗ в организации промышленных процессов и установок, обеспечивающих резкую интенсификацию углубления переработки нефти. Поэтому

нет основания ожидать презентаций в ходе конференции новых прорывных решений в области катализаторов нефтепереработки и создания оригинальных технологий для ряда процессов. Ведущие зарубежные фирмы — поставщики технологий нефтепереработки, как показывает опыт работы аналогичных конференций, информируют о процессах и технологиях, уже используемых в промышленности.

Глава фирмы «Euro Petroleum Consultants» Колин Чапман в обзорном докладе «Задачи и возможности реализации проектов по переработке нефтяных остатков на НПЗ России и стран СНГ» отметил значительное снижение объемов инвестиций в процессы переработки нефтяных остатков, поскольку новые проекты требуют значительного финансирования, а также тщательного планирования выбора схемы переработки остатка.

Учитывая сложившуюся мировую ситуацию в нефтепереработке прежде всего в Европе (рост спроса на дизельное топливо и снижение спроса на бензин, а также резкое увеличение стоимости переработки), автор считает, что для пересмотра инвестиционных программ, отбора и реализации стратегических проектов необходимо опираться на долгосрочную стратегию, на использование оптимальных технологий, возможность интеграции с существующей конфигурацией НПЗ, требования внутреннего рынка и спроса, к качеству нефтепродукта, на переоценку экономической составляющей существующих проектов. Выбор оптимальной технологической схемы, отвечающей изменениям требований рынка, предварительные планирование и

*Нефедов Б.К. — докт. хим. наук, проф, зам. директора по научной работе.
Тел.: (8 916) 901-55-17, e-mail: nefedov_bk@smtp.ru.*

оценка проекта позволят в конечном итоге за счет переработки нефтяных остатков увеличить степень конверсии сырья, производительность НПЗ.

Тенденции развития рынка нефтеперерабатывающей промышленности

В 2007–2015 гг. основные рынки потребления и переработки нефти — Юго-Восточная Азия (Китай, Индия), Европа, Северная Америка и Россия. Предпосылки стимулирования инвестиционного развития нефтепереработки в этот период: высокий спрос на нефтепродукты, дефицит мощностей нефтепереработки, разница в цене на легкую и тяжелую нефть, необходимость облагораживания нефтепродуктов и сокращение потребления мазута, требования природоохранного законодательства.

Можно предполагать, что в условиях продолжающегося экономического кризиса основными тенденциями развития российской нефтеперерабатывающей промышленности могут быть: модернизация заводов с целью увеличения глубины переработки и повышения рентабельности производства; удовлетворение растущего потребления моторных (прежде всего дизельных) топлив и улучшения их качества для обеспечения евростандартов Евро III, Евро IV, подготовка перехода к стандарту Евро V; выход на международный рынок с продукцией как собственной, так и посредством покупки существующих мощностей в Европе и в Америке; участие в развитии быстро растущей нефтеперерабатывающей промышленности КНР; минимизация экологических рисков при работе предприятий.

С этими положениями Чапмана и академика С.Н. Хаджиева нельзя не согласиться, их необходимо учитывать при планировании развития и модернизации российских НПЗ.

Состояние российской нефтепереработки, ее место в мировой нефтепереработке, основные проблемы российского нефтеперерабатывающего сектора и перспективы развития НПЗ

Достаточно подробно состояние нефтепереработки в мире и намеченные пути развития процессов глубокой переработки нефти в России охарактеризовал Генеральный директор ОАО «ВНИПИнефть» профессор В.М. Капустин. Состояние нефтепереработки в мире в 2009 г. характеризуется ростом мощ-

ностей по нефтепереработке в Китае и Индии; строительством экспортно-ориентированных заводов в Саудовской Аравии, Кувейте, Арабских эмиратах; увеличением добычи битуминозной нефти в Канаде; снижением в перспективе потребления нефти в Европе и, следовательно, прибыли от нефтепереработки. В России в 2009 г. переработано 5,6 млн т нефти (–1,4 % по сравнению с 2008 г.), выработано 35,7 млн т бензина (+0,3 %), 8,5 млн т керосина (–9,5 %) и 67,4 млн т дизельного топлива (–2,2 %). Эти результаты достигнуты на морально и физически устаревшем оборудовании. В 2009 г. введены в эксплуатацию лишь установка замедленного коксования ОАО «Уфанефтехим» и установка висбрекинга ОАО «Салаватнефтеоргсинтез». Ничего не сообщается о состоянии реализации разработанных в предыдущие годы крупных проектах нефтепереработки, действительно направленных на проблемы увеличения глубины переработки нефти: комплекс гидрокрекинга («Татнефть», Нижнекамск и «Сургутнефтегаз», Кириши), комплекс глубокой переработки нефти («Лукойл», Кстово), гидрокрекинг гудрона («Газпромнефть», Москва), комплекс гидрокрекинга («ТАИФ-НК», Нижнекамск), реконструкция и модернизация Московского НПЗ и др.

Намечается перспектива развития производства базовых масел в России: выполнены базовые проекты создания мощностей 200 тыс. т/год по технологии «Exxon-Mobil» для ОАО «НК Роснефть» (Ангарск, Новокуйбышевск), ведется проектирование мощности 100 тыс. т/год по технологии «Shevron Lummus Global» для ОАО «Татнефть» (Нижнекамск).

Новыми тенденциями в российских разработках по технологии переработки нефти В.М. Капустин считает развитие процессов каталитического крекинга и катализаторов процесса, висбрекинга, замедленного коксования и гидроконверсии гудрона. Из этого набора технологий перспективной можно признать лишь процесс гидроконверсии гудрона, который пока, судя по зарубежным аналогам, является затратным и технологически сложным.

Процесс каталитического крекинга постоянно совершенствуется и за счет новых технологических решений и катализаторов удастся достигнуть приведенных в докладе показателей: выход бензина с к.к. 205 °С — 51 мас.%; суммарный выход газов C₃–C₄ — 16 мас.%; октановое число ИМ — 94,2; содержание серы в бензине — 0,005 мас.%. Показатели качества новых катализаторов каталитического крекинга бензинов (в частности «Люкс-2» разработка ИППУ

СО РАН) превосходят показатели лучших зарубежных катализаторов «Brilliant Grace» и «LS-60P» фирмы «Engelhard». Однако остается открытым вопрос энергосбережения новых технологий, поскольку это будет определять реализуемость новых проектов.

Без сомнения процесс гидроконверсии остатков заслуживает самого серьезного внимания, поскольку позволяет из гудронов разных нефтей получать 81–86 % синтетической нефти. Однако приведенная блок-схема процесса не дает никаких сведений о технической возможности реализации и, самое главное, о материало- и энергозатратах.

Новым направлением развития нефтепереработки может стать проблема качества и рынка бункерного топлива (доклад компании «Purvin & Gertz»). В настоящее время нормативные органы и транспортные компании принимают меры по выполнению новых требований, выдвинутых Международной морской организацией (ИМО) по изменению ассортимента бункерного топлива, которые повлияют на уровень спроса на высоко- и малосернистое бункерное, дистиллятные топлива для судовых двигателей. Это, безусловно, скажется на структуре НПЗ, потребует разработки и внедрения новых технологий.

В настоящее время наметились некоторые положительные сдвиги в развитии российской нефтепереработки: снижение спроса на низкокачественное топливо и неэкологичные двигатели, принятие Ф3 РФ «О техническом регулировании», в частности техническим регламентом, утвержденным Постановлением Правительства РФ за № 609 от 12.10.05 на топливо и автомобильные двигатели, дифференциация акцизов на топливо, введение нулевых пошлин на ввоз оборудования нефтеперерабатывающей промышленности, на биржевую торговлю энергоносителями, в том числе нефтепродуктами.

Рекомендации ведущих нефтеперерабатывающих фирм по процессам переработки тяжелых нефтяных остатков в качественные моторные топлива

Можно выделить три типа «новых» процессов, которые должны решить актуальные задачи, связанные с пересмотром стратегических решений в финансировании перспективных проектов, характеризующихся большей эффективностью и меньшими потерями в условиях финансового кризиса:

1) термохимические (висбрекинг, сольвентная

деасфальтизация, замедленное коксование) процессы;

2) гидрогензационные процессы;

3) технологии с газификацией остатков для производства водорода и электроэнергии.

Компания «Föster Wheeler» считает, что несмотря на замедление экономического роста, и общемировой спад в нефтепереработке, приведшие к задержке и отмене многих проектов, наблюдается реализация новых проектов на развивающихся рынках, что связано с высокой стоимостью нефти, снижением стоимости проектов, повышением спроса на дизельное топливо и снижение содержания серы в мазуте. Для улучшения показателей рентабельности НПЗ необходим рост заинтересованности в осуществлении проектов облагораживания нефтяных остатков (к вариантам последнего фирма относит: висбрекинг, селективную деасфальтизацию, замедленное коксование, флексикокинг, каталитический крекинг в кипящем слое, гидрокрекинг остатков и газификацию).

Для висбрекинга по технологии «UOP» и «Föster Wheeler» используется недорогое оборудование; процесс идет при низком давлении и позволяет получать вакуумный газойль для установок каталитического крекинга или гидрокрекинга. Для увеличения глубины конверсии на установке может быть предусмотрен термический крекинг рециклового газойля.

Технология селективной деасфальтизации характеризуется низкими капиталовложениями, но высокими затратами на разделение продуктов (докритическая или закритическая сепарация деасфальтизата и сольвента). Деасфальтизат направляется на каталитический крекинг или гидропереработку, а остаток требует утилизации. Наиболее эффективна утилизация комбинированием селективной деасфальтизации с замедленным коксованием SYDECSM. По мнению специалистов фирмы, этот процесс, проверенный в промышленности (построено более 100 установок за последние 10 лет), обеспечивает полное превращение тяжелых остатков в дистилляты, полную декарбонизацию тяжелого сырья коксования и полное удаление металлов, поэтому процесс SYDECSM направлен на производство топливного кокса. Использование процесса замедленного коксования по технологии SYDECSM позволяет экономично перерабатывать нефти самого разного качества, в том числе высокосернистые.

Для получения качественных топлив в схеме НПЗ предусмотрен процесс гидрокрекинга по технологии с кипящим слоем (лицензиары «CLG», «Axens», «Headwater») или технология со шламовой фазой («UOP», «Eni», «Chevron», «BP»). Характерная особенность технологических процессов «Föster Wheeler»: снижение потребности в топливном мазуте (висбрекинг), сокращение объема получаемого битума (селективная деасфальтизация), достижение высокой конверсии (коксование), производство топлив гидрокрекингом. Газификацией обеспечивается полное превращение нефтяного остатка.

Аналогичное предложение по переработке нефтяных остатков фирма делала на 2-й конференции России и стран СНГ по технологиям переработки нефтяных остатков (17 и 18 апреля 2007 г., Москва). Однако рекомендации по выбору оптимальной схемы реконструкции НПЗ в целях получения максимального выхода светлых и максимального сокращения производства топливного мазута недостаточно убедительны.

Фирма «Shell» считает, что технологический процесс термической конверсии чрезвычайно универсален по ассортименту перерабатываемого сырья и глубине конверсии и поэтому альтернативен замедленному коксованию, деасфальтизации, FCC, гидрокрекингу. Технология термической конверсии может стать основой модернизации НПЗ для решения проблемы «нулевого» производства мазута. Для этого в схему НПЗ вводятся установка висбрекинга с сокинг-камерой и установка по производству электроэнергии (комбинированный цикл комплексной газификации). Термический крекинг подходит для схем поэтапных капиталовложений и может служить переходным звеном к технологии гидроконверсии. Действительно, за 50-летний период совершенствования технологии термоконверсии последние установки фирмы работают с «нулевым» выходом мазута, выход дизельного топлива возрос с 27 до 51 % от объема переработки, в остатке — сырье для производства электроэнергии (~10 %) и битума (~10 %). Фирма скромно умалчивает, что решая проблему полной переработки мазута в конфигурации НПЗ имеется установка по гидроочистке дизельного топлива. Как решается проблема получения дизтоплива, отвечающего современным стандартам, не указывается. Кроме того, последние варианты технологических решений по технологии «STDC-2» предусматривают дополнительную установку каталитического крекинга вакуумного газойля.

Фирма «KBR» предлагает проверенную технологию «ROSE» (сольвентной деасфальтизации), которая позволяет получать анодный кокс при переработке нефти низкого качества. В настоящее время рынок анодного («зеленого») кокса оценивается в 11–12 млн т в год и ожидается ежегодный рост на 3–5 %.

Вводом в состав НПЗ установки «ROSE» можно гибко регулировать состав сырья коксования и получать кокс анодный: (производство алюминия), игольчатый (производство стали), топливный (производство цемента, энергии). В результате регулируемого смешения компонентов сырья (мазута, деасфальтизата, смол, асфальтенов), прошедшего обработку в процессе «ROSE», удастся получать преобразованный состав с требуемым содержанием серы и металлов.

Новое производство содержит установки: замедленного коксования с получением топочного кокса, каталитического крекинга мазута с гидроподготовкой, дополнительного регулирования «ROSE», получения анодного кокса, грануляции; кроме того, имеется производство дорожного асфальта.

Преимущества использования смол деасфальтизации следующие: меньшая зависимость от качества сырья, гибкость выбора и подготовки сырья, отсутствие дорогостоящей системы очистки сырья, более высокий выход жидких продуктов с установки коксования, получение ценного анодного кокса, снижение выхода низкосортного топливного кокса.

Значительный интерес представляет «Новая технология замедленного коксования», изложенная ведущим научным сотрудником Уфимского государственного нефтяного технического университета Г.Г. Валявиным. Сущность ее заключается во включении в схему установки выносной секции ректификационной колонны для подачи сырья и фракционирования продуктов рециркуляции.

Эта технология позволяет значительно увеличить производительность действующих установок и организовать производство нескольких видов кокса: анодного и топливного, игольчатого и анодного, игольчатого и топливного. Разработан режим получения новой продукции — коксующейся добавки, потребителями которой являются предприятия металлургии и коксохимии. В 2009 г. на НПЗ в Уфе построена и пущена по новой технологии установка мощностью 1,2 млн т сырья в год.

Фирма «Conoco Phillips» представила опыт перевода установки коксования в псевдоожиженном слое

НПЗ «Martinez» компании «Tesoro» на технологию замедленного коксования «Thru Plus[®]», в результате которого сократились выбросы в атмосферу, улучшилась экологическая обстановка в районе залива Сан-Франциско (Калифорния), сократилось производство топливного газа, повышена безопасность, сократился объем выбросов вследствие ликвидации атмосферной колонны продувки, сократились расходы и энергозатраты, повысилась производительность.

В установке с расходом сырья 2,5 млн т/год и выходом кокса 3175 т/сут. использована закрытая система подачи и продувки, что позволяет конденсировать водяной пар и пары углеводородов из загружаемой коксовой камеры, минимизировать воздействие на факел сброса давления в коксовой камере, минимизировать загрязнение воздуха, воды и шума.

Достигнуто сокращение выбросов NO_x на 93,3 %; SO_2 на 99,7 %; NH_3 на 98,6 %; парниковых газов на 70 %. Пыление на установке сведено до минимума, в результате рациональной схемы «яма—площадка». Время пребывания кокса на площадке позволяет улучшить контроль влажности кокса (8—10 мас.%). На установке использована высокоэффективная печь с двухсторонним нагревом и низкой скоростью закосовывания.

Доклады и презентации этого раздела мало информативны, носят, скорее, рекламный характер совершенствования процессов и не позволяют принять эффективных решений по модернизации действующих НПЗ.

Рекламируемые термохимические процессы переработки нефтяных остатков, отработанные в промышленности, не дают возможности получать качественные моторные топлива. В частности, в процессе сольвентной деасфальтизации деметаллизированный продукт с низким содержанием примесей направляют на последующую переработку, а пек деасфальтизации используют как компонент дорожного покрытия, как твердое топливо в производстве пара и энергии, цемента, плавки и очистки металлов. Процесс замедленного коксования направлен на производство топливного и игольчатого кокса невысокого качества; получающиеся при этом жидкие продукты требуют дальнейшей переработки с целью получения высококачественных моторных топлив.

Более информативны, с конкретными рекомендациями, презентации оборудования для переработ-

ки нефтяных остатков фирм «Flowserve» (доклад «Инновации в технологических схемах автоматизации и дистанционного управления для гидроудаления кокса»), «Zimmerman & Jansen» (доклад «Инновационные технические решения для оптимизации производства и повышения безопасности установок замедленного коксования и ФКК»), «Alfa Laval» (доклад «Теплообменники для эффективной передачи и утилизации тепла»), «Deltavalve» (доклад «Безопасность и надежность работы установок замедленного коксования в условиях экономического спада»). В них рассматриваются схемы применения установок, преимущества, достигаемые с их использованием.

Гидрогенизационные процессы

Фирма «Du PontTM» предлагает эффективную технологию гидрогенизационных процессов нефтепереработки (гидроочистка, легкий гидрокрекинг) «IsoTherming[®]» для получения дизельного топлива, отвечающего стандарту Euro V, практически из любого вида сырья. Процесс «IsoTherming[®]» представляет технологию гидрогенизации (гидроочистку, легкий гидрокрекинг), позволяющую производить дизельное топливо с низким и сверхнизким содержанием серы (< 0,001 мас.% из типичных видов сырья, включая легкий рецикловый газойль установки каталитического крекинга. Технология может быть использована при строительстве новых установок и реконструкции действующих; обеспечивается приемлемый уровень долгосрочного дохода на инвестированный капитал и получение желаемой номенклатуры продукции из дешевого сырья (газойлей коксования, жидких продуктов переработки сланцев, битуминозных песков).

Отличительные особенности технологии «IsoTherming[®]»: эксплуатационная гибкость при использовании традиционных промышленных катализаторов; меньшие капитальные вложения (затраты при реконструкции); меньший объем катализатора при переработке отдельных видов сырья; больший выход продукта. Это достигается работой реактора в изотермических условиях (адиабатический рост температуры гораздо меньше, чем при использовании традиционной конструкции реактора с орошаемым слоем, а теплота реакции поглощается циркулирующей жидкостью). Необходимый для реакции водород растворяется в жидкости до поступления в слой катализатора. Расход жидкого циркулирующего потока устанавливается таким, чтобы

количество водорода, растворенного в объединенном сырье, значительно превышало потребности реакции. В этом случае процесс управляется эффективностью катализатора и фактической скоростью реакции. В результате подъем температуры в слое катализатора значительно ниже, чем в традиционной технологии. Поэтому даже при гидроочистке или гидрокрекинге тяжелого сырья (крекинг-газойли, газойли коксования и т.п.) обеспечивается более высокий выход целевого продукта по сравнению с традиционной технологией, а также срок службы катализатора.

Конструкция реактора процесса «IsoTherming®», рассчитанная только на жидкую фазу, позволяет эффективно решить проблемы, связанные с многофазовым потоком, — обеспечить значительно меньший перепад давления и правильный режим двухфазового потока.

В связи с отсутствием системы циркулирующего газа экономия капитальных затрат при строительстве новых установок достигается в результате отсутствия компрессора газа циркуляции, емкости испарения высокого давления, сепаратора, конденсатора, аминовых скруббера и насоса высокого давления, меньшего размера реактора.

Приведены схемы для новых установок «IsoTherming®» для производства дизельного топлива и керосина из легкого сырья; дизельного топлива из трудно перерабатываемого сырья, а также проекты реконструкции разных действующих установок.

В случае гидрокрекинга, использование технологии IsoTherming® для подготовки сырья каталитического крекинга дает возможность обеспечить выполнение заводских требований наиболее эффективным образом. Так, при гидрооблагороживании комбинированного сырья — вакуумного газойля с деасфальтизатором, в реактор загружается серия слоев катализаторов деметаллизации, гидрообессеривания и гидродеазотирования, гидрокрекинга, рабочий объем выбирается с учетом задач снижения примесей до целевого уровня.

Капитальные затраты на установку легкого гидрокрекинга по технологии «IsoTherming®» мощностью 200 м³/ч при давлении 14,0 МПа составляют 67,3 млн долл. по сравнению со 135 млн долл., необходимыми для реализации традиционного процесса с орошаемым слоем.

В настоящее время эксплуатируются: две установки легкого гидрокрекинга (200 м³/ч на заводе компании «Holly Corp. Artesia NM» и 100 м³/ч — «Holly Corp. Woods X Utah»), две новые установки

гидроочистки (80 м³/ч компании «Western-Yorktown, VA» и 33 м³/ч компании «Western-Ciniza, NM»), реконструированная установка получения дизельного топлива (25 м³/ч компании «Western-Ciniza, NM»).

В докладе «Процесс по технологии «LC-Fining» эксплуатация установки гидрокрекинга и обеспечение высокой степени конверсии остатков» компании «Chevron Lummus Global» описываются результаты эксплуатации установки в составе комплекса «Shell Canada Energy» в Скотфорде по облагораживанию нефти в проекте переработки битуминозных песков Атабаски (AOSP). В установке объединены такие процессы как гидроочистка и гидрокрекинг вакуумного остатка.

В связи с возрастающими поставками в качестве сырья тяжелых высокосернистых нефтей с высоким содержанием примесей (азот, металлы, асфальтены), коксуемостью возрастает постоянная потребность в улучшении качества нефтепродуктов (дизельного топлива, бензина). Все возрастающее значение будут иметь нетрадиционные продукты и процессы: переработка газа в жидкие продукты, производство жидких продуктов из угля, переработка канадских битуминозных песков, тяжелых нефтей, производство биотоплива как энергоносителя. В период экономической неопределенности для инвестиционных решений по новой структуре нефтепереработки определяющее значение приобретает эффективность капиталовложений, которая во многом определяется технологической гибкостью процесса, надежностью и безопасностью.

Компания «Chevron Lummus Global» специализируется также на гидропроцессах переработки нефтяных остатков и за период 2000—2008 гг. лицензировала технологии гидроочистки остатков «RDS», «VRDS», «OCR», «UFR», гидрокрекинга остатков «LC-Fining», гидроочистки дистиллятов «Iso Cracking», «Iso Treating», производства базовых масел «Iso Cracking», «Iso Dewaxing», «Iso Finishing».

В зависимости от количества примесей в составе сырья, требований к качеству товарных продуктов и необходимой степени конверсии рекомендуются коммерчески успешные технологии гидрокрекинга. На выбор технологической схемы установки влияют ограничения по капитальным затратам.

Для переработки легкого газойлевого сырья каталитического крекинга рекомендуется процесс фирмы «Axen HуC-10» (подготовка сырья для установки каталитического крекинга FCC и производство дизельного топлива с низким, < 0,001 мас.%, содержанием

серы — модификация процесса «HyC-10™»), в целях реализации которого в установке объединены секции легкого гидрокрекинга и гидроочистки продуктов.

Для полной переработки газойлевого сырья в средние дистилляты (дизельное топливо) высокого качества рекомендуется процесс «HyK™» — гидрокрекинг при высоком (≥ 14 МПа) давлении водорода, осуществляемый либо в одну ступень с рециклом, либо в две ступени. Гидрокрекинг подготовленного вакуумного газойля проводят на катализаторах HR 548 (Ni-Mo) и HDK776 (Ni-W). При необходимости работы с высокой конверсией (увеличение выхода дизельного топлива и снижение выхода сырья каталитического крекинга) используется система двух катализаторов (HR 548 + HDK776). Процесс гидрокрекинга при высоком давлении позволяет перерабатывать вакуумные дистилляты прямогонные, коксования, висбрекинга, деасфальтизаты, экстракты фурфурольной очистки, парафины с получением высококачественного дизельного топлива и керосина, базовых масла с высоким индексом вязкости, а также сырья пиролиза.

Для гидроочистки средних дистиллятов рекомендуются технологии «Prime-D» и «Prime-K» для получения дизельного топлива со сверхнизким $< 0,001$ мас.% содержанием серы и авиакеросина с низкой высотой коптящего пламени и сверхнизким содержанием серы. Для реализации этих технологий разработаны специальные катализаторы серии HR-500 — катализатор Co-Mo HR-626 для сверхглубокого обессеривания дизельного топлива, гидрообессеривания при низком давлении; Ni-Mo HR-648 для гидродеароматизации при давлении 4—5 МПа. Разработаны специальные катализаторы для максимальной селективности выхода дизельного топлива, качественных товарных дизельного топлива и авиакеросина, неперерабатываемых остатков для производства смазочных масел.

В презентации российского института ГрозНИИ рассмотрен процесс гидроконверсии тяжелого нефтяного сырья в легкие и средние дистилляты при 6—10 МПа с использованием наноразмерного катализатора. В принципиально новой каталитической системе обеспечивается лучший доступ реагентов к активным центрам. Состав не сообщается, но, судя по литературным данным, это — Mo-катализатор, разработанный в Институте горючих ископаемых для процесса ожижения угля и гидропереработки нефтяных остатков. Отличительная особенность этого катализатора — эмульсионное состояние с

118,6—460,3-нм частиц, которое достигается в процессе приготовления при вводе предшественников в исходное сырье.

При переработке сырья на опытных установках достигается выход «синтетической» нефти от 63,4 % (сырье—битум) до 81—86 % (сырье—мазут или гудрон). Синтетическая нефть плотностью 857—890 кг/м³ не содержит металлов, но содержит 1,2—2 мас.% серы. По предлагаемой технологической схеме такая нефть направляется на дальнейшую переработку по известным технологиям с целью получения товарных продуктов. В презентации приводятся умозрительные блок-схемы НПЗ с новым процессом гидроконверсии для переработки тяжелой нефти. К сожалению, отсутствует оценка материало- и энергозатрат на блок установки гидроконверсии, поэтому невозможно оценить инвестиционную привлекательность схемы безостаточной переработки нефти на предлагаемом НПЗ.

Компания «Axens» (доклад «Интегрированная технология в кипящем слое: надежное и компетентное решение для максимального выхода дизеля из остатков нефти «Ural»») сообщает, что за последние годы технология процесса H-Oil была существенно доработана: улучшены надежность, эксплуатационные характеристики и гибкость. На действующих установках значительно увеличено время непрерывной работы (более чем на 97 %) и производительность, адаптированы новые системы катализаторов. Интегрированные процессы по доработанной технологии «H-Oil» особенно пригодны для производства топлива с низким содержанием серы и с максимальным выходом дизельного топлива из вакуумных остатков нефти «Ural».

Компания «UOP» в презентации «Конверсия тяжелых остатков и гидрогенизационные процессы как решение проблем качества котельного топлива в будущем» предлагает решения в области глубокой конверсии и гидроочистки остатков российских нефтей с использованием процессов «Uniflex», «Unicracking», «Unionfining», хотя для конверсии остатков можно использовать все имеющиеся у фирмы технологии. В частности сольвентной деасфальтизацией с гидроочисткой остатков из гудрона или вакуумного газойля можно получить морское котельное топливо с содержанием 0,1 мас.% серы. Процессом замедленного коксования по технологии «Siadeck» можно получать из гудрона судовое котельное топливо наряду с другими продуктами (бензин, дизельное топливо, вакуумный газойль). Для переработки

вакуумного газойля, выделенного при перегонке нефти на АВТ, наиболее пригодны технологии каталитического крекинга или гидрокрекинга. Конверсией остатков перерабатывается гудрон с получением моторных и реактивных топлив. Фирма «UOP» сообщает, что она располагает всеми известными технологиями конверсии остатков как термических, так и гидрогенизационных процессов.

Для переработки российских нефтей типа «Urals» фирма рекомендует процесс «Uniflex» — технологию гидрокрекинга во взвешенном слое катализатора с элементами хорошо известных технологии гидрокрекинга гудрона «Canmet», а также технологий «UnionfiningTM» и «UnicrackingTM». Установка «Uniflex» обеспечивает высокую конверсию гудрона с получением максимального выхода судового котельного топлива. Отличительные особенности технологии «Uniflex»: оптимальная конструкция реактора с восходящим потоком (небольшой объем газовых пустот, высокая степень испарения продукта, интенсивное обратное перемешивание жидкой фазы), а также использование наноразмерного диспергированного катализатора.

В результате циркуляции тяжелого вакуумного газойля уменьшается закоксованность катализатора и, следовательно, увеличивается конверсия, выход жидких продуктов. Модернизация технологии «Uniflex» продолжается моделированием эксплуатационных характеристик, совершенствованием контроля, регулирования, технологической схемы, утилизации неконвертированного остатка. Последняя, очень важная, проблема решается сжиганием в цементных печах и отопительных котлах, переработкой на установках замедленного коксования или сольвентной деасфальтизации, газификацией. Процесс «Uniflex» легко сочетается с другими процессами переработки остатков: висбрекингом, гидрогенизационными процессами, замедленным коксованием, сольвентной деасфальтизацией.

Можно видеть, что рекомендации фирмы «UOP» пригодны для переработки не только российской нефти типа «Urals». Приведенные комбинированные схемы переработки не конкретны, не содержат данных по капитальным затратам базовых проектов, условиям переработки с получением качественных моторных топлив и, тем более, данных по составу катализаторов. Фирма предлагала схемы производства качественных моторных топлив легким гидрокрекингом с частичной конверсией «UnicrackingTM» и «Unifining» (например, в 2006 г. на 6-й конферен-

ции-выставке по технологиям нефтепереработки России и стран СНГ). Предлагались для получения высокооктанового бензина и дизельного топлива со сверхнизким содержанием серы катализаторы HC 215, HC 115 (селективные к средним дистиллятам), HC 29, HC 185, HC 190 (селективные к бензиновым фракциям) и HC 35, HC 150, HC 53 (универсальные). Эти технологии позволяли в одну ступень совместно перерабатывать газойли каталитического крекинга с разными дистиллятными фракциями. При этом обеспечивалось снижение потребления водорода и гибкости процесса в отношении как перерабатываемого сырья, так и получаемых продуктов.

В презентации фирмы «Criterion Catalysts & Technologies» (доклад «Осмысление опыта эксплуатации установок гидрооблагороживания тяжелых остатков» сопоставлялась эффективность применения катализатора в стационарном слое и во взвешенном (эбуляционном) слое на примере установки «LC-Fining» фирмы «Словнафт» для гидрооблагороживания остатков и на установке обессеривания мазута (Ближний Восток). При работе в стационарном слое катализатора максимальная степень конверсии тяжелых остатков ограничивается сопутствующим ростом загрязнений оборудования и продуктов. На установке со стационарным слоем катализатора возможна переработка атмосферного остатка или смеси атмосферного и вакуумного остатков с взвешенным слоем 100 %-ного вакуумного остатка и даже битума. При этом установки с суспендированным слоем позволяют перерабатывать сырье с более высоким содержанием примесей (металлов — до 0,06 %, асфальтенов 10—18 %), коксующестью по Конрадсону 18—22.

Условия эксплуатации установок со стационарным слоем: рабочее давление 10—20 МПа, объемная скорость 0,2—0,3, температура 370—410 °С, рабочий цикл катализатора 6—12 мес.; с суспендированным слоем катализатора: рабочее давление 11—20 МПа, объемная скорость 0,25—1,0, температура 400—435 °С, рабочий цикл катализатора неограничен. В реактор стационарного слоя загружается до пяти разных катализаторов; в реактор с суспендированным слоем — один катализатор, добавляемый ежедневно. Конверсия остатка составляет в стационарном слое 25—40 %, во взвешенном слое 50—80 %. Продуктами являются в первом случае низкосернистый мазут и сырье для процесса FCC, во втором — средние дистилляты + вакуумный газойль + вакуумный остаток для мазута. Основные факторы, ограничивающие

продолжительность рабочего цикла — в реакторе стационарного слоя — достижение максимальной средневзвешенной температуры слоя катализатора и высокий перепад давления в защитном реакторе; в реакторе с суспендированным катализатором — загрязнение последующего оборудования (горячего сепаратора низкого давления, теплообменника, атмосферной и вакуумной колонн, теплообменника печи вакуумной колонны) окалиной и коксовыми отложениями.

Основные задачи повышения эффективности работы установок с суспендированным слоем: устранение ограничений, связанных с образованием осадка (повышение степени конверсии и улучшение стабильности продукта); преодоление температурных ограничений (повышение степени конверсии при сохранении рабочей температуры); снижение затрат на катализатор (повышение стабильности и уменьшение потерь (количества добавки) катализатора).

В установках используется специальный катализатор «TEX-2800» и «TEX-2910» вместо использованного ранее «HDS-1443», который позволяет снизить образование осадка в шесть—семь раз. На примере работы установки «LC-Fining» на НПЗ фирмы «Словнафт» (основа интегрированного комплекса переработки нефти типа «Urals») показано, что использование новых катализаторов в сочетании с новым распределительным оборудованием является апробированным в промышленности решением, позволяющим быстро устранить эксплуатационные ограничения, связанные с загрязнениями осадком. В результате появляется гибкость, необходимая для работы установок как с суспендированным, так и со стационарным катализатором.

Единственной презентацией, связанной с разработкой новых катализаторов для процесса крекинга остатков, стал доклад менеджера по маркетингу фирмы «Grace Davison» С. Baitlie «Третье поколение катализаторов технологической платформы «Enhance R» фирмы «Grace Davison». Сообщается, что на базе платформы «Enhance R» созданы новые высокоэффективные катализаторы крекинга «NACER», «Resid Cracker R», «Dieselise R», «Premie R».

Разумеется, технология эксплуатации новых катализаторов не сообщается, но приведены принципы их создания: регулирование количества и силы кислотных центров посредством нанесения алюминия на поверхность цеолита, что приводит к образованию новых кислотных центров для предварительного крекинга больших молекул сырья (технология

EAM); изменение структуры пор с увеличением количества крупных пор в области ≥ 10 нм. В результате такого модифицирования увеличивается активность катализатора, улучшается крекинг остатков, повышаются выход олефинов C_4 (технология EPR), металлостойкость (технология EMR) и структурная стабилизация (технология ESS).

Создана серия катализаторов крекинга остатков: «NEKTOR» (технологии EMR+EPR), «NEKTOR-ULCC» (технологии EMR+EPR+EAM) для переработки остатков с низкой величиной δ кокса; «PREMIER» (технологии EPR+EMR^{PRIMER}+EAM) для переработки остатков с максимальной металлоемкостью и минимальной величиной δ кокса; «NOMUS» (технологии EAM+ESS) и «NOMUS-DMAX» (технологии EAM+ESS+EPR) для максимальной конверсии сырья и выхода легкого рециклового газойля; «Dieselise R» (технологии EAMRD+ESS+EPR^R) для максимального выхода легкого рециклового газойля при гидроочистки и крекинге остатков; «ResidCracker R» (технологии EAMRD+EMR+EPR^R) для глубокого крекинга остатков; «NADIUS» (технологии EAM^{HT}+ESS), «NASER» (технологии EAM^{HTD}+ESS+EPR^{HT}) для крекинга остатков и гидроочистки сырья с высокой конверсией.

В 2008—2009 гг. на промышленных установках применялись три катализатора «NASER» и по одному «Dieselise R» и «Resid Cracker R» для переработки вакуумного газойля.

В качестве примера применения катализаторов третьего поколения, в частности катализатора «NEKTOR-ULCC», приведены данные по эксплуатации установки FCC на НПЗ компании «Total» в Антверпене. Установка мощностью 175 м³/ч имеет многоуровневую конструкцию фирмы «UOP», в 2001 г. была реконструирована с монтажом верхних питающих сопел фирмы «Stone & Webster». На установке перерабатывали до 70 % атмосферных остатков гидроочистки. Вследствие улучшенной селективности катализатора «NEKTOR-ULCC» в отношении коксообразования установка работает с более высокой активностью равновесного катализатора. В результате конверсия возросла на 1,4 мас.%, выход сжиженного газ — на 0,4 мас.%, бензина — на 1,1 мас.%. Прибыль от замены старого катализатора на «NEKTOR-ULCC» составила 2 млн. долл. в год. Катализаторы «NEKTOR» и «NEKTOR-ULCC» в настоящее время занимают 45 % от общего количества катализаторов «FCC» на рынках Европы, Ближнего Востока и Африки.

Технологии газификации остатков для производства водорода и электроэнергии

На конференции представлены два доклада: «Технология газификации компании “Shell” — составляющая стратегии модернизации НПЗ» фирмой «Shell Global Solutions» и «Разные способы производства водорода с использованием технологии газификации “Lurgi”» фирмой «Lurgi».

В презентации «Shell Global Solutions» указывается, что единственная альтернатива утилизации неконвертируемых остатков от процессов переработки нефти — газификация, позволяющая производить продукцию из дешевого сырья. Внедрение газификации на НПЗ создает возможность: переработки (а) сырья с более высоким содержанием серы ввиду полного удаления ее соединений в установке очистки газа газификации, (б) низкосортного вязкого и тяжелого сырья; производства водорода для реализации гидрогенизационных процессов НПЗ; квалифицированного применения синтез-газа для производства электроэнергии и пара в комбинированном цикле комплексной газификации (IGCC), для синтеза химической продукции (аммиака, метанола, уксусной кислоты, оксо-спиртов, а также для производства синтетических топлив (средних дистиллятов) по технологиям компании.

Технологией газификации из самых тяжелых остатков нефтепереработки можно с высоким содержанием серы и металлов получать чистый синтез-газ, а также серу, металлы и золу — продукты, имеющие спрос.

Компания предлагает две технологии газификации: процесс газификации (SGP) для жидкого сырья, включая нефтяные дистилляты, остатки и природный газ; процесс газификации угля (SCGP) для твердого сырья, включая уголь, лигнин, нефтяной кокс. Обе технологии обладают высокой гибкостью и могут быть встроены в разные конфигурации НПЗ.

Технология SGP позволяет НПЗ производить водород, необходимый для гидрогенизации при производстве малосернистых топлив, а также уменьшить экологическое воздействие на окружающую среду за счет получения синтез-газа.

Компания разработала процесс крупномасштабного производства по технологии синтеза средних дистиллятов (SMDS) путем конверсии синтез-газа модифицированным процессом Фишера-Тропша (GTL).

Технология SCGP — основа универсального про-

цесса для эффективной конверсии практически любого вида сырья в синтез-газ. Процесс SCGP отличается низким потреблением кислорода, высокой эффективностью в результате подачи сухого сырья, высокой надежностью при эксплуатации.

Все технологии уникальны, учитывают потребности заказчика, экономичны и безопасны для окружающей среды.

Согласно расчетам, при газификации тяжелых нефтяных остатков с получением водорода, пара и электроэнергии по варианту с максимальным производством электроэнергии из 100 т/ч кокса установка производит 320 МВ электроэнергии при затратах 533 млн долл. (стоимость 1 МВ производимой энергии составляет 1,66 долл.).

В презентации фирмы «Lurgi» рассматриваются варианты процессов производства водорода, газификации сырья разных видов. Отмечается, что при использовании любых нефтяных остатков, кокса, угля продуктом газификации является CO_2 — парниковый газ. Альтернатива известным процессам газификации — газификация биомассы как сырья для производства водорода или синтетических топлив. Компания «Lurgi» совместно с «Forschungszentrum Karlsruhe» разработала термодинамический процесс конверсии биомассы «Bioliq^R».

Рекламируется процесс многоцелевой газификации «MPG^R», который пригоден для переработки широкого диапазона сырья — от природного газа, сырой нефти, битума, угольной нефти, тяжелых остатков НПЗ, водо-битумной эмульсии до асфальтенов и химических отходов. Сконструирована специальная печь для высоковязких (<300 сСт) жидкостей, не имеющая ограничений по температурам вспышки. Уникальный процесс «MPG^R» является возможностью переработки в печи разных потоков сырья, чем обеспечивается одновременная газификация несмешивающихся потоков сырья или потоков, которые могут взаимодействовать. Сырой газ очищают от серосодержащих соединений и CO_2 на установке «Rectisol^R». Необходимая чистота водорода достигается на установке метанирования или короткоциклового адсорбции.

Технология процесса «MPG^R» хорошо и длительно проверена на заводах «Sasol Synfuels» (ЮАР), «Dakota Gasification Co.» (США), «Tianji Coai Chemical Co.» и «Yima Coal Chemical Co.» (КНР). Стандартные условия получения синтез-газа — газификация угля при 3 МПа в присутствии пара высокого давления и чистого кислорода. Эффективность производства

водорода, $\text{нм}^3/\text{кг}$ исходного сырья: 2,27 в процессе «MPG» при расходе кислорода $0,22 \text{ кг}/\text{нм}^3 \text{ H}_2$; 0,69 при производстве H_2 из биомассы (отходы лесозаготовок) и расходе кислорода $0,76 \text{ кг}/\text{нм}^3 \text{ H}_2$; 0,59 в процессе «Lurgi» из обычного низкосортного угля при расходе кислорода $0,47 \text{ кг}/\text{нм}^3 \text{ H}_2$. Выбор способа газификации для получения водорода должен быть основан на требовании к продуктам производства в каждом конкретном случае.

К сожалению, в обеих презентациях кроме расходных данных не приводится никаких технико-экономических сведений, характеризующих возможность хотя бы ориентировочной оценки выбора технологической схемы для НПЗ. Поэтому трудно заинтересовать потребителя высокими достижениями указанных компаний.

Заключение

Анализ представленных на 5-й конференции-выставке по технологиям нефтепереработки России и стран СНГ (апрель 2010 г.) презентаций и докладов ряда ведущих западных фирм дает возможность выявить тенденции современного состояния и перспектив развития процессов углубленной переработки нефти.

Основным направлением нефтепереработки в России и странах СНГ должно быть развитие гидрогенизационных процессов, которые позволяют получать из дешевого высокосернистого сырья продукты высокого качества или квалифицированно готовить сырье для каталитического крекинга. В условиях продолжающегося экономического кризиса основными тенденциями развития российской нефтеперерабатывающей промышленности могут быть: модернизация существующих заводов с целью увеличения глубины переработки и повышения рентабельности производства; удовлетворение роста потребления моторных, прежде всего дизельных, топлив и улучшения их качества для обеспечения показателей евростандарта; участие в развитии быстро растущей нефтеперерабатывающей промышленности КНР; минимизация экологических рисков при работе предприятий.

Для совершенствования технологий нефтепереработки необходимы высокоэффективные катализаторы нового поколения, создаваемые с использованием нетрадиционных подходов к конструированию активной фазы, включая выбор нетрадиционных носителей. Пример — создание фирмой «Grace Davison» серии селективных, металлостойких, обеспечивающих высокую конвер-

сию тяжелого сырья катализаторов каталитического крекинга нефтяных остатков.

Большое внимание уделяется совершенствованию существующих процессов, оборудования и промышленных установок с минимальными капитальными затратами, что немаловажно для Российских НПЗ.

Трудно понять, чем определялся выбор тематики презентаций и докладов с акцентом на хорошо известные и проверенные на практике термические процессы, которые как уже неоднократно указывалось, малоэффективны для глубокой и тем более безостаточной переработки таких тяжелых нефтей России, как «Urals».

Презентации, как правило, носят рекламный характер: приведенные комбинированные схемы переработки не конкретны, не содержат данных по капитальным затратам базовых проектов, условиям переработки с получением качественных моторных топлив. Это значительно снижает их инвестиционную привлекательность для российского потребителя.

Интегрирование технологии газификации нефтяных остатков в схему НПЗ может стать перспективным направлением безостаточной переработки таких высокосернистых тяжелых нефтей России, как «Urals». Однако это потребует значительных капитальных затрат при создании установок получения водорода и синтетических моторных топлив из синтез-газа.

Продолжают совершенствоваться процессы гидрокрекинга остатков в направлении использования новых катализаторов в суспендированном слое катализатора. Тем не менее эти технологии капиталоемки и вряд ли будут востребованы в ближайшее время российской нефтепереработкой в условиях экономического кризиса.

Заслуживает внимания технология каталитической гидроконверсии нефтяных остатков в синтетическую нефть при давлении водорода 6—10 МПа в присутствии эмульсионного катализатора с 118—460-нм частицами. Однако оценить инвестиционную привлекательность этого процесса невозможно, поскольку нет никаких данных по материало- и энергозатратам блока установки гидроконверсии в составе НПЗ.

Рекламируемые термохимические процессы переработки остатков — отработанные в промышленности процессы — позволяют перерабатывать нефтяные остатки, однако не дают возможности получать качественную товарную продукцию (моторные топлива). Рекомендации презентаций конференции носят общий характер и не позволяют принять эффективных решений по модернизации действующих НПЗ.

Рекомендуемые термические процессы, как правило, обеспечивают полное превращение тяжелых остатков в дистилляты, декарбонизацию тяжелого сырья коксования и удаление металлов. Однако для получения качественных моторных топлив требуется использование материало- и энергозатратных гидрогенизационных процессов.

Для развития российской нефтепереработки в условиях продолжающегося экономического кризиса зарубежные фирмы предлагают максимально использовать комплекс существующих установок НПЗ, совершенствуя технологию каталитического крекинга, гидроочистки, легкого гидрокрекинга, а для квалифицированной переработки образующихся тяжелых остатков (шламов, деасфальтизатов, тяжелых

рециркулятов) предлагается дополнительно вводить установки термокрекинга, селективной деасфальтизации, замедленного коксования, газификации. При этом основные цели переработки нефтяного остатка — максимальное повышение степени конверсии, удаление примесей, влияющих на последующую переработку, с получением ценных продуктов, расширение сферы использования продуктов и комбинирование этих процессов получения тепла и энергии с производством водорода.

Наметилась тенденция при модернизации и реконструкции некоторых нефтеперерабатывающих комплексов России использовать отечественные разработки, однако до сих пор, в основном, работают по технологиям зарубежных фирм.

УДК 544.47 + 54.057

ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАНОЛА ИЗ ЗАБАЛЛАСТИРОВАННОГО АЗОТОМ СИНТЕЗ-ГАЗА

© 2010 г. **И.И. Лищинер**¹,
О.В. Малова¹, **А.Л. Тарасов**²,
В.М. Масленников¹, **Ю.А. Вы-**
скубенко¹, **Л.С. Толчинский**¹,
Ю.Л. Долинский¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва,

²Институт органической химии им. Н.Д.Зелинского РАН, Москва

Введение

Согласно современным экономическим требованиям к технологии производства жидкого топлива

из природного или попутного газа, непосредственно на месторождениях следует превращать их в синтез-газ (СГ) — смесь водорода и оксида углерода с последующей конверсией в жидкие синтетические продукты [1].

Традиционные производства жидких продуктов из природного газа сопряжено со значительными капитальными затратами и оправданы лишь при больших объемах перерабатываемого газа. Для месторождений, где объемы добычи газа (природного или попутного) менее 100 млн м³ в год, требуется создание новых технологий (в первую очередь производства синтез-газа). В основе нового способа получения смеси СО и Н₂ — реакция частичного окисления газа кислородом воздуха в газовой турбине, дизельном двигателе. Качество получаемого синтез-газа, определяемое соотношением СО/Н₂, наличием примесей СО₂, Н₂О и углеводо-

Лищинер И.И. — канд. хим. наук, зав. лабораторией Объединенного института высоких температур РАН. Тел.: (495) 485-96-36, e-mail: lii48@bk.ru.

Малова О.В. — канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник Объединенного института высоких температур РАН. Тел.: (495) 485-96-36, e-mail: mov58@yandex.ru.

Тарасов А.Л. — канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник Института органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН. Тел.: 8-917-558-29-07, e-mail: atarasov@ioc.ru.

Выскубенко Ю.А. — канд. техн. наук, зав. лабораторией Объединенного института высоких температур РАН. Тел.: (495) 485-98-33, e-mail: jvyskubenko@mtu-net.ru.

Масленников В.М. — докт. техн. наук, профессор, заслуженный энергетик России, зав. отделением проблем энергетики и экологии Объединенного института высоких температур РАН. Тел.: (495) 485-80-77, e-mail: ivtmaslen@mail.ru.

Долинский Ю.Л. — зав. лабораторией Объединенного института высоких температур РАН. Тел.: (495) 484-25-61. e-mail: dolul@bk.ru.

Толчинский Л.С. — нач. отдела Объединенного института высоких температур РАН. Тел.: (495) 484-19-38, e-mail: levtl@bk.ru.