

УДК 620.91/92 + 662.69

Газохимия как ключевое направление развития энергохимических технологий XXI века

В. С. Арутюнов, А. Л. Лapidус

ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ АРУТЮНОВ — доктор химических наук, заведующий лабораторией окисления углеводородов Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (ИХФ РАН). Область научных интересов: кинетика газозависимых реакций, окислительная конверсия углеводородных газов в жидкие продукты, экологические проблемы энергетики и транспорта.

119991 Москва, ул. Косыгина, 4, ИХФ РАН, тел. (095)939-72-87, E-mail arutyunov@center.chph.ras.ru

АЛЬБЕРТ ЛЬВОВИЧ ЛАПИДУС — член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой газохимии РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, заведующий лабораторией Института органической химии им Н.Д. Зелинского РАН (ИОХ РАН). Область научных интересов: катализ, химия C₁-соединений, химическая переработка природного газа и угля.

119913 Москва, Ленинский просп., 47, ИОХ РАН, тел. (095)135-88-56, (095)938-36-75, E-mail albert@ioc.ac.ru

Истоки энергетического кризиса

Начало XXI века совпало с самым серьезным эволюционным кризисом за всю историю существования цивилизации. Неолитическая революция (примерно 10 тыс. лет назад) ознаменовала переход человечества от присваивающей экономики охотников и собирателей к производящей экономике оседлых земледельцев и скотоводов. Именно в этот момент произошел разрыв человечества с окружающей средой, выпадение его из естественных биосферных циклов, нарушение той «идиллии экологического равновесия», о которой мечтают активисты природозащитных движений. До неолитической революции численность вида *Homo Sapiens* регулировалась теми же экологическими законами, что и численность других биологических видов [1] и, в соответствии с ресурсами существовавших экосистем, не превышала нескольких сот тысяч особей. Переход к производящей экономике нарушил эту связь. С тех пор численность населения планеты определяется экономическим потенциалом цивилизации и стремительно растет вместе с ним (рис. 1). За несколько тысяч лет существования цивилизации численность человечества, а также неразрывно связанных с ним домашних животных на пять порядков превысила их экологически обоснованную численность и достигла нескольких миллиардов. Несмотря на все социальные и экономические меры по снижению темпа прироста населения Земли, он все еще составляет 1,8% в год, что соответствует почти шестикратному увеличению населения за столетие. По прогнозам, только к концу текущего столетия численность населения стабилизируется на уровне 12–13 млрд человек [2].

Экспоненциальный рост численности населения и, соответственно, всех сопутствующих факторов потребления продовольствия, энергии, минеральных ресурсов, чистой воды и др., а также рост отходов, скорости деградации сельскохозяйственных земель, лесов, естественных экосистем, нарастающая потеря биологических форм жизни на планете, поставили цивилизацию на грань истощения естественных природных ресурсов и последующей деградации [3]. Основным ресурсом, обеспечивающим условия для существования современной цивилизации, является энергия. Сопоставление уровня экономического развития (уровня жизни) различных стран и потребления энергоресурсов на душу населения показывает прямо пропорциональную зависимость между этими величинами

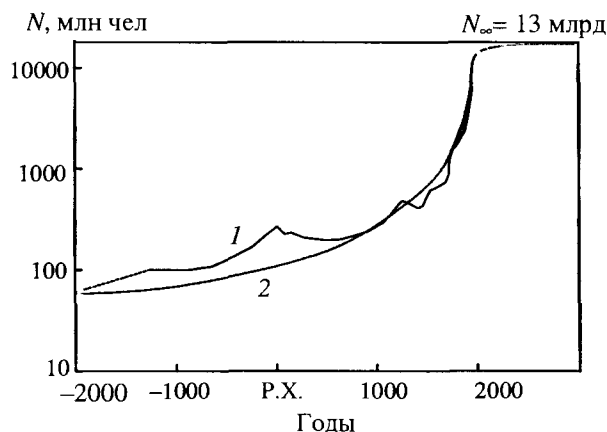


Рис. 1. Рост численности населения Земли от 2000 г. до н.э. до 3000 г. н.э. [2]:

1 — реальный рост, 2 — интерполяция

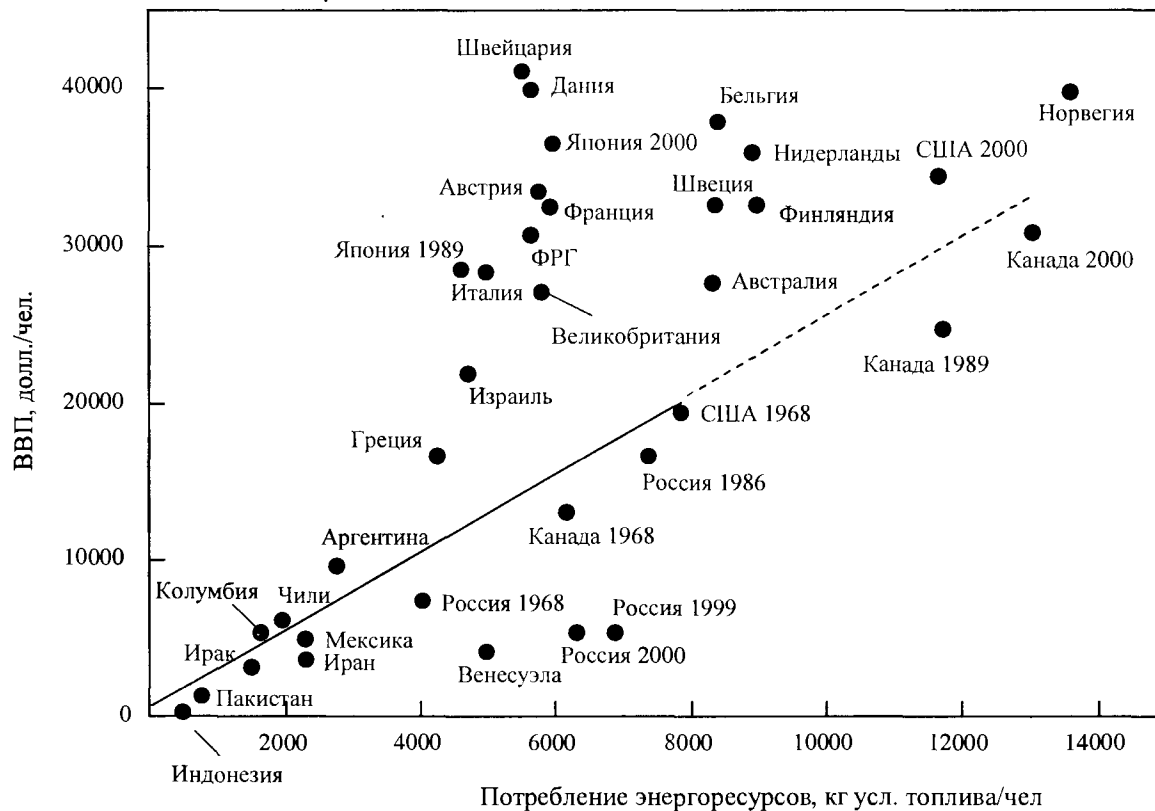


Рис. 2. Связь внутреннего валового продукта (ВВП) с потреблением энергоресурсов в мире [4]

(рис. 2) [4]. При наличии энергоресурсов может быть найдено практическое решение многих кризисных ситуаций и тенденций современного общества. Особенно актуальна проблема обеспечения энергоресурсами для России, которая по своему географическому положению имеет наиболее суровый климат среди всех стран мира и соответственно наиболее высокий уровень потребления энергии на единицу ВВП [5].

Миф о возобновляемой энергетике

Сейчас в мировой прессе, включая и научные издания, усиленно муссируется представление о предстоящем в течение текущего века переходе человечества к использованию преимущественно экологически чистых возобновляемых источников энергии. Заявления такого рода трудно расценить иначе как полное непонимание реальной ситуации, либо как часть преднамеренного «пиара», проводимого ведущими мировыми нефтегазодобывающими компаниями, особенно усердствующими в данном вопросе, с целью демонстрации своей готовности уделить небольшую долю доходов, получаемых от реализации ископаемых энергоресурсов, на создание в будущем экологически чистой энергетике. К сожалению, элементарные оценки показывают абсолютную нереальность этих надежд.

Все альтернативные возобновляемые источники энергии на Земле, будь то солнечная, ветровая, гидро- и энергия, получаемая при сжигании биомассы, имеют своим первичным источником энергию падающего на Землю солнечного излучения. Сейчас уровень мирового энергопотребления достиг почти 0,02% от

энергии падающей на Землю солнечной радиации. Стабилизация экономической и политической ситуации в мире невозможна без хотя бы частичного сокращения разрыва в уровне жизни, а следовательно, в уровне энергопотребления между наиболее богатыми и наиболее бедными странами, который сейчас превышает стократный. Поэтому энергопотребление в течение текущего столетия увеличится еще в несколько раз (до 2030 года прогнозируется ежегодный прирост на уровне 1,7% [6]) и приблизится к 0,1% от падающего на Землю потока солнечной энергии.

Стабильность условий в биосфере нашей планеты, поддерживающей на протяжении более 2 млрд лет после образования кислородной атмосферы практически постоянными все основные параметры, обусловлена высокой интенсивностью биосферных процессов, в которых потоки вещества и энергии внутри системы на несколько порядков превышают потоки на входе и выходе из нее. Согласно оценкам [1], человечество не нарушает равновесие биосферы до тех пор, пока поглощает менее 1% первичной продукции биоты. Однако уже сейчас потребление чистой первичной продукции биосферы, произведенной на суше, непосредственно в виде пищи, корма для животных и топлива превысило 10% и продолжает увеличиваться. Так как КПД преобразования солнечной энергии зелеными растениями составляет в среднем немногим более 1%, использование даже практически всей доступной продукции биосферы (с учетом реальных потерь) не сможет покрыть ближайших энергетических потребностей человечества. А попытка реализации такого проекта

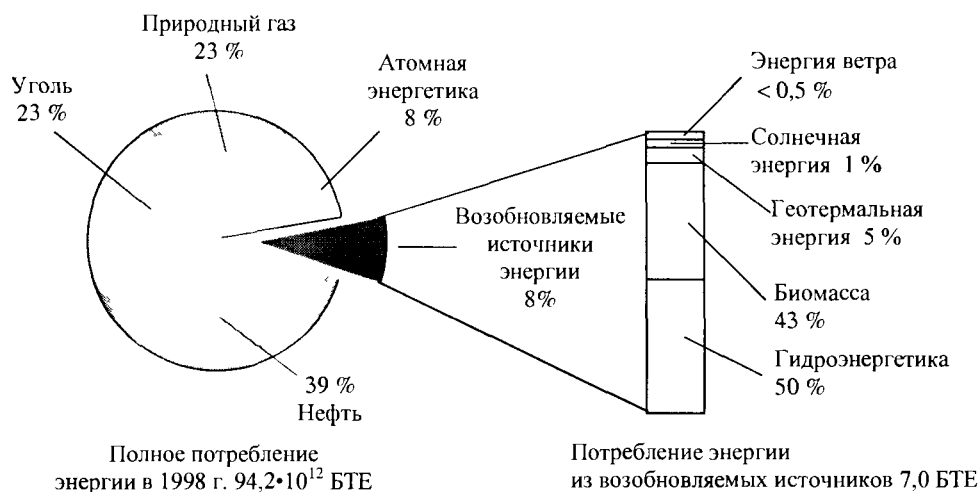


Рис. 3. Энергобаланс США за 1998 г. [9].

Сумма процентов не равна 100 из-за округления отдельных значений, БТЕ — Британские тепловые единицы

приведет к гибели естественных экосистем и потере равновесия глобальных биосферных процессов

Низкая плотность потока первичной энергии (солнечной радиации на земной поверхности) и низкий КПД его преобразования зелеными растениями делает сельскохозяйственное производство даже в наиболее развитых странах наименее рентабельной (а точнее, просто убыточной) областью человеческой деятельности, поддерживаемой за счет дотаций из других источников. Это перечеркивает надежды на глобальную роль возобновляемой «зеленой» энергетики. Сам тезис об «экологической чистоте» возобновляемых источников энергии, например, основанных на сжигании растительной массы, также вызывает большие сомнения. Как правило, такие оценки не учитывают выбросы, образующиеся при производстве, обслуживании и последующей утилизации огромного и быстро выходящего из строя парка механизмов, необходимых для выращивания, сбора и переработки соответствующего объема растительной массы. Кроме того, необходимо учитывать огромный объем сжигаемого при этом традиционного топлива. Такие оценки, мягко говоря, некорректны.

Еще менее реально создание искусственных фотопреобразующих систем необходимой мощности. И дело не только в необходимости изъятия из хозяйственной деятельности и естественных экосистем огромных площадей в сотни тысяч квадратных километров, что соответствует площади крупнейших западноевропейских государств, и фантастических объемах капитальных затрат на их оснащение сложным инженерным оборудованием. Для реализации подобных грандиозных проектов человечество не обладает необходимым количеством даже самых дешевых конструкционных материалов. Например, запасы алюминия в земной коре меньше, чем необходимо для создания самых простейших нагревательных устройств необходимой мощности, на что серьезные специалисты обратили внимание еще тридцать лет назад [7, 8]. Реальная солнечная энергетика остается одним из самых дорогих источников энергии и, несмотря на многолетние декла-

ративные усилия в этой области, занимает в энергобалансе США менее 0,1% (рис. 3). А почти 99% «возобновляемой» энергетики (помимо сжигания биомассы, т.е. дров) представлены такими традиционными и дешевыми, но весьма ограниченными по ресурсам ее видами, как гидро- и геотермальная энергетика.

Как показали результаты моделирования глобальных процессов развития цивилизации, при современном уровне энергопотребления развитых стран за счет возобновляемых источников энергии на Земле может существовать не более 500 млн человек [10], что в десять раз ниже уже достигнутой численности населения. За счет каких же энергетических источников существует громадное современное население планеты?

Современное состояние энергоресурсов

Мы живем за счет тех своеобразных «энергетических консервов», которые приготовила нам биосфера примерно за 300 млн лет своей эволюции, начиная с каменноугольного периода. Эти ресурсы громады, но современная скорость их потребления в миллион раз превышает скорость процессов их естественного формирования в земной коре. За один год мы расходует запасы, на образование которых природе требуется миллион лет. Очевидно, что с учетом темпов роста мирового энергопотребления эти запасы могут обеспечить потребности человечества всего в течение примерно сотни лет.

Мировой баланс источников энергии за последние 25 лет приведен на рис. 4. В 2000 году доля нефти в мировом энергобалансе составляла 38%, природного газа — 23%, угля — 27%, ядерного топлива — 6%, а всех возобновляемых источников, включая гидроэнергетику — 6%. То есть почти на 90% мировое энергопотребление удовлетворялось за счет ископаемых углеродных источников, из которых почти 40% приходилось на долю нефти. Единственный реальный неуглеродный источник энергии, на который мы можем опереться в ближайшее время, это атомная энергетика, которая уже вступила в полосу возрождения

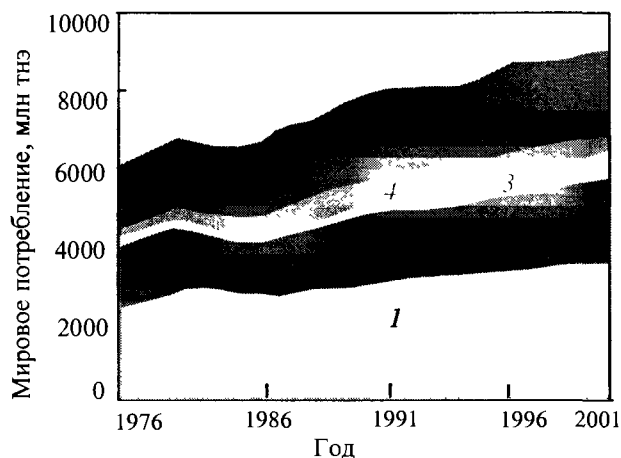


Рис. 4. Мировой баланс источников энергии за 1976–2001 гг. [11]:

1 — нефть; 2 — природный газ; 3 — атомная энергетика; 4 — гидроэнергетика; 5 — уголь; тнэ — тонна нефтяного эквивалента

после глубокого кризиса, вызванного чернобыльской катастрофой. На конец 2000 г. в мире на 68 атомных электростанциях действовали 427 энергоблоков. После почти двадцатилетнего перерыва возобновились работы по созданию новых установок, и сейчас в стадии проектирования и строительства находится около 40 новых реакторов. Развитию атомной энергетике пока нет альтернативы, но она основана, как и энергетика на углеродном топливе, на ископаемых энергоресурсах, запасы которых в земной коре ограничены (даже при массовом переходе на реакторы-бридеры). Кроме того, в отношении этого источника энергии существуют серьезные проблемы общественно-эмоционального характера, безопасности и захоронения радиоактивных отходов.

Человечество получит практически неисчерпаемый источник энергии, освоив управляемый термоядерный синтез. Однако решение этой проблемы, казавшейся еще тридцать лет назад практически уже решенной, отодвигается все в более далекое будущее. Оптимисты надеются, что демонстрационный термоядерный реактор будет создан в середине текущего века. Это означает, что реально термоядерная энергия станет доступной не ранее конца столетия. Перед человечеством стоит серьезнейшая проблема — найти энергоресурсы, способные заполнить промежуток длиной в столетие до практического освоения термоядерной энергии. Цена неудачи в решении глобальной энергетической проблемы — неизбежное снижение уровня жизни, а затем и сокращение численности населения до уровня, обеспечиваемого потоком солнечной радиации на земную поверхность.

Основной и наиболее удобный во всех отношениях энергоресурс современной экономики — нефть, но ее запасы ограничены и быстро истощаются. На сегодняшний день из недр уже извлечена половина ее первоначальных запасов [12], что по всем прогнозам в ближайшие несколько лет неизбежно приведет к падению объемов добычи и росту цены на нефть [12–14] (рис. 5). Кроме того, запасы нефти распределены весьма неравномерно. Согласно последнему обзору

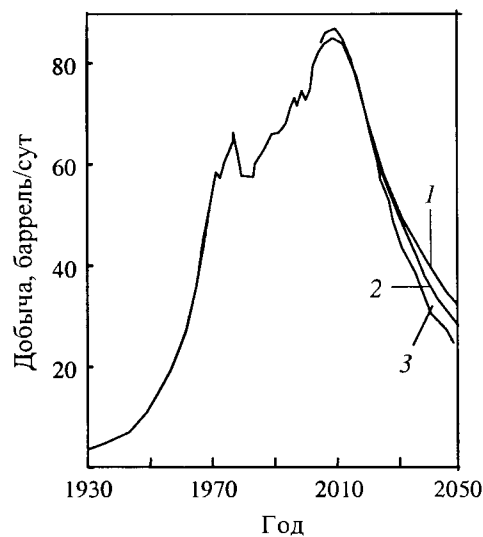


Рис. 5. Достигнутые и прогнозируемые объемы мировой добычи нефти [13] в предположении:

1 — нулевого роста потребления; 2 — роста потребления на 1%; 3 — роста потребления на 2%

состояния мировой энергетике, представленному компанией Бритиш Петролеум [11], 65% всех доказанных ресурсов нефти сосредоточены на Ближнем Востоке (рис. 6). Хотя уровень нефтедобычи в России сейчас быстро растет и вплотную приблизился к уровню мирового лидера — Саудовской Аравии, на ее долю приходится всего около 5% доказанных запасов нефти.

Ресурсы каменного угля огромны и распределены более равномерно. Наибольшими запасами обладают три страны — США, КНР и Россия, на долю каждой из которых приходится примерно четверть мировых ресурсов. Объем мировой добычи угля увеличивается, и уголь частично отвоевывает некогда утраченные позиции. Особенно велика его доля в производстве электроэнергии: в КНР — около 75, в США — более 50%. Однако низкая производительность труда при добыче и транспортировке угля, а также серьезные экологические проблемы, связанные с его использованием в энергетике, сдерживают масштабы его применения. Это вынудило Департамент энергетики США выступить с инициативой разработки нового поколения экологически более чистых способов получения энергии из угля [15]. Предполагается, что типовая угольная электростанция XXI века будет использовать в качестве топлива не непосредственно уголь, а синтез-газ или водород, полученный путем предварительной газификации угля. Необходимый для газификации кислород будут получать относительно дешевым мембранным разделением воздуха. Из очищенного от серо- и азотсодержащих соединений и твердых примесей синтез-газа на основе мембранных технологий будут выделять водород, используемый в качестве экологически чистого топлива для газовых турбин и топливных элементов. Монооксид углерода путем паровой конверсии будет превращать в дополнительное количество водорода и углекислый газ, а последний — удалять из полученных газов без выделения в

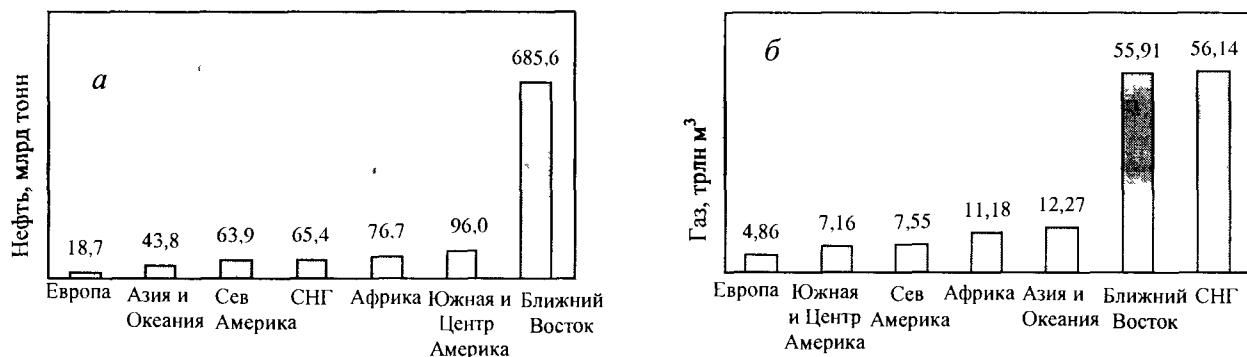


Рис. 6. Доказанные мировые ресурсы нефти (а) и природного газа (б) [11]

атмосферу, т.е. одновременно предлагается кардинальное решение проблемы антропогенного вклада в парниковый эффект. В моменты минимума нагрузки часть полученного синтез-газа будет использоваться для выработки синтетических жидких углеводородов (СЖУ), необходимых для замещения истощающихся природных нефтяных ресурсов и производства синтетических моторных топлив, отвечающих новым жестким экологическим стандартам. Таким образом, основная ставка делается на передовые газохимические технологии производства и использования вторичных энергоресурсов.

Ресурсы природного газа

Природный газ появился на арене мировой энергетики относительно поздно, лишь во второй половине прошлого века, и в отличие от угля и нефти никогда не выступал в роли основного энергоресурса. Его доказанные мировые ресурсы велики и постоянно пересматриваются в сторону увеличения (рис. 6). Они сосредоточены в двух основных регионах — в России и на Ближнем Востоке. Располагая 12,8% мировой территории и 2,8% населения, Россия обладает 34% доказанных и более 40% потенциальных запасов природного газа. Именно это национальное богатство делает Россию ведущей энергетической державой XXI века. Практически столь же велики нетрадиционные запасы природного газа, например, угольного метана, объем добычи которого в США достиг 35 млрд м³/год. Согласно современным представлениям о его генезисе, природный газ, в отличие от нефти и угля, имеет в основном abiогенное происхождение. Ежегодно в результате продолжающейся дегазации планеты до 1 трлн м³ метана выделяется из недр в земную кору и атмосферу [16]. Это количество сопоставимо с его мировой добычей, что позволяет рассматривать природный газ как частично возобновляемый ресурс. Но самое главное, существуют огромные запасы метана в виде твердых газовых гидратов. По оценкам ресурсы гидратного метана составляют около 20 тысяч трлн м³ [16—18], т.е. минимум на два порядка превышают его традиционные запасы. При образовании гидрата один объем воды связывает от 70 до 210 объемов газа, а 1 м³ гидрата метана содержит до 165 м³ газа при нормальных условиях [18]. В настоящее время США и Япония ведут активную разработку методов промышленной эксплуатации газогидратных месторождений.

Таким образом, природный газ по запасам, экономичности добычи и возможности использования, экологическим свойствам является наиболее перспективным ресурсом, способным обеспечить потребности человечества в энергии и углеводородном сырье, по крайней мере, в течение текущего столетия. «Газовая пауза» может дать человечеству шанс успеть овладеть управляемым термоядерным синтезом и решить проблему стабилизации численности населения без серьезных катаклизмов мирового масштаба, а природный газ и газохимия могут сыграть в мировой экономике и энергетике XXI века такую же роль, какую сыграли в XX веке нефть и нефтехимия. Следствием понимания возрастающей роли природного газа не только в качестве энергоресурса, но и как нефтехимического сырья явился резкий всплеск в последние два года интереса к проблеме химической переработки газа, особенно к процессам превращения в жидкие углеводороды и моторное топливо, к так называемым GTL (gas-to-liquid)-технологиям. Крупнейшие нефтегазовые компании мира уже обозначили свой интерес к этой проблеме, анонсировав планы проектирования и строительства новых предприятий (табл. 1).

GTL-технологии сегодня

К сожалению, современный уровень развития газохимии пока еще не сопоставим с уровнем развития нефтехимии, и не позволяет ей взять на себя ту роль, которую нефтехимия играет в мировой экономике. Всего около ~110 млрд м³ добываемого природного газа используется в качестве химического сырья, что составляет менее 5% объема его годовой добычи [23]. Основными крупнотоннажными продуктами химической переработки природного газа являются аммиак и метанол. Кроме того, природный газ используется в относительно малотоннажных процессах получения сажи, ацетилен, хлорфторуглеводородов и некоторых других продуктов.

Резкий и, видимо, уже необратимый рост цен на нефть обострил интерес к проблеме конверсии природного газа в многотоннажные легко транспортируемые химические продукты. Помимо удовлетворения потребности в соответствующих продуктах, это, вероятно, наиболее реальный путь освоения громадных запасов природного газа в удаленных регионах и на континентальном шельфе. Рассматривается несколько технологий утилизации труднодоступных запасов газа,

Действующие, проектируемые и анонсированные процессы конверсии природного газа в жидкие продукты (GTL-процессы)
(при оценке принято годовая кампания — 333 сут (8000 ч), 1 т жидкого продукта = 7,1 баррель)

Фирма (страна)	Проектная мощность, баррель/сут	Проектная мощность тыс. т/год	Объявленная стоимость проекта, млн долл.	Удельные капзатраты, (долл./баррель)сут	Удельные капзатраты, (долл./т)год	Литература
Mobil ^a (Новая Зеландия)		470		76 000	1 620	[19]
Mossgas ^a (ЮАР)	22 500	1 100		46 000	980	[19]
Shell ^a (Малайзия)	12 500	580		50 000	1 070	[19]
Exxon ^b (Катар)				30 000	640	[19]
Sasol/Shevron ^b (Нигерия)	50 000	2 350		26 000	550	[19]
Exxon Mobil ^b				29 000	620	[20]
Shell ^b				30 000	640	[20]
Sasol ^b	15 300	720	395	25 800	550	[20]
Syntroleum ^b	12 000	560	455	37 920	810	[20]
Rentech ^b	16 450	770	468	28 450	610	[20]
Intevep ^b	15 300	720	373	24 380	520	[20]
Exxon Mobil ^b				24 000	510	[20]
Shell ^b				26 000	550	[20]
Sasol ^b	50 900	2 400	1 039	20 410	430	[20]
Syntroleum ^b	40 000	1 900	1 258	31 450	660	[20]
Rentech ^b	54 900	2 600	1 268	23 100	490	[20]
Intevep ^b	50 900	2 400	997	19 590	420	[20]
Syntroleum ^b (Австралия)	10 000	470	506	50 600	1 080	[21]
Shell Intl Gas/ EGPC-West Damiatta ^b (Египет)	75 000	3 500	1700	22 700	486	[22]
Qatar Sasol-Ras Laffan ^b (Катар)	34 000	1 600	800	23 500	500	[22]
BP PLC ^b (США, Аляска)	300	14	86	290 000	6 150	[22]
Conoco Inc ^b (США)	400	18,8	75	187 500	4 000	[22]

^a Реализованный процесс

^b Проект в стадии строительства или проектирования.

^в Анонсированный проект

включая процессы конверсии газа в жидкость (gas-to-liquids, GTL), к которым в первую очередь относят синтетические жидкие углеводороды (СЖУ) и метанол. Как правило, в этой же группе рассматриваются и сопутствующие технологии конверсии метанола в бензин (methanol-to-gasoline, MTG), метанола в олефины (methanol-to-olefins, MTO), олефинов в бензин (olefins-to-gasoline and distillates, MOGD), а также получение диметилового эфира (DME) и генерация энергии, в том числе из метанола

Главным преимуществом СЖУ и получаемого из них моторного топлива является отсутствие в них экологически проблемных примесей, прежде всего соединений серы. Перспективным первичным продуктом конверсии природного газа является метанол. Он служит сырьем для производства формальдегида, уксусной кислоты, МТБЭ и других компонентов моторных топлив, а также многих других химических продуктов. В настоящее время мировое производство метанола уже достигло 35 млн т/год. Метанол являет-

ся удобным энергоносителем, который можно использовать в качестве моторного, котельного и газотурбинного топлива, как источник водорода для топливных элементов. Он может стать базовым полупродуктом C₁-химии. Потенциальный мировой рынок метанола включает получение из него таких химических полупродуктов, как этилен и пропилен, и в 20 раз может превысить существующий объем его производства [23]. Ниже приведена перспективная потребность в метаноле (млн т/год):

Существующий рынок	35
Новые потенциальные рынки	
Энергетика	600
Топливные элементы	150
Дизельное топливо	55
Производство химических продуктов	14

Около 600 млн т метанола потребуется, если на нем будет базироваться только 10% мирового производства вторичной энергии. В транспортном секторе потребуется 150 млн т/год при переводе всего 25% мирового парка автомобилей на топливные элементы, питаемые водородом, получаемым из метанола непосредственно на борту автомобиля. Примерно 55 млн т/год метанола потребуется, если 25% дизельного топлива будет содержать 15%-ю добавку диметилового эфира.

Сегодня рассматриваются около 15 проектов предприятий по конверсии природного газа в жидкие продукты (GTL) методом Фишера—Тропша суммарной производительностью около 750 000 баррель/сут (35 млн т/год) и с общим потреблением газа около 7,5 млрд фут³/сут (~80 млрд м³/год) [24]. Но по экспертным оценкам в ближайшие годы из них будут реализованы не более двух-трех проектов [25].

Все ныне действующие производства и предлагаемые проекты основаны на предварительной конверсии природного газа в синтез-газ — смесь монооксида углерода и водорода. Это технологически сложный и энергозатратный процесс, на долю которого приходится от 50 до 75% общей стоимости производства метанола и других продуктов [26]. Однако пока только этот путь обеспечивает возможность практически полной конверсии углеводородного сырья в целевые продукты. Согласно исследованиям, проведенным компанией *Foster Wheeler Energy Ltd.* по заказу фирмы *Sasol* [27], а также данным работы [25], типичный завод по конверсии природного газа в жидкие продукты производительностью 30 000 баррель/сут на основе технологии Фишера—Тропша при условии размещения непосредственно на побережье для транспортировки произведенной продукции морем имеет следующие параметры [25, 27]:

Производительность	30 000 баррель/сут (1,4 млн т/год)
Стоимость проекта	750 млн долл.
Удельные капзатраты	25 000 долл. за баррель в сут. (530 долл. за тонну в год)
Текущие затраты (без учета стоимости сырья и амортизационных отчислений)	28—32 долл./т

Удельный расход газа	9 500 фут ³ /баррель (1900 м ³ /т)
Цена газа	0,5 долл./тыс. фут ³ (17,7 долл./1000 м ³)
Затраты на сырье	4,5 долл./баррель (32 долл./т)
Срок окупаемости	10 лет
Срок эксплуатации	25 лет
Удельные амортизационные отчисления	9 долл./баррель (64 долл./т)
Себестоимость продукции	18 долл./баррель (128 долл./т)

Стоимость такого завода в условиях Ближнего Востока составит примерно 750 млн долл., а сроки сооружения оцениваются в три года. С учетом отчислений на возврат капиталовложений и сырье при стоимости газа ~18 долл./1000 м³ себестоимость продукции составит 128 долл./т, что вполне приемлемо при цене нефти выше 20 долл./баррель. При проектной продолжительности эксплуатации 25 лет [25, 27] будет переработано не менее 40 млрд м³ газа, поэтому такие проекты, с учетом степени извлечения ресурсов, должны опираться на месторождения с начальными доказанными запасами от 100 млрд м³ и выше.

Из построенного по данным табл. 1 рис. 7 видно, что при мощности производства СЖУ или метанола ниже 600 тыс. т/год удельные капзатраты резко возрастают, т.е. эта производительность фактически является порогом рентабельности на мировом рынке. Современные GTL-технологии являются сложными многостадийными процессами, включающими подготовку и очистку природного газа, получение и очистку синтез-газа, синтез СЖУ или метанола, их последующую переработку в товарные продукты, генерацию и утилизацию необходимой для проведения процесса и выделяющейся при его проведении энергии. Поэтому производители в перспективе ориентируются преимущественно на мощности свыше 2 млн т/год (табл. 1), для сырьевого обеспечения которых необходимы месторождения с доказанными запасами в несколько сотен миллиардов кубометров.

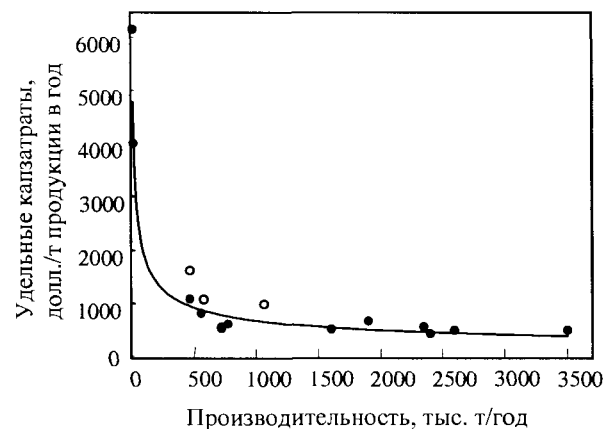


Рис. 7. Зависимость удельных капзатрат при производстве СЖУ от производительности предприятия

Проблема транспортировки природного газа

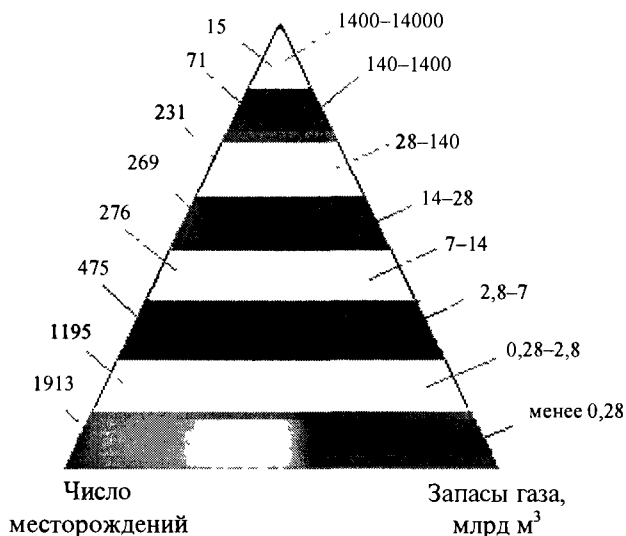


Рис. 8. Распределение газовых месторождений мира по величине запасов [28]

Из примерно 4,5 тысяч открытых газовых месторождений мира всего несколько процентов крупнейших месторождений могут служить сырьевой базой для таких гигантов (рис. 8). Аналогичная ситуация и с отечественными месторождениями (табл. 2). Из примерно 760 месторождений почти 600 относятся к мелким с запасами менее 10 млрд м³ и по экономическим условиям не вовлечены в промышленную эксплуатацию. Они недостаточно велики, чтобы стать базой для современных производств и не могут оправдать прокладку к ним дорогостоящих трубопроводов. В то же время трудно рассчитывать на открытие в будущем новых гигантских месторождений природного газа. Большинство вновь открываемых месторождений относится к мелким. Поэтому проблема использования или транспортировки их углеводородных ресурсов потребителям будет обостряться.

Таблица 2

Распределение начальных разведанных на 1998 г. запасов газа в России по величине запасов [29]

Запасы газа в месторождении, млрд. м³	Месторождения		Начальные разведанные запасы	
	Число	%	трлн м³	%
До 1	285	37,3	0,15	0,3
1—10	284	37,2	0,92	1,6
10—30	74	9,6	1,35	2,3
30—100	58	7,6	3,46	6,0
100—500	47	6,2	10,95	18,8
Более 500	16	2,1	41,17	71,0
Итого	764	100	58,00	100

Сложность транспортировки природного газа серьезно влияет на динамику его добычи и потребления. Трубопроводный транспорт газа значительно менее эффективен по сравнению с транспортом жидких продуктов, требует громадных затрат, расхода металла и энергии на перекачку газа. Это основная причина, препятствующая вовлечению в промышленную эксплуатацию тысяч давно открытых мелких месторождений во всем мире. Стоимость строительства километра магистрального газопровода оценивается в среднем в 1 млн долл., что превращает их сооружение в сложное дорогостоящее мероприятие, осуществимое усилиями только мощных международных консорциумов. А энергозатраты на транспортировку природного газа от северных месторождений до западной границы России поглощают до 10—15% его добычи и увеличивают стоимость каждой тысячи кубометров на несколько десятков долларов.

Большинство вновь открываемых и осваиваемых традиционных газовых и газогидратных месторождений расположено в удаленных регионах или на морском шельфе, что делает проблему транспортировки их ресурсов потенциальным потребителям критической. Экономическая целесообразность использования трубопроводного транспорта или технологии сжижения природного газа для его доставки на расстояния в тысячи километров от отечественных месторождений на побережье и шельфе Северного Ледовитого океана к предполагаемым центрам потребления, например, в Юго-Восточной Азии, вызывает большие сомнения. Хотя мировой объем торговли сжиженным природным газом (СПГ) достиг уже 90 млрд м³/год, современные методы получения СПГ и его перевозка танкерами-рефрижераторами увеличивают цену газа минимум на 50—55 долл./1000 м³, что менее рентабельно, чем конверсия в жидкие продукты для последующей транспортировки. Только расход металла при транспортировке энергетического потенциала природного газа в виде синтетических жидких углеводородов (СЖУВ) может быть снижен в 2,5 раза по сравнению с трубопроводным транспортом и в 7 раз по сравнению с перевозкой в сжиженном виде [30]. Кроме того, в течение проектного срока службы одна линия СПГ с экономически обоснованной мощностью потребляет для покрытия собственных нужд до 140 млрд м³ газа [31]. Наконец, транспорт и промышленность нуждаются именно в жидком экологически чистом топливе и сырье. Практический путь решения обеих задач открыла бы рентабельная технология конверсии природного газа в жидкие химические продукты непосредственно в промысловых условиях.

Однако переработка природного газа в жидкие продукты в условиях российского Севера, Аляски, шельфовых месторождений и месторождений с малым сырьевым ресурсом, в которых сосредоточена подавляющая часть мировых запасов, видимо, не может быть рентабельной на основе существующих газохимических технологий и требует принципиально новых технологических решений. Отсутствие простых малотоннажных процессов конверсии углеводородных газов в отдельных случаях сдерживает даже проведение перспективных геологоразведочных работ, в том числе на нефть. Для их экономического обоснования требуются более привлекательные планы использования

газа, залегающего в нефтеносном пласте, чем сжигание в факелах или повторная закачка в пласт. Объем непроектируемо используемого природного газа, т.е. сжигаемого в факелах, сбрасываемого в атмосферу или повторно закачиваемого в пласт, в 1996 г. составлял 439 млрд м³, что эквивалентно годовому производству 222 млн т синтетической нефти [31].

Газохимия и парниковый эффект

Есть еще одна серьезная проблема, с которой человечество столкнулось в XXI веке и в решении которой прогресс в газохимических технологиях может сыграть решающую роль, — это глобальное потепление в результате роста концентрации парниковых газов в атмосфере. Механизм формирования климата нашей планеты очень сложен и зависит от многих параметров, плохо поддающихся даже грубой оценке. Тем не менее есть веские основания полагать, что порожденная цивилизацией нарастающая антропогенная эмиссия парниковых газов является одной из существенных причин наблюдаемого в течение последнего столетия роста концентрации парниковых газов в атмосфере и постепенного повышения средней температуры земной поверхности. Хотя в трактовке наблюдаемых явлений и в прогнозах возможных климатических изменений есть много спорного [32], реальные последствия глобальных климатических изменений могут иметь катастрофические последствия, вплоть до полной гибели цивилизации. Серьезность проблемы заставила представителей практически всех правительств мира подписать в 1997 г. Киотский протокол об ограничении и частичном снижении эмиссии парниковых газов.

Основной упор был сделан на сокращение эмиссии диоксида углерода, подавляющая часть которого производится мировой энергетикой при сжигании ископаемого углеродного топлива. Однако простые оценки показывают практическую нереальность сбора и утилизации громадного объема диоксида углерода, эмитируемого в атмосферу. Современная энергетика потребляет ежегодно почти 8 млрд т углеродного топлива (в нефтяном эквиваленте), т.е. почти 7 млрд т углерода. При этом в атмосферу выбрасывается примерно 20 млрд т или 20 трлн м³ углекислого газа. Если учесть, что подавляющая часть CO₂ выбрасывается в атмосферу в составе дымовых газов тепловых электростанций, где его концентрация при стехиометрическом сжигании в воздухе чуть менее 12%, становится ясно, что более-менее существенное воздействие на уровень его эмиссии требует переработки значительной части от громадного потока в 200 трлн м³ дымовых газов. Это экономически нереальная задача.

Стоимость извлечения и удаления тонны диоксида углерода из разбавленных дымовых газов составляет от 100 до 300 долл. [32]. Если умножить это значение на объем мировой эмиссии диоксида углерода, полученный объем необходимых затрат будет сопоставим с ВВП, производимым всей мировой экономикой. При этом себестоимость добычи тонны природного газа, образующей при сгорании три тонны CO₂, даже в условиях российского Крайнего Севера не превышает 3 долл. Таким образом, при сборе и утилизации тонны CO₂ необходимы затраты, вызывающие эмиссию в сто раз большего количества CO₂! Попытки решить проблему за счет использования все более изощренных

технологических проектов напоминают 300-летние попытки создания вечного двигателя. Достаточно очевидно, что энергия, необходимая для выделения единицы объема CO₂ из десятикратно разбавленного азотом газа, его сбора, транспортировки и утилизации или захоронения будет сопоставима с энергией, выделяющейся при его образовании, а с учетом реального КПД этих процессов, как минимум на порядок выше. Именно понимание непосильного бремени этих расходов для национальной экономики заставило США отказаться от ратификации Киотского протокола.

Хотя удаление других поллютантов из дымовых газов электростанций, особенно работающих на угле, почти столь же дорого (цент/кВт-ч) [33], их объем несопоставим с объемом эмитируемого CO₂.

CO ₂ (такса за выбросы)	1,5—4,0
SO _x	1,5—3,5
NO _x	0,5—2,0
Твердые частицы	0,5—2,8

Суммарная стоимость очистки от всех поллютантов в несколько раз превышает стоимость производимой электроэнергии. Это заставляет американскую энергетику искать принципиально новые пути, в частности, рассматривать газохимическую переработку угля как единственную возможность использования его в качестве экологически чистого источника энергии.

Новые газохимические технологии могут открыть возможность реального решения проблемы антропогенного парникового эффекта. Вклад диоксида углерода в парниковый эффект действительно наибольший, но отнюдь не подавляющий. Точно такой же вклад, но с обратным знаком, оказывают в сумме тропосферные аэрозоли и вызываемое ими изменение облачного покрова [34]. Причем так же, как и CO₂, аэрозоли образуются преимущественно при сжигании углеродного топлива. В результате суммарное воздействие мировой энергетикой на парниковый эффект за последние 150 лет близко к нулю! Решающее значение здесь имеют другие факторы. Прежде всего это повышение концентрации в атмосфере метана, парниковый эффект от которого достигает половины эффекта от CO₂. При этом концентрация метана и его эмиссия почти в 200 раз ниже, чем для диоксида углерода. Таким образом, эффективное воздействие на парниковый эффект можно оказать путем снижения значительно более слабых антропогенных потоков метана и других углеводородных газов. Причем в отличие от диоксида углерода эти газы являются ценным химическим и энергетическим сырьем, их сбор и утилизация могут быть экономически оправданы даже безотносительно вклада в решение проблемы стабилизации климата [32]. Это позволяет не противопоставлять экологию экономике, а искать совместное решение экологических и экономических проблем.

В настоящее время только в процессах нефте- и газодобычи ежегодно в мире на нескольких тысячах месторождений выбрасывается в атмосферу или сжигается в факелах более 100 млрд м³ углеводородных газов, что составляет примерно 4% объема мировой добычи. Претворить эти потери практически невозможно до тех пор, пока не будут созданы технологии, позволяющие рентабельно перерабатывать небольшие потоки природного газа. Следует сосредоточить усилия по реализации целей Киотского протокола на разработке и широком

внедрении новых малотоннажных технологий переработки небольших потоков углеводородных газов, как антропогенного, так и естественного происхождения. Это могло бы дать максимальный экологический эффект при минимальных экономических затратах и позволило бы много более экономично, чем сбор и связывание CO_2 , решить проблему антропогенного вклада в парниковый эффект и глобальное изменение климата.

Условие развития — новые технологии

Другим серьезным стимулом для интенсификации усилий по развитию газохимических технологий является ужесточение требований к составу экологически проблемных соединений в выхлопных газах современного автотранспорта. Особенно сложную проблему для нефтеперерабатывающей отрасли создает ограничение содержания ароматических соединений в моторном топливе и снижение ПДК на содержание диоксида серы в выхлопных газах до 15 ppm. Многомиллиардные затраты на перестройку нефтеперерабатывающих предприятий и неизбежное повышение стоимости новых экологически более чистых нефтяных топлив дают газохимии шанс завоевать позиции на рынке экологически чистых моторных топлив.

Помимо продолжения усилий по совершенствованию существующих газохимических технологий, а также по разработке новых процессов получения синтез-газа [35] и синтеза на его основе СЖУ, метанола, ДМЭ и других продуктов, в настоящее время ведутся работы по созданию нескольких принципиально новых перспективных процессов конверсии углеводородных газов в химические продукты, минуя стадию получения синтез-газа. Среди них окислительная димеризация метана в этан и этилен, прямое окисление метана в метанол и другие процессы. В настоящее время трудности с их практической реализацией связаны главным образом с необходимостью достаточно крупных финансовых затрат на проектную и технологическую проработку соответствующих процессов. Видимо, важным направлением, которое облегчит внедрение новых технологий, станет развитие энергогазохимических процессов, когда потребляющие и выделяющие огромное количество энергии газохимические процессы будут совмещены в едином энергохимическом комплексе по производству химических энергоносителей и электроэнергии для внешних потребителей. Такое совмещение позволит более рационально решить процессы использования химического и энергетического потенциала природного газа.

Для освоения Северных и шельфовых, а также малоресурсных месторождений мировой экономике и энергетике необходимы новые более эффективные малотоннажные процессы конверсии громадных ресурсов природного газа в легко транспортируемые жидкие углеводородные продукты — сырье для энергетики, нефтехимии, производства моторных топлив. Особенно важно внедрение принципиально новых технологий переработки углеводородных газов для современной России. Создание таких технологий может позволить на местном уровне решить проблему энергоснабжения богатых газом северных регионов, куда ежегодно завозится более 9 млн т жидкого топлива, повысить энергетическую безопасность как отдельных регионов, так и страны в целом.

В условиях сложившегося глобального научно-технического отставания и недостатка финансовых ресурсов попытки догнать, а тем более обойти передовые страны на пути освоения традиционных технологий почти наверняка обречены на неудачу. Только развитие принципиально новых идей и подходов дает шансы завоевать передовые рубежи на рынке новых технологий. Поэтому ускоренное развитие газохимии как ключевой энергохимической отрасли должно стать приоритетным направлением научно-технической политики России на ближайший период. Это позволит оптимальным образом реализовать природный потенциал страны, обеспечить ее энергетическую и сырьевую безопасность, устойчивое развитие экономики в XXI веке.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Гориков В Г Физические и биологические основы устойчивой жизни М ВИНТИ, 1995, 470 с
- 2 Капица С П Общая теория роста человечества М Наука, 1999, 190 с
- 3 Медоуз Д Х, Медоуз Д Л, Рандерс Й За пределами роста М Прогресс, 1994, 304 с
- 4 Добрецов Н А, Конторович А Э, Куликов В В Вестник РАН, 2001, т 71, № 10, с 867—885
- 5 Паришев А П Почему Россия не Америка М Крымский мост-9д, 2000, 411 с
- 6 Oil & Gas J, 2002, Oct 14, p 36—38
- 7 Капица П Л Успехи физ наук, 1976, т 118, № 2, с 307
- 8 Легасов В А, Кузьмин И И Природа, 1981, № 2, с 8
- 9 Johnson J Chem Eng News, 2000, Oct 9, p 45
- 10 Мусеев Н Н Мировое сообщество и судьба России М Изд-во МНЭПУ, 1997, т 3, с 92
- 11 British Petroleum Statistical Review of World Energy 2002 (<http://www.bp.com/centres/energy2002/>)
- 12 Campbell C J, Loherrne J H Scientific American, 1998, № 3, p 78
- 13 Oil & Gas J, 2002, Aug 26, p 33—34
- 14 Parker H W Ibid, 2002, Feb 25, p 40
- 15 Rutter S K Ibid, 2002, Oct 7, p 30—32
- 16 Валаев Б Газовая промышленность, 1997, № 7, с 6—9
- 17 Якушев В С, Истомина В А Там же, 2000, № 7, с 34—36
- 18 Макогон Ю Ф Там же, 2001, № 5, с 10—16
- 19 Thi Chang Oil & Gas J, 2000, Dec 18, p 46—49
- 20 Weeden S L Ibid, 2001, Mar 12, p 58—63
- 21 Shubert P F, Bayens C A et al 6th Natural Gas Conversion Symp Studies in Surface Science and Catalysis Ed E Iglesia, T H Fleish Elsevier Science B V Amsterdam-London-New York-Oxford-Paris-Shannon-Tokyo, 2001, v 136, p 459—464
- 22 Stell J Oil & Gas J, 2002, Nov 25, p 60
- 23 Fleisch T H, Puri R, Sills R A, et al См [21], p 423—428
- 24 Gas-to-Liquids News, Dec 2000, p 11
- 25 Gradassi M J См [21], p 429—434
- 26 Крылов О В Катализ в промышленности, 2002, № 2, с 16
- 27 Ghaemmaghami B, Clarke S C Oil & Gas J, 2001, Mar 12, p 64
- 28 Agee M A In Surface Sciences and Catalysis Eds A Parmaliana et al Amsterdam Elsevier, 1998, v 119, p 931
- 29 Скоробогатов В А, Старосельский В И, Якушев В С Газовая промышленность, 2000, № 7, с 17
- 30 Велихов Е П Там же, 2000, № 11, с 12
- 31 Петров А А Катализ в промышленности, 2002, № 2, с 11
- 32 Арутюнов В С Рос хим ж (Ж Рос хим об-ва им Д И Менделеева), 2001, т 45, № 1, с 55
- 33 Coboter A A A, Brkic D, Cooperberg D C, Sep K Oil & Gas J, 2001, Feb 26, p 58
- 34 Hansen J et al Proc Natl Acad Sci, 2000, v 97, p 9875 (<http://www.giss.nasa.gov/research/impacts/altscenarios/>)
- 35 Колбановский Ю А, Платэ Н А Нефтехимия, 2000, т 40, № 5, с 323—333