

## КАТАЛИЗ И ЭНЕРГЕТИКА. ОПЫТ ИНСТИТУТА КАТАЛИЗА ИМ. Г. К. БОРЕСКОВА СО РАН



*Валентин Пармон*

*Институт катализа СО РАН, Россия  
Лауреат Международной энергетической  
премии «Глобальная энергия» 2016 года  
[info@ge-prize.org](mailto:info@ge-prize.org)*

**Аннотация:** В публикуемом материале даётся обзор научно-технологических разработок в области использования катализаторов в различных областях топливно-энергетического комплекса Российской Федерации, выполненных Институтом катализа СО РАН за более чем четверть века своей деятельности под руководством и с непосредственным участием академика В. Н. Пармона, лауреата премии «Глобальная энергия» за 2016 год. В частности, описывается ряд каталитических технологий, используемых в нефте- и газопереработке, производстве биотоплив и эффективном использовании различных видов биомассы, ядерной и возобновляемой энергетиках. Несомненный интерес представляют приложение каталитических технологий к использованию низкопотенциального тепла и повышению комфортности жизни людей. Стратегическим направлением описываемых технологий является повышение энергоэффективности процессов, связанных с производством энергоносителей и их использования, а также разработка альтернативных методов использования солнечной и иных «нетрадиционных» видов энергии.

**Ключевые слова:** катализаторы, каталитические технологии, переработка углеводородов, ядерная и термоядерная энергетика, биотопливо, солнечная энергия, фотосинтез, аккумуляция энергии, низкокалорийное тепло.

В 2016 году международная премия «Глобальная энергия» была присуждена российскому учёному-химику, действительному члену (академику) Российской академии наук (РАН) Валентину Пармону за «прорывную разработку новых катализаторов в области нефтепереработки и использовании возобновляемых источников энергии, внесших принципиальный вклад в развитие энергетики будущего».

В настоящее время академик В. Н. Пармон является научным руководителем Института катализа им. Г. К. Борескова\* Сибирского отделения (СО) РАН и членом престижных научно-технических советов и научных обществ в России и за рубежом. Валентин Пармон заявил о своём намерении использовать денежную часть полученной премии, которая составила в 2016 году 39 млн. рублей, на поддержку научных исследований, проводимых молодыми учёными в области катализа и получения новых катализаторов для их применения в производстве и использовании эффективных энергоносителей.

Публикуемый материал в рубрике «Говорят лауреаты премии «Глобальная энергия» настоящего выпуска журнала «Энергетический вестник» является текстом лекции, прочитанной Валентином Николаевичем в рамках мероприятий Лауреатской недели премии «Глобальная энергия» в Санкт-Петербурге, Российская Федерация, в июне 2016 года.

\* Боресков Георгий Константинович, (1907–1984), выдающийся советский учёный физико-химик, действительный член (академик) Академии наук СССР, основатель и первый руководитель Института катализа Сибирского отделения (СО) АН СССР (после 1991 года СО РАН). Прим. ред.

## Введение

В современном обществе слово «катализатор» – очень популярное. С его применением подразумевается нечто «активирующее» во всех смыслах, например, катализатор прогресса, мнения, общественного течения, политики и т.д. На самом деле, термин «катализатор» – чисто химическое понятие. Оно было впервые введено великим химиком Й. Берцелиусом\* в 1836 году. Катализатор – это «волшебная палочка», прикоснувшись которой к заданному веществу можно получить желаемый продукт, а катализ – это способ управления скоростью и направлением химических превращений с помощью катализаторов.

Катализ – это химия каталитических интермедиатов. Катализаторы и каталитические технологии являются структурообразующим базисом химической промышленности и смежных отраслей экономики России и многих стран мира. Они позволяют успешно решать следующие важные задачи:

- повышение качества продукции,
- эффективное использование сырьевых ресурсов,
- значительное сокращение энергозатрат,
- улучшение экологии,
- производство продукции с высокой добавленной стоимостью.

С помощью каталитических технологий производится продукция:

- в мире – в объеме более \$1,0 трлн. в год,
- в России – более чем на 1,0 трлн.руб.

Вклад каталитических технологий в материальную составляющую ВВП:

- в России – 12–15%,
- в США – 35%.

Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, далее ИК СО РАН\*\* был основан академиком Г. К. Боресковым в 1958 году и в настоящее время является ведущим национальным исследовательским

\* Берцелиус Йёнс Якоб (Jons Jacob Berzelius) (1779–1848), шведский учёный химик, считается основоположником некоторых разделов химии, включая каталитическую химию, электрохимию, сделал открытия трёх химических элементов. Прим. ред.

\*\* Полное название института – «Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт катализа Сибирского отделения Российской академии наук им. Г. К. Борескова». Прим. ред.



**Рис. 1. Как работает химический катализатор?** Катализатор – это вещество, которое управляет направлением и скоростью химических превращений за счет промежуточных взаимодействий с участниками реакции и которое регенерирует свой состав после завершения цикла этих превращений и не входит в состав продуктов реакции.



**Рис. 2. Типичные промышленные катализаторы и носители.**

центром в данной области с признанным международным авторитетом.

Изначально основная миссия института была определена следующими задачами: быть на современном уровне науки о катализе и обеспечить импортонезависимость страны в области важнейших промышленных катализаторов. Важными вехами в развитии института следует считать создание и научно-производственную деятельность в 1986–1991 годах МНТК\*\*\* «Катализатор» и присвоение ему в 1994 году статуса Государственного научного центра (ГНЦ).

\*\*\* Межотраслевой научно-технический комплекс. Прим. ред.



**Рис. 3. Катализатор ароматизации попутных газов (промышленное производство мощностью 150 т/год, Новосибирск).**



**Рис. 4. Опытно-промышленная установка переработки попутных газов в ароматические соединения мощностью 1000 т/год (Краснодар, 2006).**

### Катализ в переработке углеводородного сырья

Традиционными областями взаимодействия катализа и энергетики являются такие важные направления, как производство моторных и авиационных топлив в соответствии с требуемыми стандартами, очистка дымовых газов ТЭЦ и выхлопных газов ДВС; переработка нетрадиционного углеводородного сырья (природный газ, попутные нефтяные и нефtezаводские газы) в моторное топливо.

За время своего существования институт выполнил большое число проектов, связанных

с энергетикой. Очень показательна результативность выполнения инновационного проекта государственного значения «Разработка и промышленное освоение катализаторов и каталитических технологий нового поколения для производства моторных топлив» в 2003–2006 гг. Целью проекта являлась разработка и промышленное освоение выпуска отечественных катализаторов мирового уровня для базовых процессов нефтепереработки и производства сырья для нефтехимии – катализаторов крекинга, риформинга, гидроочистки; а также модернизация производств на предприятиях-участниках проекта.

Реальная экономическая эффективность проекта за период за 2003–2006 годы не вызывает сомнения, так как на 1 руб. вложенных в проект бюджетных средств за время выполнения проекта было произведено дополнительной высоколиквидной продукции на 16,6 руб. на ОАО «Газпромнефть-Омский НПЗ» и ОАО «ТНК-ВР», что в сумме составило более 8 млрд. руб.

Переработка попутных газов является перспективной сырьевой базой нефтехимии России на ближайшие годы и важнейшей областью использования катализаторов. В России ежегодно бесполезно сжигают на факелах более 35 млн.т/год попутных газов нефте- и газодобычи, что приводит к потере не менее 180 млрд. руб/год и выбросам в атмосферу около 50 млн. т CO<sub>2</sub>. В 2006 году с участием Института катализа СО РАН в России была создана научная и производственная базы для масштабной переработки попутных газов в ароматические соединения. Потенциал рынка катализаторов для этих процессов в РФ оценивается в 700 млрд. руб. Потенциальными потребителями разрабатываемых и опробованных в опытно-промышленных масштабах технологий являются крупнейшие Российские компании: ПАО «Газпром», ПАО «Газпром нефть», ПАО «СИБУР Холдинг».

Другим успешным научно-технологическим проектом явилась разработка процесса БИМТ (получения «бинарных» моторных топлив). Назна-

\*\* Ароматические углеводороды представляют собой широкий спектр углеводородов, в состав молекулы которых входит одно или несколько бензольных колец. Являются исходным сырьём получения технически ценных синтетических материалов с повышенной термической стабильностью и механической прочностью, высокими диэлектрическими характеристиками, большого ассортимента физически активных веществ и красителей и т.д. Прим. ред.

\* Двигатели внутреннего сгорания. Прим ред.

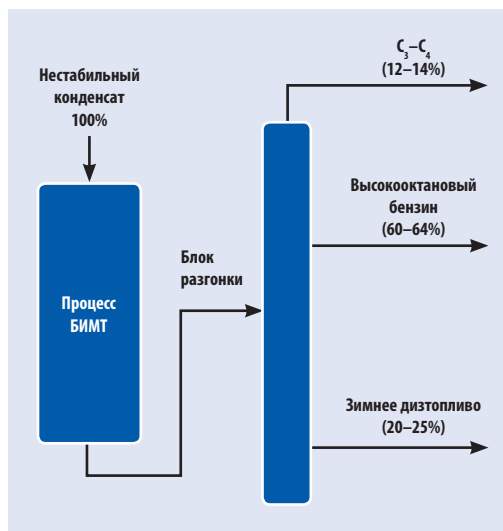


Рис. 5. Схема процесса БИМТ.



Рис. 6. Установка мощностью 4000 тонн в год по сырью, принадлежащая ОАО «НИПИгазпереработка»\* (г. Краснодар), на которой проводились опытно-промышленные испытания технологии БИМТ.

\* Научно-исследовательский и проектный институт по переработке газа. Прим. ред.

чение процесса: одностадийное получение одновременно высокооктановых бензинов, зимнего дизельного топлива и сжиженного газа C<sub>3</sub>-C<sub>4</sub> без предварительной гидроочистки сырья от сернистых соединений. К достоинствам данной технологии относится возможность использования нестабильных газовых конденсатов или прямогонных нефтяных фракций с концом кипения до 350–370 °С с нелимитируемым содержанием общей серы в сырье при этом содержание серы в получаемых продуктах составляет менее 0,05% мас. Более того, технология БИМТ обеспечивает снижение энергозатрат в данном производстве в 2–3 раза по сравнению с традиционными.

Разработанные институтом высококремнеземные цеолитные катализаторы и основанные на них технологии открывают возможность и для одностадийных процессов совместного превращения метана CH<sub>4</sub> и легких парафинов и C<sub>3</sub>-C<sub>4</sub> (метана и пропан-бутанов) в ароматические соединения.

#### Реакции легких углеводородов



Температура сдвига равновесия: **1630 К**



Температура сдвига равновесия: **760 К**



Температура сдвига равновесия: **880 К**

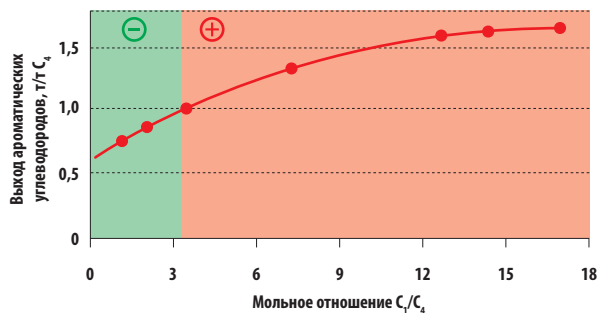
Так, при совместном превращении бутана с метаном удалось увеличить выход ароматических углеводородов удаётся в 2,5 раза – до 1,7 тонны на 1 тонну израсходованного бутана за счет прямого включения углеродных атомов метана в ароматические соединения.

Это позволило институту разработать оригинальный каталитический процесс «БИЦИКЛАР» – процесс совместной переработки метана и углеводородов C<sub>3</sub>-C<sub>4</sub> в ароматические соединения, который обеспечивает вовлечение в переработку природного газа, ШФЛУ,\*\* попутных нефтяных газов, факельных газов и других углеводородных смесей.

Ключевые технологические параметры процесса: температура 450–550 °С, давление 0,1–4,0 МПа, объемная скорость подачи сырья

\*\* Широкая фракция лёгких углеводородов – продукт переработки попутного нефтяного газа и газового конденсата. Прим. ред





**Рис. 7. Показатели процесса «БИЦИКЛАР» в зависимости от соотношения  $C_1/C_4$ . Знак ⊕ означает прямое встраивание углеродных атомов метана в ароматические соединения.**

до  $1600 \text{ ч}^{-1}$ . К достоинствам процесса относятся: обеспечение высокого выхода ароматических углеводородов (в присутствии метана – до  $1,7 \text{ т/т } C_4$ , в отсутствии метана – до  $0,72 \text{ т/т } C_4$ ), возможность утилизировать углеводороды  $C_3-C_4$  и смеси других углеводородов, осуществлении совместной переработки олефиновых и парафиновых углеводородов, низкие энергозатраты. Технология «БИЦИКЛАР» опробована на реальном сырье в пилотном масштабе (реактор объемом  $150 \text{ л}$ ) и защищена патентами Российской Федерации.

Успешной была и разработка процесса «БИФОРМИНГ» с целью с прямого вовлечения в нефтепереработку нефтезаводских газов илипутных нефтяных газов (газов, содержащих смесь легких  $C_1-C_4$  углеводородов) при производстве высокооктановых бензинов. «БИФОРМИНГ» обеспечивает увеличение выхода целевого продукта – высокооктанового компонента моторных топлив – бензина на  $3,0-4,5\% \text{ масс.}$  (в лабораторных условиях – до  $5-7\% \text{ масс.}$ ) в расчете на поданное в переработку сырье без привлечения дополнительных сырьевых ресурсов. В 2005 году состоялось успешное полномасштабное промышленное испытание процесса на Рязанском НПЗ.

Важным направлением работы института самых последних лет явились разработка и проведенные в декабре 2015 года опытно-промышленные испытания технологии мягкого парового риформинга попутных нефтяных газов (ПНГ). Назначением данной технологии является переработка в стандартное газовое топливо (метан) широкой фракции легких углеводородов ПНГ без ее предварительного разделения в целях использо-

вания в децентрализованной электрогенерации или направления в трубопровод для дальнейшей транспортировки потребителям. Технология является разработкой Института катализа РАН и дочерней инжиниринговой компании Института – ООО «БИ АЙ Технолоджи» (Санкт-Петербург).

### Катализ и нетрадиционная энергетика

Более полувека научно-технические проблемы использования возобновляемых и нетрадиционных энергоресурсов занимали и продолжают занимать важное место сначала в деятельности АН СССР, а затем РАН.

Инициировали эту деятельность академики А. Ф. Иоффе и Н. Н. Семёнов, а в 1974 году был создан Научный совет АН СССР по изысканию новых путей использования солнечной энергии. Химическому направлению в работе совета было отведено важное место, и в научные исследования в данной области включился целый ряд научно-исследовательских институтов Академии, включая Институт катализа, а также высших учебных заведений.

Для лучшего понимания роли катализа в становлении и развитии нетрадиционных областей энергетики представляется интересным рассмотреть основные этапы развития сырьевых баз химии и энергетики.

XVIII век  
древесина

XIX век  
уголь (углехимия на основе ацетилен,  $-C \equiv C-$ )

XX век  
нефть (нефтепереработка и нефтехимия на основе олефинов,  $-C=C-$ )

XXI век  
природный газ, уголь, биомасса (газохимия + углехимия + биомасса растений + ...) → что дальше?

Неизбежность смены базиса первичных источников энергии нашей цивилизации – одна из основных проблем XXI века. Во многих случаях именно катализ помогает найти решения этих проблем и ответить на поставленный выше вопрос: «что дальше?». Исследования Института

катализа в данной области направлялись на решение следующих энергетических задач:

I. Производство теплоты из нетрадиционного и низкокалорийного углерод-содержащего сырья.

II. Квалифицированная переработка возобновляемой биомассы растений в топлива.

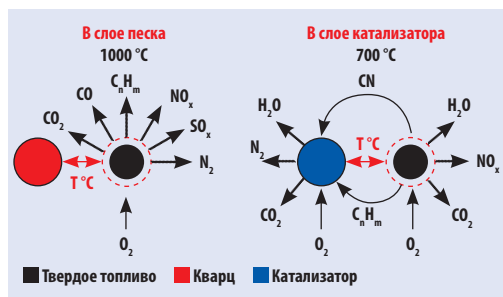
III. Каталитические технологии в ядерной и нетрадиционной (в т.ч. солнечной) энергетике.

IV. Повышение эффективности производства механической и электрической энергии.

V. Рекуперация или утилизация средне- и низкопотенциального тепла.

### I. Производство теплоты из нетрадиционного и низкокалорийного углерод-содержащего сырья

Основными задачами данного направления работ являлось повышение эффективности использования нередко доступных в достаточном количестве низкокалорийных твёрдых и других топлив. Ряд технологий, разработанных Института катализа СО РАН в данном направлении, внедрённых в энергопроизводство. Таковыми являются, например, технологии, основанные на сжигании твердых топлив в кипящем слое катализатора.



В данном процессе обеспечивается контролируемое экологически чистое горение, совмещенное с различными технологическими процессами. Достоинствами использования катализаторов в этом процессе сжигания топлива являются: низкая температура горения, снижение эмиссии вредных выбросов, компактность оборудования. Технологии, разработанные на основе этого процесса, реализованы в России, Казахстане и Литве.

Используемые топлива: угли (включая низкосортные), отходы углеобогащения и нефтяные шламы, торф, отходы деревопереработки и сельского хозяйства, влажные илы водоочистных сооружений, рисовая шелуха и пр.



Рис. 8. Опытно-промышленные испытания установки мягкого парового риформинга на Крапивином месторождении (Томская обл.) ПАО «Газпром нефть» лето-декабрь 2015 г.

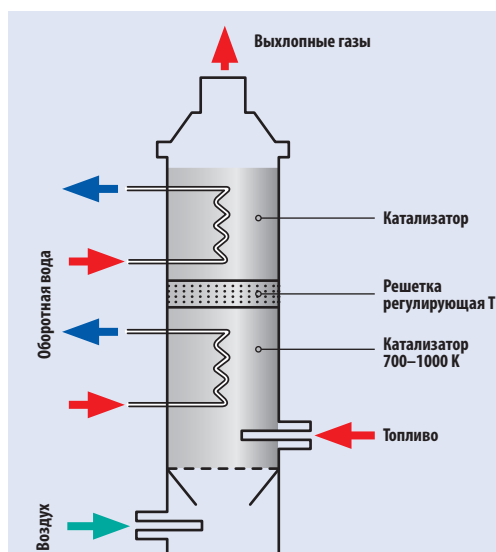


Рис. 9. Схема сжигания топлив в кипящем слое катализатора и опытно-промышленная автономная теплофикационная установка КТУ-2 мощностью 500 кВт для сжигания твердых топлив (высота 2,5 м.).

**Принцип**

Получение тепла путем сжигания топлива в слое катализатора



Каталитический генератор тепла (КГТ)

**Возможности**

- Тепловая мощность от 1,0 до 15 Гкал/ч
- Коэффициент использования тепловой энергии топлива – 93%
- **Экономия угольного топлива до 2–3 раз!!!**
- Возможно сжигание низкокалорийных топлив
- Содержание  $NO_x$ ,  $SO_x$ ,  $CO$  в отходящих газах – ниже ПДК

**Реализация**



- 2008 г. – п. Артышта (Кемеровская область), мощность 3 Гкал/ч
- 2010 г. – г. Юрга (Кемеровская область), мощность 1 Гкал/ч
- 2011 г. – ст. Кулунда (Алтайский край), мощность 3 Гкал/ч
- 2012 г. – ст. Абакумовка (Красноярский край), мощность 2 Гкал/ч
- ст. Магдагачи (Амурская область), мощность 6 Гкал/ч

Производство «под ключ» велось ООО «Термософт-Сибирь»

Рис. 10. Сжигание твердых углеродосодержащих топлив в кипящем слое катализатора и промышленные экологически чистые котельные серии КТУ, использующие в качестве топлива низкокачественный уголь.

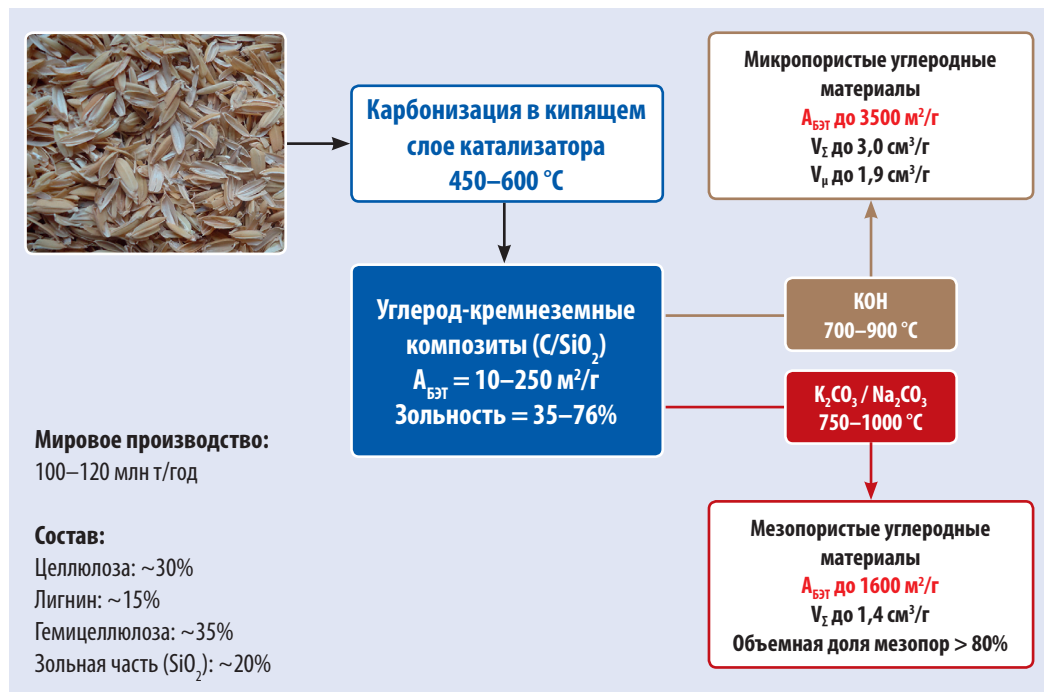


Рис. 11. Рисовая шелуха – нетрадиционное топливо и одновременно перспективное поистине возобновляемое сырье для получения пористых углеродсодержащих материалов.

## II. Квалифицированная переработка возобновляемой биомассы растений в топлива

Биомасса растений – доступное и возобновляемое углеродсодержащее сырьё для химической промышленности и энергетики. Годовое производство биомассы на Земле –  $10^{10}$  тонн. Ниже приводятся данные объёмов производства различного рода биомассы в России в сравнении с нефтедобычей и получением газового конденсата.

Вдобавок отходы животноводства представляют собой отличное сырьё для получения биогаза (смесь  $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ).

Добыча нефти и газовый конденсат .....~500 млн. т/год  
 Деловая древесина .....~250 млн. м<sup>3</sup>/год  
 Получение зерна .....~80 млн. т/год  
 Отходы лесного хозяйства .....~100 млн. т/год  
 Отходы растениеводства ..... ~200 млн. т/год

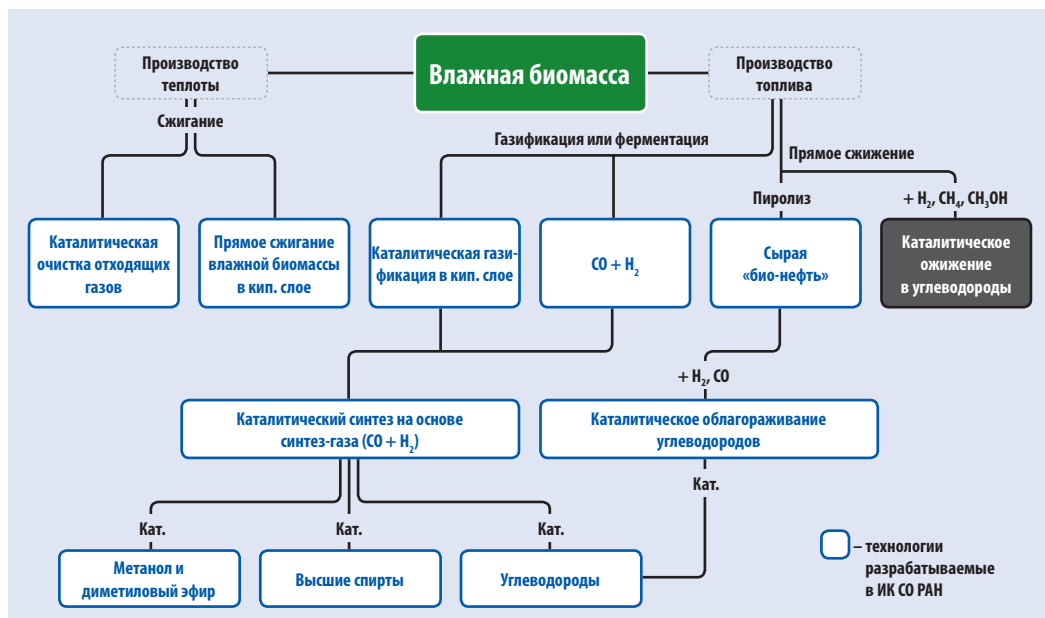


Рис. 12. Энергетическое использование влажной биомассы с участием каталитических технологий.

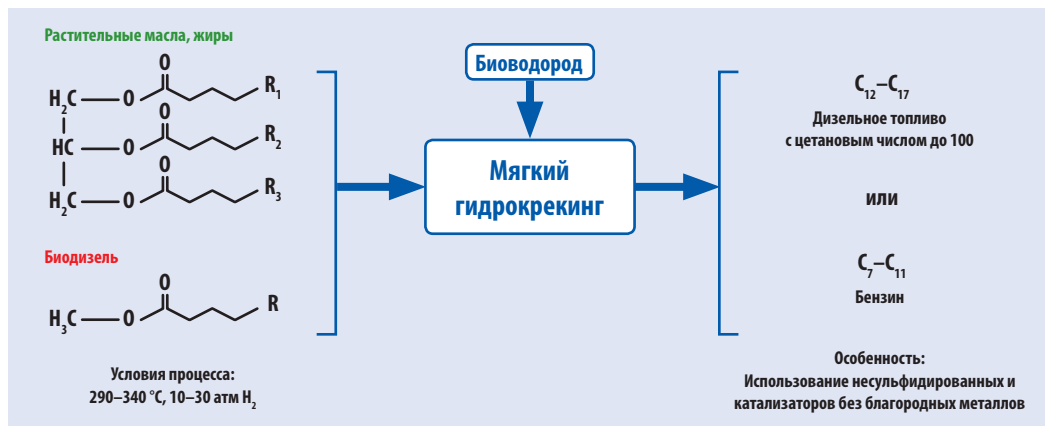


Рис. 13. Получение высокоцетанового дизельного топлива и бензина из «биодизеля» и растительных масел и жиров.



**Возможные каталитические технологии в использовании биомассы для нужд энергетики**

На Рис. 12 представлены возможные пути энергетического использования биомассы с участием различных каталитических технологий.

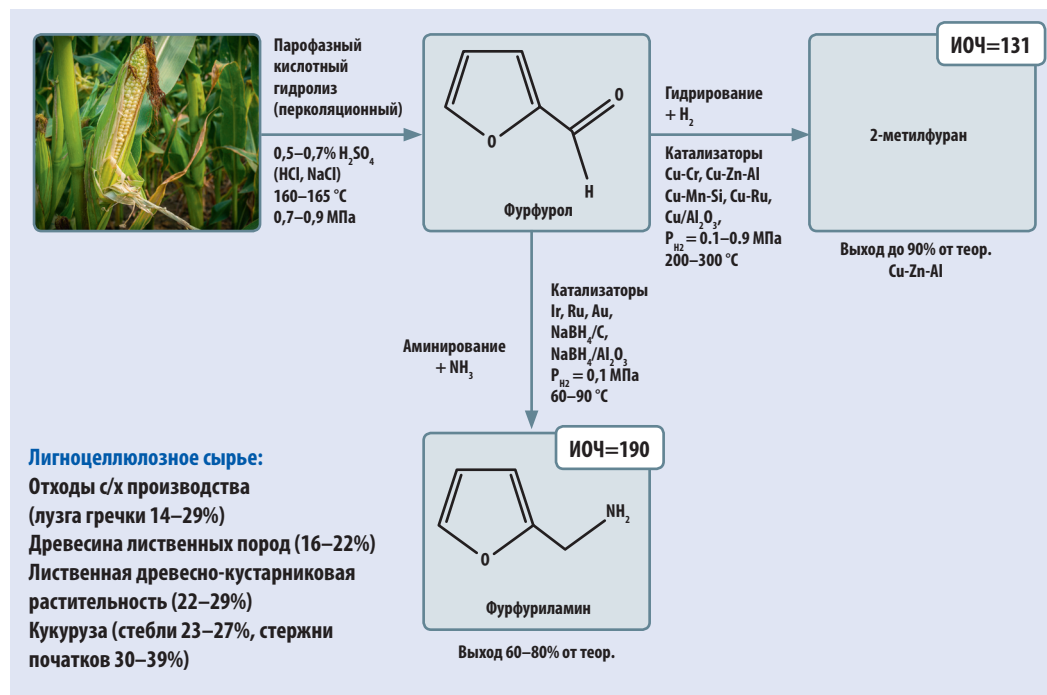
Ниже приводится краткое описание некоторых каталитических технологий для получения ценных энергетических продуктов: высокоцетанового дизельного топлива, бензина, авиакеросина и других видов моторных топлив.

**Получение компонентов авиакеросина и арктического дизельного топлива из липидов растительного происхождения**

Получение компонентов авиакеросина и арктического дизельного топлива из липидов растительного происхождения уже реализовано в промышленном масштабе (по зарубежной технологии) компанией NExBTL на нескольких заводах: 380 тыс. т/год (Порво, Финляндия), 800 тыс. т/г (Сингапур, 2010), 800 тыс. т/г (Роттердам, 2011). Данная технология позволяет перерабатывать растительные масла с высоким молекулярным весом, которые содержат до 13% вес. кислорода.

При нефтепереработке на первой стадии удаляется кислород с получением парафинов воскового ряда, вторая стадия крекирует парафины до более легких с одновременной изомеризацией. В результате конечный продукт не зависит от состава и свойств исходного масла, а получаемые продукты уже используют как компоненты в традиционных авиационных топливах.

Для России серьезной проблемой является то, что ряд свойств отечественного авиакеросина ТС-1 не соответствует свойствам зарубежных аналогов типа JET-1 и тем более биоавиакеросина. Так, ТС-1 имеет на 10 °С меньшую температуру вспышки, чем JET-1 и биоавиакеросин, и соответственно – меньшую термостабильность. Вследствие этого требование перехода на зарубежные стандарты, требующие использовать биоавиакеросин, окажет очень серьезное влияние на Российский рынок авиакеросина, который оценивается в 15 млн.т. ежегодно. Целевые задачи для организации отечественного производства биоавиакеросина – это отработка основных параметров процесса, наработка компонентов топлив и определение их химотологических характеристик.



**Рис. 14. Производство фурфурола из растительного сырья и эффективных октан-повышающих добавок из фурфурола. ИОЧ – «исследовательское октановое число».**

### Синтез высокооктановых компонентов бензина из растительного сырья

Перспективным направлением в использовании биомассы может стать расширение производства из растительного сырья фурфурола – альдегида, который широко применяют на предприятиях нефтехимии для получения твердых смол или в качестве растворителя, например, для экстракции диенов, используемых для производства синтетической резины. Мировое производство фурфурола оценивается в 280 тыс. тонн в год. Около 90% фурфурола производит Китай (200 тыс. тонн в год), Доминиканская республика (32 тыс. тонн в год) и Южная Африка (20 тыс. тонн в год). В России производителями фурфурола являются АО «Кропоткинский химзавод» и ООО «Кировский биохимический завод». К ведущим мировым разработчикам в данной области относятся National Renewable Energy Laboratory (Колорадо, США), Micromidas (Калифорния, США), Shell Global

Solutions (Голландия) и пр. В России разработки ведут Институт катализа (Новосибирск) и ИХХТ СО РАН (Красноярск). Для энергетики очень существенно, что фурфурол может служить исходным сырьем для очень эффективных и экологически чистых октан-повышающих добавок, чрезвычайно востребованных производителями бензинов (рис. 14).

### Получение высококачественных топлив из «бионефти»

«Бионефтью» называют жидкий продукт, получаемый из растительного сырья в ходе импульсного (за время менее 1 °C) пиролиза сухой биомассы при температуре около 450 °C. В принципе, современные технологии импульсного пиролиза позволяют превратить в жидкую «бионефть» в количестве до 70–80% от использованной биомассы. Основные проблемы, связанные с «бионефтью», – это ее высокая вязкость, нестабильность (склонность к полимеризации), слабая испаряемость, несмешиваемость с традиционными топливами, высокая кислотность (рН 3), а также высокое содержание кислорода в получаемых при пиролизе соединениях (фенолы, карбокислоты, спирты, сахара, кетоны, фураны и пр.). На рис. 15 приведены схемы получения «бионефти» и её «облагораживания» за счет «гидродеоксигенации» с помощью катализаторов.

Каталитическое гидрооблагораживание позволяет обеспечить трансформацию кислородсодержащих соединений «бионефти» в высококачественные топливные углеводороды. Облагораживание «бионефти» путем каталитической деоксигенации – перспективный крупнотоннажный процесс для будущего, с перспективой использования в таких же масштабах, как в настоящее время каталитическая переработка нефти.

### III. Каталитические технологии в ядерной и нетрадиционной (в т.ч. солнечной) энергетиках

В атомной и нетрадиционной (солнечной) энергетиках для преобразования первичной формы энергии в химическую можно использовать как обратимые химические термokatалитические циклы, так и квантовое (фотokatалитическое) преобразование энергии.

Для термokatалитического преобразования атомной и солнечной энергии, а также для хими-



Рис. 15. Получение высококачественных топлив из «бионефти».

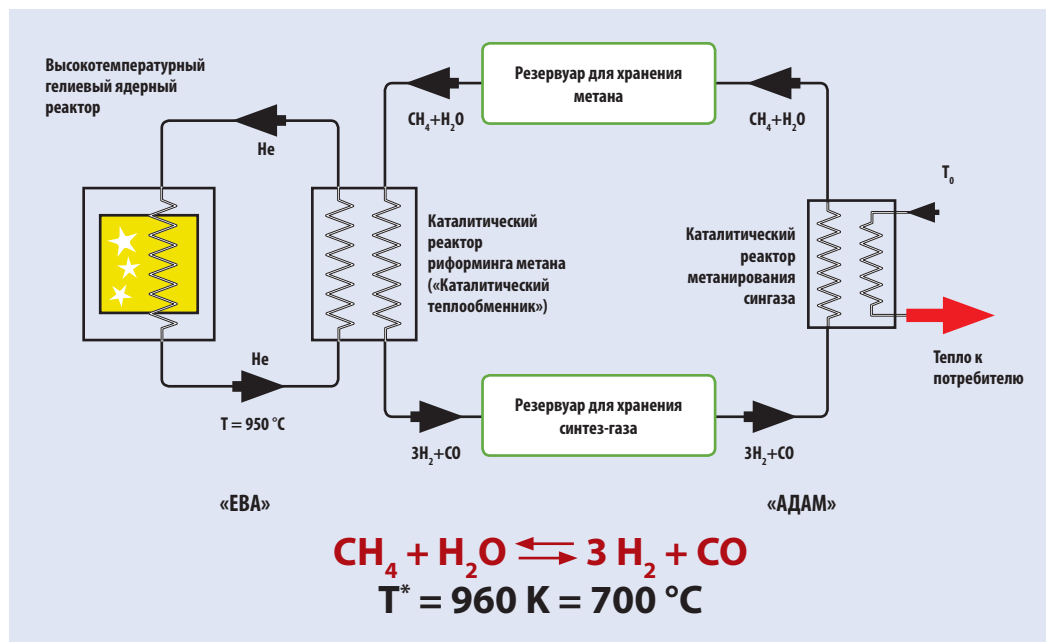


Рис. 16. Цикл «ЕВА-АДАМ» для термокаталитической конверсии ядерной энергии.

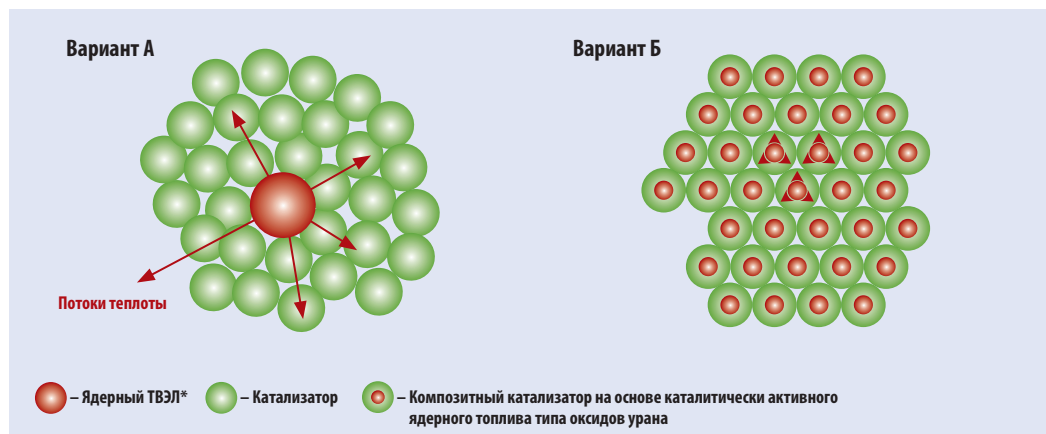


Рис. 17. Варианты исполнения энергоаккумулирующей стадии цикла «ИКАР» для термокаталитического преобразования атомной энергии в энергию химического топлива.

\* ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент. Прим. ред.

ческих тепловых насосов удобно использовать хорошо известные обратимые (в присутствии катализаторов) процессы типа паровой конверсии метана в синтез-газ (смесь  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ , запасание энергии) и получение метана и воды из этого синтез-газа («метанирование», выделение энергии). В начале 1970-х годов в Западной Европе в целях

сглаживания суточной нагрузки на ядерный реактор и ее аккумулирования в химическом виде разрабатывался термокаталитический цикл «ЕВА-АДАМ» для конверсии ядерной энергии в химическую.

Основными недостатками данной технологии являются необходимость разработки высоко-

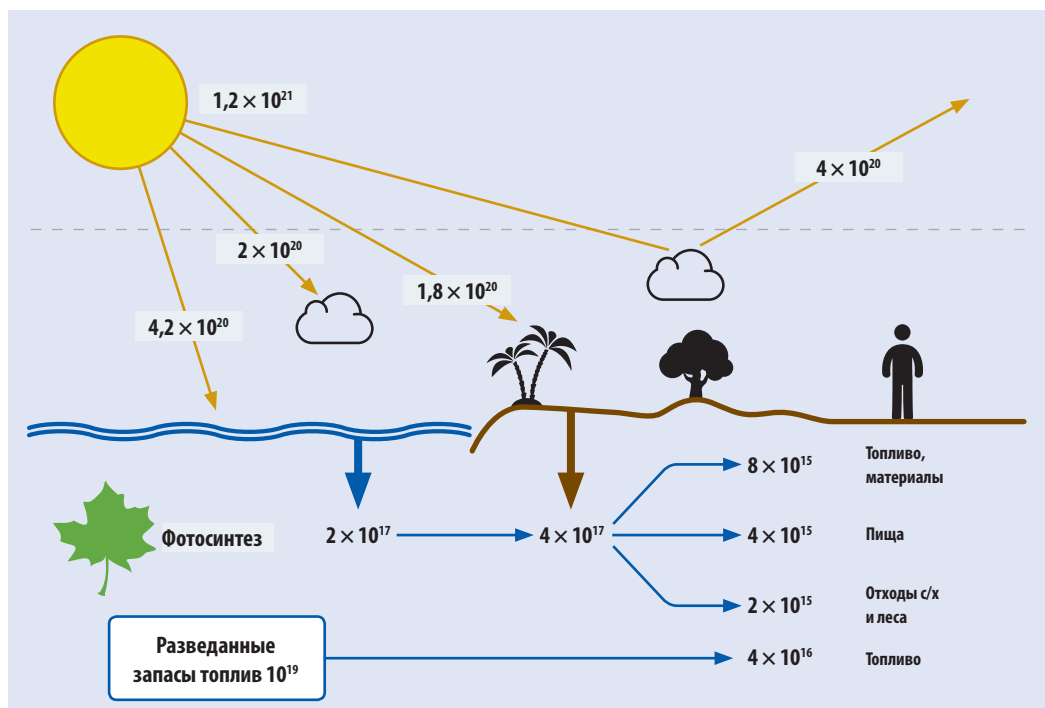


Рис. 18. Годовой баланс энергии, поступающей на поверхность Земли с солнечными лучами, и ее распределение.

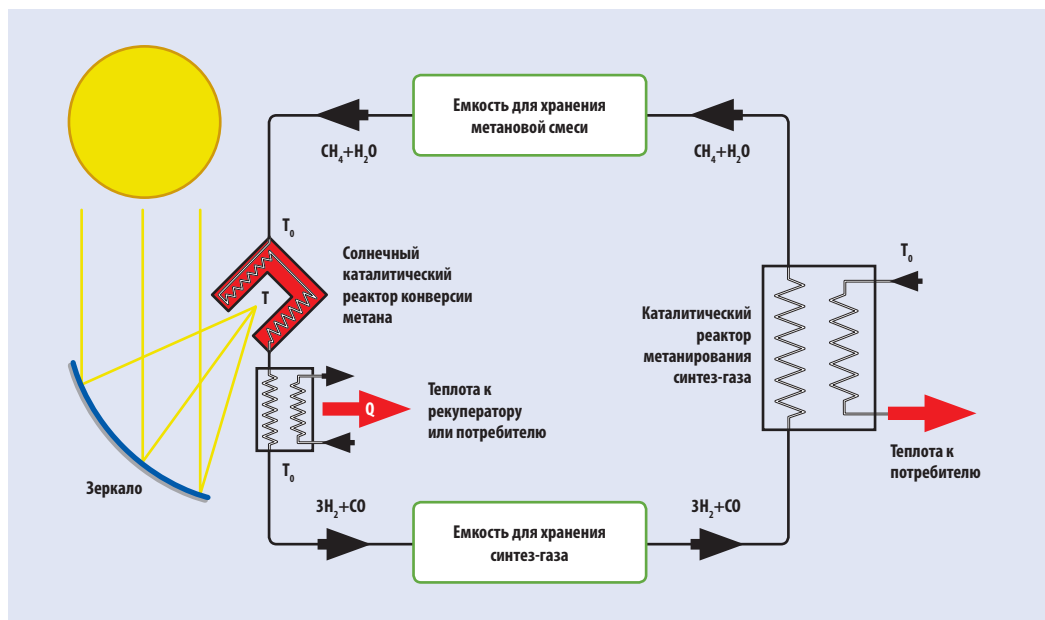


Рис. 19. Термокаталитическое преобразование солнечной энергии на основе реакции паровой конверсии метана.



температурного гелиевого реактора для получения очень разогретого гелиевого теплоносителя (около 1000 °С) и малая удельная энергонапряженность установок в связи с необходимостью использовать теплообменники типа «газ-газ», обеспечивающие нагрев смеси метан-вода для последующей каталитической конверсии синтез-газ.

Удельная энергонапряженность (УЭН) установок для преобразования энергии в энергию химического топлива определяется следующим образом:

$$\text{УЭН} = \frac{\text{Количество теплоты, превращаемой в химическую энергию}}{(\text{Объем реактора} \times \text{время})} = \frac{\text{Тепловая мощность}}{\text{Объем}}$$

$$\text{УЭН} = \Delta H^\circ \times (\text{скорость реакции})$$


Очевидно, что УЭН определяет размер, а следовательно, и стоимость устройства для преобразования энергии. Энергонапряженность ядерных реакторов составляет около 100–200 МВт/м<sup>3</sup>. В цикле ЕВА-АДАМ УЭН принципиально не может превышать величины около 5 МВт/м<sup>3</sup> = 5 кВт/литр из-за наличия промежуточных теплообменников типа газ-газ. Безусловно, это очень малая цифра.

В середине 1980-х годов для терموкаталитического преобразования атомной энергии в Институте катализа СО РАН был разработан альтернативный термокаталитический цикл «ИКАР». Особенностью этого цикла является подвод энергии к катализатору в виде ионизирующего излучения без промежуточных теплообменников.

Достоинства технологии «ИКАР»: теплота выделяется непосредственно внутри катализатора при торможении быстрых частиц; вследствие чего промежуточный теплообменник не нужен вообще; при этом температура ядерного реактора не будет превышать 800 °С. Предложены два варианта загрузки катализатора конверсии энергии в ядерный реактор (см. рис. 17). Для обоих вариантов экспериментально продемонстрирована возможность достижения УЭН более 200 кВт/дм<sup>3</sup>.

Обратимся теперь к проблемам использования энергии солнца с использованием катализаторов. Солнце является первоисточником практически всех энергетических ресурсов на нашей планете, включая ископаемое топливо, гидро- и ветроэнергетику и т.п. Годовой баланс энергии (в ккал), посту-

**Солнечный каталитический реактор СКР-3 для запасаения солнечной энергии**

$$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow[900^\circ\text{C}]{+\text{теплота}} 3\text{H}_2 + \text{CO}$$


**Реактор каталитического метанирования для выделения запасаенной энергии в виде теплоты с температурой 600 °С**

$$3\text{H}_2 + \text{CO} \xrightarrow[600^\circ\text{C}]{-\text{теплота}} \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$$

**Рис. 20. Опытная установка термокаталитического преобразования солнечной энергии, испытанная в 1984–1985 годах.**

пающей на поверхность Земли с солнечными лучами, и его распределение представлен на Рис. 18.

Одной из возможностей преобразования солнечной энергии в химическую энергию является использование термокаталитических циклов, предложенных для схем «ЕВА-АДАМ» и «ИКАР» (Рис. 19). В ходе испытания опытной установки термокаталитического преобразования солнечной энергии с полезной мощностью более 2 кВт был экспериментально зафиксирован к.п.д. 43% для преобразования солнечной энергии и 20% – для полного цикла аккумуляции-выделение энергии.

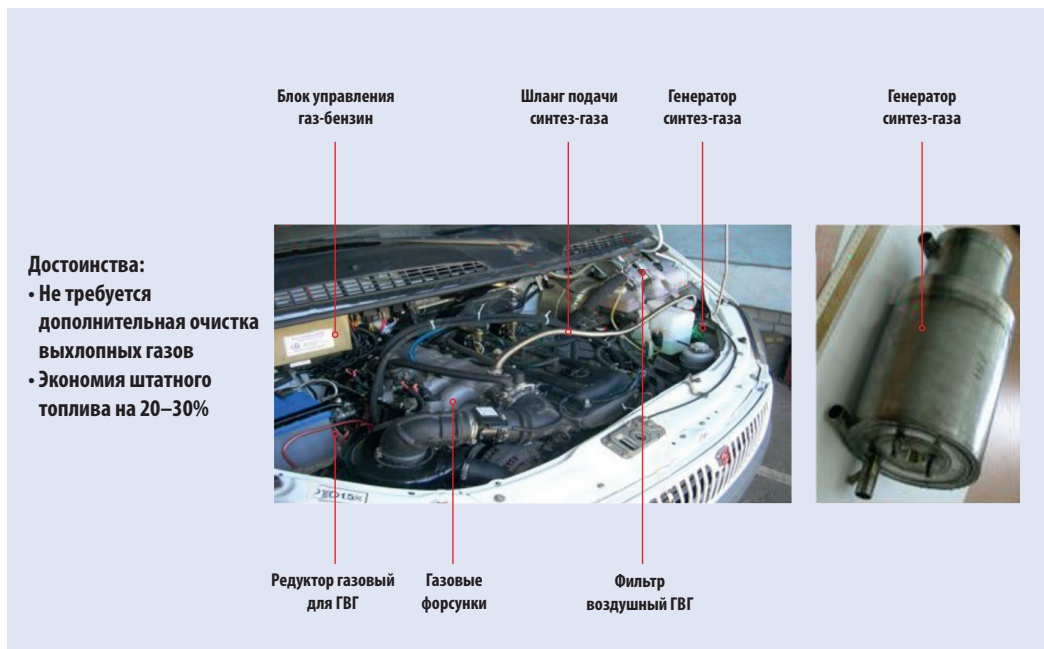


Рис. 21. Установка бортового квантового генератора синтез-газа на транспортном средстве.

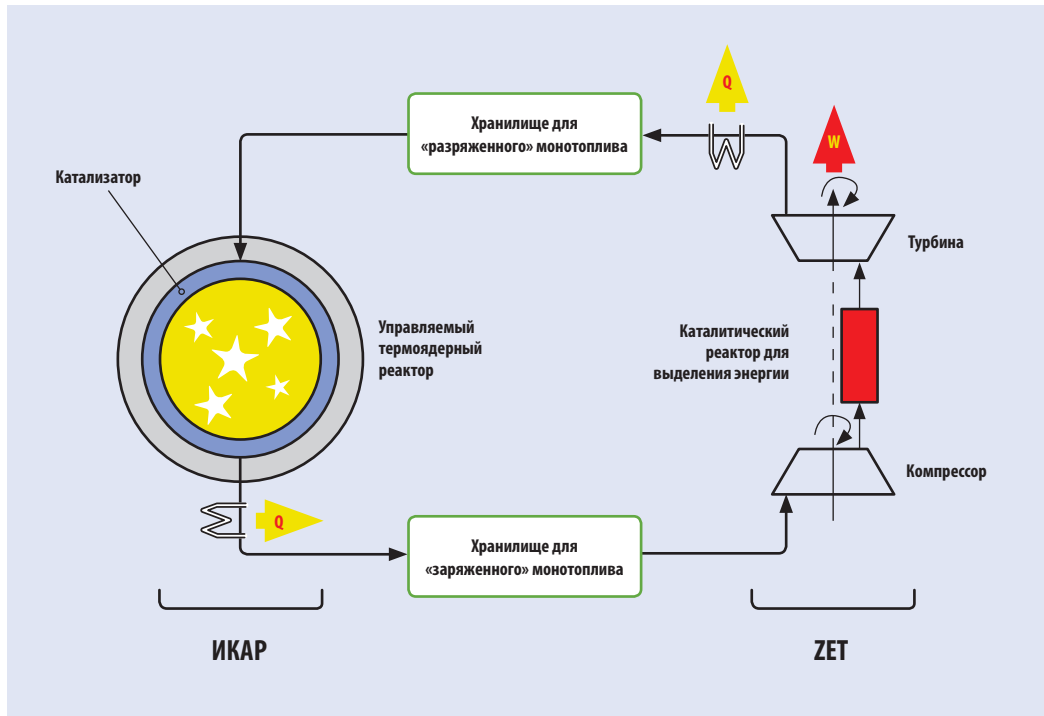


Рис. 22. Комбинация процессов «ИКАР» и «ZET» как основа для поглощения теплоты и получения механической (электрической) энергии в термоядерной энергетике будущего.

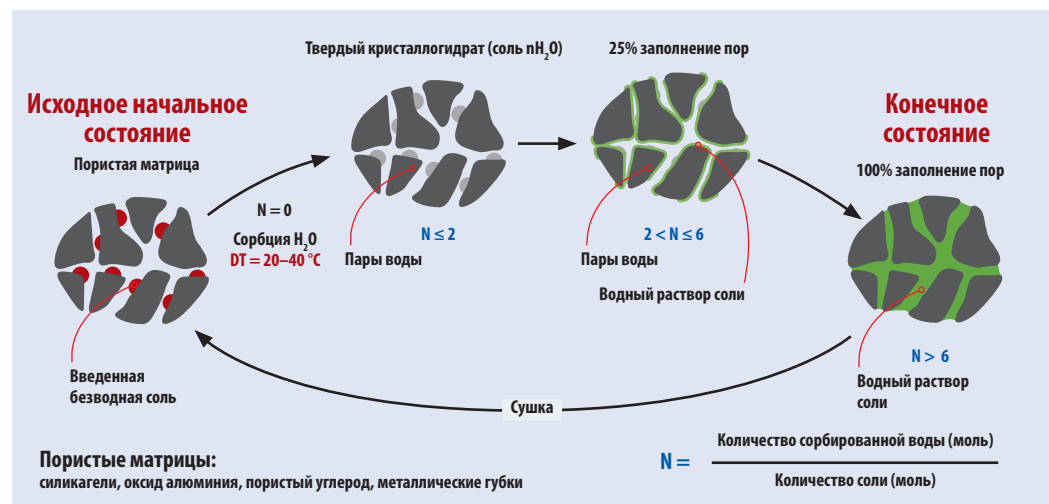


Рис. 23. Действие «химических аккумуляторов теплоты» на основе композитного материала «гигроскопическая соль (например, CaCl<sub>2</sub>) в пористой матрице».

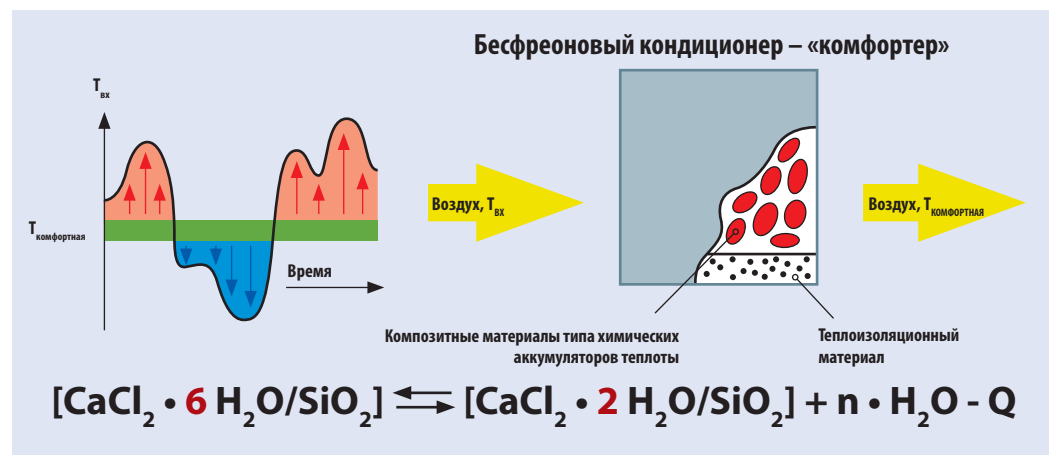


Рис. 24. Схема накопления тепла из окружающей среды «химическими аккумуляторами теплоты» на основе композитов «CaCl<sub>2</sub> в пористой матрице».

Основные характеристики испытанной в 1984-1985 гг. (Крым, п. Качивели) системы с солнечным каталитическим реактором СКР-3: диаметр параболического зеркала для концентрации солнечного света – 5 м, к.п.д. конверсии солнечной энергии в химическую – 43%, полезная мощность – 2,4 кВт, общий к.п.д. замкнутого термокаталитического контура – 20% (рис. 20). В 1990 году был изготовлен, но к сожалению, уже не испытан СКР «Ромашка» с полезной мощностью более 10 кВт.

Была экспериментально подтверждена возможность еще более высокоэффективного прео-

бразования световой энергии в светопрозрачном термокаталитическом реакторе. Особенностью данного метода является подвод преобразуемой энергии к катализатору в лучистой форме без стадии теплообмена со стенкой реактора. Зарегистрированная полезная мощность экспериментального реактора составила 200 Вт при его диаметре 3 см. При этом эффективность конверсии световой энергии в химическую энергию в лабораторных условиях достигала 60%.

Для квантовых методов преобразования солнечной энергии в химическую термодинамически разре-

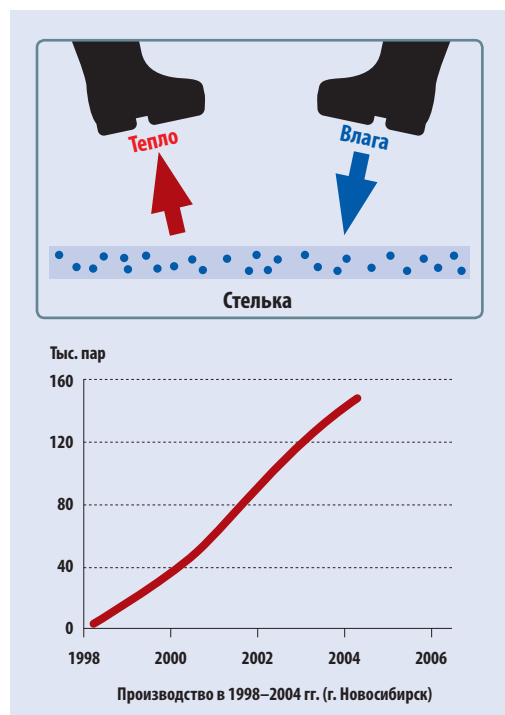


Рис. 25. Энергосберегающие устройства для регенерации теплоты в системе принудительной вентиляции бытовых помещений.



Рис. 26. Способы получения пресной воды с использованием селективных сорбентов воды (SWS).





**Рис. 27. Применение композитных селективных сорбентов воды в производстве влагопоглощающих стелек для обуви.**

шенная эффективность достигает 30% и может быть даже выше. При этом существенным достоинством квантовых (фотокаталитических) методов преобразования является отсутствие необходимости предварительной концентрации солнечного света.

Природными высокоэффективными аналогами фотокаталитического преобразования солнечной энергии в химическую являются бактериальный фотосинтез и фотосинтез сине-зеленых водорослей и зеленых растений. Особенностью фотосинтеза сине-зеленых водорослей и зеленых растений является восстановление  $\text{CO}_2$  в углеводы за счет окисления воды до  $\text{O}_2$ . Именно фотосинтез сине-зеленых водорослей и зеленых растений более чем 2 млрд. лет назад осуществил качественное изменение состава атмосферы Земли: в исходно восстановительной атмосфере стал сохраняться свободный  $\text{O}_2$ . Ко всему прочему именно этот фотосинтез обеспечил планету ресурсами горючих ископаемых.

В искусственных системах для фотокаталитического (квантового) преобразования солнечной

энергии можно применять как гомогенный, так и гетерогенный катализ. При этом наиболее интересна разработка функционального аналога фотосинтеза зеленых растений – фотокаталитическое разложение воды на водород и кислород. Четыре главных проблемы, требующих своего разрешения, – это фоторазделение зарядов, катализаторы окисления воды до кислорода, катализаторы восстановления воды до водорода, а также сочетание всех перечисленных факторов в одной системе.

Разрабатывают как биомиметические (молекулярные) каталитические системы для фотокаталитического получения  $\text{H}_2$  из водных растворов (например, на основе липидных везикул), так и полупроводниковые фотокаталитические системы. Интересно, что с помощью полупроводниковых фотокаталитических систем на основе микрогетеропереходов еще в 80-х годах в Институте катализа были созданы системы получения водорода путем разложения  $\text{H}_2\text{S}$  с квантовой эффективностью выделения водорода, превышающей эффективность фотосинтезирующих бактерий.

#### **IV. Повышение эффективности производства механической и электрической энергии**

Установка бортового каталитического генератора синтез-газа на транспортном средстве значительно повышает энергоэффективность последнего. В основе лежит простая идея: часть штатного моторного топлива селективно окисляется на катализаторе кислородом воздуха до смеси  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$ , и затем эта смесь впрыскивается в двигатель внутреннего сгорания вместе со штатным моторным топливом.

Разработка, изготовление и испытания бортового генератора синтез-газа была осуществлена Институтом катализа СО РАН, ВНИИЭФ\* (г. Саров), НАМИ\*\* (г. Москва) в 2008 году. Экспериментальные «Газель» и «Баргузин», оснащенные таким генератором, совершили пробег в несколько тысяч километров и продемонстрировали возможность экономии штатного моторного топлива на 20–30%.

Возможна прямая конверсия химической энергии в механическую в турбине без вредных выбро-

\* Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, в настоящее время – Российский федеральный ядерный центр. Прим. ред.

\*\* Научный автомеханический институт, в настоящее время – Государственный научный центр Российской Федерации «НАМИ». Прим. ред.

сов (Zero-Emission Turbine – «ZET») с использованием обратимых топливных смесей («монотоплив»). Идея «ZET» также принадлежит Институту катализа СО РАН.

Эффективность преобразования химической энергии в механическую в «ZET» может достигать 50% при предварительной 20-ти кратной компрессии газообразного монотоплива. Основным преимуществом данного метода является отсутствие теплообменников и, следовательно, чрезвычайно малая масса энергетических устройств.

Представляется, что комбинация процессов «ИКАР» и «ZET» может стать основой создания эффективных систем для преобразования энергии и в термоядерной энергетике будущего (Рис. 22).

#### V. Рекуперация или утилизация средне- и низкопотенциальной теплоты

В Институте катализа были разработаны очень простые «химические аккумуляторы теплоты» на основе композитных материалов типа селективных сорбентов воды. Принцип их действия показан на Рис. 23

Данные системы можно использовать для аккумуляции низкотемпературной теплоты, а также осушки воздуха, углеводородных газов и жидкостей и т.д. Кроме того, селективные сорбенты воды оказались очень эффективными при создании систем с химически активной теплозащитой. Преимуществами описываемых материалов являются высокая сорбционная емкость по воде (до 60% вес) и низкая температура регенерации (80–120 °С) при возможности осушки воздуха с точкой росы ниже -50 °С.

Описанные материалы можно использовать для обратимого накопления (аккумулирования) теплоты из окружающей среды в жаркое время дня или сезона. Схема действия таких устройств (бесфреоновых кондиционеров воздуха, «комфортеров») представлена на Рис. 24.

Накопительная ёмкость устройств на основе «химических аккумуляторов тепла» с химической реакцией гидратация/дегидратация может достигать 500 ккал/л, что на порядок превышает теплоаккумулирующую емкость устройств на основе обычных фазовых переходов со скрытой теплотой менее 50 ккал/л.

Институт катализа в сотрудничестве с другими исследовательскими центрами разработал и испытал прототипы энергосберегающие устройства для рекуперации теплоты в системах для

принудительной вентиляции бытовых помещений в зимнее время года. Фотографии испытанных макетов, разработанных в Институте катализа и Институте теплофизики СО РАН в 2010 г., представлены на Рис. 25.

Предложенные Институтом катализа селективные сорбенты воды могут иметь и другие очень широкие применения. Так, например, их можно использовать для получения пресной воды из атмосферы в пустынях и защиты людей от низких температур. Последнее имеет исключительно важное значение для проживающих в районах с экстремальными условиями климата.

На Рис. 26 представлены схемы использования селективных сорбентов для получения пресной воды из воздуха с весьма высокой производительностью, а на рис. 27 – схемы использования этих же материалов в бытовых целях.

Так, в 1998–2004 годы композитные селективные сорбенты воды использовались для производства влагопоглощающих стелек для обуви. Данная продукция имеет большой спрос у военнослужащих, строителей, шахтеров, спортсменов и буровиков.

#### Заключение

В XX веке возможность применения катализа для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии рассматривали не более, чем шутку. Тем не менее, активная работа химиков-катализаторов, в том числе Института катализа СО РАН, показала, что в XXI веке, когда нетрадиционные и возобновляемые источники энергии становятся практически важными, эффективное использование этих источников энергии зачастую связано с широким применением именно каталитических процессов. В результате развитие науки о катализе в части, касающейся указанных проблем, уже сейчас стало одним из ведущих направлений катализа и каталитических технологий.

*Автор благодарен за активнейшее участие в разработке затронутых в публикации систем: акад. К. И. Замараева, профессора N. Giordano (Италия), А. С. Носкова, Ю. И. Аристова, В. А. Лихолобова, В. А. Кириллова, В. А. Садыкова, Л. Л. Макаришина, Е. Н. Савинова, Е. П. Савинову, В. А. Яковлева, А. Д. Сиимонова, Г. Л. Елизарову, А. Г. Окунева, О. В. Васильцову, Ю. Ю. Танашева, С. В. Лымаря и весь коллектив Института катализа СО РАН.*