

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ДЛЯ ТЕПЛО- И ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ХИМИКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А.В. Зродников*, В.М. Поплавский*, Г.И. Сидоров*, А.В. Маленков*,

А.А. Кричко**, А.С. Малолетнев**, В.В. Заманов***,

Т.Д. Демидова***

* ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск

** Институт горючих ископаемых, г. Москва

*** ЗАО Тулаинжнефтегаз, г. Тула



В России разработана универсальная технология для переработки угля и высококипящих нефтяных остатков (температура кипения $> 360 - 520^{\circ}\text{C}$) с применением метода гидрогенизации под давлением водорода 6-10 МПа, позволяющая рентабельно производить бензин, дизельное и реактивное топливо, сырье для каталитического крекинга, фенолы, ароматические углеводороды $\text{C}_6 - \text{C}_8$ и другие химические продукты. Высокая экономическая эффективность производства обусловлена сочетанием применения в процессах невысокого давления водорода, а для энергообеспечения и интенсификации указанных процессов - высоконадежных и экологически безопасных ядерных реакторов на быстрых нейтронах типа БН (БОР-60, БН-600). Расчетами установлено, что в результате применения комбинированной ядерно-химической технологии существенно сокращаются расход угля и выбросы вредных отходов в окружающую среду.

ВВЕДЕНИЕ

С учетом остроты проблемы теплоснабжения и экологической напряженности крупных городов прогнозируется, что АЭС и АЭСТ в XXI в. займут ведущие позиции в системе теплоснабжения страны. Широкие возможности в этом представляют ядерные реакторы, генерирующие высоко- и среднетемпературное тепло, которое может быть использовано помимо перечисленных направлений и для промышленных химических, угле- и нефтехимических технологий. В перспективе ядерные источники обеспечат производство водорода из воды и тем самым будут созданы возможности для выработки экологически чистого топлива (атомно-водородная энергетика).

Затраты на добычу и транспортировку нефти в России постоянно возрастают по мере освоения новых месторождений в отдаленных и труднодоступных районах, поэтому в XXI в. производство жидкого топлива из угля должно приобрести особую роль в народном хозяйстве страны.

© А.В. Зродников, В.М. Поплавский, Г.И. Сидоров, А.В. Маленков, А.А. Кричко, А.С. Малолетнев, В.В. Заманов, Т.Д. Демидова, 2000

Для гидрогенизационных технологий переработки угля и нефтепродуктов характерна потребность нагрева сырья до 550-750°C, на которую приходится основная часть всего тепло- и энергопотребления. Для выработки такого среднетемпературного тепла, например, на нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ) средней мощности (10-12 млн.т/год) сжигается 0,8 млн. т/год мазута. Это обстоятельство характерно не только для нефтеперерабатывающей промышленности, но и нефтехимии России в целом. Согласно прогнозным оценкам, потребности нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности будут возрастать.

Для целей нефтепереработки и нефтехимии, а также для производства синтетического жидкого топлива (СЖТ) не менее 75% потребляемого тепла должно подводиться теплоносителем, температура которого не превышает 550°C, причем значительная часть этого тепла обеспечивается сжиганием в трубчатых печах жидкого или газообразного топлива. Замена жидкого (газообразного) топлива на уголь хотя и служит предметом технологических разработок, но до сих пор промышленностью не освоена. Поэтому, для интенсификации и энергообеспечения различных химико-технологических процессов (нефтепереработка, нефтехимия, гидрогенизация угля) целесообразным является применение экологически безопасных ядерных энергоисточников. Преимущества такого использования тепла ядерных реакторов определяются большой долей среднетемпературного тепла в общем балансе; существенно большей технологической подготовленностью работы ядерных реакторов в среднетемпературном интервале по сравнению с работой в высокотемпературном режиме ($\geq 1000^\circ\text{C}$); возможностью использования «низкотемпературных» технологий получения водорода.

В связи с поставленной проблемой следует отметить уже имеющуюся практику совмещения выработки пара и технологического тепла в высокотемпературных атомных реакторах с гелиевым охлаждением для энерготехнологического комплекса по газификации угля, которые приведены в [1,2]. В США в составе промышленной установки по газификации угля эксплуатировался атомный реактор Reach-Bottom с тепловой мощностью 115 МВт, охлаждаемый гелием, выходящим из реактора с температурой 750°C [3].

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЯ

Наиболее привлекательным методом получения жидких продуктов из угля – моторного топлива и сырья для органических синтезов – является гидрогенизация [4,5], т.к. для их получения необходимо присоединить к органической массе угля (ОМУ) значительное количество водорода, осуществить деструкцию угольного мультимера и удаление гетероатомов для получения низкомолекулярных продуктов и придания топливу необходимых качественных характеристик. Поэтому процессы гидрогенизации получили применение в промышленной практике 30-50-х гг. в Германии, Англии, России. Однако применявшееся в процессах высокое давление водорода (25-70 МПа) сопровождалось его большим расходом, и после появления в 50-60-х гг. на мировом рынке относительно дешевой нефти производства были остановлены.

Метод газификации угля и синтез из газа жидких топливных и химических продуктов сохранил свое значение для переработки высокозольных, труднообогащаемых углей, в т.ч. в настоящее время остается единственным методом производства водорода, необходимого для гидрогенизации угля. В ЮАР при финансовой поддержке государства (400-500 млн. долл. в год) из угля производится свыше 4,5 млн. т моторного топлива в год. Состояние проблемы в этой области рассмотрено в [6].

В связи с ограниченными запасами нефти, по сравнению с углями, отсутствием нефти в ряде индустриально развитых стран, высокими затратами на разведку новых месторождений и дальним, экологически небезопасным транспортом нефти в Европу, Северную Америку и Японию во многих странах мира проводятся исследования и опытные работы, направленные на совершенствование метода гидрогенизации, интенсификацию отдельных стадий и процессов получения синтетического жидкого топлива (СЖТ) из угля с целью уменьшения капитальных и эксплуатационных затрат на переработку угля в жидкое топливо, подготовку процессов к реализации в промышленности. В качестве иллюстрации можно привести материалы последних международных конгрессов «Наука об угле» (1997 г., Германия; 1998 г., Страсбург, Франция), на которых были рассмотрены достижения науки в этой области [7,8]. Исследования по гидрогенизации углей в настоящее время широко проводятся в Австралии, Великобритании, Германии, Испании, Индонезии, Колумбии, Китайской Народной Республике, Пакистане, США и Японии.

В Германии, США, Японии, России подготовлен к промышленной реализации ряд новых процессов гидрогенизации угля в жидкие продукты, применение которых на практике сдерживается низкими ценами нефти на мировом рынке.

В Германии фирмами Veba Oil, Ruhrkohle AG, Saarbergwerke AG и др. разработана и проверена в условиях опытно-промышленных установок (производительностью по сырью до 200 т/сут.) «новая немецкая технология» гидрогенизации угля под давлением 20-30 МПа, в которой по сравнению с промышленным процессом 40-х годов усовершенствованы стадии подготовки угля, переработки продуктов ожижения, в т.ч. с применением процесса гидропиролиза для переработки твердых остатков. На опытно-промышленном предприятии в г.Боттропе в течение 58900 ч переработано в жидкие продукты около 368 тыс. т углей различных месторождений Германии. Разработаны технические проекты для получения 1-3 млн.т моторного топлива и химических продуктов из угля в год.

В США фирмами Exxon, Gulf Oil Corp., Pittsburgh and Midway Coal Mining и др. разработана технология гидрогенизации угля под давлением 20 МПа с рециркулирующим пастообразователем-донором водорода в присутствии суспензированного алюмокобальтмолибденового катализатора (процесс SRC), а также модификация процесса H-Oil – процесс H-Coal, реализованного фирмой Hydrocarbon Research, процесс EDS и другие. Начато строительство в 1996 г. установки по переработке 1500 т угля/сут. в штате Огайо [9].

Наиболее интенсивно работы по созданию технологии гидрогенизации нового поколения в последние годы проводятся в Японии, где в рамках государственной программы «Sunshain» фирмой Nippon Coal Oil Co., Ltd и корпорацией NEDO сооружена и начата успешная эксплуатация опытно-промышленной установки производительностью 150 т угля в сут. (г. Кашима). Процесс осуществляется под давлением 17-19 МПа с применением так же, как и в «новой немецкой технологии» железосодержащего катализатора (3-5% в расчете на сырье). В 1998-1999 гг. проведены опытные пробеги по полной технологической схеме (за 1300 ч переработано 6500 т углей месторождений Австралии и Индонезии). Принято решение о разработке проекта и сооружении демонстрационной установки производительностью 30000 т угля/сут. в Индонезии, провинция Tanjung Enim [10]. Научно-исследовательским центром Takasago Coal Liquefaction Center, Kobe Steel проведены исследования по усовершенствованию технологии переработки углей в жидкие продукты методом гидрогенизации [11]. Усовершенствования процесса BCL, разработанного ранее применительно к бурым углям, проверены на установке производительностью 50 т угля/сут. (Австралия, 1993 г.).

Исследования по гидрогенизации бурого угля из Австралии, Японии и суббитуминозного угля из Индонезии показали, что при температуре 300-400°C происходит глубокое превращение углей в жидкие высокомолекулярные соединения, которые необходимо стабилизировать водородом для предотвращения их конденсации при дальнейшем нагреве и гидрогенизации в дистиллятные продукты. Поэтому предложено осуществлять процесс в двух реакционных стадиях. На первой стадии при 380-420°C происходят указанные первичные превращения, а на второй стадии - окончательная гидрогенизация при температуре 450-460°C. При этом увеличивается выход жидких дистиллятных продуктов и снижается газообразование.

Так, при гидрогенизации австралийского угля месторождения Jallourn выход жидких продуктов увеличивается с 50,1 до 61,8% в расчете на сухой беззольный уголь, а газообразование уменьшается с 18,4 до 13,3%. Для индонезийского угля месторождения Banko получены соответственно следующие величины: 65,5 и 67,9%, 15,7 и 10,1%.

В настоящее время проводятся исследования, опытные и проектные работы японскими правительственными организациями (NEDO) и корпорациями (NBCL, Kobe Steel и др.) с целью разработки совершенной технологии нового поколения переработки углей в жидкие продукты, в т.ч. применительно к углям Индонезии, как для переработки их на месте (запасы свыше 34,0 млрд. т), так и доставки их в Японию для указанной цели.

Анализ приведенных данных японских исследователей (см. табл.1) показывает, что применение высокого давления при гидрогенизации индонезийских углей сопровождается высоким расходом водорода, что связано с превращением кислорода углей, в основном, в воду. Исследованиями, проведенными в ИГИ [12], показано, что выход воды при давлении 6-10 МПа в присутствии эмульгированного Мо катализатора в 2-3 раза ниже, т.к. кислород удаляется, в основном, в виде диоксида углерода. Расход водорода извне также существенно ниже и составляет 1,5-2,0% вместо 6,0-8,0% при гидрогенизации под давлением 15,0 МПа, и выше - в присутствии железного катализатора.

На основании полученных сведений и результатов экспериментальных исследований совместно индонезийскими (BPPT) и японскими (NEDO, BCL) организациями в 1998-1999 гг. разработана концепция сооружения на о. Суматра (угольное месторождение Banko) предприятия по переработке 30000 т угля/сут. для получения 140 тыс. барр/сут. жидких продуктов по стоимости 20 USD/барр (стоимость угля 15,22 USD/т).

Таблица 1

**Результаты гидрогенизации углей Индонезии
(450°C, 27-24 МПа, 60 мин., катализатор Fe₂O₃)[13]**

Месторождение	W ^r , %	A ^d , %	H/C	O/C	Выход продуктов, мас. %		Расход H ₂ , мас.%
					масла	асфальтены	
Banko	34,3	2,6	0,87	0,23	72,2	2,5	8,3
Adaro	25,0	1,4	0,84	0,21	63,5	10,9	7,3
Pasir	16,0	1,0	0,83	0,19	63,2	12,4	8,1
Berau	23,5	2,4	0,82	0,22	64,1	5,3	5,7
Cerenti	52,7	6,4	0,88	0,30	63,8	2,7	8,4
Yallourn*	65,0	1,6	0,85	0,31	56,4	10,0	7,8

* Гидрогенизация в проточной установке производительностью 0,1 т/сут.; 450°C, 14,7 МПа, 0,75 кг/л-ч, 1,0% FeOОН, растворитель:уголь = 2,5:1

В Японии на заводе производительностью 150 т угля/сут. (г. Кашима) проведено [14] 5 опытных пробегов по полной технологической схеме по гидрогенизации индонезийского угля месторождения Tanito-Harum.

В России в 70-80-х гг. проводились исследования, опытные и проектно-конструкторские разработки, направленные на создание конкурентоспособного с переработкой нефти производства жидких топливных и химических продуктов из бурых и каменных углей, в основном, открытой добычи, крупнейших в мире месторождений Канско-Ачинского, Кузнецкого и др. угольных бассейнов. В этих работах участвовало большое число научно-исследовательских, проектно-конструкторских организаций и промышленных предприятий. Были разработаны отечественная технология производства жидких продуктов из угля под давлением водорода (10 МПа, 425-435°C, время реагирования на стадии ожигения угля 60 мин., эмульгированный Мо-катализатор), которая прошла апробацию в условиях опытно-промышленного производства на заводе СТ-5; концепция и проектно-конструкторская документация для сооружения в Канско-Ачинском бассейне промышленного предприятия мощностью от 3,0 до 4,5-5,0 млн. т жидких продуктов в год.

Установлено, что применение новых каталитических систем при гидрогенизации углей Канско-Ачинского бассейна при понижении давления водорода позволяет достигнуть еще более высокой степени превращения органической массы угля (ОМУ) и образования жидких продуктов – 91,6 – 95,6% и 91,6 – 96,1% в присутствии образцов катализаторов, содержащих MoS_2 и WS_2 соответственно. В присутствии таблетированных Мо-Ni-W-катализаторов степень превращения ОМУ ниже, чем с мелкодисперсными Со-Mo-Ni-W-катализаторами и составляет 76,4-81,6% при выходе жидких продуктов 79,8-81,4%. При применении в качестве катализатора концентрата MoS_2 руды Сорского комбината при ожигении бурого угля Канско-Ачинского бассейна достигается несколько меньшая степень превращения ОМУ в жидкие продукты – 65,8%.

Переход на пониженное давление водорода в отечественной технологии (до 10 МПа) позволяет использовать стандартное для НПЗ оборудование, что существенно снижает металлоемкость технологических линий.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ТЕХНОЛОГИЮ ГИДРОГЕНИЗАЦИОННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НИЗКОСОРТНЫХ УГЛЕЙ В МОТОРНОЕ ТОПЛИВО

Одной из важнейших проблем при массовом производстве СЖТ является решение проблемы защиты окружающей среды от загрязняющих веществ, так как углеперерабатывающее производство является потенциальным источником ряда вредных выбросов и отходов (твердых и газообразных) [15].

Следует отметить, что сжигание 1 т угля на ТЭС дает четыре тонны вредных отходов. Выбросы ТЭС содержат газы и пары CO_2 , SO_2 , NO_2 , CO , углеводороды различного состава, в том числе наиболее ядовитые ароматические полициклические производные и мелкодисперсные твердые аэрозоли, включающие в себя практически все элементы таблицы Менделеева, в том числе и естественные радиоактивные изотопы.

В зависимости от состава топлива ТЭС создает тяжелые экологические нагрузки в приземном слое атмосферы и на ландшафтах больших регионов.

Преимущество использования ядерных реакторов для энергообеспечения предприятий производства СЖТ заключается в следующем:

- вдвое сокращаются затраты на угледобычу и площади отчуждаемых земель [16];

- сокращаются затраты на ступенях гидрокрекинга средних и тяжелых фракций, риформинга и сероочистки бензина, уменьшается металлоемкость технологического оборудования за счет интенсификации процесса ожижения гамма-излучением [17];
- существенно снижены тепловые выбросы в атмосферу из-за высокого термодинамического КПД парового цикла ядерной установки;
- практически отсутствуют радиационные выбросы вследствие высокой поглощающей способности теплоносителя ядерного реактора и его низкого давления ($0.2 \div 0.5$ МПа);
- существенно снижены объемы радиационных отходов из-за специфических особенностей топливного цикла быстрых реакторов;
- наконец, полностью отсутствуют твердые и газовые отходы, характерные при сжигании низкосортных бурых углей для целей энергообеспечения технологического процесса получения светлого топлива.

Петрографический состав и специфические физико-химические свойства низкометаморфозных бурых углей Канско-Ачинского бассейна в наибольшей мере отвечают условиям процесса эффективной гидрогенизации ОМУ с высоким выходом целевых жидких продуктов. Зависимость отношения Н/С (Н и С – содержание водорода и углерода, в масс. %) для разного вида сырья приведена на рис.1. Выход целевого продукта в зависимости от отношения Н/С приведен на рис.2.

Проведенные в последние годы проектно-конструкторские разработки [18,19] позволяют сделать вывод о том, что для указанных углей и существенного снижения вредных выбросов в состав промышленного комплекса по производству СЖТ (мощность до 500 тыс.т жидких продуктов в год) могут быть включены высоконадежные, экологически безопасные ядерные реакторы на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем типа БН (см. рис 3). Температура теплоносителя составляет 550°C, а на входе в парогенератор ~ 520°C, что достаточно для гидрогенизации угля и тяжелых нефтяных остатков.

Гигантское месторождение бурых углей (запасы свыше триллиона тонн) – ценнейшего и самого дешевого в мире химического сырья – является уникальной базой Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса, развитию которого придается решающее значение в Государственных программах освоения Сибири.

Специфика состава и структуры этих бурых углей, содержащих 5-10% золы и до 40% влаги, нетранспортабельность их и наряду с этим чрезвычайная дешевиз-

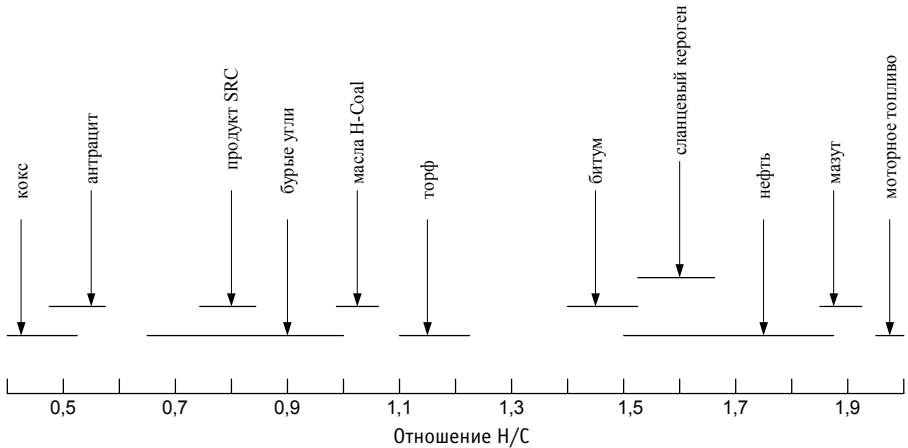


Рис. 1. Атомарное отношение Н/С для различного углеводородного сырья: Н и С – содержание водорода и углерода, в масс. %

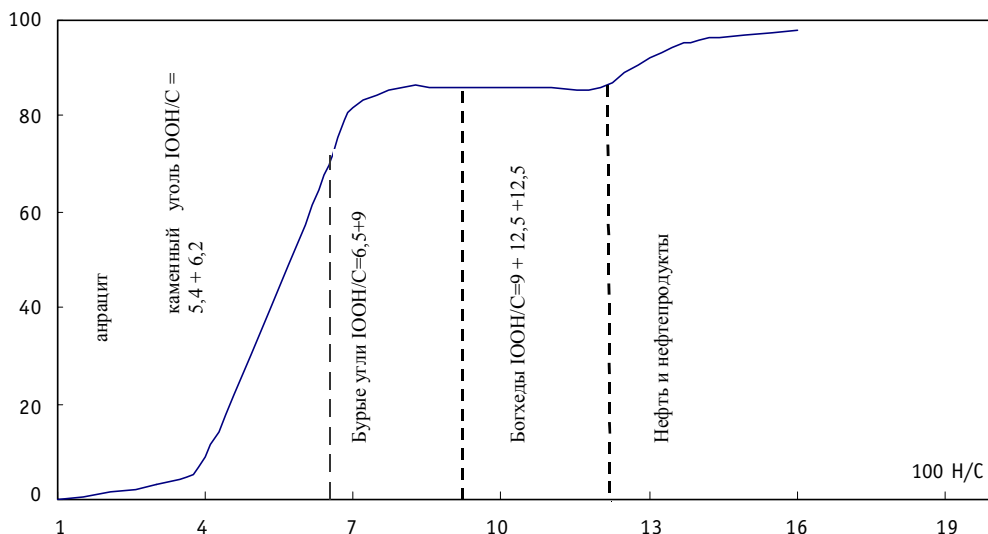


Рис.2. Зависимость выхода жидких продуктов гидрогенизации от отношения 100 Н/С в исходном топливе

на добычи (10% от себестоимости угля в Донбассе) обуславливают особенности эксплуатации действующих крупнейших ГРЭС КАТЭК (Назаровской, Березовской). И прежде всего – крайне тяжелое состояние экологии громадного региона. Трудно представить многомиллионный тоннаж масс золы и шлаков, сконцентрированных в атмосфере и на территории КАТЭК при дальнейшей реализации его тепло-энергетического потенциала, не говоря уже о глобальных отрицательных геофакторах.

В комплексном плане развития КАТЭК предусмотрено производство синтетического жидкого горючего на базе теплоэнергетики. Но это никак не снимает тяжесть проблем экологии.

Предложенное использование безопасных ядерно-энергетических установок с реакторами на быстрых нейтронах в технологии переработки углей для синтеза моторных топлив дает кардинальное решение проблемы.

Будущее КАТЭК с использованием ядерных реакторов на быстрых нейтронах видится как мощное развитие промышленности синтетического моторного топлива, а также дешевого газа и ценнейших продуктов основного органического синтеза, как становление новой углехимии.

По экономическим соображениям размещение предприятий СЖТ должно быть рядом с угольными разрезами. Предполагается провести разработку проекта атомного технологического комплекса производства СЖТ с привязкой его к конкретному расположению угля (Канско-Ачинский бассейн).

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА СЖТ

В табл.2 приведены основные технико-экономические показатели производства синтетического жидкого топлива с годовым выпуском товарной продукции ~5 млн.т (СТ-500).

На основании данных табл.2 можно констатировать, что переработка угля с применением гидрогенизационных процессов при пониженном давлении водорода (до 10 МПа) позволяет увеличить ресурсы моторного топлива; все получаемые продукты обеспечат прибыль и рентабельность промышленного производства при сроке окупаемости капиталовложений в течение 5-6 лет.

Однако в ближайшей перспективе сооружение предприятий по производству из угля 3-5 млн. т моторного топлива в год в одном угольном регионе вряд ли це-

Таблица 2

Технико-экономические показатели СТ-500 (цены 1990 г.)

Показатели	Величина показателей	
	I схема*	II схема**
Годовой объем переработки угля, млн. т	20,318	28,198
в т.ч. на технологию	14,068	21,198
Годовой выпуск жидких продуктов (всего), млн. т	4,361	5,486
в т. ч. автобензин АИ-93	1,000	2,370
авиакеросин	0,300	0,300
дизтопливо марки Л гидроочищенное	2,715	2,715
бензол	0,061	0,061
толуол	0,005	0,005
МТБЭ	0,281	-
метанол	-	0,036
Стоимость годового выпуска товарных продуктов, млн. руб.	1556,7	2087,9
Себестоимость годового выпуска товарных продуктов, млн. руб.	778,2	989,0
Годовая прибыль, млн. руб.	778,5	1098,9
Сметная стоимость строительства (всего), млн. руб.	4884,7	6261,1
в т. ч. СМР	2626,8	3367,0
Численность производственного персонала, чел.	4621	4853
Годовой расход энергосредств:		
бурый уголь для сжигания на ТЭЦ, млн. руб.	4,600	4,820
бурый уголь для сжигания в блоке углеподготовки, млн. руб.	1,650	1,740
топливный газ (собственная выработка), млн. м ³	5,139	5,210
пар (собственная выработка), млн. Гкал	7,780	7,940
электроэнергия (50% собственная выработка), млн. кВт·ч	3338,7	3647,18
вода свежая, млн. м ³	59,0	65,096
Срок окупаемости капитальных вложений, лет	6,2	5,7

* получение жидкого топлива прямой гидрогенизацией угля;

** получение жидкого топлива гидрогенизацией и газификацией угля (дополнительно включена установка по производству из синтез-газа бензина с последующей гидроконверсией его в высокооктановый автобензин)

лесообразно в связи с трудностями обеспечения инвестициями на создание столь крупномасштабного производства. Более реальным представляется строительство упрощенных установок модульного типа мощностью до 500 тыс. т жидких продуктов в год. Создание таких установок достаточно для обеспечения горюче-смазочными материалами угольных регионов России, удаленных от источников централизованного снабжения нефтепродуктами, но располагающих ресурсами угля, в том числе мелких классов.

Приведенные ниже результаты технико-экономической оценки модуля производительностью 500000 т/год с энергообеспечением от ядерного реактора с жидкометаллическим теплоносителем выполнены с использованием материалов раз-

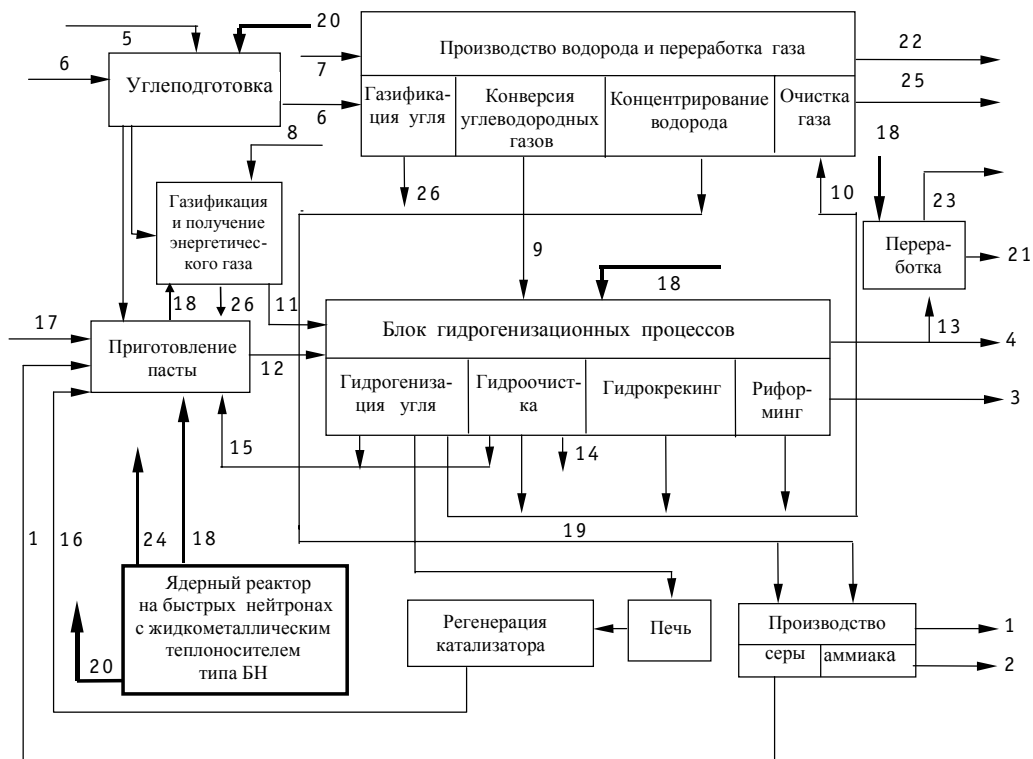


Рис. 3. Принципиальная блок-схема получения жидких продуктов из угля на промышленном предприятии с ядерным энергоисточником типа БН: 1 - сера; 2 - аммиак; 3 - высокооктановый бензин; 4 - дизельное топливо; 5 - реагенты; 6 - уголь; 7 - кислород; 8 - воздух; 9 - водород; 10 - газ; 11 - энергетический газ; 12 - паста; 13 - низкооктановый бензин; 14 - вода; 15 - пастообразователь; 16 - возврат катализатора; 17 - катализатор; 18 - пар; 19 - шлам; 20 - горячий инертный газ; 21 - автобензин; 22 - сжиженные газы $C_3 - C_4$; 23 - ароматические углеводороды $C_6 - C_8$; 24 - электроэнергия; 25 - CO_2 ; 26 - шлак

Таблица 3

Сравнительная технико-экономическая оценка промышленного получения жидкого топлива из бурого угля Канско-Ачинского бассейна и суббитуминозного угля Индонезии

№ п/п	Показатели	Процесс	
		ИГИ* (Россия)	NEDO-BCL** (Япония)
1	Годовой объем переработки угля, млн.т.	1,6	15,44
2	Годовой выпуск жидких продуктов (всего), млн.т, в т. ч. автобензин АИ-93	0,5	5,94
	дизельное топливо	0,135	-
	угольная нефть	0,365	-
		-	5,94
3	Технологические условия процесса: давление, МПа	6,0	17,0-19,0
	катализатор, мас.% от угля	0,05	3,0
4	Капитальные вложения, млн. долл.	318	4275
5	Уровень рентабельности, %	15	-
6	Себестоимость 1 т жидких продуктов, долл.	135,2	150,0

* - с ядерной энергоустановкой; ** - с энергоисточником на органике

работки головного предприятия СТ-500 в 1989 и 1991 гг. В табл.3 приведены некоторые сравнительные технико-экономические характеристики для двух заводов по переработке угля в моторное топливо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании результатов исследований, опытных и проектно-конструкторских работ, выполненных в последнее время в России и опубликованных зарубежными организациями (Япония, Германия, Испания, Китай и др.), разработана концепция создания модульной установки мощностью 500 тыс. т жидких продуктов в год; выполнена технико-экономическая оценка производства и разработаны предложения выполнения проекта инвестиций в промышленное предприятие.

2. Рассмотрение экологических аспектов и путей снижения экологически вредных выбросов при промышленном производстве топливных и химических продуктов из угля показало, что существенное снижение вредных выбросов промышленного комплекса по получению жидких продуктов из угля может быть достигнуто при применении в его составе экологически безопасных ядерных БН-реакторов для выработки электроэнергии, водяного пара и газового теплоносителя на собственные нужды. Суммарное снижение удельного расхода угля на производство примерно в 1,5 раза в этом случае позволит резко увеличить защищенность окружающей среды от вредных выбросов газов в атмосферу и на 30-40% снизить складирование твердых золошлаковых отходов в отвалы.

3. В настоящее время на основании полученных экспериментальных данных ИГИ и Тулаинжнефтегаз разработана новая упрощенная технологическая схема переработки угля в моторное топливо с применением метода гидрогенизации под давлением 6,0 МПа как на стадии ожижения угля, так и на стадии переработки угольных продуктов в высококачественный автомобильный бензин и дизельное топливо с использованием новых, высокоэффективных катализаторов, разработанных во ВНИИНП. Для конструктивного оформления технологической схемы разработана аппаратура, необходимая для технической реализации процессов, и рекомендованы соответствующие заводы-изготовители.

Литература

1. *Schulten R.* // Erdol und Kohle. - 1971. - 24. - P.334 – 337.
2. *Van Heek K. H., Juntgen H., Peters W.* // Erdol und Kohle. – 1973. - 26. - P.701-703.
3. *Cautius W., Engelhard J., Ivens G.* // Atomwirtschaft-Atomtechnik. – 1974. -19. - P.444-450.
4. *Калечиц И.В.* // Российский химический журнал. – 1984. - Т. XXIX. - №4. - С.63-73.
5. *Кричко А.А., Лебедев В.В., Фарберов И.Л.* Нетопливное использование углей. М.: Недра, 1978. - 215 с.
6. *Lapidus A.L. Krylova A.Yu.* Hydrocarbon synthesis from the products of coal gasification: III International symposium "Catalysis in coal conversions" (Novosibirsk, 10-13 July 1997). – Новосибирск, 1997. – С.85-87.
7. *Ziegler A., van Heek K.H., Klein J., Wanzl W.* Proc. 9th International Conference on Coal Science (Essen, Germany, 7-12 September 1997). - Essen, 1997. – V.III. – 613 p.
8. Extended Abstracts and Programme of Symposium "Science and Technology of Carbon" (Strasbourg, France, July 1998). – Strasbourg, 1998. - v.II. – 894 p.
9. Oil and Gas Journal - 1993. - April 12. - P.85.
10. *Nishiyama Y.* Proc. 6th Japan-China Symposium on Coal and C₁ Chemistry. (Zao, Miyagi, Japan, October 1998.). - Zao, Miyagi, 1998. - 390 p.
11. *Tamura M., Kaneko T., Shimasaki K.* Outline of the advanced BCL process: Proc. 6th Japan-China Symposium on Coal and C₁ Chemistry. (Zao, Miyagi, Japan, October 1998). - Zao, Miyagi, 1998. - P.164-167.

12. Кричко А.А., Малолетнев А.С. Гидрогенизация углей месторождений Танито-Харум и Яллоурн // Химия твердого топлива. – 1997. - №4. - С.69-76.
13. Hartiniati S. Current status and prospect of coal liquefaction in Indonesia: Proc. 6th Japan-China Symposium on Coal and C₁ Chemistry (Zao, Miyagi, Japan, October 1998). - Zao, Miyagi, 1998. – P.180-183.
14. Hirano K., Endo M., Nishibayashi T., Kobayashi M., Yoshida H. Operation of 150 t/d NEDOL coal liquefaction Pilot plant: Proc. 6th Japan-China Symposium on Coal and C₁ Chemistry (Zao, Miyagi, Japan, October 1998). - Zao, Miyagi, 1998. - P.1-4.
15. Кричко А.А., Малолетнев А.С., Сидоров Г.И. и др. Экологические аспекты производства жидкого топлива гидрогенизацией углей // ХТТ. – 1998. - №2.
16. Малолетнев А.С. и др. Использование экологически безопасных ядерных энергоисточников для переработки угля в моторное топливо // Химия твердого тела. – 1999. - №4.
17. Рябченко П.В., Лукин В.В. и др. Каталитические свойства оксидных систем в реакциях Клауса после регенерации в пучке ускоренных электронов // Химическая промышленность. – 1998. - №2.
18. Козловцев В.С., Сидоров Г.И. и др. Применение реакторов на быстрых нейтронах для энергообеспечения производства синтетического жидкого топлива из угля: Материалы конференции Ядерного Общества СССР «Ядерная энергия в СССР» (Обнинск, июнь 1990). – Обнинск, 1990.
19. Громов Б.Ф., Сидоров Г.И. и др. Энергообеспечение крупнотоннажных производств синтетического жидкого топлива от атомной энерготехнологической станции на быстрых нейтронах. // Энергетическое строительство. - 1992. - №6.

Поступила в редакцию 14.03.2000

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.526:662.7

Processing of Coal in Engine Fuel with Usage of Nuclear Technology - Future of Coal-Chemistry \A.V. Zrodnikov, V.M. Poplavskiy, G.I. Sidorov, A.V. Malenkov, A.A. Kritchko, A.S. Maloletnev, V.V. Zamanov, T.D. Demidova; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 11 pages, 3 illustrations, 3 tables. – References, 19 titles.

An efficient universal technology for both coal and high-boiling petroleum residues (boiling point > 360-520°C) reprocessing by hydrogenation under hydrogen pressure of 6-10 MPa has been developed in Russia, which allows an economically efficient production of gasoline, diesel and jet engines fuel, raw material for catalytic cracking, phenols, aromatic hydrocarbons $C_6 - C_8$ and other chemical products. High efficiency of the production is stipulated by combination of using of low hydrogen pressure in the processes and high-reliable, environmentally safe of BN-type fast reactors (BOR-60, BN-600) for power supply and intensification of these processes. On the basis of calculation is shown that usage of combined nuclear-chemical technology is essentially reduced the expenditure of coal and releases of noxious wastes into environment.

УДК 621.039.566

Fast Method of Prediction of Crack Growth in Pipelines \V.A. Andreev, O.M. Gulina; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 5 pages, 5 illustrations. – References, 6 titles.

The fast method of leak probability calculation using the information on initial defects allocation, characteristics of control method and parameters of the equation Paris is offered. This method is faster and more accurate than direct simulation method. For decision-making about prolongation of pipeline exploitation the method of the analysis of failure rate curve obtained on calculation data is offered.

УДК 621.039.566.007.4

Analysis of NPP Operating Personnel Activity under Stress Conditions \A.N. Anokhin, S.M. Kindinova, A.A. Bugaev, L.V. Puchkov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 8 pages, 3 illustrations. – References, 6 titles.

The purpose of this paper is to study of the NPP operator performance under extreme conditions that are fraught with stress. The operator activity is modeled in «input-state-output» formalism. The model consists of 37 components, including 21 environmental factors, 9 operator individual indexes, 4 stress indexes, and 3 indexes of operator's efficiency. Evaluation of factors and indexes was carried out by expert estimation technique with special questionnaire. 30 operators from Kalinin and Ignalina NPPs were interviewed as experts. Each expert carried out verbal description and qualitative estimation of the most critical situation, which has been taking place in his own practice. As a result of correlation analysis of acquired data some relationships between model components were detected. Emotional pressure and deficit of time are the most significant factors that provoke stress and operator's errors.

УДК 51-74:621.039.58

Problem of Estimation of Equipment Reliability under Discrete Degradation \A.I. Pereguda, I.A. Soborova, A.I. Groshev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 8 pages, 4 illustrations. – References, 5 titles.

The mathematical model of reliability of equipment subjected to percussion load of the same nature is described. Analysis of this model allows to receive quantitative values of indices of reliability and longevity. The practical example is given.

УДК 621.039.526

*Role of Reactivity Coefficients at Realization Principle of the Maximal Self-Protection of Fast Reactors *