

АССОЦИАЦИЯ ПО РАЗВИТИЮ  
МЕЖДУНАРОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
И ПРОЕКТОВ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИКИ  
«ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ»

# 10

ПРОРЫВНЫХ  
ИДЕЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ  
НА СЛЕДУЮЩИЕ  
ДЕСЯТЬ ЛЕТ

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| Промышленные технологии улавливания и хранения углерода                                   | 4   |
| Цифровые двойники   | 14  |
| Плавучие солнечные станции  | 30  |
| Голубой водород   | 44  |
| Каталитические методы переработки углекислого газа угольной генерации в полезные продукты | 54  |
| Получение высококачественных моторных топлив из растительного сырья                       | 75  |
| Высокотемпературные тепловые насосы   | 87  |
| Технологии переработки нефтесодержащих отходов  | 102 |
| Технология передачи энергии сверхвысокого напряжения                                      | 110 |
| Электротопливо  | 119 |



## Дорогие друзья!

Перед Вами – вторая по счёту ежегодная подборка самых перспективных, «прорывных» энергетических технологий десятилетия, которую публикует ассоциация «Глобальная энергия».

Некоторые из этих разработок уже меняют нашу повседневную жизнь, в то время как другие остаются в списке потенциально реализуемых в далёкой перспективе.

Попавшие в сборник технологии объединяет то, что, как ожидается, они будут иметь широкие последствия для человеческой жизни в наступившем десятилетии.

Иногда, заглядывая в будущее, мы ждем появления необычайных технологий, каких еще не было. Но не стоит забывать о том, что есть вещи, которые мы можем сделать уже сейчас. Поэтому в доклад включены также технологии, которые может и не являются «прорывными», но их развитие исключительно важно для жизни «здесь и сейчас».

Закономерным является вопрос, что именно подразумевается под «прорывом»?

Значительный уклон, не стоит этому удивляться, получился в сторону технологий «очистения» существующих ресурсов (которые еще долго будут составлять неотъемлемую часть энергобаланса), экологичности и рециклинга тех продуктов, которые могут быть использованы с пользой, вместо того, чтобы быть растраченными впустую или принести вред окружающей среде.

Это такой блок технологий, как: «Каталитические методы переработки углекислого газа

угольной генерации в полезные продукты», «Технологии переработки нефтесодержащих отходов», «Промышленные технологии улавливания и хранения углерода».

Другим блоком можно выделить технологии, которые только развиваются и будут конкурентоспособны в будущем, чтобы занять свое место среди привычных традиционных ресурсов. Например, «Получение высококачественных моторных топлив из растительного сырья» и «Электротопливо».

Некоторые из тем настолько интересны и обширны, что они перешли из доклада прошлого года, чтобы быть рассмотрены более глубоко и под другим углом. Это тема «Голубой водород» и «Промышленные технологии улавливания и хранения углерода» и «Цифровые двойники».

Есть темы, которые будут рассмотрены впервые: «Технология передачи энергии сверхвысокого напряжения», «Плавучие солнечные станции».

Желаю всем, кто собирается изучить новый доклад «10 прорывных идей в энергетике на следующие 10 лет. 2021» от ассоциации «Глобальная энергия», увлекательного и полезного чтения.

С наилучшими пожеланиями,

Заместитель Председателя Правительства  
Российской Федерации  
А.В. Новак



# ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УЛАВЛИВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ УГЛЕРОДА

## Эндрю Смоллбоун

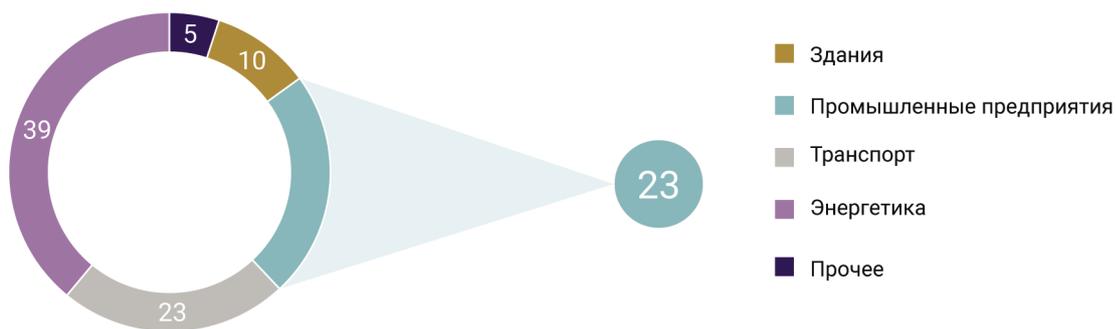
Директор Информационной сети по декарбонизации теплоснабжения и охлаждения, Служба охраны окружающей среды Комиссии по регулированию, Даремский университет

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мы наблюдаем, как все больше промышленно развитых стран стремятся к полному запрещению выбросов оксида углерода. На практике такое стремление означает существенное снижение выбросов углекислого газа во всех направлениях развития нашего высокоиндустриального общества. Секторная диаграмма на рис. 1 показывает объемы выброса

двуоксида углерода по отраслям мировой экономики. Принимая во внимание общий объем всех совокупных выбросов (~40 Гт CO<sub>2</sub> в год (Le Quéré et al (2020))), мы должны срочно разработать технически жизнеспособные и экономически целесообразные решения, обеспечивающие нулевые выбросы в энергетике, промышленности, на транспорте, при отоплении зданий и т.д.

РИСУНОК 1. Прямые выбросы двуоксида углерода по секторам экономики в 2017 г.  
Источник - IEA (2019).



В результате значительных инвестиций в научные исследования во всех промышленных странах, все большее согласие возникает в отношении пакета предложений по рентабельному обеспечению нулевых выбросов в энергетике и на транспорте. Как показано на рис. 1, декарбонизация промышленных источников выбросов имеет такую же важность в мировом масштабе. Однако, широко признается, что перед промыш-

ленным сектором стоят уникальные задачи, которые могут потребовать индивидуальных решений применительно к каждому отдельному предприятию.

В данной главе рассказывается о том, как можно достичь этой цели с помощью кластеров промышленного улавливания углерода или интегральных сетей, основанных на новом поколении производственных технологий и оборудования.

## ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Международное Энергетическое Агентство (IEA) пришло к выводу, что на промышленные источники выбросов, например, нефтеперерабатывающие заводы, в настоящее время приходится четверть объема всех антропогенных выбросов диоксида углерода и около 40% энергопотребления (IEA (2019)). В целом, промышленный сектор имеет фундаментальное значение для мировой экономики, так как он сводит воедино международные цепочки поставок для производства мировых товаров и продуктов. Однако в настоящее время как потребители, так и политики перестают рассматривать выброс диоксида углерода как нечто производимое электростанцией или выхлопной трубой автомобиля и спрашивать, насколько экологически безопасными и рассчитанными на длительную перспективу являются привычные нам продукты, и все чаще делают осознанный выбор на основании их воздействия на окружающую среду.

Сегодня, когда разрабатываются и реализуются детальные планы и решения, позволяющие перейти к нулевым выбросам, промышленный сектор сталкивается с реальной необходимостью находить рентабельные пути для соответствия как обязательным целям, так и растущим ожиданиям потребителя.

В то же время, такие факторы как рост населения, продолжающаяся урбанизация, экономическое и социальное развитие, посто-

янно увеличивают потребительский спрос на промышленные продукты. Кроме того, естественная сила рынка исторически снижала цену на эти продукты посредством перехода к все более масштабному массовому производству, при котором на каждом предприятии неоднократно имели место этапы оптимизации и энергосбережения. В настоящее время проблема состоит в том, что рынок естественным путем снижает издержки потребителя, но не обязательно сокращает соответствующие выбросы диоксида углерода. Поэтому многие считают, что такое сокращение уже приближается к максимально достижимым показателям (ZEP 2013). Это означает, что снижение выбросов двуокиси углерода с помощью энергосбережения имеет ограниченную возможность достижения нулевой отметки.

Более того, многие из этих производственных предприятий являются уникальными в плане а) химического или технологического процесса и самого продукта; и б) экономии, по крайней мере регионального масштаба. Последняя также имеет большое значение, так как крупные химические или производственные предприятия являются неотъемлемой частью региональной или национальной производственной инфраструктуры, региональной цепочки поставок, и обеспечивают рабочие места для многих местных жителей.

## ПЕРСПЕКТИВА ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

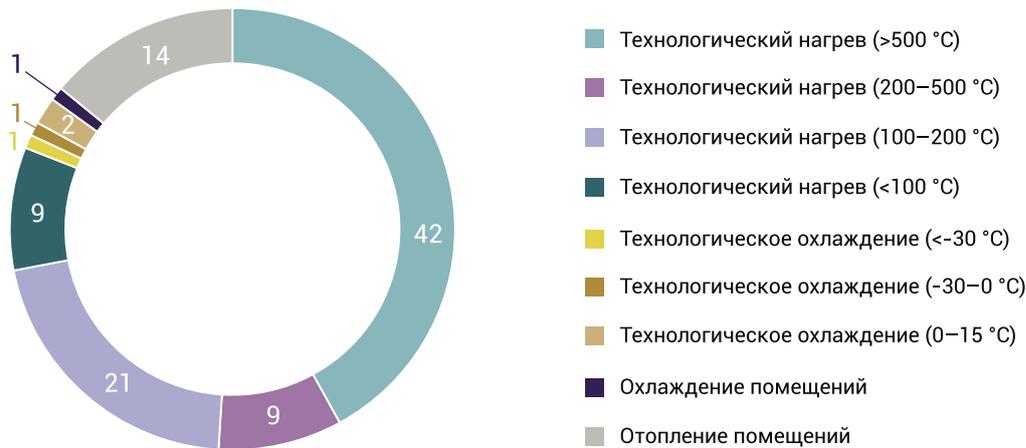
Данные показывают, что в Великобритании спрос на конечную энергию для производственных процессов вызывается главным образом потребностью в тепловой энергии (>70% - BEIS, 2016). В диаграмме на рис. 2 представлены значения температуры тепловой энергии, необходимой для производственных процессов в Европейском Союзе. Диаграмма четко устанавливает требования спроса на тепловую энергию для всех производственных процессов и показывает соответственный спрос на технологический нагрев и охлаждение и на отопление и охлаждение зданий в плане температуры рабочего вещества.

Возможной альтернативой является декарбонизация некоторых из этих процессов

посредством установки электрических нагревательных элементов, например, с использованием сочетания возобновляемой электроэнергии с тепловыми насосами. Однако, такая возможность на практике имеет определенные ограничения в плане высокой капитальной стоимости тепловых насосов, а также в плане того, что тепловые насосы наиболее эффективны для низкотемпературных процессов. Как показано на рис. 2, почти три четверти спроса на тепловую энергию представляет собой высокотемпературное технологическое тепло с рабочими температурами, превышающими 100°C; таким образом необходимо признать необходимость таких решений, которые на должном уровне решают проблемы высоких температур.

РИСУНОК 2. Спрос на конечную энергию в Европейском Союзе (2015 г).

Источник: HeatRoadmap.



Промышленные выбросы CO<sub>2</sub> в Европейском Союзе преобладают в металлургической промышленности (19%), химической промышленности (15%), нефтепереработке (14%) и в производстве цемента и извести (11%) (UNFCCC 2012).

Исторически сложилось так, что высокотемпературные технологические условия, требующие температур, превышающих 200-500°C, было легко обеспечить с помощью обилия ископаемых видов топлива, технологии доочистки продуктов горения с низким выбросом и использования простых технологий с применением бойлеров или печей. Кроме того, мы приняли как должное дополнительные преимущества от использования ископаемых видов топлива в плане их пригодности для безопасного долгосрочного хранения в месте использования и тем самым

снизили периодическое воздействие энергопотребления предприятия на энергосеть.

Декарбонизация производственных процессов приведет к фундаментальным изменениям всех вышеуказанных процессов, однако многие из них потребуют специальных индивидуальных решений. Также нельзя не отметить, что многие из таких процессов составляют неотъемлемую часть местной производственной и социальной инфраструктуры и являются экономически эффективными, так что чрезвычайно важной является поддержка политическим руководством перехода к нулевым выбросам.

Промышленные выбросы остаются значительными, и задача обеспечения их нулевого уровня должна решаться незамедлительно, однако промышленный сектор труднее всего поддается декарбонизации.

## РЕШЕНИЕ ВОПРОСА КОМПЛЕКСНОЙ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО СЕКТОРА

Процесс улавливания и утилизации промышленного диоксида углерода представляет собой комплекс технологий, посредством которых выбросы двуоксида углерода могут улавливаться у источника и, как правило, транспортироваться к месту хранения при помощи трубопровода под давлением, а затем храниться на постоянной основе.

Многие из проблем, связанных с улавливанием промышленного углерода, схожи с проблемами, которые в настоящее время стоят перед запуском новых технологий, обеспечивающих

гибкость и работоспособность энергетического сектора. Однако, разнообразие видов промышленного применения, технологий, характеристик местности и воздействие на сами продукты вызывает дополнительные серьезные проблемы. Как следствие, существует множество новых возможностей для исследований и новаторских решений.

За последние сто лет в мире было создано множество региональных кластеров прямо и косвенно связанных между собой промышленных предприятий. Они извлекают выгоду из производства качественной продукции по более

низкой цене с помощью общих ресурсов, технологических потоков, транспортной инфраструктуры, профессионального опыта и т.д.

Комплексный обезуглероженный промышленный кластер представлен на рис. 3. Он предназначен для объединения нескольких

промышленных предприятий и электростанций общей инфраструктурой улавливания, транспортировки и утилизации двуокси углерода. Приведенный пример показывает планируемые кластеры в городских агломерациях Тиссайд и Хамберсайд, Великобритания.

РИСУНОК 3. Планируемые кластеры улавливания промышленного углерода в городских агломерациях Тиссайд и Хамберсайд.



Целью является снижение стоимости установки систем улавливания углерода в двух подкластерах посредством использования общих хранилищ в Северном море, сначала Эндьюранс, а затем и других.

В агломерации Тиссайд существуют многочисленные химические и производственные предприятия, нефтеперерабатывающие заводы и другие промышленные площадки, включая крупный завод по производству водо-

рода. В агломерации Хамберсайд находится тепловая электростанция Дракс, водородные, металлургические, химические и цементные заводы. На начальном этапе не все предприятия объединяются в одну сеть, однако планируется, что по мере снижения технологических рисков и роста спроса, число предприятий, включаемых в сеть по улавливанию выбросов диоксида углерода, будет увеличиваться.

## КЛЮЧЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО КЛАСТЕРА ПО УЛАВЛИВАНИЮ, УТИЛИЗАЦИИ И ХРАНЕНИЮ УГЛЕРОДА

Каждый промышленный кластер является уникальным, так как все они создавались в течение нескольких поколений в результате действия сложных рыночных сил и различаются

**Технология улавливания CO<sub>2</sub>:** Точные детали самого производственного процесса, доступа к общим технологическим процессам

по географическому расположению, геологическим условиям и местным отраслям промышленности. Однако, у них есть общие компоненты, которые можно обобщить следующим образом:

и его масштаб важны для определения наиболее целесообразного и рентабельного решения для улавливания диоксида углерода.

### Как правило, диоксид углерода можно улавливать одним из следующих способов:

- 1 выделение двуокиси углерода в результате технологического процесса – в некоторых отраслях (таких как, например, производство аммиака и водорода); это основной способ, при котором высококонцентрированный поток двуокиси углерода легко перенаправляется из производственного процесса в сеть;
- 2 сгорание кислородного топлива является возможным способом при технологиях с производством внешнего тепла (бойлеры, теплоэлектростанции, промышленные

печи для обжига и цементные заводы), кроме этого, существует возможность более эффективного в металлургической промышленности, нефтепереработке и других отраслях применения источников внутреннего тепла;

- 3 традиционные технологии после улавливания с применением химических, физических или твердых поглощающих материалов для улавливания углерода из выходящих потоков разбавленных газов двуокиси углерода.

Предполагается, что в краткосрочном плане способ (3) предлагает обеспечивающее быстрый успех скорректированное решение. Этот способ подходит для многих производственных технологий, при этом существует возможность его применения в дополнительно установленной линии доочистки газов. Такая линия может совместно использоваться различными источниками промышленных выбросов. Однако, когда промышленные предприятия

модернизируются в рамках процесса долгосрочного инвестирования или полного обновления, как способ (1), так и способ (2) могут быть более перспективными с точки зрения качества продукции и экономической целесообразности. Например, восходящее проектирование завода (от элемента к системе) предлагает больше возможностей для интеграции с возобновляемыми источниками энергии, усовершенствованными проектами и новыми технологиями.

**Транспорт и инфраструктура:** Система улавливания выбросов на производственном предприятии может иметь различные источники диоксида углерода, меньшие по масштабу, чем на предприятии энергетики, поэтому ожидается, что технологии, применяемые после улавливания, будут получать пользу от использования нескольких более мелких сообщающихся с атмосферой источников диоксида углерода и от

применения технологии улавливания выбросов с нескольких более крупных объектов. Кроме того, такие источники, как (UNIDO/IEA 2011) и ZEP (2013) предлагают создание кластеров улавливания промышленных выбросов двуокиси углерода для преодоления технических и экономических барьеров, связанных с созданием транспортной инфраструктуры и использования реальной экономики за счет роста производства.

**Поглотители углерода:** После улавливания и концентрации, диоксид углерода должен храниться или утилизироваться таким образом, чтобы он был на длительный срок исключен из атмосферы. Подземное хранение в настоящее время рассматривается как хорошо зарекомендовавшее себя безрисковое техническое решение. При этом во всем мире созданы многочисленные подземные хранилища (Kelemen, et al. (2019)).

Кроме того, имеется возможность применения двуокиси углерода в качестве сырья для химической промышленности или в качестве рабочей жидкости для повышения нефтеотдачи пласта (Gonzalez Diaz et al. (2021)) в целях увеличения ценности продукции, обычно считающейся малоценной.

В то время как многие способы утилизации двуокиси углерода представляют возможность для дальнейшего изучения, ожидается, что этот рынок будет небольшим по отношению к значительному объему диоксида углерода, который, по всей видимости, продолжит выделяться по мере дальнейшего развития мировой экономики. Кроме того, необходимо приложить все усилия для того, чтобы тщательно изучить ключевые вопросы суммарного объема выбросов диоксида углерода за весь срок эксплуатации продукта, экономические показатели и другие факторы, особенно в контексте возможного продолжения выбросов двуокиси углерода к концу срока эксплуатации.

## ОБЕЗУГЛЕРОЖЕННЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ПРОДУКЦИЯ

В настоящем разделе приводятся примеры того, как можно обезуглеродить три обычных промышленных продукта посредством интеграции сетей улавливания, утилизации и хранения двуокиси углерода.

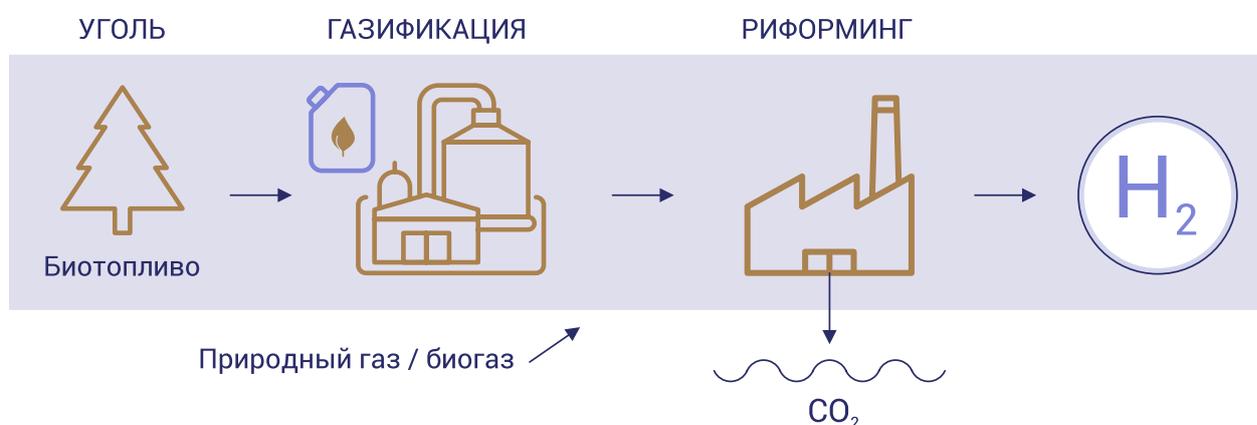
**Модернизация завода по производству водорода.** Как указано выше, производственные процессы, в настоящее время питаемые сжиганием природного газа (или иных видов ископаемого топлива), являются самыми распространенными и составляют неотъемлемую часть каждого промышленного предприятия, часто попутно производящего электроэнергию, высокопотенциальное тепло или иные услуги.

Часто утверждается, что посредством усовершенствования бойлера или печи можно обезуглеродить энергообеспечение многих производственных процессов, перейдя от природного газа к водородосодержащему газу в качестве топлива. И хотя водородосодержащий газ действительно не всегда является простой альтернативой природному газу, он представляет собой действительно жизнеспособное решение, особенно при модернизации того, что уже является глубоко интегрированной инфраструктурой производственного предприятия. При таких обстоятельствах реальной проблемой является производство обезуглероженного водорода в тех же объемах и в тех же стоимостных пределах, что и производство природного газа.

Водород может производиться разными способами, но в настоящее время он обычно производится в промышленных масштабах посредством риформинга природного газа. Упрощенная схема этого процесса приведена на рис. 4. В рамках этого процесса диоксид углерода производится в больших концентрациях и может быть сконцентрирован еще больше, так чтобы напрямую подаваться в более широкую сеть улавливания углерода. Этот процесс поддерживает производство водорода для более широкой декарбонизации за пределами местности, где размещается сеть.

К тому же, как показано на рисунке, расширение этого процесса и включение в него этапа газификации открывает возможность использования других видов сырья для производства электроэнергии, включая уголь и биологическое топливо, и представляет другие возможности в плане сокращения объема выброса двуокиси углерода, повышения экологичности, роста производства и обеспечения энергобезопасности. При этом необходимо отметить, что «голубой водород», производимый с помощью процесса, показанного на рис. 4, может снизить общий объем выбросов диоксида углерода только примерно на 90% (*Gonzalez Diaz et al. (2020)*); таким образом, хотя это и представляет собой значительный шаг в процессе декарбонизации, у такой возможности есть определенные ограничения.

РИСУНОК 4. Производство водорода с помощью различных видов первичного сырья, связанное с улавливанием диоксида углерода.



## АММИАК КАК УДОБРЕНИЕ И СУДОВОЕ ТОПЛИВО

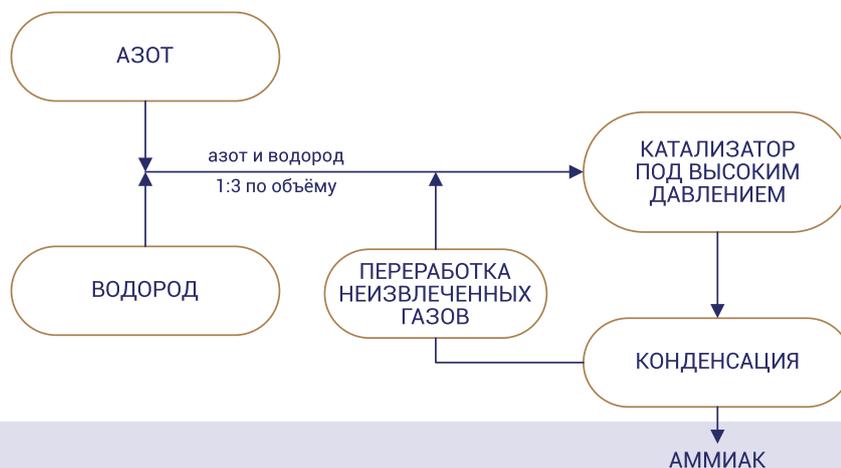
Как описано выше, производство большого количества обезуглероженного водорода дает возможность заняться другими производственными процессами, сопровождающимися обильным выделением двуокиси углерода, которые могут использовать «голубой водород» непосредственно как химическое сырье (а не топливо для сжигания).

Отличным примером является аммиак, который обычно производится с использованием процесса Габера–Боша, как показано на рис. 5. В этом процессе водород соединяется с азотом (полученным из окружающего воздуха) при высокой температуре и под высоким давле-

нием с участием железного катализатора, в результате чего получается аммиак. Обычно водород производится в результате процесса, показанного на рис. 4, но без улавливания углерода. *Gonzalez Diaz et al. (2020)* изучили возможности и последствия использования вместо этого «голубого водорода».

Сам по себе аммиак является сырьем для различных производственных процессов, включая производство удобрений, газообразных холодильных агентов, очистку воды, производство пластмасс, взрывчатых веществ, тканей, пестицидов, красителей и других химических веществ.

РИСУНОК 5. Производство аммиака с применением процесса Габера–Боша. (*Gonzalez Diaz et al. (2020)*).



В настоящее время основным потребителем аммиака является производство удобрений для сельского хозяйства. Анализ, проведенный *Gonzalez Diaz et al. (2020)*, показывает, что непосредственное объединение производства удобрений с сетями улавливания диоксида углерода позволяет снизить выбросы  $\text{CO}_2$  на 77,5% без ухудшения или изменения качества конечного продукта.

В сельском хозяйстве, помимо выбросов двуокиси углерода, серьезную проблему представляют выбросы парниковых газов; таким образом, при распространении энергосбережения по всей цепочке снабжения в показателях выброса парниковых газов на тонну продукции за весь жизненный цикл, выбросы от производства риса и пшеницы могут быть сокращены, соответственно, на 4,6–7,3% и 16,0–17,3%.

Еще одной возможностью применения аммиака, согласно исследованию *Gonzalez*

*Diaz et al. (2021)*, является использование его в качестве транспортного топлива, или, в более широком смысле, как энергоносителя для водорода. Аммиак переносит водород, связанный с азотом, и, как углеводород, может храниться и транспортироваться в жидкой форме. Его энергоемкость выше, чем у ионно-литиевых батарей и даже у сжатого водорода. Кроме того, в двигателе внутреннего сгорания (и даже в дизельном двигателе) аммиак сгорает без образования двуокиси углерода, вследствие чего он представляет интерес для секторов транспорта, которому требуется большая мощность и способность покрывать большие расстояния, таких как морской и грузовой транспорт. С помощью интеграции производства аммиака в кластер по извлечению диоксида углерода можно снизить его выбросы двуокиси углерода из аммиака, извлеченного из природного газа, на 68,4%.

## ПЛАСТМАССЫ ДЛЯ УПАКОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Полиэтилентерефталат (ПЭТ) представляется обычной пластмассой, которая применяется для изготовления пластиковых бутылок для напитков, пластиковых контейнеров для пищевых продуктов, а также в текстильной, электронной и автомобильной промышленности. ПЭТ обычно производится из углеводородного сырья: в ходе серии технологических процессов синтезируется пластмассовая смола, из которой изготавливается конечная пластмассовая продукция.

Пластмассы для упаковки пищевых продуктов в настоящее время являются важным источником выброса диоксида углерода. Так, например, на 1 кг произведенного ПЭТ приходится около 2,5 кг двуокиси углерода. Существуют возможности обезуглероживания таких пластмасс посредством интеграции сетей улавливания диоксида углерода либо напрямую путем изменения технологических потоков, либо посредством модернизации технологического оборудования (Bains, et al., 2017).

Тем не менее, также существует возможность разработки альтернативных пластмасс, которые могут одновременно играть роль поглотителя углекислого газа. Например, пластмассовая продукция, сделанная из ПЭТ, может быть заменена на продукцию из полиэтилен-фураноата или пластмасс на основе ПЭФ. ПЭФ представляет собой полиэфир на основе сырья биологиче-

ского происхождения, который производится из двуокиси углерода и возобновляемого сырья. Jiang et al., (2020) изучили технико-экономическую возможность реализации этого процесса в промышленном масштабе, и сегодня этот процесс может применяться как поглотитель диоксида углерода с технической и экономической точки зрения в перспективе всего срока эксплуатации продукции.

Анализ показывает, что сырье из ПЭФ-пластмасс будет на ~35% дороже, чем из ПЭТ в расчете на 1 кг, однако, вследствие более совершенных характеристик материала, пластиковая бутылка емкостью 237 мл из ПЭФ может быть легче, чем такая же бутылка из ПЭТ. Такое сочетание означает, что оба типа бутылок будут в принципе доступны по равной цене.

Соответствующий анализ выделения двуокиси углерода на протяжении срока эксплуатации продукции показал, что использование пластмассовой бутылки из ПЭФ в качестве альтернативы может снизить выделение двуокиси углерода на 40,5% по сравнению с такой же бутылкой из ПЭТ. Этот анализ был оптимизирован в отношении цены, однако если потребители готовы платить больше, возможна дальнейшая экономия, связанная с выбросами диоксида углерода, особенно в случае интеграции с возобновляемыми источниками энергии.

РИСУНОК 6. Процесс производства ПЭФ.



Если этот процесс может быть усовершенствован так, чтобы он стал нетто-отрицательным с точки зрения выбросов диоксида углерода, то может открыться беспрецедентная возможность создания промышленного поглотителя двуокиси углерода нового типа. Пример этого приведен на рис. 6, причем уже существует крупномасштабная безотходная экономика в поддержку переработки ПЭТ для вторичного использования. Как известно, ПЭФ может пере-

рабатываться вместе с ПЭТ, таким образом уже существует инфраструктура для переработки пластмасс ПЭФ в промышленном масштабе. Если удастся нарастить производство ПЭФ, такая экономика с многооборотным использованием продукции, состоящей из ПЭФ/ПЭТ-пластиковых бутылок, хранящихся дома, переработанных и используемых повторно, может играть роль долгосрочного поглотителя и хранилища диоксида углерода.

## ■ КРАТКИЙ ИТОГ

Все больше правительств и торговых союзов ставят перед собой задачу достижения нулевых выбросов и принимают политику такого достижения. Действительность такова, что происходит глубокая декарбонизация каждого сектора экономики, и все большее внимание уделяется проблемам обезуглероживания других отраслей, помимо энергетики и транспорта.

Промышленный сектор является фундаментальным для нашего экономического процветания, и проведение его декарбонизации является сложным процессом, перед которым стоят уникальные проблемы, требующие кардинальных технических и экономических решений. Многие из этих проблем будут воздействовать на каждое производственное предприятие, на всю мировую цепочку снабжения, и результат может быть весьма разрушительным.

Кластеры или сети улавливания, утилизации и хранения промышленного углерода

помогут декарбонизировать некоторые из наиболее сложных направлений применения. Эта технология предлагает краткосрочное модернизационное решение, которое позволит продолжить полномасштабное использование промышленной инфраструктуры в соответствии с требованиями относительно нулевых выбросов. Помимо этого, существуют более радикальные решения, основанные на сети кластеров улавливания двуокиси углерода, которые могут обеспечить более эффективные и экономичные решения по декарбонизации. Как результат, промышленное улавливание и утилизация диоксида углерода обладает большим потенциалом для сокращения значительного объема выбросов двуокиси углерода во всем мире.

В настоящей статье были приведены примеры промышленного улавливания диоксида углерода и способы промышленного производства водорода, аммиака и пластмасс.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Le Quéré, C., Jackson, R.B., Jones, M.W. et al. Temporary reduction in daily global CO<sub>2</sub> emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nat. Clim. Chang.* 10, 647–653 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>
2. IEA (2019), Transforming Industry through CCUS, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/transforming-industry-through-ccus>
3. YouGov & Sky News (2021) Climate change: Revealed - how many Britons are unwilling to change their habits to tackle the crisis – Lisa Holland, Wednesday 7th April 2021.
4. ZEP. CO<sub>2</sub> Carbon Capture and Storage (CCS) in Energy-intensive Industries- An Indispensable Route to an EU Low-carbon economy. Report, Brussels: Zero Emissions Platform, 2013.
5. Heat Roadmap Europe – Heating and Cooling Energy Demands in 2015 for EU28 Countries <https://heatroadmap.eu/heating-and-cooling-energy-demand-profiles/>
6. Department of Business, Energy and Industrial Strategy. [https://www.gov.uk/government/statistics?keywords=&topics%5B%5D=all&departments%5B%5D=department-of-energy-climate-change&from\\_date=&to\\_date; 2016](https://www.gov.uk/government/statistics?keywords=&topics%5B%5D=all&departments%5B%5D=department-of-energy-climate-change&from_date=&to_date; 2016)
7. UNFCCC. National Inventory Submissions. New York: United Nations Framework Convention on Climate Change, 2012.
8. Gonzalez-Diaz, A., Jiang, L., Roskilly, A. P., Smallbone, A. J. “The potential of decarbonising rice and wheat by incorporating carbon capture, utilisation and storage into fertiliser production” Issue 3, *Green Chemistry*, The Royal Society of Chemistry (2020) <http://dx.doi.org/10.1039/C9GC03746B>
9. Kelemen Peter, Benson Sally M., Pilorgé Hélène, Psarras Peter, Wilcox Jennifer. An Overview of the Status and Challenges of CO<sub>2</sub> Storage in Minerals and Geological Formations, *Frontiers in Climate Vol 1* (2019) DOI:10.3389/fclim.2019.00009
10. Abigail Gonzalez-Diaz, L. Jiang, M.O. Gonzalez-Diaz, A.P. Roskilly, A.J. Smallbone, Hydrogen production via ammonia from methane integrated with enhanced oil recovery: A techno-economic analysis, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 9, Issue 2, 2021, 105050, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105050>
11. Jiang, Long & Gonzalez Diaz, Abigail & Ling-Chin, J. & Malik, Abdullah & Roskilly, Tony & Smallbone, Andrew. (2020). PEF plastic synthesized from industrial carbon dioxide and biowaste. *Nature Sustainability*. 10.1038/s41893-020-0549-y.
12. Praveen Bains, Peter Psarras, Jennifer Wilcox, CO<sub>2</sub> capture from the industry sector, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 63, 2017, Pages 146-172, ISSN 0360-1285, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.07.001>.

# ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ

**Стенников Валерий Алексеевич**

Директор Института систем энергетики  
им. Л.А. Мелентьева Сибирского  
отделения РАН, член-корреспондент РАН

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из современных трендов цифровизации, получивших уже достаточно широкое распространение в мире, являются Цифровые двойники (ЦД) (Digital Twin) и цифровые тени (Digital Shadow). Концепцию цифровых двойников (Digital Twin) относят к числу базовых элементов высокотехнологичной и интеллектуальной системы управления в контексте четвертой промышленной революции (Industry 4.0) [1]. Согласно данным института Гартнера<sup>1</sup>, тенденции развития технологий цифровых двойников находились на пике «завышенных ожиданий» в период 2018-2019 гг., а активное развитие этой технологии прогнозируется в предстоящие 5-10 лет.

Развитие идеи цифрового двойника имеет определённую историю, в формирование которой внесли вклад ряд авторов. Вместе с тем, большинство авторов сходятся во мнении [2], что первоначально концепция ЦД была озвучена Майклом Гривсом на PLM (Product Lifecycle Management) курсе в Мичиганском университете в начале 2002 г. и позднее, в 2003 г. была представлена на конференции по

PLM. По сути – это концепция взаимодействия физического объекта/системы в реальном мире с его цифровой копией в виртуальном мире через информационные связи между ними. В технологическую структуру физического объекта/системы встраиваются датчики для сбора информации об его состоянии в реальном времени. Цифровая модель на основании этой информации уточняется и прогнозирует поведение физического объекта/системы. Суть концепции состоит в том, что каждый объект/систему можно представить в виде физической и виртуальной системы, так что виртуальная система отображает физическую, и наоборот.

Уровень технологий в то время не позволил реализовать в полной мере эту концепцию, интерес к этой тематике возрос в последние годы. По интенсивности исследований в этой области (согласно количеству научных публикаций, содержащихся в базе данных Scopus), РФ занимает 5-е место в мире (после США, Германии, Китая и Соединенного Королевства), а по степени востребованности ЦД-технологии в России – на втором месте [3].

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Концепция цифрового двойника непосредственно опирается на понятие цифровой модели. Цифровая модель, по сути, компьютерная программа, способная с определенной точностью рассчитывать характеристики поведения реального объекта в различных условиях внешней среды – как наблюдаемых, так и гипотетических. Достоинство цифровой модели состоит в том, что она позволяет ставить над объектом/системой виртуальные эксперименты, что особенно важно в ситуациях, когда реальный эксперимент неприемлемо дорог, невозможен или даже опасен. Это в полной мере относится к исследованиям пространственно распределенных, структурно и организационно сложных систем энергетики.

Цифровой двойник относительно цифровой модели является более емким информационным инструментом, поскольку включает в себя одну или несколько взаимосвязанных цифровых моделей, а также наборы данных, необходимых для их работы, часто получаемых в режиме времени, близком к реальному, непосредственно с реального объекта энергетики.

Еще более общим является понятие «цифрового образа», который, помимо моделей и данных объекта техники/системы, включает

в себя поведенческие и когнитивные модели связанной с ним человеческой деятельности (например, операторов оборудования, административного персонала). Цифровые образы – основа для создания систем поддержки принятия решений нового поколения.

Понятие ЦД имеет несколько определений, обзор которых выполнен, например, в [4] на основании зарубежных источников [5-14], а современное состояние в этой области представлено в [3]. Наиболее удачное определение ЦД приводится в [15]. Применительно к энергетике **Цифровой двойник** – это реальное отображение всех компонентов объекта/системы в жизненном цикле с использованием физических данных, виртуальных данных и данных взаимодействия между ними, то есть ЦД создает виртуальный прототип реального объекта/системы, с помощью которого можно проводить эксперименты и проверять гипотезы, прогнозировать поведение объекта/системы и решать задачи управления его жизненным циклом. Структурная схема ЦД в виде симбиоза программного обеспечения для управления жизненным циклом объекта/системы (PLM) и информационно-телекоммуникационной технологии Интернет вещей (IIoT) приведена на рис. 1.

РИСУНОК 1. Структурная схема цифрового двойника.

Источник: ГК Техносерв, Vinnum.



В ЦД объединяются инструменты для создания цифровой 3D-модели объекта/системы, разрабатываемой с помощью системы инженерного проектирования (CAD), информационно-телекоммуникационная система на базе промышленного Интернета вещей и интегрированные математические модели для отслеживания поведения и оптимизации процессов функционирования реального объекта с помощью CAE-системы, предназначенной для проведения инженерных расчетов.

Для построения ЦД (рис. 2) применяется различный инструментарий, например

численные методы моделирования физических процессов в объектах/системе для прогнозирования их реакции на различные внутренние и внешние возмущения, например, на базе метода конечных элементов (FEA – Finite Element Analysis). Информацию о их структуре и параметрах формируют CAD-модели (Computer-aided design). Модели, основанные на анализе надежности систем FMEA-модели (Failure Mode and Effects Analysis), интегрируют математические модели анализа отказов и оценки их последствий со статистической базой данных о событиях отказа и принятию решения по их предотвращению и устранению.

РИСУНОК 2. Состав технологий создания цифрового двойника<sup>2</sup>.

Источник: General Electric, 2017.



ЦД содержит описание ретроспективы обслуживания и эксплуатации объекта/системы, что позволяет прогнозировать поведение реального объекта/системы, в том числе с учетом мониторинга и тестирования объектов/системы и проведение анализа на основе агрегированных данных по всем объектам системы энергетики. Являясь самообучающейся платформой ЦД использует технологии машинного обучения, широкий круг информации из множества источников, включая данные с датчиков, осуществляющих мониторинг состояния оборудования

и параметров режимов, сведения о нагрузках и т.п. Их интеграция с технологиями интернета вещей является драйвером развития и обеспечивает сбор и анализ данных с различного рода сенсоров в рамках мониторинга, формирование управляющих воздействий и их доведение до исполнительных механизмов с целью эффективного управления объектом/системой.

Существующие классификации цифровых двойников по уровню развития, технологиям моделирования и назначению приведены на рис. 3 [3].

**В энергетике наибольшее распространение получили три определяющих типа цифровых двойников:**

**Двойник-прототип (Digital Twin Prototype, DTP).** Это виртуальный аналог реально существующего объекта/системы. Он содержит информацию, которая описывает определенный объект и систему в целом на всех стадиях – начиная от требований, предъявляемых к производству и технологическим процессам при эксплуатации, заканчивая требованиями к утилизации элемента.

2 – FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) – технология анализа видов и последствий потенциальных отказов (дефектов).

CAD (Computer-aided design) – система, реализующая проектирование объекта/системы.

FEA (Finite Element Analysis) – модель для моделирования и решения задач проектирования и функционирования объектов/систем.

**Двойник-экземпляр** (*Digital Twin Instance, DTI*). Содержит в себе информацию по описанию элемента (оборудования), то есть данные о материалах, комплектующих, информацию от системы мониторинга оборудования.

**Агрегированный двойник** (*Digital Twin Aggregate, DTA*). Объединяет прототип и экземпляр, то есть собирает всю доступную информацию об оборудовании, объекте или системе.

РИСУНОК 3. Классификация цифровых двойников.



В рамках структурного построения выделяют ЦД объекта, процесса и системы [4]. «Цифровой двойник объекта» представляет собой виртуальную модель конкретного объекта (электростанции, трансформаторной подстанции, линии электропередачи и т.п.). «Цифровой двойник процесса» имитирует производственные/технологические процессы (производство энергии, электрические режимы, потокораспределение и т.п.). Виртуальный производственный/технологический процесс может имитировать различные сценарии и проиллюстрировать то, что может произойти при разного рода внутренних и внешних возмущениях. Это позволяет разрабатывать наиболее эффективную методику ведения технологического процесса. Его можно оптимизировать с помощью виртуальных двойников объекта или системы. «Цифровой двойник системы» — это виртуальные модели всей системы целиком (например, электроэнергетической, газоснабжающей, нефтеснабжающей и др.). Они собирают огромные объемы операционных данных,

поставляемых устройствами, отдельными объектами и системами в целом и позволяют получать представление об объекте/системе и создают новые бизнес-возможности для оптимизации всех процессов, включая организационные, технологические и др.

Нередко используется термин «цифровая тень». Цифровую тень можно определить как систему связей и зависимостей, описывающих поведение реального объекта, как правило, в нормальных условиях работы и содержащихся в избыточных больших данных, получаемых с реального объекта при помощи технологий промышленного интернета. Цифровая тень способна предсказать поведение реального объекта только в тех условиях, в которых осуществлялся сбор данных, но не позволяет моделировать другие ситуации [16]. После некоторого противопоставления цифровых теней и цифровых двойников, все специалисты сходятся во мнении о необходимости перехода к их совместному использованию, рассматривая цифровую тень как составляющую цифрового двойника.

## ПРЕИМУЩЕСТВА И ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Для энергетических систем основными функциональными возможностями использования (use cases) цифровых двойников являются [17]:

- Оценка и прогнозирование уровней производства, потребления, хранения энергоносителей во всех аспектах;
- Оценка и прогнозирование пропускной способности сегментов сетевых комплексов;
- Оценка рисков, обусловленных нарушениями вследствие воздействия факторов техногенного характера;
- Оперативная оценка параметров и управления режимами с целью обеспечения работоспособности и повышения эффективности функционирования системы;
- Расчет и виртуальная отработка уставок, переключений, нормальных и аварийных режимов;
- Предсказательный мониторинг состояния оборудования, оценка аварийности и потребности в техническом обслуживании и ремонтах;
- Калибровка и верификация моделей объектов/систем и управляющих алгоритмов;
- Виртуальная апробация и оценка проектных решений;
- Обучение и виртуальная тренировка персонала энергетических объектов.

Все эти функции включает в себя цифровой двойник-экземпляр, который является наиболее актуальным для применения компаниями, эксплуатирующими электрические сети. Он основывается на математической модели сети и содержит информацию о технических параметрах используемого оборудования (кабели, трансформаторы, выключатели и т.д.), времени его ввода в эксплуатацию, географических координатах, данных, поступающих с измерительных устройств. Эта информация используется для проведения расчетов по подключению новых потребителей, а также различных расчетов электрических сетей, например, для расчета режимов, токов короткого замыкания, координации устройств релейной защиты и другие.

Сегодня на практике эти расчеты проводят различные подразделения, и для каждого из

них разрабатывается своя собственная математическая модель одной и той же физической сети. Использование разных моделей нередко приводит к ошибкам и снижению точности расчетов. Применение единого ЦД всеми подразделениями компании будет способствовать успешному решению данной проблемы путем организации единого цифрового пространства. Цифровой двойник электрических сетей включает базу данных с информацией о сети, которая интегрируется с другими ИТ-системами энергокомпании (SCADA, геоинформационная система, система управления активами и пр.), а также вычислительный инструментарий. Он должен синхронизировать данные, полученные из разных источников, таким образом, чтобы они точно соответствовали текущему состоянию электрической сети.

**Выделяют пять компонентов программного обеспечения, необходимых для создания цифрового двойника и формирующих его архитектуру:**

- Ядро цифрового двойника – математические, имитационные и информационные модели;
- Систему сбора данных с физического объекта/системы, мониторинга и управления ими;
- Системы наблюдения, распознавания и сбора данных, системы контроля и управления ими;
- Хранилища поступающих данных – классические СУБД (Oracle, MS SQL, DB2) и СУБД с открытым кодом (PostgreSQL), облачные хранилища (S3, RedShift, Greenplum), распределенные файловые системы HDFS;
- Сервисные инструменты, которые предоставляют услуги и интерфейс клиентам – элементы поддержки сервисов оптимизации, математического моделирования, построения прогнозов и т. п.;
- Системы коммуникаций между названными элементами (платформа Internet of Things (IoT)) [3].

Укрупненная схема взаимосвязи причисленных компонентов приведена на рис. 4.

Энергетика является одной из областей техники, где ЦД-технология весьма востребована. Разрабатываются цифровые двойники в нефтегазовой отрасли, в атомной энергетике, в электроэнергетике, где широкое распространение получили системные разработки таких

компаний, как General Electric, Siemens, SAP, Национальной лаборатории энергетических технологий (NETL, National Energy Technology Laboratory, USA). Имеются и отдельные российские решения, не претендующие на уровень комплексных.

РИСУНОК 4. Компоненты программного обеспечения цифрового двойника.



**Факторами, сдерживающими развитие ЦД-технологии, которые со временем преодолеваются, являются:**

- Высокая стоимость проектов, обусловленная привлечением многопрофильного программного обеспечения (ПО) и требующая привлечения не только начальных инвестиций, но и затрат на поддержку ЦД.
- Недостаток специалистов, обладающих междисциплинарными знаниями для создания проектов класса ЦД. Недостаток информации и образовательных программ соответствующего профиля.
- Проблемы согласованности толкования термина ЦД, основополагающих целей и задач, излишняя сложность и детализация (про запас) моделей.
- Неправильная последовательность действий. Необходимо все изменения сначала отработать на ЦД, и только после этого они должны реализовываться в реальной системе, но не наоборот.
- Представление старых технологий под новой «вывеской», что дискредитирует технологию ЦД, и снижает интерес к ней [3].

**Основные факторы, представляющие интерес и стимулирующие развитие и успешное применение ЦД, достаточно весомы и имеют хорошие перспективы, к их числу могут быть отнесены следующие:**

- ЦД является одной из важнейших технологий, на которые опираются проекты по цифровой трансформации и интеллектуализации систем, они повышают их конкурентные преимущества и расширяют функциональные возможности.
- Сложность создаваемых инженерных объектов требует перехода к новой парадигме проектирования, направленной на интеграцию различных групп разработчиков и поставщиков в комплексных цепочках реализации проекта.
- ЦД позволяют снизить расходы в результате смещения «центра тяжести» по отработке процесса создания и функционирования систем на стадию их разработки и осуществления предикативного обслуживания.
- ЦД снижает расходы на всех этапах жизненного цикла изделия при осуществлении задач эксплуатации, поддержки, мониторинга, модернизации и утилизации.
- Успешность применения ЦД для наиболее полного проявления функциональных возможностей систем, продления срока службы оборудования, снижения расходов на ремонт, оптимизации ремонта в труднодоступных местах.
- Развитие смежных и сопутствующих цифровых технологий, в частности промышленного интернета вещей, облачных технологий, приложений виртуальной и дополненной реальности, технологий аддитивного производства.
- Развитие ЦД как части стратегии цифровизации, повышения уровня надежности и безопасности эксплуатации энергообъектов и систем [3].

Анализ исследований, выполняемых в области использования концепции цифровых двойников, подтверждает актуальность их применения в интеллектуальном управлении не только функционированием, но и развитием систем энергетики. При этом для разных уровней энергетических систем и объектов возможны разные типы цифровых двойников.

В идеале, цифровой двойник базируется на инструментах больших данных, которые поступают в реальном времени по множеству измерений и отвечают критерию трех V<sup>3</sup>. Эти измерения создают развивающийся профиль объекта/системы и реализуемого технологического процесса в цифровом пространстве для принятия эффективных решений по их структурной, функциональной трансформации, а также переформатированию технологического

процесса. В то же время Цифровой двойник отличается от традиционной системы автоматизированного проектирования (САПР) и не является просто еще одним решением с поддержкой датчиков и Интернета вещей (IoT).

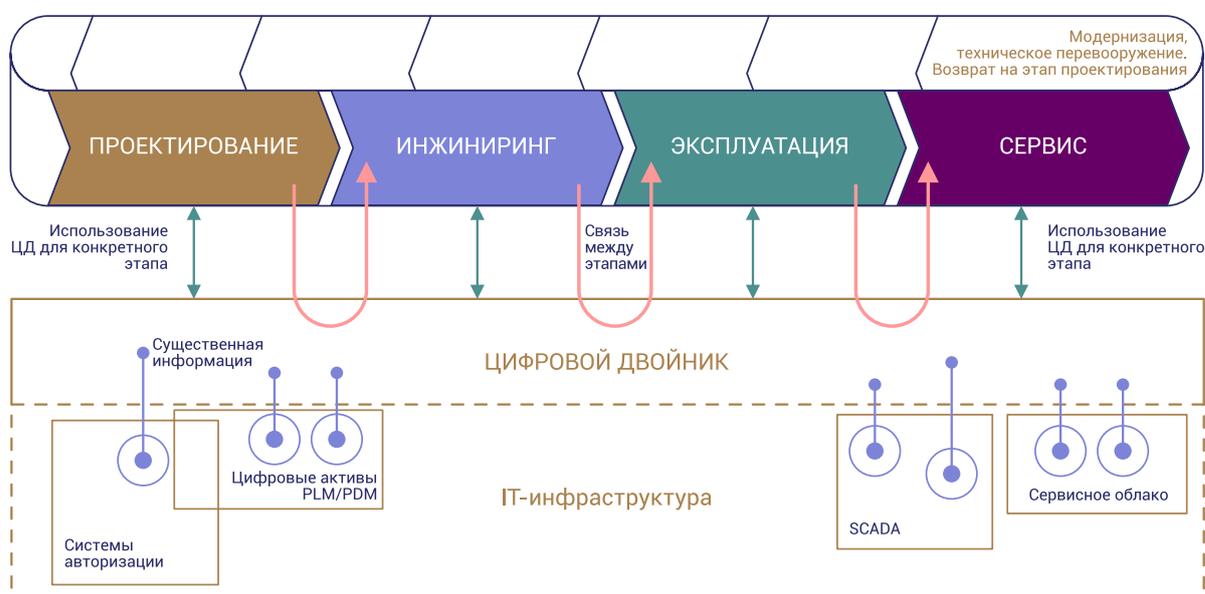
Предполагается, что в перспективе ЦД станет интегрирующей платформой между операционными технологиями ОТ (Operational Technologies), которые охватывают интеллектуализацию технологического процесса, мониторинг состояния и параметров системы и т.д., где генерируются данные, и информационными технологиями ИТ (Information Technologies), обеспечивающими интеллектуализацию бизнес-процессов и мобильных приложений и т. д. Он успешно интегрируется в компьютерную среду и обладает более развитой инфраструктурой и функциональными возможностями.

## ВОПРОСЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Цифровой двойник на протяжении всего жизненного цикла, схематично представленного на рис. 5, активно использует все компоненты ИТ-системы, такие, как PLM, PDM и SCADA<sup>4</sup>. Он обеспечивает хранение и предоставление для использования больших

объемов информации, поступающей из множества программных и аппаратных средств, датчиков, встроенных в физические объекты и других источников. Он делает эту информацию доступной для использования на всех этапах жизни объекта/системы.

РИСУНОК 5. Принципиальная структура построения цифрового двойника системы.  
Источник: ANSYS CFD.



Вопросы информационной обеспеченности ЦД представляются особенно актуальными, например, для территориально распределенной и структурно сложной Единой электроэнергетической системы России (ЕЭС) это важно для эффективного управления ее режимами, планирования мероприятий по обслуживанию и ремонтам, предотвращения аварийных ситуаций и др. [18, 19]. Сложившаяся к настоящему времени эффективно работающая иерархическая система диспетчерского и автоматического управления режимами ЕЭС России обеспечивается детальной текущей измерительной информацией, получаемой от традиционных и векторных средств измерений систем SCADA и СМГР (Система мониторинга переходных режимов). На основе получаемых данных формируются текущие информационные модели ЕЭС, Объединенных и Региональных энергетиче-

ских систем, являющиеся основой для решения технологических задач мониторинга и прогнозирования режимов и управления ими. Они реализуются системой EMS (Energy Management System)<sup>5</sup> на каждом уровне территориальной иерархии. Для управления режимами ЕЭС вырабатываются управляющие воздействия, выполняемые диспетчером и системой автоматического управления [20].

Разработанная и используемая Системным оператором (СО) ЕЭС России распределенная иерархическая информационная модель ЕЭС является представительной развитой базой для формирования цифрового двойника энергообъединения на всех уровнях территориальной иерархии. Создание информационных моделей цифрового двойника представляется целесообразным осуществлять по следующим направлениям [19].

4 – PLM (Product Lifecycle Management) – модуль управления жизненным циклом, PDM (Product Data Management) – модуль управления данными, SCADA – комплекс сбора данных и диспетчерского управления.

5 – EMS (Energy Management System) – система мониторинга, управления и оптимизации производством, передачей и потреблением электроэнергии.

- Формирование ЦД ЭЭС как единого информационного пространства энергообъединения, реализуемого по единым принципам и распределенного по уровням территориальной иерархии управления. На основе информации цифрового двойника с использованием единых принципов и методов конструируются информационные модели для решения конкретных задач управления режимами на каждом уровне иерархии. Эти принципы формирования единого цифрового двойника ЭЭС гарантируют непротиворечивость результатов решения различных задач управления режимами энергообъединения на различных уровнях.
- Разработка и использование цифрового двойника ЭЭС, учитывая масштабы энергообъединения, необходимую детальность представления элементов системы и информационные возможности используемых средств измерения, должны быть связаны с работой на уровне больших данных. Современные средства информационного обеспечения задач управления режимами (SCADA, СМПП) уже сейчас предоставляют огромные объемы информации [21], однако, полезно используется лишь незначительная ее часть. Увеличение объема ее использования может придать мощный импульс к пониманию новых неожиданных, полезных, возможно, и негативных свойств объекта управления.
- При обработке и анализе больших объемов данных целесообразно использовать CIM-модели (Common Information Model) [22]. Технология CIM-моделей, основываясь на формате данных ODM (Open Model for Exchanging Power System Simulation Data), позволяет формировать модели любой сложности, которые потом могут быть конвертированы в любой известный или новый формат данных, используя дополнительно подключаемые модули. ODM является международным открытым стандартом обмена данными для моделирования ЭЭС, поддерживает расчеты динамических процессов. Информация в формате CIM хранится в базе данных и может быть использована в различных приложениях ИТ-инфраструктуры при создании цифрового двойника ЭЭС и интеллектуальной системы управления ее режимами.
- В качестве технологий интеллектуальной поддержки принятия решений диспетчером целесообразно исследовать возможности онтологического, когнитивного и событийного моделирования, интегрированные в рамках ИТ-инфраструктуры. В последующем эти интеллектуальные технологии могут быть дополнены технологиями искусственных нейронных сетей, нечетких множеств и нечеткой логики, вейвлет-анализа и др.

Цифровой двойник ЭЭС России опирается на единую распределенную базу данных, которая должна интегрироваться с другими ИТ-системами. ЦД должен синхронизировать информацию из разных источников таким

образом, чтобы она однозначно соответствовала текущему состоянию физической системы и с требуемой точностью отражала характеристики элементов и системы в целом, их состояние, параметры режимов и др.

## ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

При построении цифровых двойников энергетических систем важно, чтобы они были ориентированы на моделирование всевозможных воздействий (не только физических) на объект/систему в ходе его полного жизненного цикла, прогнозирование последствий таких воздействий, выработку мер по предотвращению их негативного техногенного влияния. Для решения этих задач в основу цифрового двойника объекта/системы должен входить комплекс взаимосвя-

занных компьютерных моделей, достаточный для выполнения следующих базовых действий:

- достоверное отображение состояния объекта и его окружения в реальном времени;
- достоверное предсказание поведения объекта в штатных и нештатных условиях;
- достоверное порождение управляющих воздействий на объект.

Ключевым компонентом цифрового двойника должен быть комплекс математических и экономических расчетных, имитационных, нейросетевых моделей, описывающих все аспекты поведения объекта/системы. Предусматриваются мощные механизмы калибровки моделей в целях повышения их достоверности, в том числе путем машинного обучения [7]. Для обеспечения удобного доступа к моделям в составе цифрового двойника, их часто оформляют как инструменты сервиса [11]. Сервисная архитектура, скрывающая детали реализации моделей, особенно удобна для применения в распределенных системах с децентрализованным управлением, таких как Интернет энергии.

Пилотный ЦД энергосистемы был построен как классический цифровой двойник базового типа (Baseline Twin) [23]. С его помощью были проведены исследования и отработаны функциональные возможности использования двойника в полном объеме для управления системой, уточнения профиля потребления отдельных энергоприемников по интегральным показаниям приборов учета, установленных на вводах в аудитории (деагрегация), автоматического поиска оптимальной конфигурации гибридной системы энергоснабжения. По результатам этих исследований было показано, что для

корректного функционирования математических моделей и представления ими актуальной неискаженной картины структуры и состояния объекта необходимо обеспечение их исходными структурированными данными из базовых информационных компонентов, описывающих объект в различных функциональных аспектах и получаемых в автоматическом режиме.

На основе накопленного опыта в проектировании больших информационно-управляющих систем в энергетике [23], были предложены следующие базовые информационные компоненты цифрового двойника:

- цифровые схемы и карты (в первую очередь, однолинейная схема электроснабжения);
- электронная документация (проектно-сметная, эксплуатационная и др.);
- информационные модели (мастер-данные);
- оперативная информация (результаты приборных измерений потребления и первичных характеристик технического состояния оборудования).

Предложенная архитектура цифрового двойника, отражающая его структуру и взаимосвязи со смежными автоматизированными системами, приведена на рис. 6 [17, 25].

РИСУНОК 6. Архитектура цифрового двойника энергетической системы.

Источник: ИПУ РАН.

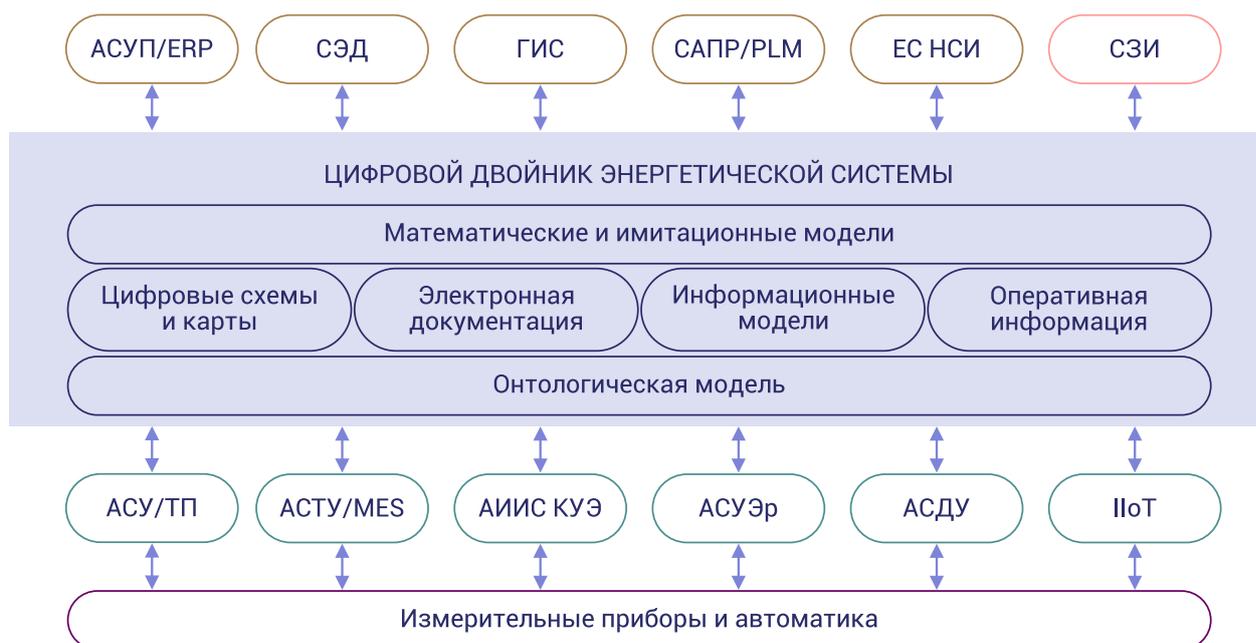


РИСУНОК 7. Обобщенная архитектура цифрового двойника энергетических объектов и систем. Источник: ИСЭМ СО РАН.



Обобщенная архитектура цифрового двойника энергетических объектов и систем на основе онтологического подхода [19, 26] имеет вид, представленный на рис. 7.

Информационные модели представляют собой совокупность информации о наиболее существенных свойствах и параметрах объекта/системы или процесса. На современном этапе развития информационных технологий производственные и технологические процессы все более тесно интегрируются с информационными системами, в результате чего создаются киберфизические системы, в том числе и в энергетике. В исследованиях энергетики находят применение разнообразные информационные модели, как для разработки баз данных, так и для описания и представления структуры систем энергетики, исследуемых объектов и процессов.

Представляется, что для успешной реализации ЦД в энергетике, должны быть востребованы математические модели объектов и систем в целом, применяемые для научных и прикладных исследований энергетических систем. Очевидно, что они не являются синонимами ЦД, но могут стать их ядром, так же, как информационные модели могут стать основой цифровых теней.

В исследованиях, выполняемых в ИСЭМ СО РАН, решаются задачи анализа, проекти-

рования, прогнозирования объектов и систем энергетики и широко используется математическое и имитационное моделирование топливно-энергетического комплекса в целом, отдельных систем энергетики, энергетических объектов и их элементов. В частности, разрабатываются программные комплексы для решения задач проектирования систем и объектов энергетики. При этом программное обеспечение создается на основе апробированных моделей реальных физических систем, а знания о структуре систем, прикладных задачах и математических моделях представляются в виде онтологий для многократного использования [26]. Для сокращения сроков разработки цифровых двойников высокого уровня целесообразно использовать имеющийся и хорошо апробированный инструментарий, который, как правило, применяется для решения отдельных задач [27-28].

Технология цифровых двойников предполагает междисциплинарное моделирование, т.е. интеграцию результатов численного моделирования структурных элементов и физических процессов в системе на основе обмена данными между входящими в систему компонентами.

В различных отраслях энергетики разрабатываются цифровые двойники как для отдельных объектов, так и систем в целом.

## ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Считают, что нефтегазовая промышленность России является драйвером развития рынка цифровых двойников. В нефтегазовой отрасли реализованы не только ЦД отдельных элементов оборудования, но также разрабатываются двойники сложных комплексных систем («ЦД месторождения», «ЦД морской нефтедобывающей платформы», «ЦД нефтеперерабатыва-

ющего завода»). Особенно актуальным является создание ЦД для управления процессом нефтедобычи в труднодоступных морских условиях. Почти все крупнейшие российские нефтяные компании за последние несколько лет объявили об использовании технологии ЦД, а многие даже обозначили данное направление в качестве приоритетного направления развития.

- Компания «Лукойл» выделила четыре основных направления: «цифровые двойники», «цифровой персонал», «роботизация рутинных процессов» и «цифровая экосистема «Цифровой двойник», предполагает развитие технологии «интеллектуального месторождения», включая геологоразведку и добычу, а концепция «цифровой завод» инкапсулирует переработку и сбыт. В нефтепереработке с помощью цифровых технологий предполагается обеспечить гибкое реагирование производства на изменение спроса, организовать эффективную загрузку мощностей, поддержание производственной и технологической безопасности.
  - В стратегии компании «Роснефть» («Роснефть-2022») было заявлено шесть основных направлений: «цифровое месторождение», «цифровой завод», «цифровая цепочка поставок», «цифровой трейдинг», «цифровая АЗС» и «цифровой рабочий».
  - «Роснефть» начала в 2018 году проект по созданию «цифрового месторождения» в Башкирии. В этом проекте была реализована подробная цифровая копия реального месторождения (Илишевское месторождение), где каждый физический объект представлен своим цифровым двойником, передающим информацию о своем состо-
- янии. С помощью 3D-платформы специалисты в режиме реального времени отслеживают все ключевые показатели – добычу и транспортировку, действия сотрудников, перемещения транспорта. Для получения информации с дистанционно ненаблюдаемых объектов привлекаются беспилотники, которые регулярно облетают территорию месторождения.
  - В «Газпром нефть» технологии ЦД используются не только на этапе добычи нефти, но и на этапах ее переработки. Например, на Московском НПЗ компания запустила проект по созданию цифрового двойника установки гидроочистки бензина каталитического крекинга, а на Омском нефтеперерабатывающем заводе – установки первичной переработки нефти [3].
  - Цифровой двойник позволил компании ADNOC, одному из ключевых операторов нефтегазовой промышленности на Ближнем Востоке, объединить на единый диспетчерский пункт 20 нефтеперерабатывающих и нефтедобывающих предприятий разбросанных по всему Ближнему Востоку. ЦД интегрировал в себе производственные активы и обеспечил унификацию и приведение к единому стандарту все организационные и технологические процессы.

## ■ ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

В электроэнергетике, имеющей, как отмечалось ранее, сложную пространственную структуру сетевого комплекса и разнотипный состав генерирующей мощности с огромными массивами данных, выявить зависимости и предложить оптимальное решение без цифровых двойников представляется невозможным, особенно в современных реалиях конкуренции и глобальных вызовов. Активно развивающийся рынок оборудования с развитой проектной автоматизированной системой мониторинга и документацией в электронном виде со стационарным оснащением, необходимыми датчиками и системой коммуникаций, способствует созданию и быстрому распространению цифровых двойников.

В России одним из лидеров по реализации цифровых программ является компания «Росатом», которая разработала и протестировала платформу программно-технологического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС», что представляется важным шагом на пути к созданию полноценных ЦД энергоблоков АЭС [3].

Национальная лаборатория энергетических технологий (NETL, National Energy Technology Laboratory) Министерства энергетики США и ее партнеры совместно с Центром обучения и исследований в области расширенного моде-

лирования виртуальной энергии (AVESTAR) Университета Западной Вирджинии разработали цифровой двойник, который имитирует электростанцию, использующую парогазовую установку с внутрицикловой газификацией угля. Проект направлен на оптимизацию проектирования сенсорной сети (расчет оптимального размещения, количества и типа датчиков), управление процессами и операционные стратегии для повышения производительности, гибкости и мониторинга состояния электростанции.

ЦД «АТОМ», разработанный компанией Siemens, представляет модель, которая использует данные о клиентах, цепи поставок, производстве энергии, техническом обслуживании, и направлена на повышение эффективности управления активами. С его помощью контролируется работа, выполнение регламентных работ по обслуживанию и ремонт турбин. Основной инструмент моделирования – AnyLogic (универсальная методология моделирования на основе агентов, дискретных событий и системной динамики).

В сегменте электроэнергетики применение цифровых инициатив будет способствовать повышению эффективности и надёжности генерирующего и сетевого оборудования, точности контроля потерь и предотвращению нештатных ситуаций.

## ■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровой двойник является эффективным инструментом визуализации, мониторинга и управления энергетическими объектами/системами на всех этапах их жизненного цикла. Это эволюционирующая обучаемая технология, отражающая все изменения, происходящие с физическим объектом/системой, которые отслеживаются через оперативно передаваемые данные с датчиков, информацию от персонала и других источников.

Расширение сферы применения ЦД будет связано с развитием математических моделей, отражающих трансформацию технологических процессов, а также организационные и экономические преобразования. Значительную роль в появлении новых возможностей ЦД будет играть наличие развитых высокопроизводительных вычислительных ресурсов, появление Интернета вещей, сетей 5G и выше, облачных

На уровне проектирования ЦД позволяет быстро находить и исправлять ошибки в технических решениях при их осуществлении в проекте ещё до его реализации. На уровне эксплуатации они могут оптимизировать технологический процесс, повышая его эффективность, оперативно выявлять риски потенциальных неисправностей и возможных аварий, обеспечивать предикативное планирование ремонтов, сокращая затраты на обслуживание.

вычислений. Новые возможности искусственного интеллекта приведут к созданию «умных» ЦД, а процесс их объединения на разных иерархических уровнях будет способствовать формированию единого цифрового двойника, что расширит круг решаемых задач и предоставляемых услуг. Все это сделает их одним из ведущих трендов будущего технологического развития.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Цифровой двойник. Индустрия 4.0 / Информатизация и системы управления в промышленности. Электронный ресурс: <https://zen.yandex.ru/media/isup/cifrovoi-dvoinik-industriia-40-5b83b7155b279900a96c54e8> (дата обращения: 09.04.2021).
2. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems [Electronic resource]. [https://www.researchgate.net/publication/306223791\\_Digital\\_Twin\\_Mitigating\\_Unpredictable\\_Undesirable\\_Emergent\\_Behavior\\_in\\_Complex\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/306223791_Digital_Twin_Mitigating_Unpredictable_Undesirable_Emergent_Behavior_in_Complex_Systems) 10.1007/978-3-319-38756-7\_4 (Дата обращения: 09.04.2021).
3. Прохоров А., Лысачев М. Научный редактор профессор Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.
4. Кокорев Д.С., Юрин А.А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса // Colloquium-journal. Technical science. 2019. № 10(34). С. 31–35. DOI: 10.24411/2520-6990-2019-10264
5. Bolton R. N. et al. Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms // Journal of Service Management. 2018. Т. 29. №. 5. Pp. 776–808.
6. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies // IEEE MultiMedia. 2018. Т. 25. №. 2. Pp. 87–92.
7. Frolov D. How machine learning empowers models for digital twins // Benchmark. July 2018. Pp. 48–53.
8. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. 2012. Pp. 1818.
9. Lee J., Bagheri B., Kao H.A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing letters. 2015. Т. 3. Pp. 18–23.
10. Michael W. Grieves Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication – LLC. 2014. 7 p.
11. Qia Q., Taoa F., Zuoa Y., Zhaob D. Digital twin service towards smart manufacturing // Procedia CIRP. 2018. Vol. 72. Pp. 237–242.
12. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing // IFAC-PapersOnLine. 2015. Pp. 567–572.
13. Söderberg R. et al. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production // CIRP Annals. 2017. Т. 66. №. 1. Pp. 137–140.
14. Tao F. et al. Digital twin-driven product de-sign framework // International Journal of Production Research. 2018. Pp. 1–19.
15. Никитина Е. Попали в сети: как работают цифровые двойники в электроэнергетике. Режим доступа: <https://pro.rbc.ru/news/5db1b59a9a79474bb142a3fe> (дата обращения: 09.04.2021)
16. Боровков А.И. Цифровые двойники и цифровые тени в высокотехнологичной промышленности <https://news.myseldon.com/ru/news/index/197616357> (Дата обращения: 09.04.2021)

17. Андриюшкевич С.К., Ковалев С.П., Нефедов Е. Подходы к разработке и применению цифровых двойников энергетических систем // Цифровая подстанция. 2019. № 12. С. 38-43.
18. Ковалёв С. П. Проектирование информационного обеспечения цифровых двойников энергетических систем // Системы и средства информатики. 2020. Т. 30. №1. С. 66–81.
19. Воропай Н.И., Массель Л.В., Колосок И.Н., Массель А.Г. ИТ-инфраструктура для построения интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики на основе цифровых двойников и цифровых образов // Известия РАН. Энергетика. №1. 2021. С. 3-13. DOI: 10.31857 / S0002331021010180
20. Массель Л.В., Колосок И.Н., Гурина Л.А. Обработка информационных потоков при мониторинге и управлении режимами интеллектуальных электроэнергетических систем / Вестник ИрГТУ. 2013. №2 (73). С. 30-35.
21. Дубинин Д.М. Актуальные задачи развития и применения технологии синхронизированных векторных измерений для задач управления в электроэнергетике // Доклад на заседании НТС СО ЕЭС (06.12. 2019).
22. Кирпичев К.Ю., Соловьев С.Ю. Интеграция информационных систем предприятий электроэнергетики на базе CIM-модели // Информатизация и системы управления в промышленности. 2008. № 3(19).
23. Erikstad S. Design patterns for digital twin solutions in marine systems design and operations. In: Proc. 17th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries COMPIT'18. Hamburg, Technische Universität Hamburg, 2018. P. 354–363.
24. Андриюшкевич С.К., Ковалёв С.П. Динамическое связывание аспектов в крупномасштабных системах технологического управления // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16. № 6. С. 3–12.
25. Andryushkevich S.K., Kovalyov S.P., Nefedov E. Composition and application of power system digital twins based on ontological modeling // Proc. 17th IEEE Intl. Conf. on Industrial Informatics INDIN'19. Helsinki-Espoo, Finland: IEEE. 2019. Pp. 1–6.
26. Массель Л.В., Ворожцова Т.Н. Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики // Онтология проектирования. 2020. Т.10. №3 (37). С. 327-337. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.
27. Массель Л.В., Массель А.Г., Копайгородский А.Н. Эволюция технологий исследований энергетики и применения их результатов: от математических моделей и компьютерных программ к цифровым двойникам и цифровым образам // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 5-19. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-01
28. Массель Л.В., Массель А.Г., Ворожцова Т.Н. Использование научной ИТ-инфраструктуры исследований энергетики для построения цифровых теней и цифровых двойников объектов и систем энергетики // Применение технологий виртуальной реальности и смежных информационных систем в междисциплинарных задачах FIT-M 2020: сборник Трудов международной научной конференции. Москва: Знание-М, 2020. С. 163-169. ISBN 978-5-907345-75-1 DOI 10.38006/907345-75-1.2020.1.310
29. Работающая магия. Энерговектор.
30. <https://zen.yandex.ru/media/energovector/rabotaiuscaia-magiiia-5e0a56ba98930900b3ab9f77> (Дата обращения: 09.04.2021)

# ПЛАВУЧИЕ СОЛНЕЧНЫЕ СТАНЦИИ

**Хесан Зиар**

Доцент, Технический университет Делфта

## ВВЕДЕНИЕ

По данным Международного энергетического агентства, в 2020 году на фоне роста спроса на 90% на возобновляемую электроэнергию во всем мире были высокими уровни развертывания солнечных фотоэлектрических систем<sup>6</sup>. Фотоэлектрические (ФЭ) системы могут напрямую преобразовывать солнечный свет в электричество. С точки зрения фотоэлектрического преобразования энергии на выработку электроэнергии ФЭ системами влияют, как видно из рис. 1, четыре основных фактора. Во-первых, это источник энергии, солнечный свет, затем преобразователь, который представляет собой фотоэлектрический элемент, далее продолжительность времени, в течение которого может работать фотоэлектрический модуль, и, наконец, площадь поверхности, используемой для применения или интегрирования фотоэлектрической технологии. Солнечный свет — это данность, которую мы не можем контролировать. При этом необходимо учитывать, что КПД фотоэлектрического преобразователя приближается к максимальному теоретическому КПД<sup>7/8</sup>. И именно поэтому исследователи

теперь прилагают больше усилий для изучения подходов к увеличению времени использования фотоэлектрических модулей (фактор — время)<sup>9</sup>, а также изучают возможности добавления ФЭ модулей на любую возможную поверхность или их интеграции на ней (фактор — площадь)<sup>10</sup>. Однако из-за низкого КПД ФЭ модулей они занимают значительную площадь, которую можно было бы использовать для других жизненно важных нужд человека, таких как обеспечение продовольствием и строительство жилья. Население мира растет, и также растет спрос на продукты питания, жилье и возобновляемую энергию. Поэтому сельское хозяйство и энергетика могут конкурировать или уже конкурируют между собой за право использовать землю. Это неизбежно привлекает внимание к другой широко доступной поверхности — воде. Простое размещение (или даже погружение) ФЭ системы любого типа на таких водоемах, как озера, водохранилища, плотины гидроэлектростанций, промышленные и ирригационные пруды, а также прибрежные лагуны, позволяет получать плавучие ФЭ системы (ПФЭ).

РИСУНОК 1. Четыре ключевых фактора, влияющих на выработку фотоэлектрической электроэнергии.



6 — World Energy Outlook 2020, International Energy Agency

7 — Yoshikawa et al., 2017

8 — Richter et al., 2013

9 — Ndiaye et al., 2013

10 — Ziar et al., 2021

## ТЕХНОЛОГИЯ

Плавучая ФЭ электростанция обычно состоит из поплавков, системы швартовки, якорной системы, ФЭ модулей и компонентов баланса системы (BoS). На рис. 2 показана схема плавучей ФЭ электростанции и ее основных компонентов. За исключением поплавков, требующих применения системы швартовки и якорной системы, остальная часть плавучей ФЭ электростанции практически не отличается от аналогичной наземной установки. Поплавки - это отсеки с высокой плавучестью, предназначенные для поддержания наплаву ФЭ модулей и опорных конструкций. Поплавки должны быть утилизируемыми, нетоксичными, стойкими к воздействию воды, солевой коррозии и УФ-излучению, что позволит обеспечить более 20 лет эксплуатации электростанции с минимальным ее воздействием на экосистему водного объекта. Существует три основных типа поплавков, используемых для плавучих ФЭ электростанций: [1] простые поплавки из полиэтилена высокой плотности (HDPE), [2] понтоны (или полые кубы) с металлическими фермами и [3] специальные мембраны или маты. Примеры таких типов поплавков показаны на рис. 3. Под швартовкой понимается любое постоянное сооружение, используемое для предотвращения свободного движения плавучей конструкции. Якорное крепление предназначено для фиксации положения плавучей конструкции относительно точки на дне или берегов водоема. Это позволяет предотвратить дрейф или пере-

мещение плавучей фотоэлектрической электростанции под действием ветровой нагрузки, волн и/или водных потоков, а также ее удары о берег при изменении уровня воды. Примеры трех основных типов якорного крепления показаны на рис. 4. Ряды ФЭ модулей, односторонние или двусторонние, вырабатывают электроэнергию постоянного тока, передаваемую в блок сумматора. Для первого и второго типа поплавков ФЭ модули обычно устанавливаются в рамах с двухсторонним остеклением, поскольку они более устойчивы к влажным условиям по сравнению с ФЭ модулями с односторонним остеклением. Однако реальные данные многолетних наблюдений, подтверждающие это общее предположение, отсутствуют. Для первого и второго типов поплавков предпочтительны ФЭ модули в рамах, поскольку они позволяют легко и при этом надежно установить ФЭ модули на плавучей конструкции. Безрамные ФЭ модули также применяются в ряде проектов, особенно при их установке на мембрану, поскольку ожидается, что в этом случае они будут меньше подвержены деградации (Potential Induced Degradation - PID). В большинстве установленных плавучих ФЭ модулей используется технология односторонних фотоэлектрических модулей на основе монокристаллического или поликристаллического кремния. Кроме того, в качестве инвертора, преобразующего произведенную электроэнергию в электроэнергию переменного тока, может использоваться как

РИСУНОК 2. Схема плавучей ФЭ электростанции и ее основных компонентов<sup>11</sup>.



центральный, так и струнный инвертор. Обычно для более крупных электростанций ПФЭ необходимо применять центральный инвертор (-ы) со степенью защиты IP67, устанавливаемый в плавучий кожух (и), тогда как большинство небольших ПФЭ имеют устанавливаемые поблизости наземные струнные инверторы. Для передачи выработанной энергии в ближайшую точку подключения к электросети используются подводные изолированные кабели (данная

энергия может быть далее передана в сеть или использована на месте). Поскольку плавучие ФЭ электростанции размещаются на открытых водоемах, они могут быть подвержены воздействию молний, поэтому для них обычно устанавливают молниезащиту, а в блоки сумматора включают ограничители перенапряжения. Плавучая ФЭ система может быть также оснащена, при необходимости, системами хранения энергии, например, аккумуляторами.

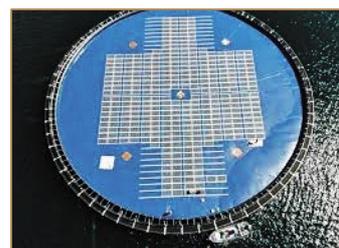
РИСУНОК 3.



a.



b.



c.

Различные плавучие конструкции, используемые для плавучих ФЭ электростанций: (а) ФЭ система малой мощности, установленная на плавучей конструкции из простых поплавков, (b) понтоны с металлическими конструкциями, используемых для поддержки рядов жестких ФЭ модулей, и (c) ФЭ модули, размещенные горизонтально на толстом эластичном мате. Вариант (а) имеет небольшой вес и большую площадь контакта воды и пластика. Это увеличивает вероятность сбрасывания нагрузки с пластика. Легкость поплавков делает их уязвимыми к большим ветровым нагрузкам при наличии волн<sup>12</sup>. При этом повышается вероятность того, что ветер начнет дуть под поплавками и станет их один за другим подбрасывать вверх. Вариант (а) имеет сложную систему швартовки, трудно настраиваемую для слежения за солнцем, а также для использования двусторонних ФЭ модулей. Тем не менее, это экономичное решение, позволяющее обеспечить массовое развертывание подобных систем. Например, этот тип поплавков используется на крупнейшей в Европе плавучей ФЭ системе (17 МВт) во Франции<sup>13</sup>. С другой стороны, вариант (b) хотя и имеет высокую стоимость и сложную конструкцию<sup>14</sup>, но позволяет осуществлять слежение за солнцем по вертикали, использовать двусторонние ФЭ модули и установки с большим наклоном. Например,

плавучая ФЭ электростанция мощностью ~ 450 кВт в Швейцарских Альпах<sup>15</sup> использует такую концепцию поплавков для двусторонних ФЭ модулей. Вариант (с) менее распространен по сравнению с двумя другими, но является хорошим выбором для регионов с нехваткой воды, так как резиновые маты могут полностью покрывать водоем. Поскольку мембраны в варианте (с) плавучих ФЭ систем полностью контактируют с водой, то ФЭ модули работают при более низкой температуре (выше КПД). Кроме того, плавучие платформы на основе мембран достаточно прочные, что позволяет выдерживать весовые нагрузки (при проведении установки и технического обслуживания), и в то же время достаточно гибкие, что дает возможность использовать их при наличии волн. Поэтому данный вариант является предпочтительным для прибрежных применений. Однако, вариант (с) отличается дорогостоящими процедурами установки, эксплуатации и технического обслуживания, а применение наклонных ФЭ модулей в этом случае невозможно. Плавучая ФЭ система мощностью 100 кВт (пик), установленная на западном побережье Норвегии, является хорошим примером использования таких плавучих установок<sup>16</sup>. ФЭ модули для этого типа можно также погружать в воду. Погруженные в воду ПФЭ в настоящее время не считаются приоритетным решением<sup>17</sup>.

12 – Bellini, 2019

13 – Floating solar: Europe's largest power plant is French, 2019

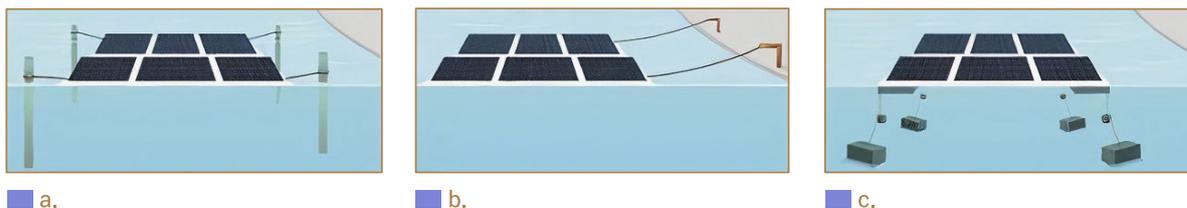
14 – Cazzaniga et al., 2018

15 – PV magazine, 2019

16 – Kyrholmen project

17 – World Bank, 2019

РИСУНОК 4.



Три распространенных типа якорного крепления плавучих фотоэлектрических электростанций: (а) крепление к палам, (b) береговое крепление и (с) донный якорь, который может быть

самопогружающимся или с постоянной фиксацией<sup>12</sup>. Тип якоря зависит от состояния грунта. Плавучая ФЭ электростанция может также использовать комбинацию разных типов крепления.

## ПОТЕНЦИАЛ И СТОИМОСТЬ

### ГЛОБАЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ПЛАВУЧИХ ФЭ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Можно легко предположить, что плавучие ФЭ системы обладают огромным потенциалом, просто зная, что 71% поверхности Земли покрыто водой. Однако современные технологии плавучих ФЭ систем недостаточно совершенны и не обеспечивают применение данных систем в суровых морских условиях, а если даже

и позволяют это, то требуют огромных дополнительных затрат. Однако, если только 10% искусственных водоемов (запруд и искусственных водохранилищ), покрыть плавучими ФЭ электростанциями, то глобальный потенциал ПФЭ составит 4 ТВт (пик)<sup>12</sup>. В таблице 1 показана доля каждого континента в данном потенциале.

ТАБЛИЦА 1. Доля континентов в глобальном потенциале ПФЭ (рассчитано по<sup>12</sup>).

| Континент        | Доля в глобальном потенциале ПФЭ (%)<br>(10% покрытие искусственных водоемов) |
|------------------|---|
| Африка           | 25  |
| Азия             | 28,6  |
| Европа           | 5   |
| Северная Америка | 31,1  |
| Океания          | 1,2   |
| Южная Америка    | 9   |

### СТОИМОСТЬ ПЛАВУЧИХ ФЭ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Основное различие между затратами на установку плавучей ФЭ системы и наземной ФЭ системы заключается в наличии плавучей конструкции, системы швартовки и якорной системы, а также в прокладке кабелей. Примеры реализации по всему миру проектов с мощностью не менее 1 МВт (пик) показывают, что капитальные затраты на ПФЭ составляют

от 0,8 до 1,2 \$/Вт (пик), что примерно на 18% больше, чем для обычных наземных ФЭ систем. Однако, эти дополнительные затраты компенсируются тем, что системы ПФЭ вырабатывают больше энергии из-за более низкой рабочей температуры и более благоприятного свободного горизонта для модулей. Имеющиеся к настоящему времени данные об

увеличении производительности систем ПФЭ различаются<sup>18/19</sup>. При этом система ПФЭв более теплом климате дает более высокий прирост производительности (~10%), в то время как в более холодных регионах прирост падает (~5%). В целом, в зависимости от региона установки, это приводит к повышению полной приведенной

стоимости электроэнергии (LCOE) для плавучих ФЭ электростанций соответственно на 3-4% и 8-9% по сравнению с наземными ФЭ электростанциями<sup>20</sup>. В Таблице 2 представлено процентное распределение стоимости компонентов системы для проекта ПФЭ мощностью порядка 1 МВт (пик).

ТАБЛИЦА 2. Доля компонентов ПФЭ в общем объеме капитальных затрат (рассчитано по<sup>15</sup>).

| Компонент ПФЭ   | Доля капитальных затрат (%) |
|---|-----------------------------|
| Модули  | 34,2                        |
| Инверторы   | 8,2                         |
| Система крепления (плавучая конструкция, система якорного крепления и швартовки)        | 20,5                        |
| BOS (кабели, распределительные коробки, распределительные щиты, трансформаторы и т. д.) | 17,8                        |
| Проектирование, строительство, испытания и ввод в эксплуатацию.                         | 19,2                        |

## ВЫЗОВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ

Электростанции ПФЭ обладают несколькими уникальными особенностями и функциями, которые могут как предоставить дополнительные возможности, так и привести

к появлению проблем. В приведенных далее таблицах представлен обзор возможностей и проблем, связанных с применением электростанций ПФЭ.

ТАБЛИЦА 3. Возможности, предоставляемые плавучими фотоэлектрическими электростанциями.

### Возможности

Экономия земли

Радиационный баланс

### Комментарии и/или аргументы

Использование водной поверхности, не приносящей дохода, позволяет сэкономить землю для развития других рынков, требующих использования земли, таких как жилищное строительство, сельское хозяйство, туризм, горнодобывающая промышленность и т. д. Это тривиальный факт, подтвержденный имеющимися источниками<sup>21/22/23/24</sup>.

Поскольку ФЭ модули предназначены для поглощения как можно большего количества света, они имеют очень низкую отражательную способность. Поэтому наземные ФЭ электростанции сильно изменяют отражательную способность земли, определяемую типом покрывающего ее материала (например, для растительности 20-30%, для пустыни 40-50%)<sup>25</sup>. Такой радиационный дисбаланс может вызвать проблемы, связанные с локальным изменением температуры и микроклимата. Однако для воды отражательная способность составляет ~6%<sup>26/27</sup>, что соответствует низкому значению данного показателя для ФЭ модулей, и, как следствие, их применение не приведет к появлению радиационного дисбаланса.

18 – Liu et al., 2018

19 – Ziar et al., 2020

20 – World Bank, 2019

21 – Rosa-Clot, 2020

22 – Trapani et al., 2015

23 – Sahu et al., 2016

24 – Ranjbaran et al., 2019

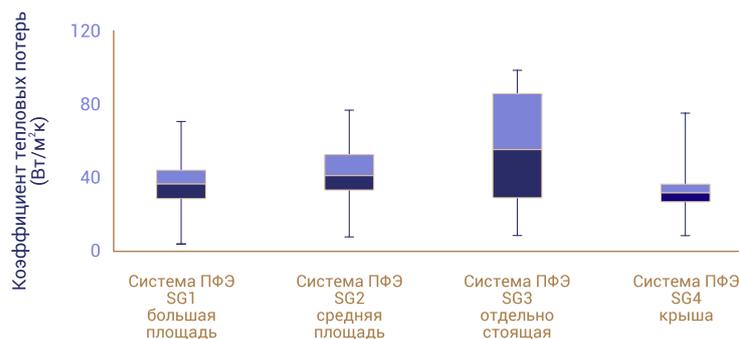
25 – Ziar et al., 2019

26 – Ziar et al., 2020

27 – Séférian et al., 2018

Повышенная  
эффективность

Основным механизмом охлаждения ФЭ модулей является конвекция<sup>28</sup>. При этом воздух над водой является более прохладным, в результате чего ФЭ модули с отрицательным температурным коэффициентом работают при более высоком напряжении, что приводит к повышению их КПД и увеличению общей выработки энергии. Исследования показали, что в тропическом климате, например, в Сингапуре разница температур плавучих ФЭ модулей (взвешенная по освещенности) может достигать 14,5°C, в то время как для морского климата (например, в Нидерландах) это значение снижается до 3,2°C. На этом графике показан коэффициент тепловых потерь систем ПФЭ в Сингапуре в сравнении с устанавливаемыми на крышах солнечными панелями<sup>29</sup>.



Снижение  
испарения воды

При установке на пресноводных водоемах плавучие ФЭ системы могут снизить скорость испарения воды. В некоторых странах, например, в Марокко, испарение воды может достигать 3 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>/год. Исследования, проведенные в Иордании, показали, что установка плавучих ФЭ модулей может снизить испарение воды на 60%. На приведенном рисунке показана платформа, использованная при проведении экспериментов в Иордании<sup>30</sup>.



Синергетический  
эффект при исполь-  
зовании совместно  
с гидроэлектростан-  
циями

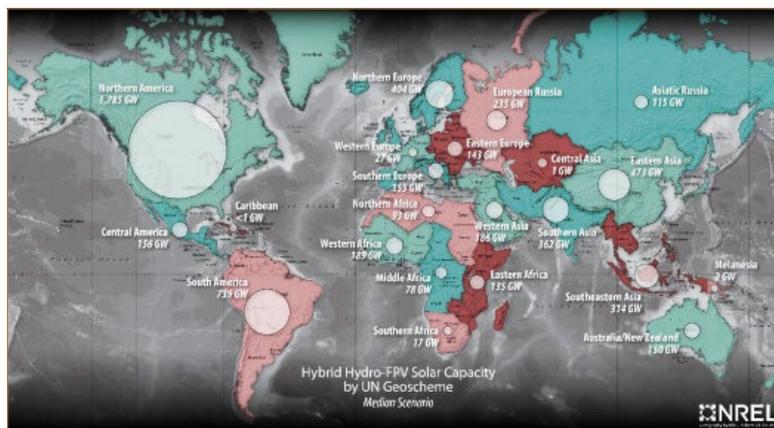
Графики годовой выработки электроэнергии гидроэлектростанциями (ГЭС) в основном определяется сезонным изменением водного баланса, который согласован с циклом солнечного излучения. Следовательно, ГЭС и ПФЭ могут работать совместно. При этом системы ПФЭ смогут действовать на поверхности спокойной воды за плотиной и использовать уже созданную электросетевую инфраструктуру, в то время, как эффективность ГЭС может быть повышена за счет меньшего испарения воды и использования

28 – Hasanuzzaman et al., 2016

29 – Dörenkämper et al., 2021

30 – Abdelal et al., 2021

профиля дополнительной выработки электроэнергии. Также при скоординированном управлении совместно работающих ГЭС и ПФЭ стабильная мощность может быть обеспечена без использования накопления электроэнергии. В ходе исследований было изучено 20 крупнейших ГЭС в мире и сделан вывод, что за счет покрытия 10% поверхности водохранилищ ГЭС производство энергии ГЭС увеличивается на 65%<sup>31</sup>. На приведенном рисунке показаны мощности гибридных ГЭС-ПФЭ по всему миру<sup>32</sup>.



Простая  
и эффективная  
очистка ФЭ модуля

Благодаря доступности воды, очистка модулей системы ПФЭ обходится дешевле и может выполняться чаще по сравнению с наземными ФЭ системами. На рисунке приведена фотография робота, осуществляющего чистку плавучей ФЭ системы, установленной в Испании<sup>33</sup>.



Повышение  
качества воды

В результате меньшей освещенности воды ограничивается рост водорослей и, следовательно, ожидается более высокое качество воды. Для оценки качества воды обычно измеряются такие показатели, как общий азот (TN), общий фосфор (TP), концентрация хлорофилла-а, общая концентрация фитопланктона (Chl-a) и хлорофилла цианобактерий, концентрация потенциально токсичных цианобактерий (cyan-Chl). На данный момент результаты исследований не показали заметного воздействия на качество воды в результате установки ПФЭ<sup>34</sup> или какого-либо ее улучшения (по результатам контроля концентрации Chl-a и нитратов)<sup>26</sup>. Для сохранения качества воды при одновременном

31 – Molina, 2021

32 – Lee et al., 2020

33 – Molina, 2021

34 – Ziar et al., 2020

снижении испарения в имеющихся источниках рекомендуется использовать покрытие воды в диапазоне от одной трети до половины поверхности<sup>35</sup>.

Более длительный срок службы

Хотя наземные ФЭ электростанции, размещенные в засушливых районах, более эффективны в результате высокой освещенности, но используемые для них модули испытывают воздействие более суровых термоциклов из-за высокой разницы дневной и ночной температуры. Это сильно влияет на срок службы модулей и вызывает такой эффект, как расслоение<sup>36</sup>. Однако, если ФЭ модули устанавливаются на воде, то в течение 24 часов они испытывают незначительные температурные изменения, поскольку вода имеет высокую теплоемкость. Это позволяет продлить срок службы ФЭ модулей.

Простота развертывания

Для поплавков первого и второго типов развертывание плавучих ФЭ систем может быть простым и быстрым. Ведущие производители поплавков сообщили, что при наличии цепочки поставок команда обученных монтажников может развернуть электростанцию мощностью от 500 кВт до 1 МВт за один день<sup>37</sup>. На рисунке показана бригада монтажников, осуществляющая быструю установку модульной ПФЭ системы на простых поплавках<sup>38</sup>.



ТАБЛИЦА 4. Вызовы, характерные для плавучих фотоэлектрических электростанций.

#### Вызов

Сложность швартовки и якорного крепления

#### Комментарии и/или аргументы

Выбор якорной системы и системы швартовки, а также их конструкции, определяется в зависимости от морфологии места установки. Ключевыми влияющими факторами являются: тип грунта на дне водоема, глубина водоема и максимальное изменение уровня воды. Также с увеличением мощности ПФЭ увеличивается количество швартовых тросов. На 1 МВт плавучих ФЭ систем требуется около 30 швартовых тросов<sup>39</sup>. Расчет сил, действующих на каждый швартовый трос при различных сценариях ветра и волн, является сложной инженерной задачей.

35 – Baradei, Sadeq, 2020

36 – Ferrara, Philipp, 2012

37 – World Bank, 2019

38 – Clean Technica, 2019

39 – Solarplaza Webinar, 2020

Например, на рисунке показана плавучая солнечная электростанция Anhui CECER в Китае (70 МВт), в которой используется донное крепление с помощью 1500 якорей<sup>40</sup>.



Скопление грязи и биообрастания, появление горячих точек

Хотя в пылевых засушливых регионах загрязнение является наиболее серьезным фактором для ФЭ электростанций, недавние исследования показали, что на плавучие ФЭ системы значительное влияние оказывают грязь и биообрастание. Одна из причин этого – птицы, часто посещающие плавучие ФЭ системы. Если ФЭ системы не очищать, то грязь и биообрастание приводят к появлению на них горячих точек, являющихся причиной повреждения ФЭ модулей<sup>41/42</sup>. Проведенные исследования показывают, что модули с большим наклоном реже загрязняются птицами, так как им труднее оставаться на них в течение длительного времени. На приведенном рисунке показано сильное биообрастание на ФЭ модулях и отражателях, а также горячие точки, появившиеся в результате загрязнения<sup>43/44</sup>.



Сложность технического обслуживания

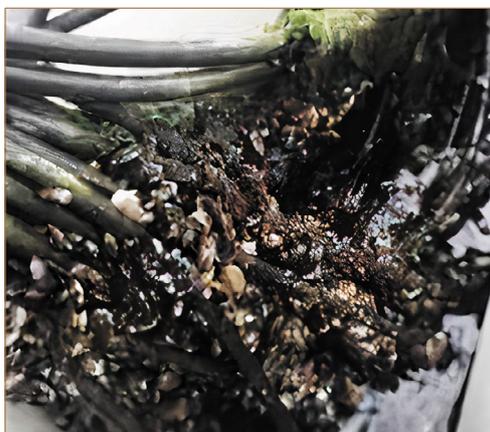
У плавучих ФЭ модулей есть некоторые преимущества с точки зрения технического обслуживания, например, более легкий доступ к используемой для чистки воде и меньший риск кражи или вандализма. Однако в целом процедура технического обслуживания, будь то профилактическое обслуживание или ремонтные работы, для плавучих ФЭ электростанций не так проста, как для наземных систем. Для плавучих ФЭ модулей сложнее получить доступ к компонентам системы, а также проводить их замену, которая может потребоваться чаще, поскольку влажная среда может ускорить коррозию, а компоненты с большой вероятностью будут иметь биообрастание<sup>45</sup>.

Воздействие  
на водную экосистему

Плавающие фотоэлектрические модули уменьшают проникновение света в воду, что приводит к снижению объема подводной биомассы и скорости фотосинтеза. Следовательно, плавающие ФЭ системы могут снизить концентрацию кислорода в воде, что может оказать влияние на рыб. Низкая концентрация кислорода (аноксия) может также увеличить выделение метана в мелководных озерах. Согласно проведенным исследованиям, периоды аноксии под плавающими ФЭ электростанциями встречаются более часто, чем на открытых водоемах<sup>38</sup>.

Меньший срок службы  
компонентов BOS

Поскольку кабели, распределительные коробки, предохранители и другие компоненты системы работают в очень влажных условиях, это может сказаться на сроке службы компонентов. Погружение кабелей и соединителей в воду может вызвать утечку токов и снизить сопротивление изоляции, а также привести к коррозии кабелей и, в конечном итоге, к нарушению энергоснабжения. На приведенном рисунке показано биообрастание на погруженных в воду разъемах и кабелях<sup>40</sup>.



Низкий показатель TRL  
для категории высоких  
волн

Хотя плавающие ФЭ электростанции, использующие мембраны в качестве плавучей платформы, предназначены для установки в прибрежных районах, уровень технологической готовности (TRL) плавучих ФЭ систем, относящихся к категории высоких волн, низкий. Все ПФЭ делятся на четыре категории. Первые три категории предназначены для внутренних водоемов (с незначительной высотой волн - 1 м и 2 м соответственно). Четвертая категория предназначена для открытого моря. Плавающие ФЭ системы этой категории должны выдерживать волны высотой до 10 метров<sup>46</sup>. Различные проекты, реализуемые в различных странах, показывают, что уровень технологической готовности выше для категорий с низкими волнами<sup>47</sup>.

Отсутствие специальных  
стандартов  
ПФЭ

Технологии плавучих ФЭ систем находятся пока на начальном этапе своего развития, поэтому специальные стандарты для них не разработаны. Стандарты, принятые для наземных ФЭ систем, не могут быть распространены на ПФЭ, поскольку ПФЭ используют плавучую платформу, а также системы якорного крепления и швартовки, размещаемые на поверхности воды.

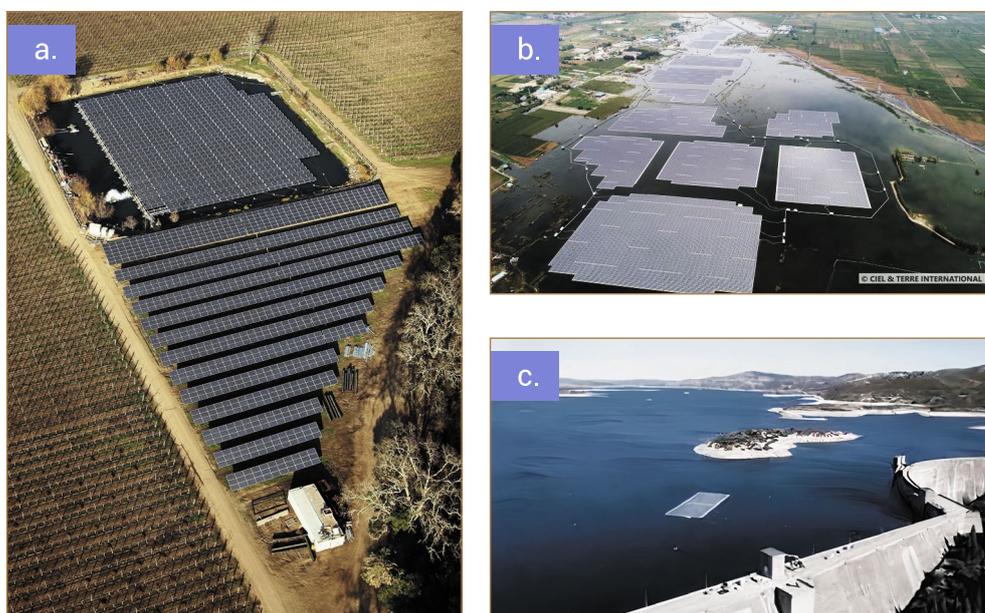
Разработка специальных стандартов и руководств по проектированию для ПФЭ будет способствовать тому, что система ПФЭ и ее компоненты смогут выдерживать суровые условия окружающей среды в течение 20 лет, сохраняя при этом высокое качество и не оказывая значительного воздействия на водную экосистему и биоразнообразие<sup>48</sup>.

## ЗНАЧИТЕЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ ПЛАВУЧИХ ФЭ СИСТЕМ, РЕАЛИЗУЕМЫЕ ПО ВСЕМУ МИРУ

Первая плавучая ФЭ система (20 кВт) была построена в 2007 году в Айти (Япония) для исследовательских целей, за ней последовала первая промышленная плавучая ФЭ электростанция (175 кВт), установленная в Калифорнии (США), в 2008 году<sup>49</sup>. Впоследствии было разработано множество плавучих ФЭ систем, в основном в странах с высокой плотностью населения и/или нехваткой земли<sup>50</sup>. В настоящее время в более чем 60 странах плавучие ФЭ электро-

станции либо установлены, либо планируются к установке в ближайшее время. К концу августа 2020 года общая установленная мощность ПФЭ в мире составила 2,6 ГВт (пик)<sup>51</sup>. На Рис. 5 показано несколько значительных систем ПФЭ, установленных по всему миру. Такие примеры являются практическим доказательством технологической осуществимости проектов плавучих ФЭ электростанций и показывают, что развитие плавучих ФЭ электростанций набирает темпы.

РИСУНОК 5.



Значительные плавучие ФЭ системы по всему миру: (а) первая промышленная плавучая ФЭ электростанция винодельни Far Niente в Калифорнии, США. Владельцы винодельни заключили в 2008 году контракт с SPG Solar на установку массива солнечных панелей мощностью 175 кВт (пик)<sup>52</sup> с дальнейшим

расширением до 400 кВт (пик)<sup>53</sup>, (b) крупнейшая на сегодняшний день в мире плавучая ФЭ электростанция мощностью 70 МВт (пик), установленная в бывшем угледобывающем районе провинции Аньхой, Китай<sup>54</sup>, (c) первая в мире плавучая ФЭ электростанция мощностью 220 кВт (пик), работающая совместно с гидро-

48 – Acharya et al., 2019

49 – Trapani et al., 2015

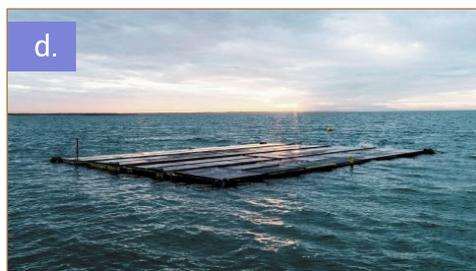
50 – Patil Desai Sujay et al., 2017

51 – Hauwitz, 2020

52 – Trapani et al., 2015

53 – The New York Times, 2011

54 – PV Tech, 2019



электростанцией и установленная на плотине гидроэлектростанции Альто-Рабагао в Португалии в 2016 году<sup>55</sup>, (d) Пилотный вариант первой прибрежной плавучей ФЭ электростанции мощностью 8,5 кВт (пик), установленной в 2019 году в Северном море, а затем модернизированной в 2020 году до 50 кВт (пик). Дальнейшее расширение до 1 МВт планируется по модульному принципу. Утверждается, что пилотный модуль был спроектирован так, чтобы выдерживать 13-метровую волну. Система пережила штормы Сиара и Деннис в феврале 2020 года<sup>56</sup>, (e) одинарная плавучая установка диаметром 50 м - плавучая ФЭ демонстрационная система мощностью 100 кВт (пик), установленная для рыбоводного хозяйства в Норвегии в 2018 году. Система, спроектированная для работы

в прибрежных водах и на искусственных водоемах, основана на встраивании ее в конструкцию лососевого хозяйства, предназначенного для открытого моря. Данная система использует кремниевые ФЭ модули, установленные на гибкой гидроэластичной плавучей мембране, (f) Одна из первых промышленных двухсторонних плавучих ФЭ электростанций мощностью ~ 450 кВт, установленная на искусственном озере Тулес в Швейцарских Альпах в 2019 году<sup>57</sup>, (g) Выдвижные вращающиеся плавучие ФЭ системы с возможностью их перемещения по поверхности водоема и слежения за солнцем по горизонтальной оси (при использовании как двухсторонних ФЭ модулей, так и рефлекторных установок). Пилотные системы были установлены в Нидерландах в 2019 году .

## ■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение плавучих ФЭ систем поможет решить конфликт по использованию поверхности земли между такими основными секторами мировой экономики, как производство продуктов питания, жилищное строительство и энергетика (с учетом быстрорастущего населения). Более того, плавучие фотоэлектрические системы практически не влияют на поверхностный радиационный баланс. Этим они отличаются от наземных ФЭ электростанций, поскольку их применение приводит к изменениям отражательной способности земли. Кроме того, плавучие ФЭ системы могут предотвратить испарение воды в засушливых регионах. Эти три ключевые особенности: (1) разрешение конфликта из-за использования поверхности

земли, (2) поддержание радиационного баланса на поверхности Земли и (3) сохранение ресурсов пресной воды, делают плавучие фотоэлектрические электростанции, наряду с другими их преимуществами, уникальным энергетическим решением на ближайшее десятилетие, а, возможно, и на более дальнюю перспективу. Работая над решением проблем, связанных с плавучими ФЭ электростанциями, инженерные и исследовательские сообщества, связанные с энергетикой, должны учитывать, что системы ПФЭ не являются конкурентами наземных ФЭ систем и могут рассматриваться как другая реализация фотоэлектрических модулей, представляющая ряд преимуществ и возможность их многоцелевого использования.

55 – Ciel Terre, 2021  
56 – Oceans of Energy, 2019  
57 – PV magazine, 2019

## ЛИТЕРАТУРА

1. World energy outlook 2020. 2020, International Energy Agency.
2. Yoshikawa, K., et al., Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%. 2017. 2(5): p. 1-8.
3. Richter, A., M. Hermle, and S.W.J.I.j.o.p. Glunz, Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells. 2013. 3(4): p. 1184-1191.
4. Ndiaye, A., et al., Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. 2013. 96: p. 140-151.
5. Ziar, H., et al., Photovoltaics: intelligent PV-based devices for energy and information applications. 2021. 14(1): p. 106-126.
6. Lee, N., et al., Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential. 2020. 162: p. 1415-1427.
7. Bellini, E., Japan's largest floating PV plant catches fire after Typhoon Faxai impact, in PV Magazine. 2019.
8. Floating solar: Europe's largest power plant is French, <https://www.planet.veolia.com/en/floating-solar-power-plant-piolenc-france>, 2019.
9. Cazzaniga, R., et al., Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. 81: p. 1730-1741.
10. Floating in the Alps, PV magazine, November 2019. <https://www.pv-magazine.com/2019/11/18/floating-in-the-alps/>.
11. <https://oceansun.no/project/kyrholmen/>.
12. Energy Sector Management Assistance Program, Solar Energy Research Institute of Singapore, Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report. 2019, World Bank.
13. Liu, H., et al., Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics. 2018. 26(12): p. 957-967.
14. Ziar, H., et al., Innovative floating bifacial photovoltaic solutions for inland water areas. 2020.
15. Rosa-Clot, M., Floating PV Plants. 2020: Academic Press.
16. Trapani, K., M.J.Pi.P.R. Redón Santafé, and Applications, A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013. 2015. 23(4): p. 524-532.
17. Sahu, A., et al., Floating photovoltaic power plant: A review. 2016. 66: p. 815-824.
18. Ranjbaran, P., et al., A review on floating photovoltaic (FPV) power generation units. 2019. 110: p. 332-347.
19. Ziar, H., et al., A comprehensive albedo model for solar energy applications: Geometric spectral albedo. 2019. 255: p. 113867.
20. Séférian, R., et al., An interactive ocean surface albedo scheme (OSAv1. 0): formulation and evaluation in ARPEGE-Climat (V6. 1) and LMDZ (V5A). 2018. 11(1): p. 321-338.
21. Hasanuzzaman, M., et al., Global advancement of cooling technologies for PV systems: a review. 2016. 137: p. 25-45.

22. Dörenkämper, M., et al., The cooling effect of floating PV in two different climate zones: A comparison of field test data from the Netherlands and Singapore. 2021. 214: p. 239-247.
23. Abdelal, Q.J.I.J.o.L.-C.T., Floating PV; an assessment of water quality and evaporation reduction in semi-arid regions. 2021.
24. Cazzaniga, R., et al., Integration of PV floating with hydroelectric power plants. 2019. 5(6): p. e01918.
25. MOLINA, P.S., Cleaning robot for floating PV. PV magazine, 2021 available online [<https://www.pv-magazine.com/2021/03/08/cleaning-robot-for-floating-pv/>].
26. Baradei, S.E. and M.A.J.W. Sadeq, Effect of solar canals on evaporation, water quality, and power production: An optimization study. 2020. 12(8): p. 2103.
27. Ferrara, C. and D.J.E.P. Philipp, Why do PV modules fail? 2012. 15: p. 379-387.
28. <https://cleantechnica.com/2019/04/22/holy-floating-solar-panels-batman-now-with-tracking/>.
29. The Floating Solar Plant Mooring Challenge, Solarplaza Webinar, Oct 2020, available online <https://www.youtube.com/watch?v=nDorBJnd0dA>. . 2020.
30. <https://www.ciel-et-terre.net/project/anhui-cecep-70005-kwp/>, Available online, March 2021.
31. Ziar, H., et al. Bypass diode characteristic effect on the behavior of solar PV array at shadow condition. in 2012 3rd Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC). 2012. IEEE.
32. Ziar, H., et al., Quantification of shading tolerability for photovoltaic modules. 2017. 7(5): p. 1390-1399.
33. <http://www.seris.nus.edu.sg/services/Thermographic-Analysis-of-PV-Systems.html>.
34. Energy Sector Management Assistance Program, Solar Energy Research Institute of Singapore, Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners. 2019, World Bank.
35. Folkerts, W., et al., Roadmap PV Systemen en Toepassingen. 2017.
36. UNIQUE RESEARCH FLOATING SOLAR PANELS HAS STARTED. <https://www.tno.nl/nl/aandachtsgebieden/energietransitie/roadmaps/naar-een-overvloed-aan-zonnestroom/zonne-energie-slim-integreren-in-onze-leefomgeving/uniek-onderzoek-drijvende-zonnepanelen/>. 2020.
37. Acharya, M., S.J.T.E. Devraj, and R.I.A.a.h.w.t.o.s.d.f.-s.-P-r. pdf, » Floating Solar Photovoltaic (FSPV): A Third Pillar to Solar PV Sector. 2019.
38. Patil Desai Sujay, S., et al., A review on floating solar photovoltaic power plants. 2017. 8(6): p. 789.
39. FRANK HAUGWITZ, SENIOR ADVISOR, and APRICUM, Floating solar PV gains global momentum, available online [<https://www.pv-magazine.com/2020/09/22/floating-solar-pv-gains-global-momentum/>]. PV magazine, 2020.
40. <https://www.nytimes.com/2011/04/20/business/energy-environment/20float.html>. 2011.
41. World's largest floating solar plant connected in China, Available online [March 2021]: <https://www.pv-tech.org/worlds-largest-floating-solar-plant-connected-in-china/>. 2019.
42. <https://www.ciel-et-terre.net/a-world-premiere-the-first-hybrid-fpv-and-hydroelectric-dam-power-plant-system/>, Available online, March 2021.
43. A world's first: offshore floating solar farm installed at the Dutch North Sea, Available online [Match 2021] <https://oceansofenergy.blue/2019/12/11/a-worlds-first-offshore-floating-solar-farm-installed-at-the-dutch-north-sea/>. 2019.

# ГОЛУБОЙ ВОДОРОД

**Альберто Абанадес**

Профессор Мадридского  
технического университета

## ВВЕДЕНИЕ

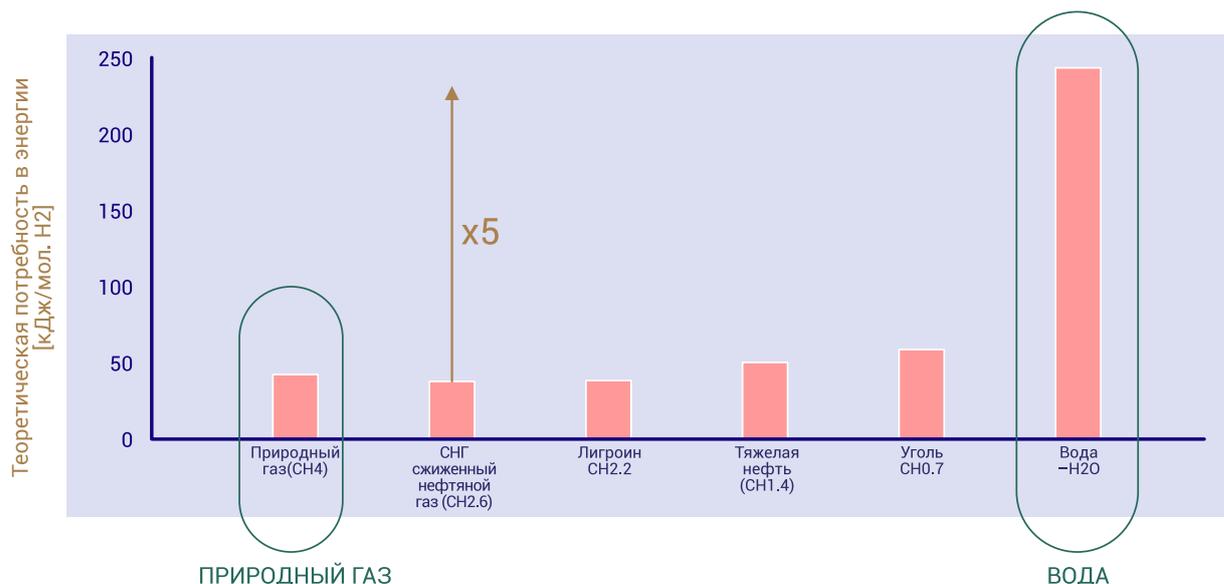
Переход к жизни в обществе без выбросов парниковых газов – одна из важнейших задач человечества, которая требует системных изменений в области получения и использования энергии, а также пересмотра подхода к переработке доступных природных ресурсов. Такие системные изменения следует развивать до парадигмы экономики замкнутого цикла материалов, когда не образуются конечные отходы, как это происходит в большинстве естественных сбалансированных безотходных экосистем.

В этом смысле одним из основополагающих направлений является водород, призванный сыграть важную роль в создании экологически устойчивого общества будущего. Водород может стать своего рода вектором молекулярной энергии, основным компонентом различных видов чистого топлива – от чистого водорода до элемента молекул углеводородов или аммиака, а также в качестве ценного промежуточного продукта или сырья, применяемого во многих произ-

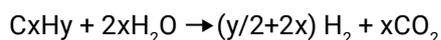
водственных процессах, например, в сталелитейной промышленности. Даже сейчас это важная составляющая таких процессов, как заводская нефтепереработка или производство удобрений.

Хотя водород является очень распространенным на нашей планете элементом, его молекула недоступна на Земле в изолированном виде. Использование водорода требует расщепления богатых водородом молекул, например, воды или углеводородов. Доступные в наше время технологии расщепления воды – электролиз или некоторые термохимические процессы – зачастую сталкиваются с такими проблемами, как потребность в энергии, предварительная очистка и доступность воды, а также экономия на масштабе. Энергия, необходимая для диссоциации воды или углеводородов, показана на рис.1. Такой способ производства водорода называется «зеленым водородом», поскольку здесь в процессе не участвует углерод, и  $\text{CO}_2$  не образуется непосредственно.

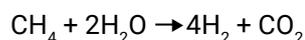
РИСУНОК 1. Потребность в тепловой энергии для производства водорода.



Другой способ получения водорода – разложение молекулы углеводорода посредством химических процессов, в большинстве случаев в сочетании с водой. Фактически,

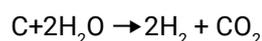


который, в случае риформинга метана ( $x=1, y=4$ ), выглядит следующим образом:



сегодня водород получают в основном путем парового риформинга природного газа и газификации угля, исходя из следующего общего баланса:

Для природного газа к балансу необходимо добавить такие компоненты, как этан ( $x = 2, y = 6$ ), пропан ( $x = 3, y = 8$ ),

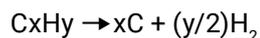


Эти процессы приводят к образованию  $CO_2$ , поскольку атом углерода непосредственно передается молекуле  $CO_2$ , чтобы произошло максимальное извле-

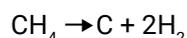
в соответствии с их мольной долей. Для газификации угля ( $y = 0, x = 1$ ) баланс составляет:

чение водорода из углеводорода и воды. Фактически, каждая молекула углерода теоретически может быть преобразована в  $CO_2$ .

Дополнительная группа процессов основана на пиролизе углеводорода в отсут-



Для пиролиза метана ( $x=1, y=4$ ) общий баланс выглядит следующим образом:



Неучастие кислорода в процессе, предотвращение образования  $CO_2$ , и при этом образование большого количества твердого углерода – на такое должен найтись рынок. В настоящее время такой рынок

в отсутствие кислорода по общему уравнению баланса:

невелик по сравнению с рынком энергии. Перед процессами производства водорода на основе углеводородов стоит задача включить в экономику замкнутого цикла либо  $CO_2$ , либо твердый углерод.

## «ГОЛУБОЙ» И «БИРЮЗОВЫЙ» ВОДОРОД

Производство водорода без выбросов CO<sub>2</sub> – ключевой аспект, которого необходимо добиться, чтобы данное направление деятельности что-то значило в будущем. Одним из способов является извлечение водорода из водных ресурсов с использованием электроэнергии из возобновляемых источников, «зеленый» водород. Другой альтернативой является усовершенствование существующих тепловых технологий (в настоящее время называемых «серым» водородом), которые полностью отлажены как базовый процесс извлечения водорода из углеводородов

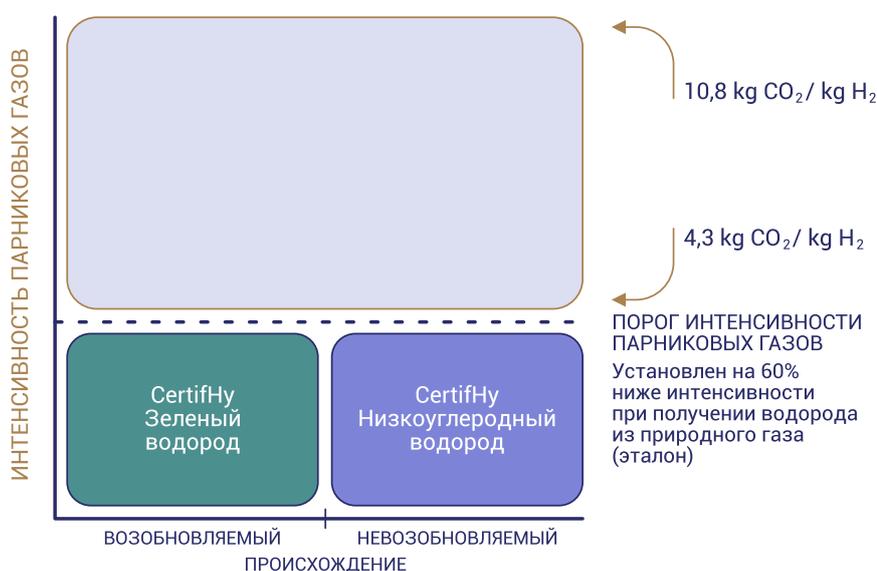
и воды. Эти процессы требуют внедрения технологий улавливания и связывания углерода (УСУ) для значительного сокращения выбросов CO<sub>2</sub>. С их помощью производят так называемый «голубой» водород. Еще одна

разрабатываемая технология – пиролиз углеводородов без прямого производства CO<sub>2</sub>, который начали называть «бирюзовым» водородом.

На практике, «окраску» водорода предлагается классифицировать в соответствии с результатами оценки жизненного цикла каждой технологии, как показано на рис. 2. Парниковый эквивалент воздействия на окружающую среду для сертификации «синего» или «зеленого» водорода в настоящее время установлен как 4,3 кг CO<sub>2</sub>/кг H<sub>2</sub>, что соответствует 40% выбросов в процессе риформинга природного газа. Это число учитывает анализ от природных ресурсов потребления энергии до производства технологического оборудования и транспортировки исходных материалов. Конкретный перечень приведен в таблице ниже.

| Технология                              | Ресурс                           | Тип       |
|---|----------------------------------|-----------|
| Электролиз из возобновляемых источников | Вода                             | Зеленый   |
| Паровой риформинг + УСУ                 | Вода + ископаемые / углеводороды | Синий     |
| Газификация + УСУ                       | Вода + ископаемые / углеводороды | Синий     |
| Пиролиз                                 | Ископаемые / углеводороды        | Бирюзовый |

РИСУНОК 2. Классификация «окраски» водорода по углеродному следу. (<https://www.certifhy.eu/>).

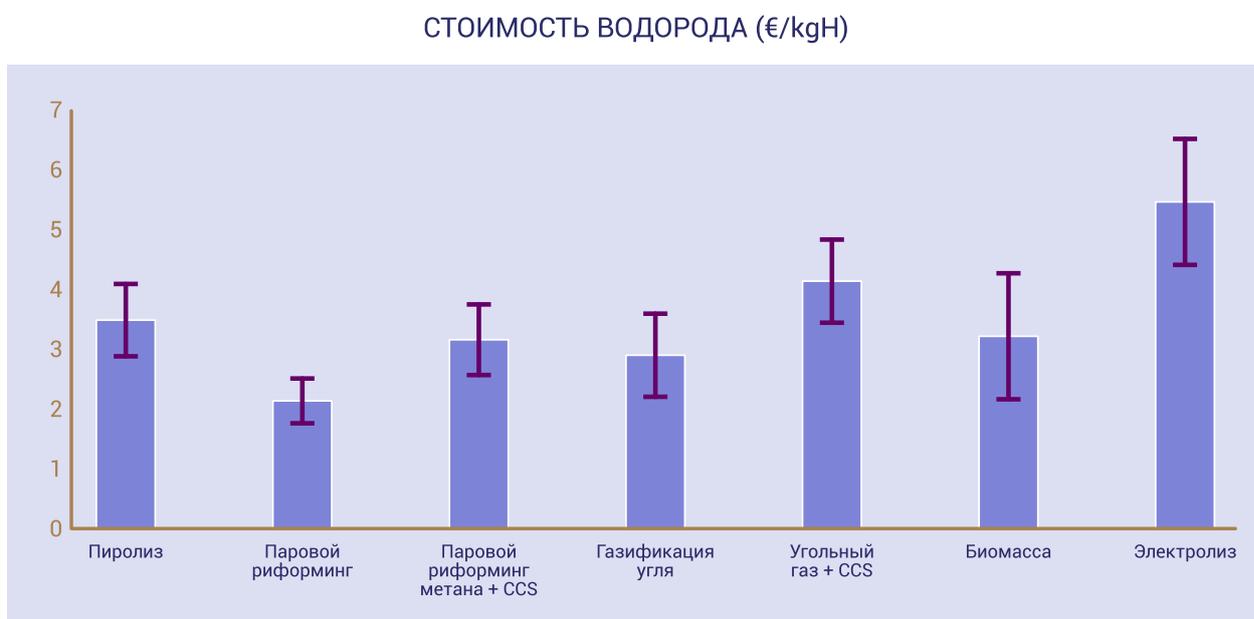


## ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСУ (УЛАВЛИВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ УГЛЕРОДА)

В настоящее время очень большое количество водорода производится посредством тепловых процессов из ископаемых ресурсов, таких как природный газ или уголь. Химические процессы, такие как паровой риформинг или газификация угля, давно отработаны и интенсивно применяются в аммиачной и нефтегазоперерабатывающей промышленности, на которые приходится

более 90% мирового производства водорода [1]. Удельная стоимость водорода, получаемого при риформинге природного газа (SMR), является наиболее конкурентоспособной, как показано на рис. 3. Для активного использования водорода в качестве конечного энергоносителя потребуются большие объемы мощностей по производству водорода.

РИСУНОК 3. Стоимость водорода, полученного с помощью различных технологий производства.



Многие крупномасштабные проекты, например, проект H21 в Лидсе (<https://www.h21.green/>), предусматривают, что водород будет производиться путем парового риформинга природного газа, поскольку эта технология обеспечивает самую лучшую экономию на производстве больших объемов водорода. Как уже упоминалось, в ходе традиционных химических процессов, основанных на использовании углеводородов, выделяется CO<sub>2</sub>. Тем не менее, если включить в такие процессы методы улавливания CO<sub>2</sub>, их углеродный след снизится на 90% по сравнению с теми же процессами без УСУ. Конечно, это повысит стоимость примерно на

30%, но позволит сохранить конкурентоспособность данной технологии по сравнению с технологиями получения «зеленого» водорода новейшими методами электролиза.

Интеграция технологий улавливания и связывания углерода (УСУ) в крупномасштабное производство водорода потребует создания централизованных предприятий по производству и улавливанию водорода, а также инфраструктуры для транспортировки и хранения водорода и углекислого газа. Транспортировка водорода может осуществляться через существующую инфраструктуру транспортировки смешанного или чистого природного газа

(в самых перспективных схемах, таких, как «H21») после необходимой адаптации приборов и сетевого оборудования. Угле-

кислый газ может быть интегрирован с дополнительной транспортной инфраструктурой и хранилищами.

РИСУНОК 4. Схема получения «синего» водорода. Получено из [2].



Внедрение технологий улавливания углерода можно считать зрелым, уже широко применяемым в газоперерабатывающей промышленности, методом. Параллельно с этим, методы секвестрации для увеличения нефтеотдачи также можно считать зрелыми и готовыми к развертыванию. Основная проблема УСУ

может заключаться в необходимости наличия достаточных мощностей по связыванию, позволяющих управлять большими объемами CO<sub>2</sub>, которые будут производиться при развитии водородной экономики, а также в их сосуществовании со спросом со стороны других тепловых станций по всему миру.

## ПИРОЛИЗ МЕТАНА

Пиролиз — это расщепление молекул углеводородов на составляющие: твердый углерод и водород. В случае природного газа, представляющего собой готовый углево-

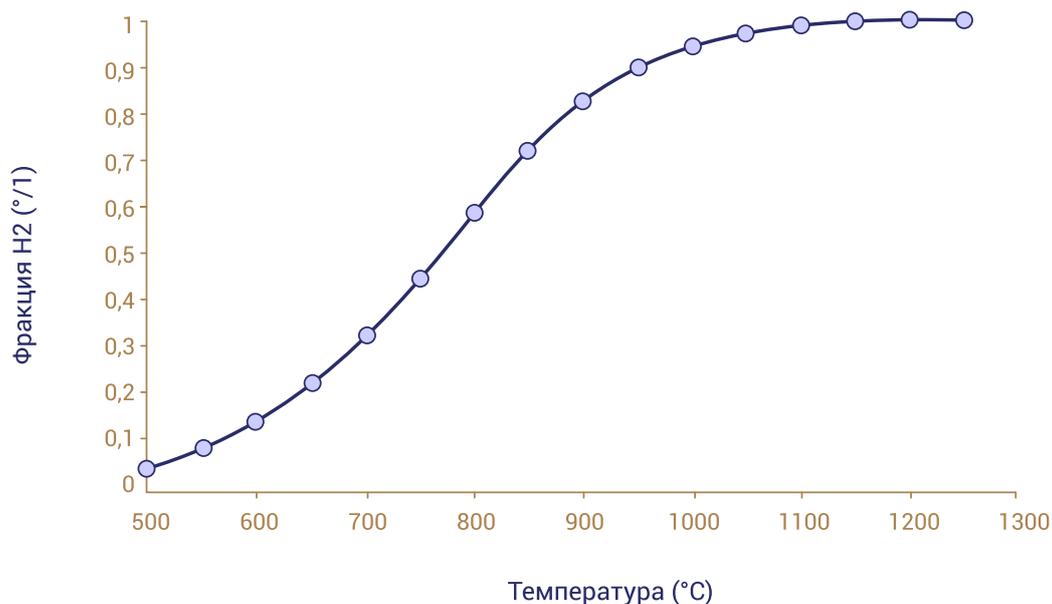
дород с более высоким соотношением H/C, основным соединением которого является метан, пиролиз описывается следующей общей реакцией:



Это технологическое решение, основанное на процессе преобразования ресурсов природного газа в чистый графитовый углерод и промышленный водород высокой степени чистоты.

Данной реакции посвящено множество работ, в том числе обширные обзоры [3], [4]. Для запуска разложения метана требуются

температуры выше 500°C, что позволяет достичь высоких степеней конверсии, превышающих 1100°C. Использование катализаторов снижает температуру реакции для высоких скоростей преобразования [5] [6]. Зависимость показателей конверсии от температуры для данной реакции представлена на рис. 5.

РИСУНОК 5. Равновесная конверсия  $H_2$  путем пиролиза метана.

Технологический статус пиролиза находится в стадии разработки. Существует реальная возможность добиться более широкого применения данной технологии и повы-

сить ее коммерческую доступность в течение ближайших 10 лет. Для достижения этой цели используются несколько различных методов; они кратко изложены в таблице ниже.

| Технология  | Преимущества   | Недостатки                                  |
|---|--|---|
| <b>Плазменная дуга (+СВЧ излучение)</b>                       | Гибкие реакторы  | Низкая энергоэффективность (электричество)  |
|   | Известная технология                                   | Ограниченная масштабируемость               |
| <b>Термокаталитический метод</b>                              | Более низкие температуры                               | Стоимость катализатора                      |
|   | Масштабируемость                                       | Деактивация катализатора                    |
|   |  | Воздействие катализатора и управление       |
| <b>Жидкие металлы</b>   | Хорошая теплопередача                                  | Коррозия реактора                           |
|   | Нет блокировки из-за твердого нагара                   | Металлический инвентарь                     |
|   | Хороший потенциал для выделения углерода               | Чистота углерода                            |
| <b>Расплавленные соли</b>                                     | Почти нет проблем с коррозией                          | Стабильность при высоких температурах       |
|   | Хорошая теплопередача                                  | Чистота углерода                            |
|   | Не образуются засоры из-за твердого нагара             |   |
| <b>Термохимические процессы на основе интермедиатов солей</b> | Не образуются засоры из-за отложений твердого углерода | Рациональное использование тепловой энергии |
|   | Разделение $H_2$ и $C$ в двух реакторах                | Вопросы безопасности ( $HCl$ )              |

Наиболее проработанным на сегодняшний день вариантом является использование плазменной дуги. Основным отраслевым ориентиром была разработка процесса Квэрнера CB&H [7]. Производственная мощность установки Квэрнера составляла 500 кг/ч чистого углерода и 2000 Нм<sup>3</sup>/ч водорода. Но в итоге фабрику закрыли. Были предложены другие практические аналоги, основанные на производстве углеродсодержащих аэрозолей с помощью плазменной технологии [8]. Главное преимущество данного процесса – высокий УТГ (уровень технологической готовности), но у него имеется и существенный недостаток: низкая энергоэффективность процесса. Дополнительные способы получения энергии основаны на применении микроволн, что делает возможным нетепловую обработку с использованием высокоэнергетических электронов для инициирования пиролиза метана и снижает энергетические потребности процесса [9, 10].

Прямой термический крекинг основан на термическом нагревании метана до высоких температур (выше 1300°C) для достижения почти полного развития реакции крекинга метана. Первоначально этот метод был предложен в качестве технологического средства получения водорода для производства чистого солнечного топлива. Жизнеспособность метода была доказана в лабораторных условиях, когда произошло практически полное превращение метана в водород [11]. Тем не менее, у данного метода, как выяснилось, существуют практические проблемы с масштабированием [12].

Для более низких температур альтернативой реакции пиролиза метана является катализируемая термическая декарбонизация. Подходящие катализаторы для металлических и углеродных катализаторов широко изучены [13], [14]. В этом случае проблема заключается в разработке устройства непрерывного действия, которое можно было бы использовать в промышленных масштабах. Не вдаваясь в подробности, в качестве катализатора реакции между 500 и 700°C, что является довольно удобной температурой для промышленного устройства, можно использовать никель. Однако же, в ходе процесса на вершине катализатора откладывается часть углерода, что приводит к деактивации.

Успешно применяются различные конструкции реакторов с чередованием циклов крекинга и регенерации в непрерывном режиме, в качестве параллельных реакторов с неподвижным слоем и реак-

торов с псевдооживленным слоем. Наиболее актуальной реализацией процесса каталитической термической декарбонизации была разработка и эксплуатация процесса HYPRO [15], основанного на реакторах с псевдооживленным слоем, с секциями разложения и регенерации. Однако же, расходы на эксплуатацию установки оказались высокими, что сделало ее неконкурентоспособной на тот момент времени. УТГ каталитического термического пиролиза также оказался высоким (около 7), но существенно повысить его экономическую жизнеспособность можно будет, лишь преодолев проблемы, связанные с управлением катализатором и его регенерацией.

В качестве технологии, которая может привести к практическому промышленному внедрению крекинга метана, было предложено разложение метана с помощью жидкого металла. Его основная характеристика – управление частицами углерода в реакторе за счет дифференциальной плотности и возможность масштабирования высокой теплопроводности жидкой среды. В качестве жидких сред для реакции предлагаются жидкое олово [16] или галлий [17], а также жидкие металлические сплавы, содержащие никель, с каталитическим эффектом [18]. Для определения масштабируемости этой концепции и нахождения компромисса между сложностью, производительностью и экономичностью процесса за счет использования различных жидких металлов, со встроенными катализаторами или без них потребуются дополнительная работа. С другой стороны, для оценки срока службы реакторов большой мощности необходимо принимать в расчет коррозию. УТГ данного типа реакторов составляет около 4. Ведутся исследования, могущие позволить достичь УТГ 5.

Расплавленные соли [19] – еще одна жидкая среда, весьма напоминающая жидкие металлы в некоторых концептуальных аспектах, но с некоторыми отличиями. Поскольку молекула соли более сложна, понадобится изучить долговременную стабильность данного носителя при высоких температурах и в качестве реакционной среды. Преимуществом является тот факт, что некоторые расплавленные соли можно использовать в качестве среды для переноса углерода из реактора.

Некоторые другие концепции основаны на концепции химического закливания, вызывающего пиролиз метана за счет присутствия некоторых промежуточных соединений [20]. Эти методы находятся на первичной стадии разработки.

## ■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Водород призван играть очень важную роль в отказе от использования углеводородов в энергетике. Задача огромна: предстоит перейти к массовому использованию водорода без образования  $\text{CO}_2$ . «Зеленый» водород должен продемонстрировать свою экономическую жизнеспособность в очень больших масштабах, что является одним из вариантов в будущем. «Серый» водород (риформинг природного газа и газификация угля) коммерчески доступен, но, поскольку в ходе этих процессов выделяется  $\text{CO}_2$ , в долгосрочной перспективе от него придется отказаться. Решение этой дилеммы означало бы настоящий прорыв на ближайшие десятилетия.

Возможны два варианта развития декарбонизации и использования углеводородов в течение следующих десятилетий (что позволит внедрить ископаемое сырье в экономику замкнутого цикла) в соответствии с требованиями контроля за выбросами парниковых газов: «синий» водород, применение методов улавливания и связывания углерода

(УСУ), и «бирюзовый» водород, получаемый на основе пиролиза. Первый уже доступен, а второму потребуется ещё несколько лет для завершения разработки, вероятно, меньше 10. Хотя «синий» водород уже готов к реализации, он имеет свои недостатки с точки зрения доступности участков секвестрации, обладает собственными техническими рисками и требует признания общественности. Преимущество пиролиза заключается в замене  $\text{CO}_2$  твердым углеродом. Это ценный материал, который в будущем будет легко интегрировать в экономику замкнутого цикла, с гораздо меньшими требованиями к инфраструктуре.

Развитие пиролиза метана значительно повысит вероятность энергетического перехода [21], обеспечив технологию, могущую в долгосрочной перспективе стать дополнением к электролизу и химическим процессам с улавливанием углерода, что в свою очередь сделает возможным внедрение углеводородных ресурсов в экономику замкнутого цикла, либо в химической промышленности, либо в схемах «Power-to-X».

## ЛИТЕРАТУРА

1. L.-C. Ma, B. Castro-Dominguez, N. K. Kazantzis, and Y. H. Ma, "Integration of membrane technology into hydrogen production plants with CO<sub>2</sub> capture: An economic performance assessment study," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 42, pp. 424–438, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.08.019>.
2. M. Noussan, P. P. Raimondi, R. Scita, and M. Hafner, "The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective," *Sustainability*, vol. 13, no. 1, 2021, doi: 10.3390/su13010298.
3. H. F. Abbas and W. M. A. Wan Daud, "Hydrogen production by methane decomposition: A review," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 1160–1190, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.036.
4. A. M. Amin, E. Croiset, and W. Epling, "Review of methane catalytic cracking for hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 2904–2935, 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.11.035.
5. Y. Li, B. Zhang, X. Xie, J. Liu, Y. Xu, and W. Shen, "Novel Ni catalysts for methane decomposition to hydrogen and carbon nanofibers," *J. Catal.*, vol. 238, no. 2, pp. 412–424, 2006, doi: 10.1016/j.jcat.2005.12.027.
6. G. Maag, G. Zanganeh, and A. Steinfeld, "Solar thermal cracking of methane in a particle-flow reactor for the co-production of hydrogen and carbon," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 18, pp. 7676–7685, Sep. 2009, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2009.07.037.
7. B. Gaudernack and S. Lynum, "Hydrogen from natural gas without release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 23, no. 12, pp. 1087–1093, 1998, doi: 10.1016/S0360-3199(98)00004-4.
8. N. Muradov, F. Smith, G. Bockerman, and K. Scammon, "Thermocatalytic decomposition of natural gas over plasma-generated carbon aerosols for sustainable production of hydrogen and carbon," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 365, no. 2, pp. 292–300, 2009, doi: 10.1016/j.apcata.2009.06.031.
9. N. Z. Muradov and T. N. Veziroğlu, "'Green' path from fossil-based to hydrogen economy: An overview of carbon-neutral technologies," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 23, pp. 6804–6839, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.08.054>.
10. R. Vander Wal, A. Sengupta, E. Musselman, and G. Skoptsov, "Microwave-Driven Plasma-Mediated Methane Cracking: Product Carbon Characterization," *C*, vol. 4, no. 4, 2018, doi: 10.3390/c4040061.
11. A. Abánades et al., "Experimental analysis of direct thermal methane cracking," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 20, pp. 12877–12886, 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.07.081.
12. A. Abanades, C. Rubbia, D. S.- Energy, and undefined 2012, "Technological challenges for industrial development of hydrogen production based on methane cracking," Elsevier.
13. M. Pudukudy and Z. Yaakob, "Methane decomposition over Ni, Co and Fe based monometallic catalysts supported on sol gel derived SiO<sub>2</sub> microflakes," *Chem. Eng. J.*, vol. 262, pp. 1009–1021, 2015, doi: 10.1016/j.cej.2014.10.077.
14. J. A. Botas, D. P. Serrano, R. Guil-López, P. Pizarro, and G. Gómez, "Methane catalytic decomposition over ordered mesoporous carbons: A promising route for hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 18, pp. 9788–9794, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.10.031.

15. J. B. . S. N. . Poblentz, "HYPRO process," US3284161, 1966.
16. T. Geißler et al., "Hydrogen production via methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor with a packed bed," *Chem. Eng. J.*, vol. 299, pp. 192–200, 2016, doi: 10.1016/j.cej.2016.04.066.
17. B. J. Leal Pérez, J. A. Medrano Jiménez, R. Bhardwaj, E. Goetheer, M. van Sint Annaland, and F. Gallucci, "Methane pyrolysis in a molten gallium bubble column reactor for sustainable hydrogen production: Proof of concept & techno-economic assessment," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 7, pp. 4917–4935, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.079>.
18. D. C. Upham et al., "Catalytic molten metals for the direct conversion of methane to hydrogen and separable carbon," *Science (80-. )*, vol. 358, no. 6365, pp. 917 LP – 921, Nov. 2017.
19. D. Kang, N. Rahimi, M. J. Gordon, H. Metiu, and E. W. McFarland, "Catalytic methane pyrolysis in molten MnCl<sub>2</sub>-KCl," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 254, pp. 659–666, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.APCATB.2019.05.026.
20. Z. Wang, W. Fan, G. Zhang, and S. Dong, "Exergy analysis of methane cracking thermally coupled with chemical looping combustion for hydrogen production," *Appl. Energy*, vol. 168, pp. 1–12, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.01.076.
21. L. Weger, A. Abánades, and T. Butler, "Methane cracking as a bridge technology to the hydrogen economy," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 720–731, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.029.

# КАТАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА УГОЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ПОЛЕЗНЫЕ ПРОДУКТЫ

**Исмагилов Зинфер Ришатович**

Директор «Институт углехимии  
и химического материаловедения»  
ФИЦ УУХ СО РАН

**Пармон Валентин Николаевич**

Научный руководитель Института  
катализа СО РАН

## РОЛЬ УГОЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ В СТРУКТУРЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ И ЭМИССИИ CO<sub>2</sub>

В настоящее время мы сталкиваемся со сценарием, при котором последствия глобального потепления быстро усиливаются, а поиск решений выходит за рамки простой технологической задачи [1]. Требуется более интегрированные решения, которые соединяют различные области и, таким образом, вызывают изменение модели жизни, что позволяет гарантировать будущее планеты и устойчивое развитие общества.

Эти новые подходы привели, например, к тому, что один из основных парниковых газов CO<sub>2</sub> больше не рассматривается в качестве отходов, а служит сырьем, из которого можно получить значительный набор продуктов с добавленной стоимостью. Это объясняет возобновившийся интерес к реакциям превращения CO<sub>2</sub>, которые до сих пор использовались в промышленных процессах только для переработки относительно небольших количеств этого соединения. В настоящее время нет крупномасштабного производства, которое могло бы работать без выбросов CO<sub>2</sub>. Это связано с тем, что экономическая рентабельность реакций переработки CO<sub>2</sub>

в большинстве случаев во многом зависит и от устойчивых поставок H<sub>2</sub>.

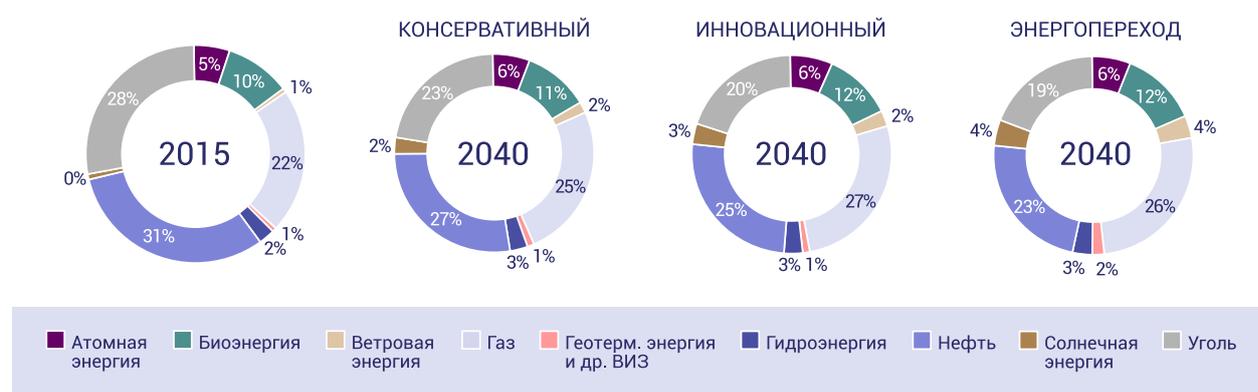
Глобальное потребление энергии резко возросло из-за увеличения населения и индустриализации, а антропогенные выбросы CO<sub>2</sub> быстро выросли, потому что основными энергетическими ресурсами, потребляемыми сегодня, являются ископаемые виды топлива. Возрастающая концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере ведет к глобальному потеплению и ряду экологических проблем. Средние температуры выросли на 0.8 ° C за последние 70 лет [1]. В виду этого были предложены международные усилия по сокращению выбросов CO<sub>2</sub>, такие как международное Парижское соглашение. В то же время, многие исследования были сосредоточены на разработке и применении возобновляемых источников энергии в качестве средства снижения зависимости от ископаемого топлива [2], а также технологий для улавливания и утилизации CO<sub>2</sub>.

Ископаемое топливо является основным источником энергетических ресурсов и соответственно выбросов углекислого газа. Ежедневно в мире потребляется ~22 млн т

угля, ~12 млн т нефти и ~10 млрд м<sup>3</sup> природного газа [3]. В результате деятельности человека ежегодно в атмосферу выбрасывается около 34 миллиардов тонн CO<sub>2</sub>, почти 80% из которых поступает непосредственно из ископаемого топлива.

Ожидается, что в ближайшие десятилетия уголь, нефть и газ сохранят доминирование в структуре мирового энергопотребления. Прогнозируется увеличение вклада нетопливных (безуглеродных) источников энергии, однако составит не более 30 % (рис. 1).

РИСУНОК 1. Структура потребления первичной энергии по видам топлива в мире в 2015 и 2040 гг. по различным сценариям развития энергетики [4].

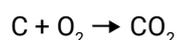


Уголь на протяжении многих десятилетий был и в ближайшее время останется одним из самых дешевых и доступных источников энергии [4]. В настоящее время доля угольной генерации в установленной мощности электростанций в России составляет около 22% (56.6 ГВт). В Сибирском федеральном округе

эта доля достигает 65%, в Дальневосточном федеральном округе – 93% [5]. Россия занимает 13-е место в мире по объемам выработки электрической энергии угольными тепловыми электростанциями, уступая Китаю, Индии, США, ЕС и другим государствам, энергосистемы которых основаны на угольной генерации [6].

Теплота сжигания угля зависит от его состава и для каменного угля равна ~30 МДж/кг. Как и при сгорании любого угле-

родсодержащего топлива, при сжигании угля образуется значительное количество углекислого газа – 3.7 тCO<sub>2</sub>/тС.



В таблице 1 представлены данные по удельному количеству CO<sub>2</sub> для различных видов угля без учета потери тепла при сжигании, которая может достигать 55–75%. Видно, что с увеличением содержания

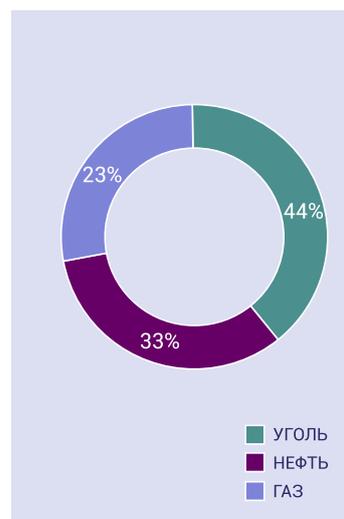
углерода в топливе углеродоемкость выработанной электроэнергии увеличивается. По сравнению с другими видами топлива, уголь характеризуется более высокими выбросами CO<sub>2</sub> (рис. 2).

ТАБЛИЦА 1. Удельные выбросы CO<sub>2</sub> от сжигания различных марок угля. По данным [7].

| Топливо            | Удельное содержание углерода в топливе, кг/кг | Удельное энерго содержание в топливе, кВт·ч/кг | Удельные выбросы CO <sub>2</sub> |                          |
|--------------------|---|--|----------------------------------|--------------------------|
|                    |   |  | кг <sub>CO2</sub> /кг            | кг <sub>CO2</sub> /кВт·ч |
| Антрацит           | 0.92  | 9.0  | 3.37                             | 0.37                     |
| Битуминозный уголь | 0.65  | 8.4  | 2.38                             | 0.28                     |
| Бурый уголь        | 0.30  | 3.9  | 1.10                             | 0.28                     |

РИСУНОК 2. Вклад типа топлива в выбросы CO<sub>2</sub> и количество CO<sub>2</sub>, выделяющегося на кВт·ч электроэнергии, получаемой при сжигании различных видов топлива [8].

УДЕЛЬНЫЙ ВЫБРОС УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ОТ РАЗЛИЧНОГО ВИДА ТОПЛИВА



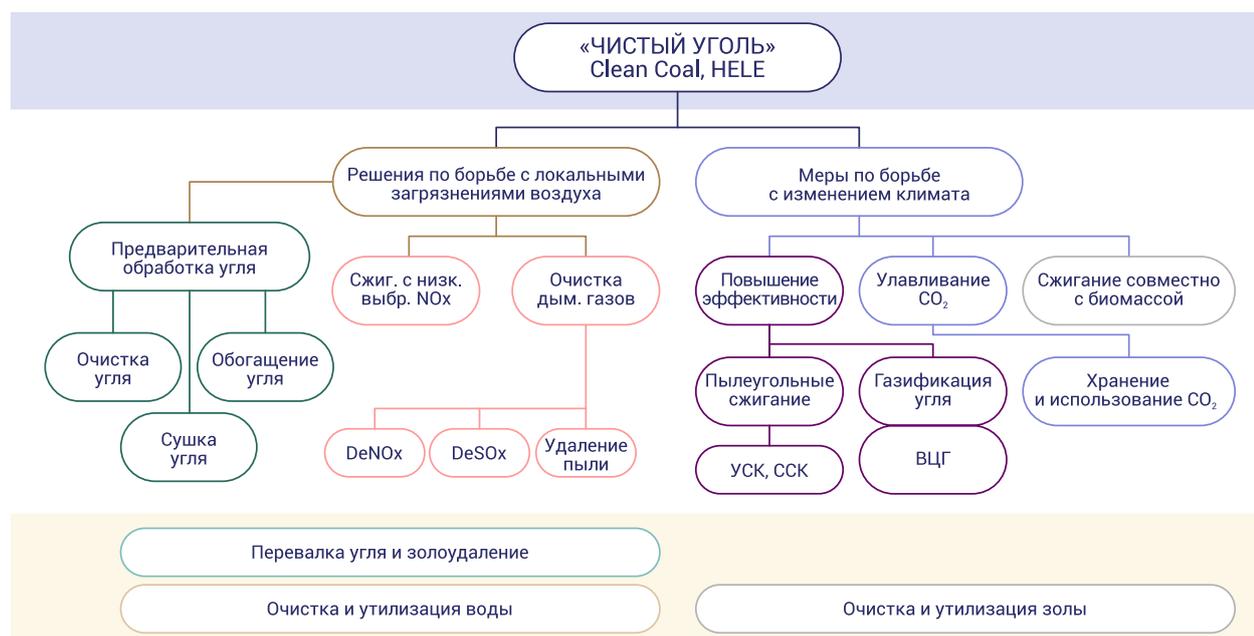
По состоянию на 2019 год Россия ответственна за выброс 4.71% парниковых газов, после Китая (30.34%), США (13.43%), ЕС27+Великобритании (8.69%) и Индии (6.83%) [9].

В совокупных выбросах с 1850 по 2007 годы топ стран выглядит следующим образом: 1. США: 28.8%, 2. Китай: 9.0%, 3. Россия: 8.0%, 4. Германия: 6.9%, 5. Великобритания: 5.8%, 6. Япония: 3.9%, 7. Франция: 2.8%, 8. Индия: 2.4%, 9. Канада: 2.2% и 10. Украина: 2.2% [10].

Для уменьшения вредных выбросов в атмосферу практически все страны с развитой экономикой и технологиями ставят задачу постепенного снижения доли угля в энерго-

балансе. С целью повышения эффективности и экологичности угольной генерации реализуются технологии, известные под общими понятиями «Clean Coal» или «High Efficiency Low Emissions» (HELE) [6]. Они включают в себя технологические решения по подавлению выбросов загрязнителей и очистке дымовых газов путем повышения качества сжигаемого угля, применения установок азото-, сероочистки и золоулавливающих фильтров, а также комплекс мероприятий по борьбе с изменением климата путем повышения эффективности угольной генерации, улавливания углекислого газа и совместного сжигания с биомассой (рис. 3).

РИСУНОК 3. Технологии Clean Coal или HELE (High Efficiency Low Emissions) [6].

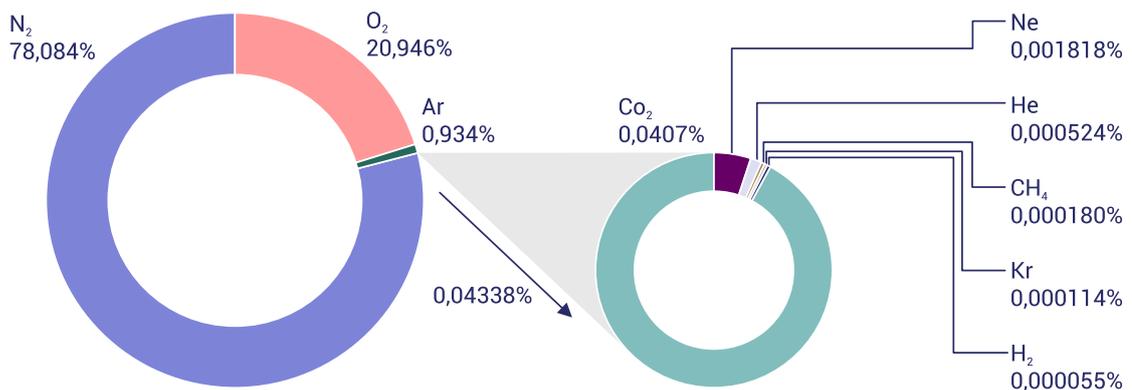


## ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ И CO<sub>2</sub>

Углекислый газ относится к парниковым газам (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O и O<sub>3</sub>), которые, хотя и составляют небольшую часть в составе

атмосферы, играют существенную роль в тепловом балансе Земли и формировании парникового эффекта (рис. 4).

РИСУНОК 4. Химический состав сухого воздуха [11]. Содержание воды в атмосфере (в виде водяных паров) колеблется от 0.2 до 2.5 об. %.



В последнее столетие наблюдается непрерывное увеличение концентрации CO<sub>2</sub>, которая на март 2021 года, по данным обсерватории Маун-Лоа на Гавайях (США), составляет 418 частей на миллион [12]. Это существенно выше средней концентрации CO<sub>2</sub> в доиндустриальную эпоху – 277 частей на миллион. При удвоении массы атмосферного углекислого газа в реальной атмосфере, которое при современной скорости роста произойдет примерно через 120 лет, ожидается рост глобальной температуры на 2.0 ± 0.3 К [13].

Углекислый газ признается мощным регулятором климата на Земле. По своим парниковым свойствам он находится на втором месте после

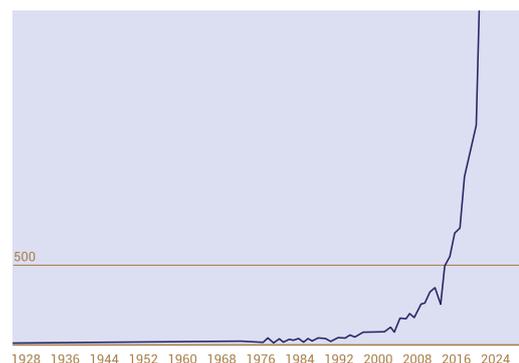
паров воды и именно с повышением концентрации CO<sub>2</sub> связывают усиление парникового эффекта. Это определяется особенностями поглощения энергии в инфракрасном спектре молекулой CO<sub>2</sub> [14–16].

Интерес к научным разработкам по сокращению выбросов углекислого газа путем переработки в полезные продукты постоянно нарастает. Издательство Elsevier в последние 20 лет наблюдает экспоненциальный рост публикаций по тематике улавливания и утилизации CO<sub>2</sub> в международных журналах по базе Scopus, и на 2021 год насчитывает более 12000 статей, из них более 4 тысяч публикаций из Китая и 2 тысяч из США, а из России пока менее 200 (рис. 5).

РИСУНОК 5. Публикационная активность по тематике утилизации CO<sub>2</sub> в международных журналах по базе Scopus.

Публикационная Активность: ПО УТИЛИЗАЦИИ CO<sub>2</sub>

приб. 12 600 документов



Актуальными являются две основные технологии: Carbon Capture and Utilization (CCU) и Carbon Capture and Storage (CCS),

каждая из которых на первой стадии предполагает улавливание и концентрирование  $\text{CO}_2$  (рис. 6, 7).

РИСУНОК 6. Стратегия снижения антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  [17].

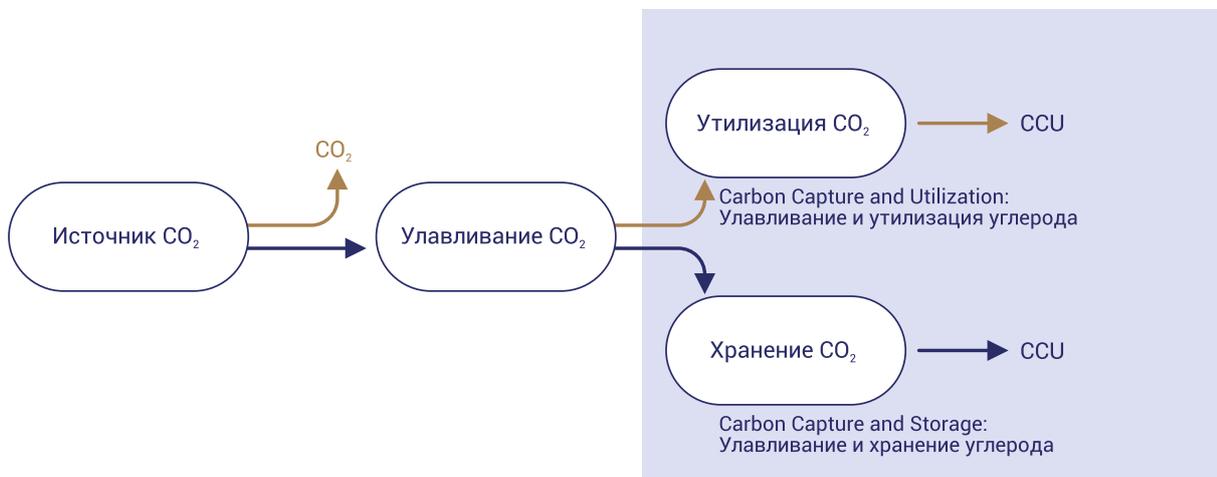
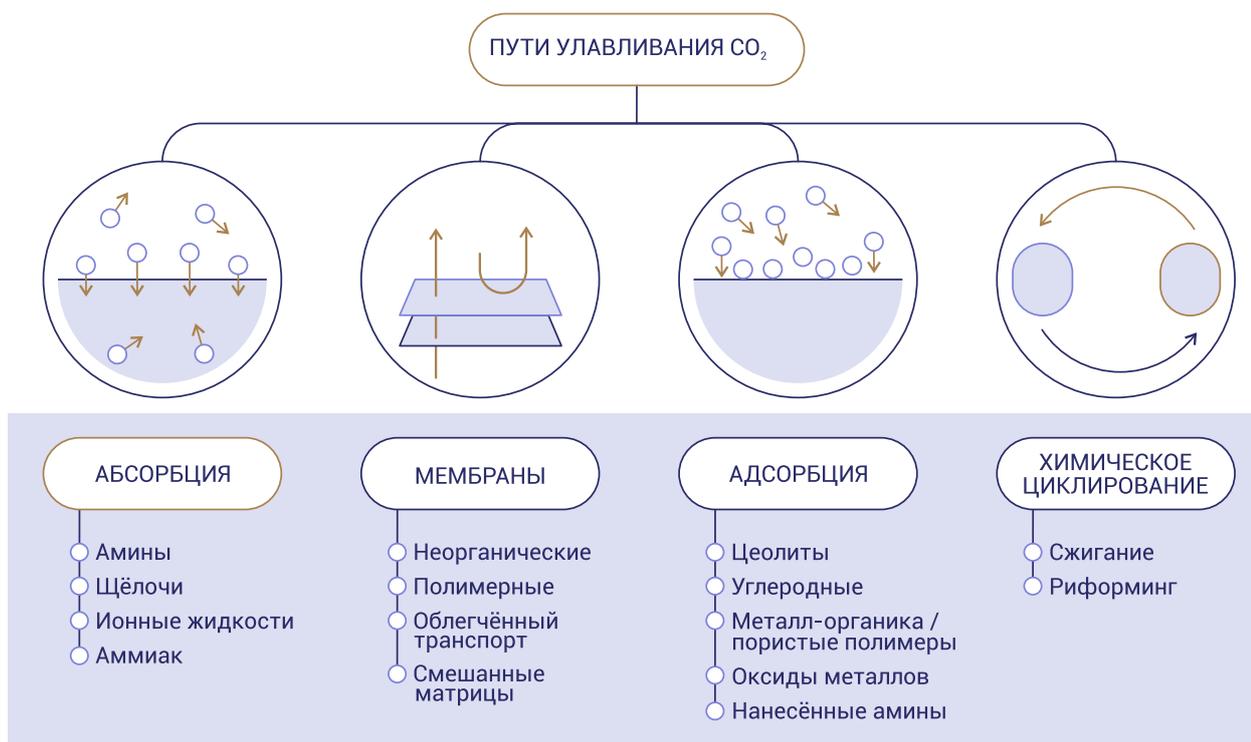


РИСУНОК 7. Технологии улавливания  $\text{CO}_2$  [18].



Сорбционные методы улавливания и концентрирования углекислого газа весьма привлекательны из-за их низкой стоимости и простоты технического решения. Предложены различные типы  $\text{CO}_2$ -адсорбентов, отличающиеся своим химическим составом, текстурой, морфологией и, соответственно, емкостью

и селективностью. Условно сорбенты можно разделить на три большие группы в зависимости от диапазона их рабочей температуры: низко-, средне- и высокотемпературные адсорбенты с температурой сорбции/десорбции  $T < 200^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C} < T < 400^\circ\text{C}$  и  $T > 400^\circ\text{C}$  соответственно [19].

### Исследования по сорбционным методам улавливания и концентрирования углекислого газа ведутся по следующим направлениям:

- Разработка методов получения эффективных жидких и твердых  $\text{CO}_2$ -сорбентов
- Модифицирование углеродных сорбентов
- Кинетика сорбции и емкость углеродных сорбентов
- Оптимизация условий сорбции  $\text{CO}_2$  активированными углями

Для химиков более привлекательной является технология утилизации, т.е. превращения в ценные химически продукты и материалы. После улавливания и концентрирования  $\text{CO}_2$  может служить исходным реагентом для производства многих химических продуктов. В настоящее время ежегодный объем его промышленного использования составляет порядка 120 млн т  $\text{CO}_2$ , что представляет собой менее 0.5% от общего объема ежегодных антропогенных выбросов 34 млрд т  $\text{CO}_2$ . В этой связи расширение области использования  $\text{CO}_2$  в качестве

исходного реагента для химических процессов является весьма актуальной задачей, направленной на решение вопросов экологической безопасности и рационального природопользования.

Генеральной линией химической утилизации  $\text{CO}_2$  является каталитическое превращение в продукты с высокой добавленной стоимостью. В настоящее время в промышленном масштабе освоены многотоннажные процессы получения мочевины, салициловой кислоты, этиленкарбоната и метанола.

## КАТАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПОЛЕЗНЫЕ ПРОДУКТЫ

Переработка  $\text{CO}_2$  в ценные продукты химической промышленности и топливо является одним из наиболее перспективных способов утилизации  $\text{CO}_2$ . Данный путь утилизации углекислого газа относят к циклическим технологиям, когда многократно повторяются этапы улавливания  $\text{CO}_2$ , его переработки в продукт и, затем, эмиссии  $\text{CO}_2$  при применении полученного продукта. Этот способ не обеспечивает полного удаления  $\text{CO}_2$  из атмосферы, но способствует сокращению использования ископаемого топлива. Объем конверсии  $\text{CO}_2$  в химические продукты (мочевина, поликарбонаты) и топливо (метанол, метан, диметилловый эфир, продукты

синтеза Фишера-Тропша) достигнет в 2050 году 0.3–0.6 и 1–4.2 млрд т  $\text{CO}_2$  в год соответственно, что составляет 4–14 % от современного уровня антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  – 34 млрд т в год [20]. Ожидается, что усовершенствование каталитических технологий позволит повысить энергоэффективность, увеличить перечень и снизить стоимость процессов получения полезных продуктов из  $\text{CO}_2$ .

Существует широкий ряд технологий переработки  $\text{CO}_2$  в полезные продукты, имеющих различные уровни разработки – промышленные процессы, пилотные проекты и лабораторные разработки (рис. 8).

Катализ – это ключевая технология, обеспечивающая эффективное и более устойчивое использование ресурсов, а также имеющая решающее значение для экономики многих стран. Это обеспечивает более низкие энергетические процессы, сокращение отходов и загрязнения и улучшенную селективность при производстве продуктов с добавленной стоимостью для всех секторов. Примерно в 90% всех химических процессов используются катализаторы с расчетным экономическим влиянием

указанных процессов на 30–40% мирового ВВП. Гетерогенные катализаторы уже являются ключевым компонентом этого сектора, от нефтехимических производств до каталитических конвертеров выхлопных газов ДВС.

По мере того, как мир движется к более устойчивым технологиям и сырью, чтобы обеспечить более чистое будущее, гетерогенные катализаторы будут играть еще более важную роль. Это открывает двери для нового поколения экологически безвредных катализаторов или

даже требует взглянуть в прошлое на их более традиционные виды.

Современный индустриальный мир немислим без катализаторов. Разработка химических продуктов в развитых индустриальных странах будет технически, экономически и экологически возможна только с помощью специ-

альных катализаторов. В настоящее время более 15 международных компаний производят около 100 основных типов твердых катализаторов.

В настоящее время из  $\text{CO}_2$  в промышленном масштабе производятся следующие химические продукты: мочевины [1], салициловая кислота [2], этиленкарбонат [3] и метанол [4] (рис. 9).

РИСУНОК 8. Продукция, получаемая при переработке  $\text{CO}_2$  [21].

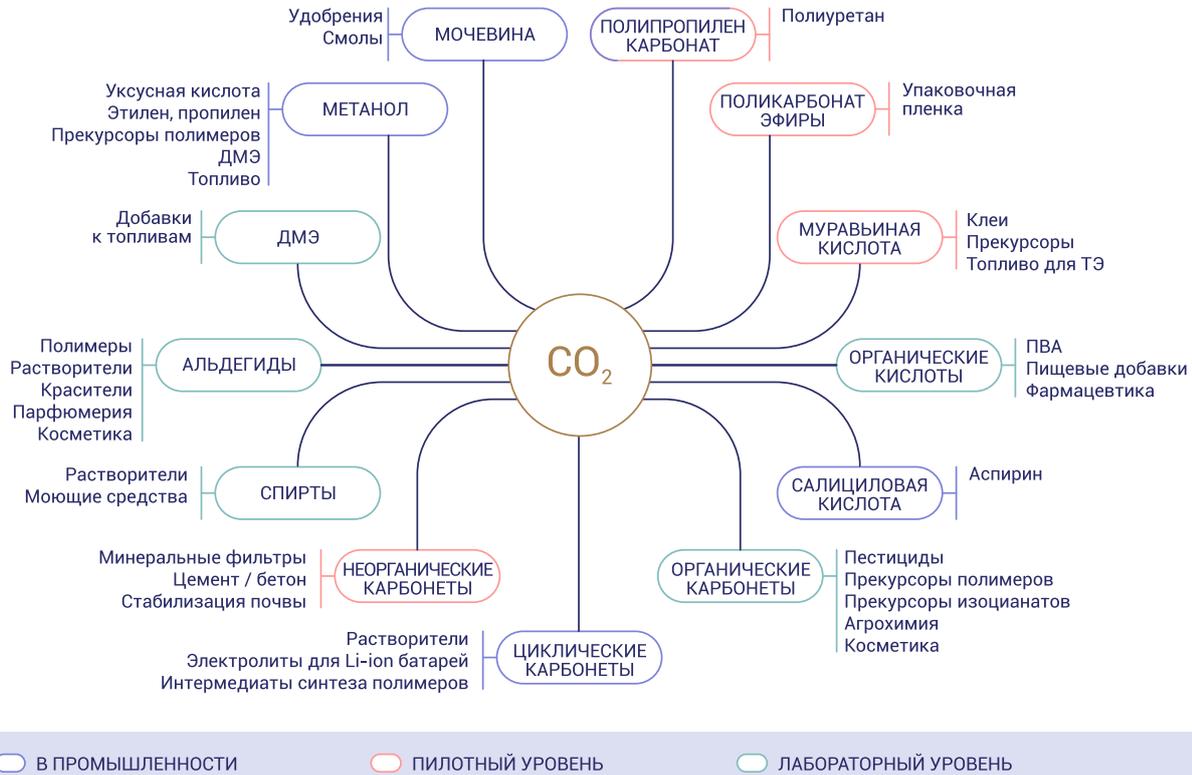


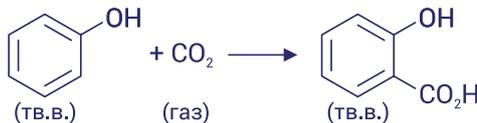
РИСУНОК 9. Промышленные процессы переработки  $\text{CO}_2$  [22].

1



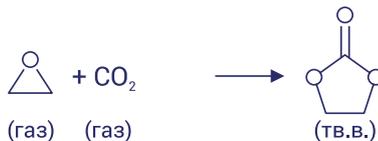
$\Delta H = -101 \text{ kJ mol}^{-1}$   
в промышленности (1922г.)

2



$\Delta H = -31 \text{ kJ mol}^{-1}$   
в промышленности (1890г.)

3



$\Delta H = -144 \text{ kJ mol}^{-1}$   
в промышленности (с 50-х г.)

4



$\Delta H = -130 \text{ kJ mol}^{-1}$   
в промышленности (2011г.)

## ПРОИЗВОДСТВО КАРБАМИДА (МОЧЕВИНЫ)

Мощность установок карбамида в СССР к концу 1972 года превысила 5 млн тонн в год и составляла более 30% от мировой. В 1970-х годах правительственным решением были закуплены комплекты оборудования агрегатов для производства карбамида производительностью 330 и 450 тыс. тонн в год по технологиям всех ведущих зарубежных фирм.

Аммиак и диоксид углерода превращаются в карбамид через карбамат аммония при давлении около 140 бар и температуре 180–185°C. Конверсия аммиака достигает 41%, углекислого газа – 60%. Непрореагировавшие аммиак и диоксид углерода поступают в стриппер, при этом  $\text{CO}_2$  выступает в роли стриппер-агента. После конденсации  $\text{CO}_2$  и  $\text{NH}_3$  идут на рецикл и возвращаются

в процесс синтеза. Теплота конденсации используется для выработки пара, поступающего в компрессор  $\text{CO}_2$ .

В мире существует более 5 совершенных технологий (Stamicarbon и др.) производства карбамида. Одна из новых — Urea 2000plus, успешно эксплуатируется на производстве карбамида мощностью 2700 тонн/сутки в Китае (CNOOC), запущенном в 2004 году, а также на производстве мощностью 3200 тонн/сутки в Катаре (Qafco IV), стартовавшем в 2005 году. На данный момент существуют также разработки мега-установок карбамида, мощностью до 5000 тонн/сутки. Новые энергосберегающие технологии используются при производстве на Газохимическом заводе ООО «Газпром нефтехим Салават» (рис. 10).

РИСУНОК 10. Производство карбамида на Газохимическом заводе ООО «Газпром нефтехим Салават» [23].



В Великом Новгороде в 2018 году введен в эксплуатацию новый агрегат по производству карбамида мощностью 600 тонн в сутки «Карбамид-600». Новое производство построено по технологии URECON®2006 (рис. 11). В настоящее время ПАО «Акрон» проводит модернизацию производства, что позволит увеличить

мощность с 600 до 2050 т/сутки [25]. Инвестиции в проект составят 85 млн долларов. После завершения проекта в 2021 году общая годовая мощность по выпуску карбамида вырастет на 0.5 млн т и достигнет 1.9 млн т, что сделает «Акрон» крупнейшей площадкой по выпуску карбамида не только в России, но и в Европе.

РИСУНОК 11. Производство карбамида по технологии URECON®2006 [24].



Использование углекислого газа в производстве этого продукта имеет очень хорошие перспективы расширения до многих миллионов тонн, поскольку химические свойства карбамида обуславливают широкое его применение в химической промышленности в синтезе карбамидо-альдегидных (в первую очередь карбамидо-формальдегидных) смол, широко используемых в качестве адгезивов, в производстве древесно-волоконистых плит (ДВП) и мебельном производстве. Производные мочевины – эффективные гербициды.

Часть производимого карбамида используется для производства меламина. Значительная его доля используется для нужд фармацевтической промышленности.

По своей природе карбамид – это минеральное удобрение, которое используется на всех видах почв под любые культуры. Такая форма удобрений обеспечивает значительную прибавку урожая сельскохозяйственных культур. По сравнению с другими азотными удобрениями карбамид содержит наибольшее количество азота (46.2%), что в основном и определяет экономическую целесообразность его использования для многих сельскохозяйственных культур на любых почвах.

В животноводстве мочевину добавляют в корма как заменитель белка, а в медицинской

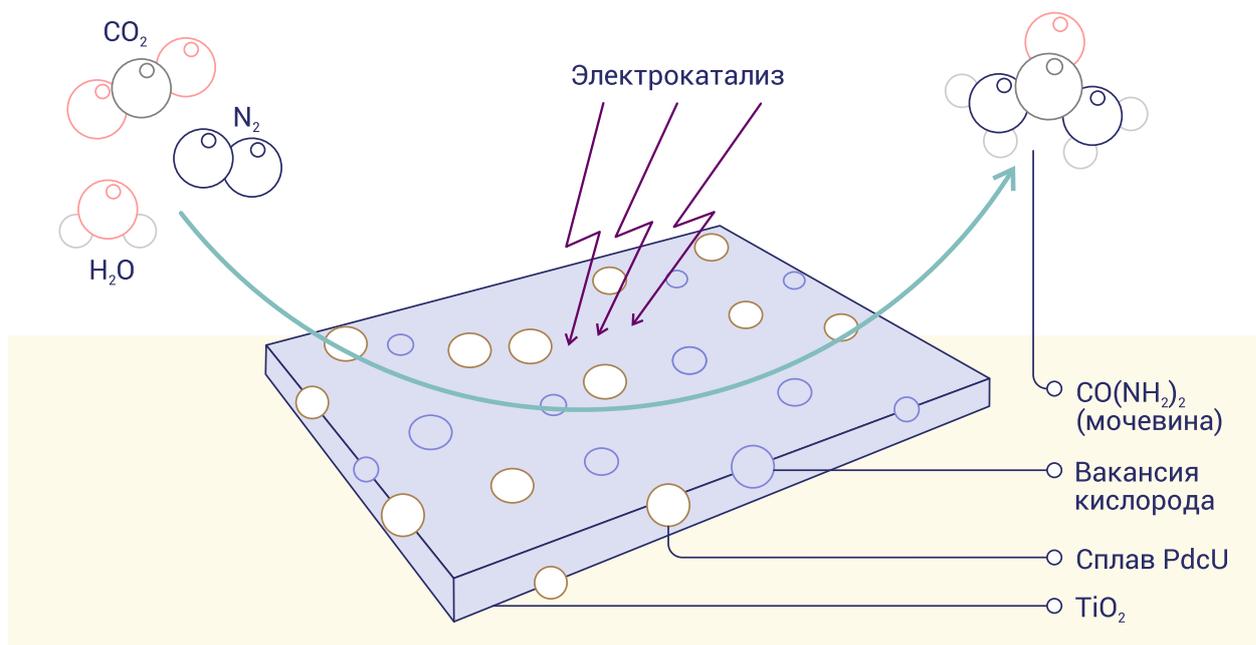
практике её используют как дегидратационное средство.

Использование карбамида для очистки выбросов ТЭЦ и мусоросжигательных установок в качестве восстановителя оксидов азота является новым многотоннажным направлением.

Для достижения соответствия состава выхлопных выбросов дизельных двигателей нормам Euro-4 и Euro-5 используется раствор карбамида под торговым названием AdBlue.

В целом, при производстве мочевины объемом ~200 млн т в год, удается утилизировать до 150 млн т  $\text{CO}_2$  в год. Процесс проводится при температуре 185°C и давлении 150 бар, конверсия  $\text{CO}_2$  достигает 85–90%. При оценке потенциала данного метода утилизации  $\text{CO}_2$  важно учитывать, что на 1 т мочевины расходуется 0.58 т аммиака, производимого по очень хорошо отработанному, но энерго- и углеродоемкому процессу Габера-Боша [26]. В этой связи ведутся исследования по разработке углерод-нейтральных технологий получения мочевины с использованием возобновляемых источников энергии. Так, например, осуществлен синтез мочевины из азота, углекислого газа и воды при комнатной температуре в присутствии электрокатализатора из наночастиц меди и палладия, нанесенных на диоксид титана (рис. 12) [27].

РИСУНОК 12. Схема электрокаталитического синтеза мочевины из азота, углекислого газа и воды при комнатной температуре [27].

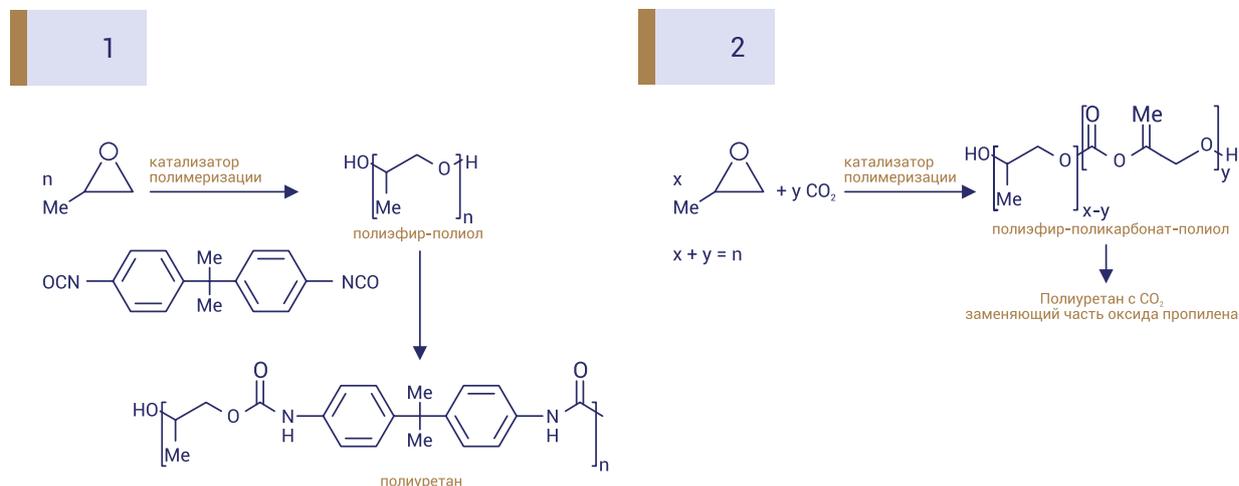


## СИНТЕЗ ПОЛИУРЕТАНОВ

Следующим важным процессом промышленного использования  $\text{CO}_2$  является синтез полиуретанов, в котором в качестве исходных веществ обычно используются полиолы и бис-изоцианаты [22]. В традиционном

процессе Байера полиол представляет собой простой полиэфир, полученный из эпоксидов, таких как оксид пропилена, сырьем для производства которого служит ископаемое топливо (рис. 13).

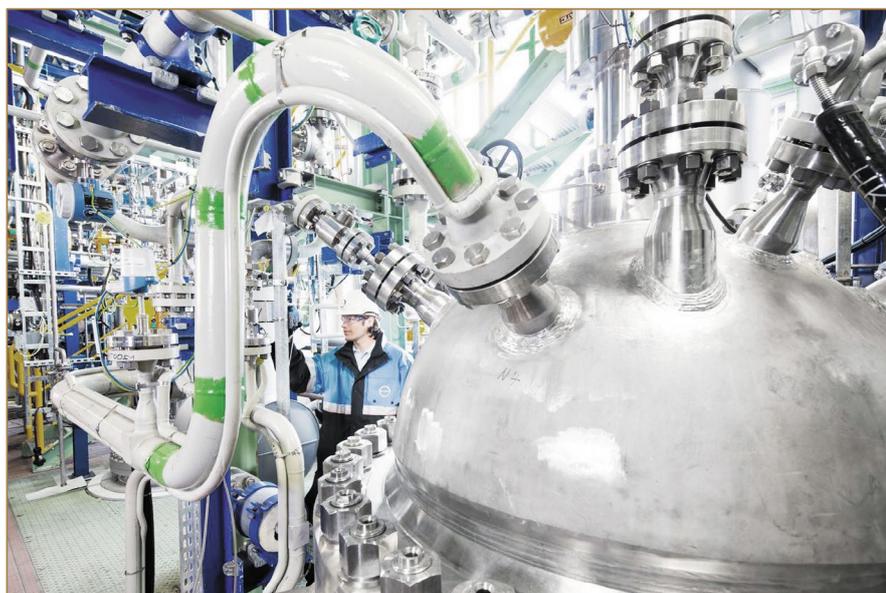
РИСУНОК 13. Схема синтеза полиуретана по традиционной технологии (1) и альтернативной технологии с утилизацией  $\text{CO}_2$  (2) [22].



В альтернативном процессе DREAM компании Covestro, в качестве полиола выступает поликарбонат-полиол, где часть пропиленоксида заменена углеродом углекислого газа. Мощность завода, запущенного в 2016 году компанией Covestro в Дормагене (Германия), составляет 5000 т полиэфиркарбонатного

полиола (рис. 14). Прямая сополимеризация  $\text{CO}_2$  с разными эпоксидами (оксид этилена, оксид пропилена, циклогексен оксид или изобутиленоксид) является перспективным способом синтеза алифатических поликарбонатов и поликарбонат эфиров для важного производства биоразлагаемых материалов.

РИСУНОК 14. Переработка  $\text{CO}_2$  в полимерную продукцию на заводе в Дормагене (Германия) [28]. Углекислый газ вместо сырой нефти: Covestro теперь включает 20 %  $\text{CO}_2$  в полимерный компонент.



Английская компания Ecopic предлагает энергосберегающую каталитическую технологию переработки  $\text{CO}_2$  в полиолы [29]. По

данным [20], к 2050 году объем переработки углекислого газа в полимерные продукты составит 10–50 млн т в год.

## САЛИЦИЛОВАЯ КИСЛОТА

Важным процессом использования  $\text{CO}_2$  в качестве химического реагента является производство салициловой кислоты по реакции Кольбе-Шмитта. На этом производ-

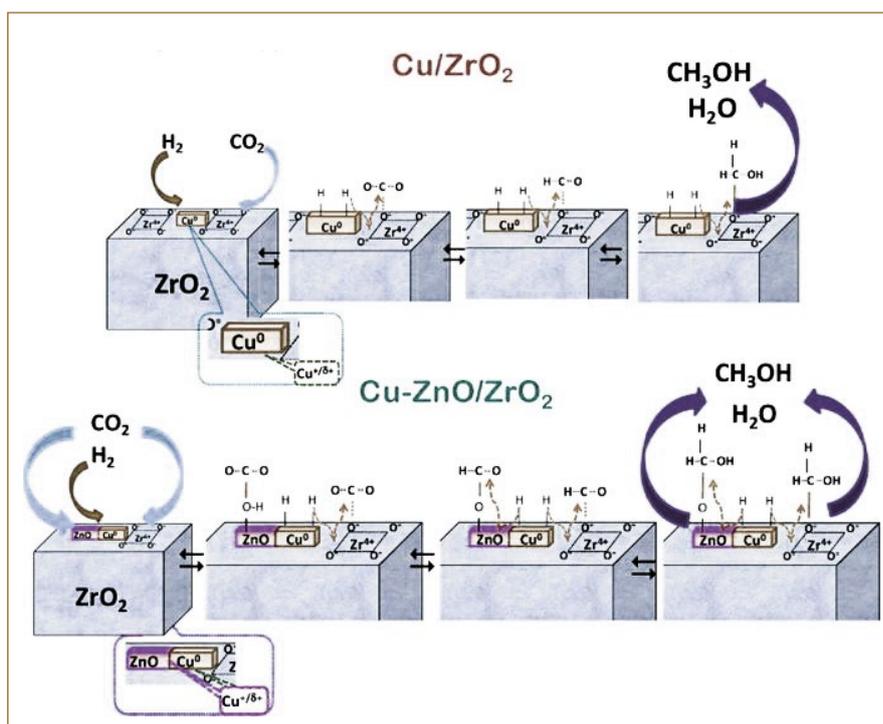
стве ежегодно перерабатывается 0.025 млн т  $\text{CO}_2$ , хотя это заметно ниже объемов его использования в синтезе мочевины или полиуретанов.

## МЕТАНОЛ

Метанол – важнейшее органическое вещество в химической промышленности с мировым годовым объемом производства ~150 млн тонн [30]. В настоящее время он преимущественно производится по каталитическим технологиям из природного газа и продуктов газификации угля. Однако, в рамках концепции устойчивого развития разрабатываются и альтернативные способы его получения с использованием  $\text{CO}_2$  [3, 31, 32]. Для синтеза метанола из углекислого газа и водорода применяют Cu-Zn-Zr-O-катализаторы, промотированные добавками различного состава (Ga, La, Ce, Cr, Si, B, Al, In) [3]. Считается [33], что в реакции участвуют два активных центра: адсорбция и диссоциация

водорода происходят на Cu-центрах, а адсорбция  $\text{CO}_2$  в виде бикарбоната – на  $\text{ZrO}_2$  (рис. 15). Путем спilloвера атомарный водород переходит с поверхности Cu на поверхность  $\text{ZrO}_2$ , где происходит гидрирование адсорбированных углерод и кислород содержащих частиц до метанола, который затем десорбируется с поверхности. Добавка в состав катализатора цинка улучшает дисперсность меди и обеспечивает дополнительные центры адсорбции для  $\text{CO}_2$ . Путем оптимизации условий приготовления катализатора и реакции достигнуты следующие показатели процесса при 220°C и 2.8 МПа: выход метанола – 12.8%, конверсия  $\text{CO}_2$  – 20.3%, селективность по метанолу – 63.2% [31].

РИСУНОК 15. Схема реакции получения метанола из  $\text{CO}_2$  в присутствии катализаторов Cu/ZrO<sub>2</sub> или Cu-ZnO/ZrO<sub>2</sub> [33].



Первая современная промышленная переработка  $\text{CO}_2$  в метанол осуществляется с 2012 года компанией Carbon Recycling International (CRI) в Исландии (рис. 16) [3, 34]. Мощность завода составляет 4000 т метанола/год. При этом объем вовлечение  $\text{CO}_2$  в данный процесс оценивается в 6000 т/год. Необходимый для

технологии водород производится электролизом воды с использованием недорогой и экологически чистой энергии гидротермальных источников. Компанией CRI разработан проект интегрированного завода по производству возобновляемого метанола производительностью 100 000 т / год (рис. 17) [36].

РИСУНОК 16. Переработка  $\text{CO}_2$  в метанол на заводе в Исландии [35].

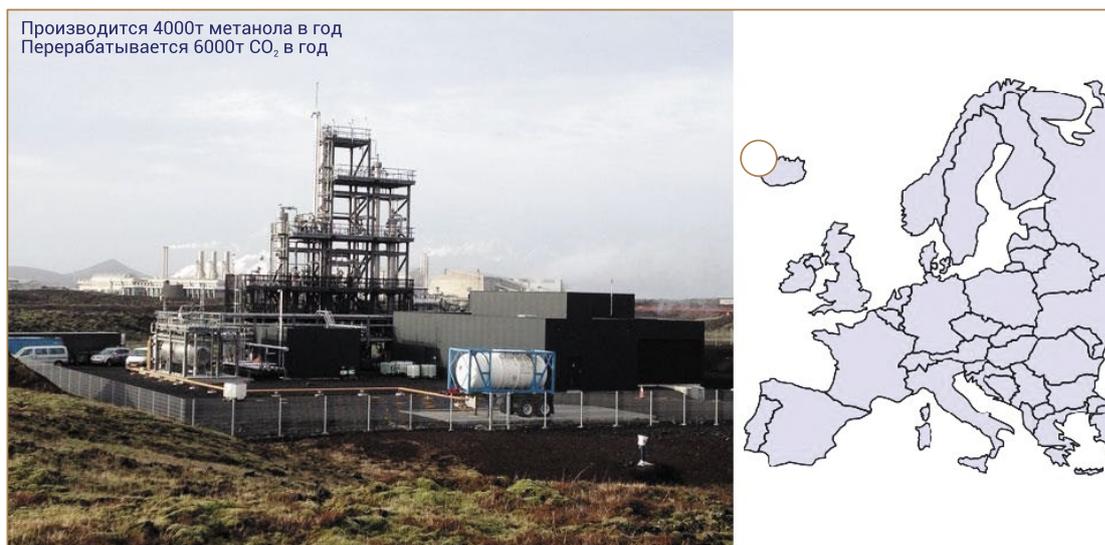


РИСУНОК 17. Трехмерная визуализация концепции интегрированного завода по переработке  $\text{CO}_2$  в метанол производительностью 100 000 т метанола/ год [36].



Другой интересный подход и технология переработки углекислого газа с использованием возобновляемых источников энергии Air to Fuels предложен компанией Canadian Carbon

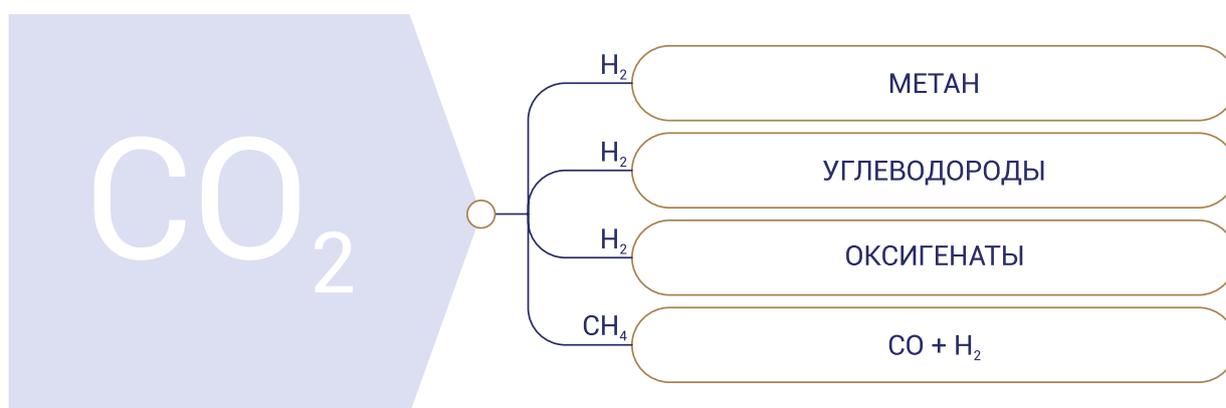
Engineering, которая предполагает производство углеродно-нейтрального жидкого топлива из атмосферного  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$ , полученного электролизом [37].

## ПРОЦЕССЫ ГИДРИРОВАНИЯ CO<sub>2</sub>

Следующую важную группу каталитических процессов переработки углекислого газа составляют процессы гидрирования с получением метана, высших углеводородов, оксигенатов или синтез-газа (рис. 18). Сейчас в химической промышленности низшие углеводороды получают из невозобновляемых

природных ресурсов – через дегидрирование легких алканов или крекинга нефти. Переработка CO<sub>2</sub> путем гидрирования открывает возможность производства этих ценных соединений из возобновляемого сырья, что снижает зависимость общества от ископаемых видов топлива.

РИСУНОК 18. Основные направления переработки CO<sub>2</sub> путем его гидрирования для получения метана, углеводородов, оксигенатов и синтез-газа.



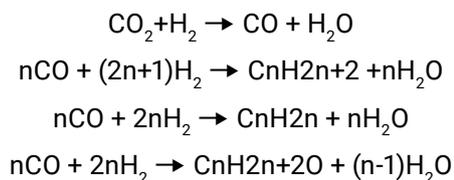
## РЕАКЦИЯ МЕТАНИРОВАНИЯ CO<sub>2</sub> (ПРОЦЕСС САБАТЬЕ)



В последнее время вызывает интерес как способ вовлечения и утилизации CO<sub>2</sub> в сочетании с синтезом веществ – энергоэффективных носителей для хранения и транспортировки возобновляемой электроэнергии. Данный процесс проводится при температуре 250–400°C и повышенном давлении с использованием катализаторов на основе Ni, Rh или Ru, обеспечивающих 100% конверсию CO<sub>2</sub> [26]. Фирмой Audi в 2013 году запущен завод Power-to-Gas (PtG) в Верльте (север Германии) по производству синтетического природного газа из CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>. Завод включает в себя

установку электролиза мощностью 6 МВт на возобновляемых источниках энергии для производства водорода и установку метанирования. Масштаб утилизации углекислого газа пока небольшой и составляет 2800 т CO<sub>2</sub> ежегодно [38].

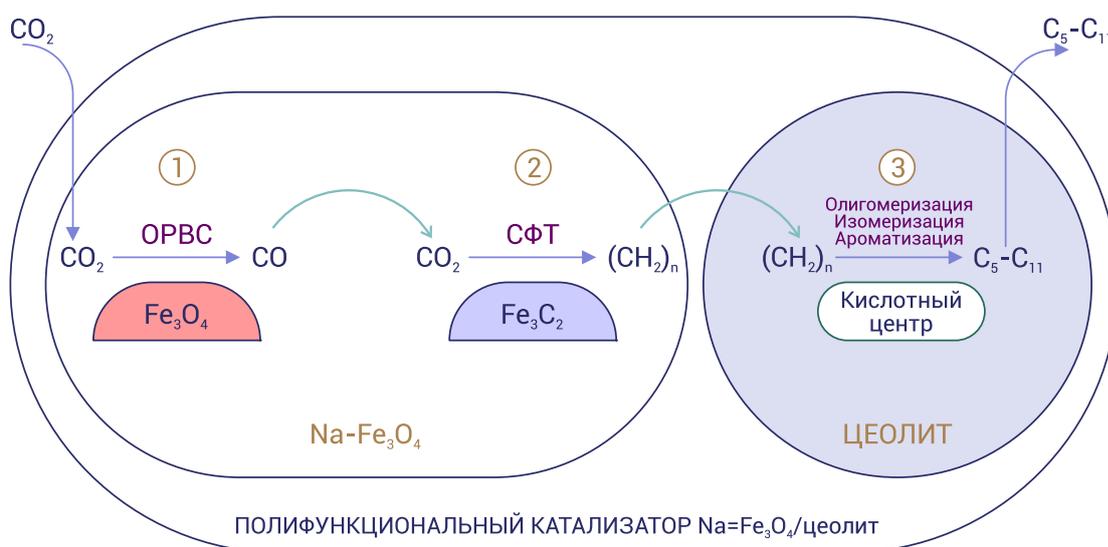
Весьма перспективным будет процесс с использованием CO<sub>2</sub> в синтезе C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>-углеводородов – модифицированный процесс синтеза Фишера-Тропша, который включает реакцию, обратную реакции конверсии CO водяным паром и последующее гидрирование CO с образованием углеводородов [26].



Комбинирование данного процесса с реакцией олигомеризации открывает возможность утилизации  $\text{CO}_2$  и получения углеводородов бензиновой фракции, содержащей смесь изопарафинов, ароматических и нафтеновых углеводородов состава  $\text{C}_5$ - $\text{C}_{11}$  [39]. Уникальность этого процесса состоит в том, что реакция гидрирования в присутствии многофункционального катализатора  $\text{Na-Fe}_3\text{O}_4/\text{цеолит}$  происходит в три этапа (рис. 19):

(1) получение  $\text{CO}$  по реакции, обратной реакции водяного сдвига (ОРВС), на центрах  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , (2) гидрирование  $\text{CO}$  до олефинов по реакции синтеза Фишера-Тропша (СФТ) на центрах  $\text{Fe}_5\text{C}_2$  и (3) образование  $\text{C}_5$ - $\text{C}_{11}$ -углеводородов в результате реакций олигомеризации, изомеризации и ароматизации олефинов на кислотных центрах цеолита. Селективность образования углеводородов составляет 78% при конверсии  $\text{CO}_2$  22% [39].

РИСУНОК 19. Основные направления переработки  $\text{CO}_2$  путем его гидрирования для получения метана, углеводородов, оксигенатов и синтез-газа.



Важным направлением переработки  $\text{CO}_2$  является синтез муравьиной кислоты  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{HCOOH}$  и диметилового эфира (ДМЭ), представляющими собой многотоннажную продукцию химической промышленности и рассматриваемые как соединения для хранения химической энергии. Они служат молекулами-носителями водорода

в циклах запасаения и транспортировки возобновляемой энергии [40]. Для прямого каталитического восстановления  $\text{CO}_2$  с получением муравьиной кислоты используются как гомогенные системы – металлоорганические соединения, содержащие  $\text{Rh}$ ,  $\text{Ru}$  и  $\text{Ir}$ , так и гетерогенные катализаторы на основе  $\text{Pt}$ ,  $\text{Pd}$ ,  $\text{Au}$ .

## СИНТЕЗ ДМЭ



Синтез ДМЭ из  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$  включает последовательные реакции гидрирования и дегидратации, что требует применения бифункциональных катализаторов, содержащих и металлические

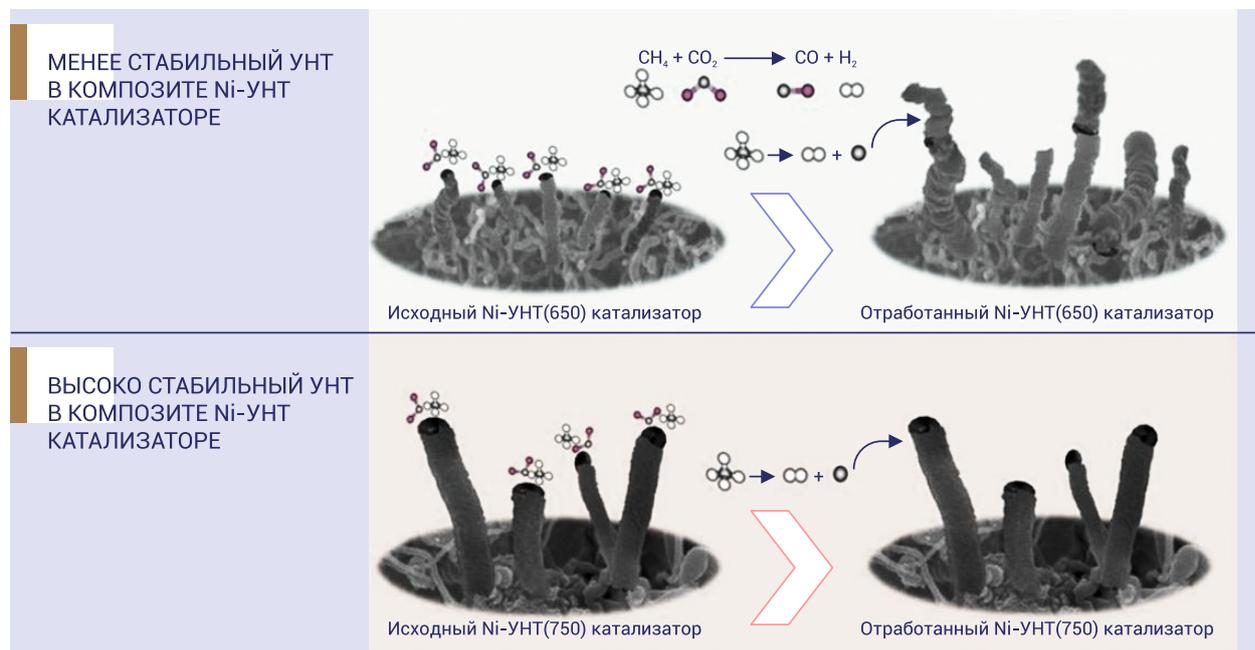
(например  $\text{Cu}$ ) и кислотные центры. Показано, что снижение размеров  $\text{Cu}$ -содержащих активных частиц – успешный подход для увеличения эффективности данного процесса [40].



Особое место в катализе занимает **углекислотная конверсия метана (УКМ)** позволяющая одновременно утилизировать два парниковых газа ( $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ) и получать в качестве продукта синтез-газ, пригодный по своей стехиометрии (1:1) для дальнейшего превращения в синтетическое топливо по реакции Фишера-Тропша. В этой реакции высокую активность проявляют никелевые катализаторы [41]. Процесс проводят при температуре 800–900°C и атмосферном давлении, демонстрируя высокие

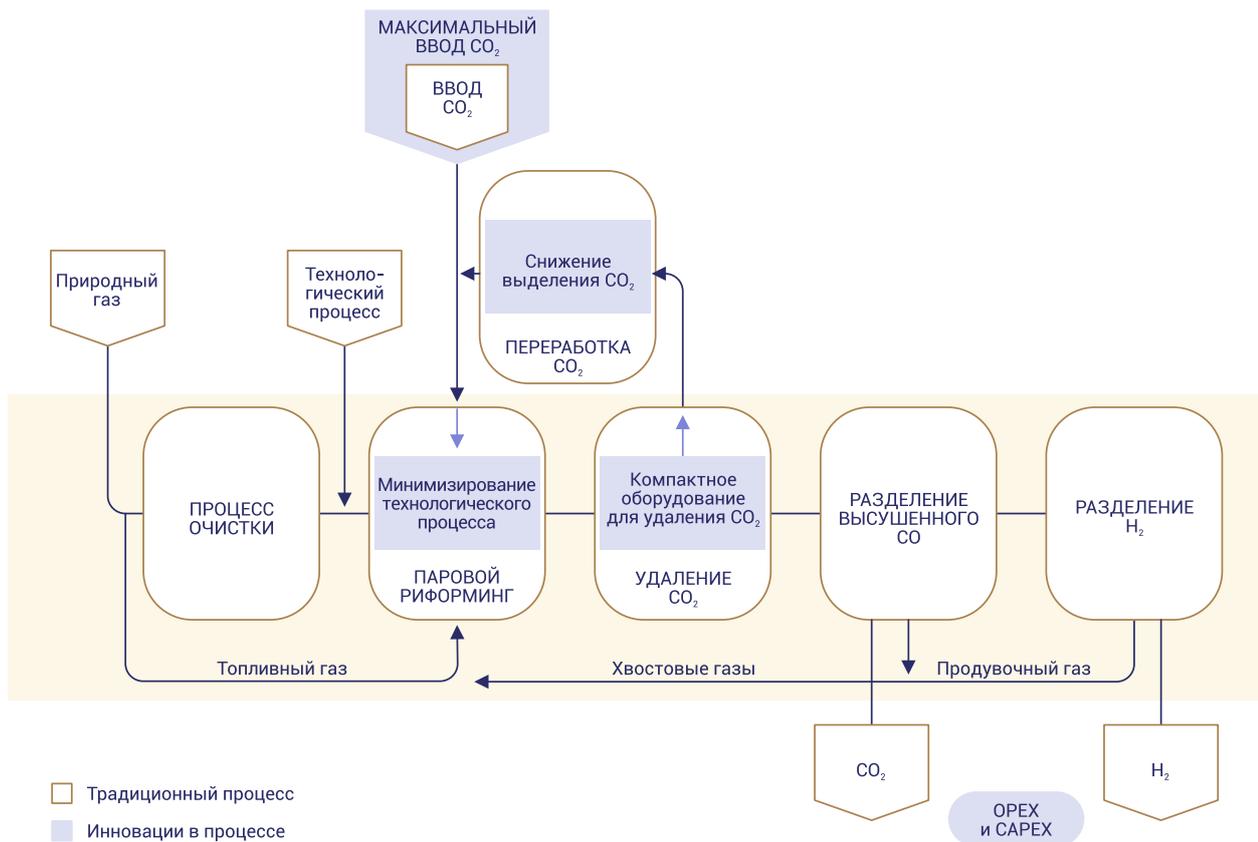
значения конверсии  $\text{CO}_2$  – 80–90%. Показана эффективность композитных катализаторов, где частицы  $\text{Ni}$  активного компонента закреплены на вершинах углеродных нанотрубок (рис. 20) [42]. Добавление к реакционной смеси паров воды расширяет область устойчивости системы к образованию углеродистых отложений, позволяет оптимизировать параметры процесса, обеспечив заданную полноту конверсии реагентов и необходимый состав получаемого синтез-газа [43].

РИСУНОК 20. Композитные  $\text{Ni}$  катализаторы для углекислотного риформинга метана [42].



Компанией Linde в сотрудничестве с концерном BASF разработана технология DRYREF™ SMR с целью повышения энергетической и экономической эффективности парового риформинга и утилизации углекислого газа [44]. Согласно предложенной схеме (рис. 21)  $\text{CO}_2$  добавляется в реакционную

смесь, содержащую природный газ и воду. В результате уменьшается углеродный след производства синтез-газа, снижается расход пара, получается синтез-газ с более низким молярным соотношением  $\text{H}_2/\text{CO}$  по сравнению с показателями для парового риформинга метана.



## ПРОЦЕССЫ С $\text{CO}_2$ В РОЛИ МЯГКОГО ОКИСЛИТЕЛЯ

На лабораторном уровне проводятся исследования процессов, в которых  $\text{CO}_2$

выступает в качестве мягкого окислителя [45–48].

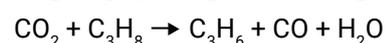
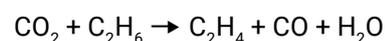


В окислительной конденсации метана ( $\text{CO}_2$ -ОКМ) с образованием этана и этилена в присутствии катализатора ( $\text{MnO-SrCO}_3$ ,

$\text{ZnO-CeO}_2$  или  $\text{CaO-CeO}_2$ ) конверсия  $\text{CO}_2$  составляет 5–7%, выход  $\text{C}_2$ -углеводородов до 5–7% [48].

Реакцию окислительного дегидрирования легких алканов с участием  $\text{CO}_2$  осуществляют при 650–700°C в присутствии катализаторов различного типа ( $\text{Pd/CeZrAlO}_x$ ,  $\text{CoMo/CeO}_2$ ,  $\text{GaN/SiO}_2$ ) [47]. Выход целевых продуктов

(этилен, пропилен) достигает 70%. Использование фотокаталитических систем позволяет использовать возобновляемый источник энергии и проводить процесс в мягких условиях (рис. 22).



Перспективным будет процесс с использованием  $\text{CO}_2$  для окислительного дегидри-

рования алкилароматических углеводородов с получением стирола и его гомологов [39].

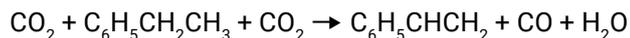
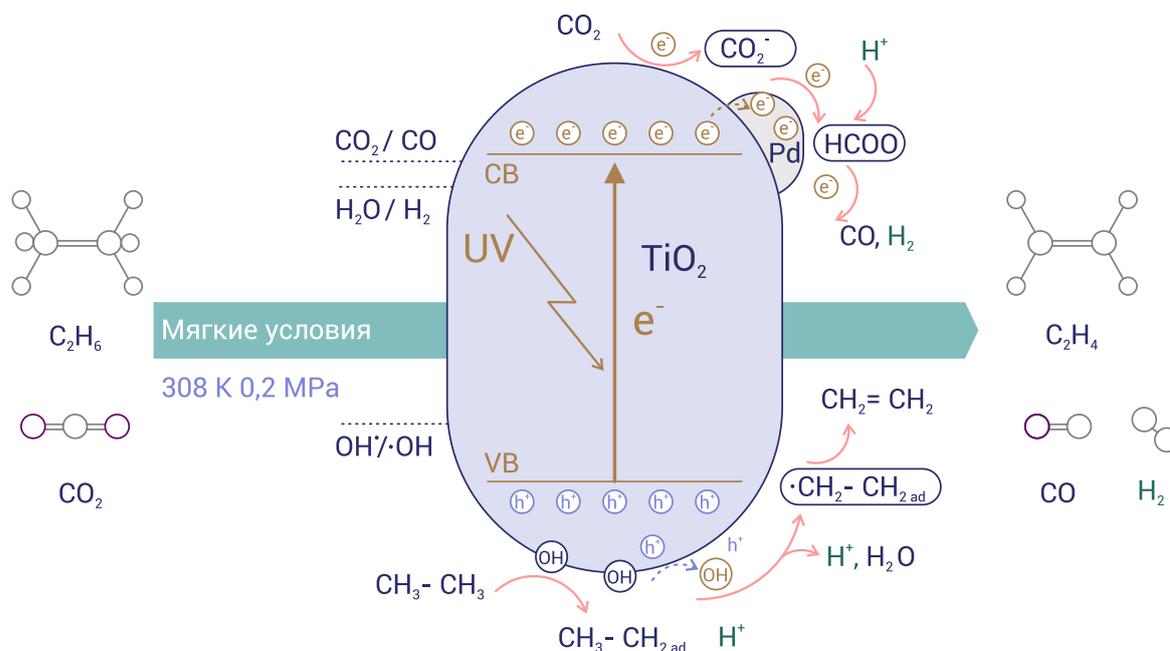


РИСУНОК 22. Механизм фотокаталитического окислительного дегидрирования этана с использованием  $\text{CO}_2$  в качестве окислителя в присутствии катализатора Pd/TiO<sub>2</sub> [48].



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной главе мы обсудили химические реакции и гетерогенные катализаторы, используемые для конверсии  $\text{CO}_2$  в ценные химические вещества, такие как карбамид, метанол, полиуретаны, CO,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ . Молекула  $\text{CO}_2$  по термодинамическим свойствам очень стабильная, её активация требует много энергии, а производство этой энергии иногда идет с выделением  $\text{CO}_2$ . Поэтому для достижения суммарного эффекта сокращения выбросов необходима разработка новых эффективных катализаторов конверсии  $\text{CO}_2$ . Каталитическая конверсия может происходить в газовой фазе, жидкофазных или электрохимических ячейках. Поскольку растворимость  $\text{CO}_2$  довольно низка в водном растворе, конверсия  $\text{CO}_2$  в жидкой фазе обычно страдает низкой производительностью. В данном кратком обзоре мы рассмо-

три, в основном, процессы в газовой фазе в которых участвовали катализаторы: оксиды металлов, нанесенные металлы, карбиды углеродные материалы.

Гомогенные катализаторы в производстве муравьиной кислоты пока отстают в применении из-за низкой растворимости  $\text{CO}_2$ , но разработка активного гетерогенного катализатора для этого процесса имеет очень хорошую перспективу.

Электрохимическая конверсия  $\text{CO}_2$  с использованием катализаторов пока находится на начальной стадии и требует дальнейшей оптимизации. Но, процессы, использующие тепло и свет в качестве источников энергии, несомненно будут востребованы, чтобы свести к минимуму общее потребление энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Climate Change. Available online [March 2021] <https://www.un.org/en/global-issues/climate-change>
2. Design and Performance Optimization of Renewable Energy Systems. 2021, Academic Press.
3. Goepfert, A., Recycling of carbon dioxide to methanol and derived products – closing the loop. Chem. Soc. Rev. 2014. 43 (23): p. 7995–8048.
4. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. Макарова, А. А., Митровой, Т. А., Кулагина, В. А.; ИНЭИ РАН–Московская школа управления СКОЛКОВО. Москва, 2019. 210 с.
5. Калачев, А. И. Особенности климатической повестки для России. Угольная генерация в период низкоуглеродного развития энергетики в мире. Available online [March 2021] [https://www.ng.ru/ng\\_energiya/2019-10-07/15\\_7695\\_climate](https://www.ng.ru/ng_energiya/2019-10-07/15_7695_climate).
6. Хохлов, А., Мельников, Ю. Угольная генерация: новые вызовы и возможности. 2019. Центр энергетики МШУ СКОЛКОВО. Available online [March 2021] [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_Coal\\_generation\\_2019.01.01\\_Rus.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Coal_generation_2019.01.01_Rus.pdf)
7. Engineering ToolBox. Combustion of Fuels – Carbon Dioxide Emission, (2009). Available online [March 2021] [https://www.engineeringtoolbox.com/co2-emission-fuels-d\\_1085.html](https://www.engineeringtoolbox.com/co2-emission-fuels-d_1085.html)
8. Erneuerbare-Energien-und-Klimaschutz.de, Specific Carbon Dioxide Emissions of Various Fuels, Specif. Carbon Dioxide Emiss. Var. Fuels. (2015). Available online [March 2021] [https://www.volker-quaschnig.de/datserv/CO2-spez/index\\_e.php](https://www.volker-quaschnig.de/datserv/CO2-spez/index_e.php)
9. Crippa, M., et al., Fossil CO2 emissions of all world countries – 2020 Report, EUR 30358 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020.
10. Which nations are most responsible for climate change? Available online [March 2021] Электронный ресурс. <https://www.theguardian.com/environment/2011/apr/21/countries-responsible-climate-change?intcmp=122>
11. Атмосфера земли. Available online [March 2021] [https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere\\_of\\_Earth](https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth).
12. CO2 Concentration at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Available online [March 2021] <https://keelingcurve.ucsd.edu/>
13. Greenhouse gas. Available online [March 2021] [https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse\\_gas](https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_gas)
14. Смирнов, Б. М., Инфракрасное излучение в энергетике атмосферы. Теплофизика высоких температур. 2019. 57 (4): с. 609–633.
15. Тонков, М. В., Спектроскопия парникового эффекта. Соревский образовательный журнал. 2001. 7 (10): с. 52–58.
16. Archer D. Global Warming. Understanding the Forecast. 2012, Wiley.
17. Alper, E., Orhan, O.Y. CO2 utilization: Developments in conversion processes. Petroleum 2017. 3 (1): p. 109–126.

18. Al-Mamoori A., et al., Carbon Capture and Utilization Update. *Energy Technol.* 2017. 5: p. 834–849.
19. Wang Q., et al., CO<sub>2</sub> capture by solid adsorbents and their applications: Current status and new trends. *Energy Environ. Sci.* 2011. 4: p. 42–55.
20. Hepburn, C., et al., The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal. *Nature.* 2019. 575: p. 87–97.
21. Technologies for Sustainability and Climate Protection – Chemical Processes and Use of CO<sub>2</sub>, Alexis Bazzanella, Dennis Krämer (Editors). DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Frankfurt/Main, Germany. 2019, 333.
22. North, M., Styring, P. Perspectives and visions on CO<sub>2</sub> capture and utilization. *Faraday Discuss.* 2015. 183: p. 489–502.
23. Газохимический завод. Производство карбамида. Available online [April 2021] <https://salavat-neftekhim.gazprom.ru/about/working/applying/>
24. «Акрон» запустил новый агрегат по производству карбамида. Available online [April 2021] <https://53news.ru/novosti/44364-akron-zapustil-novyj-agregat-po-proizvodstvu-karbamida.html>
25. «Акрон» активизирует работы по проекту «Карбамид 6+». Available online [April 2021] <http://rccnews.ru/ru/news/fertilizers/104661/>
26. Jarvis, S. M., Samsatli, S. Technologies and infrastructures underpinning future CO<sub>2</sub> value chains: A comprehensive review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2018. 85: p. 46–68.
27. Chen, C., et al., Coupling N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> in H<sub>2</sub>O to synthesize urea under ambient conditions. *Nat. Chem.* 2020. 12: p. 717–724.
28. Covestro to expand use of carbon dioxide as a building block for plastics. Available online [April 2021] <https://www.autocarpro.in/news-international/covestro-expand-carbon-dioxide-building-block-plastics-22170>
29. Turning CO<sub>2</sub> into endless potential. Available online [March 2021] <https://eonic-technologies.com/product-potential>
30. The methanol industry. Available online [March 2021] <https://www.methanol.org/the-methanol-industry/>
31. Ren, S., et al., Highly active and selective Cu-ZnO based catalyst for methanol and dimethyl ether synthesis via CO<sub>2</sub> hydrogenation. *Fuel.* 2019. 239: p. 1125–1133.
32. Shulenberger, A. M., et al., Process for Producing Liquid Fuel from Carbon Dioxide and Water, US Pat. Appl., 2007/0244208 A1, 2007.
33. Arena, F., et al., *Appl. Catal. A.* 2008. 350: p. 16–23.
34. George Olah Renewable Methanol Plant. Available online [March 2021] <https://www.carbonrecycling.is/projects#project-goplant>
35. Power to Methanol Solutions for Flexible and Sustainable Operations in Power and Process Industries. Available online [April 2021] [http://www.mefco2.eu/pdf/3.%20Presentation%20on\\_Power%20to%20Methanol%20Solutions%20for%20Flexible%20and%20Sustainable%20Operations%20in%20Power%20and%20Process%20Industries.pdf](http://www.mefco2.eu/pdf/3.%20Presentation%20on_Power%20to%20Methanol%20Solutions%20for%20Flexible%20and%20Sustainable%20Operations%20in%20Power%20and%20Process%20Industries.pdf)

36. The Emissions-to-Liquids Technology. Available online [April 2021] <https://www.carbonrecycling.is/technology-and-services#services-banner-1>
37. AIR TO FUELSTM PLANTS. Available online [March 2021] <https://carbonengineering.com/our-technology>
38. Audi opens power-to-gas facility in Werlte/Emsland; e-gas from water, green electricity and CO<sub>2</sub>. Available online [March 2021] <https://www.greencarcongress.com/2013/06/audi-20130625.html>
39. Wei, J., et al., Directly converting CO<sub>2</sub> into a gasoline fuel. *Nat. Commun.* 2017. 8: p. 15174.
40. Yan, N., Philippot, K., Transformation of CO<sub>2</sub> by using nanoscale metal catalysts: cases studies on the formation of formic acid and dimethylether. *Curr. Opin. Chem. Eng.* 2018. 20: p. 86–92.
41. Недоливко, В. В., и др. Углекислотная конверсия метана (обзор). *Журнал прикладной химии.* 2020. 93 (6) : p. 763–787.
42. Donphai, W., et al., Carbon-structure affecting catalytic carbon dioxide reforming of methane reaction over Ni-carbon composites. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization.* 2016. 16: p. 245–256.
43. Matus, E. V., et al., Bi-reforming of methane: thermodynamic equilibrium analysis and selection of preferable reaction conditions. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021. 1749: p. 012023.
44. Smaller carbon footprint. Higher process efficiency. Available online [March 2021] <https://www.engineering.linde.com/dryref>
45. Rahman, S. T., et al., The Role of CO<sub>2</sub> as a Mild Oxidant in Oxidation and Dehydrogenation over Catalysts: A Review. *Catalysts.* 2020. 10: p. 1075.
46. Cai, X., Hu Y. H. Advances in catalytic conversion of methane and carbon dioxide to highly valuable products. *Energy Sci Eng.* 2019. 7: p. 4–29.
47. Li, G., et al. Oxidative dehydrogenation of light alkanes with carbon dioxide. *Green Chem.* 2021. 23: p. 689
48. Zhang, R., et al., Photocatalytic Oxidative Dehydrogenation of Ethane Using CO<sub>2</sub> as a Soft Oxidant over Pd/TiO<sub>2</sub> Catalysts to C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> and Syngas. *ACS Catal.* 2018. 8(10): p. 9280–9286.

# ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

## Джей Кислинг

Генеральный директор Объединенного института биоэнергетики, профессор кафедры химической и биомолекулярной инженерии Калифорнийского университета в Беркли

## ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно в мире на транспортировку людей и различных грузов расходуется общее количество топлива, эквивалентное примерно 120 квадриллионам БТЕ (британских термических единиц). 95% из этого объема получают из ископаемых ресурсов и 5% - из возобновляемых (Центр 2020). Согласно прогнозам, к 2050 году потребление энергии увеличится на 50%, при этом топливо из возобновляемых ресурсов будет составлять только 25% от общего объема потребления. Углерод в топливе из ископаемого сырья вносит значительный вклад в изменение климата и является одним из наиболее проблемных источников парниковых газов (ПГ), который необходимо заменить экологически чистыми альтернативными материалами.

Транспортное топливо включает автомобильный бензин, дизельное топливо, реактивное топливо и множество других специальных видов топлива. В масштабах всего мира бензин обеспечивает – 39% от объема энергии, потребляемой транспортным сектором, дизельное топливо – 36%, а авиакеросин - 12%. Бензин представляет собой сложную смесь углеводородов, состоящую в основном из имеющих разветвленное строение алканов и ароматических углеводородов с длиной углеродной цепи (количеством атомов углерода в молекуле) от 4 до 12

(Sawyer 1993). Дизельное топливо – это смесь углеводородов обычно линейного строения с длиной цепи от 9 до 23 (среднее число атомов углерода – 16). Типы углеводородов в бензине и дизельном топливе оказывают сильное влияние на свойства топлива. Например, разветвленные и ненасыщенные углеводороды приводят к более высоким октановым числам в бензине (Ghosh, Hickey, and Jaffe, 2006) и более низким цетановым числам в дизельном топливе (Ghosh and Jaffe, 2006). В противоположность этому, n-алканы обеспечивают более высокое цетановое число и более низкое октановое число. Хотя значительное разветвление отрицательно сказывается на цетановом числе дизельного топлива, такая разветвленная структура необходима для предотвращения гелеобразования линейных углеводородов при низких температурах. Подобно бензину и дизельному топливу, реактивное топливо представляет собой смесь углеводородов. Большинство видов реактивного топлива производится на основе керосина и разработано с учетом определенных эксплуатационных критериев. В США стандарты топлива для гражданских самолетов устанавливаются техническими комитетами в составе Американского общества по испытанию материалов – ASTM International (Committee и D02 Committee,

н.о.), а для военных самолетов такие стандарты устанавливает Министерство обороны. Топливо марки JetA или JetA-1 используется в большинстве мировых регионов, за исключением Крайнего Севера (где используется Jet B) и России (где используется Jet TS-1).

В мировом масштабе на транспорт приходится около четверти от общего объема выбросов парниковых газов (Hockstad and Hanel, 2018). Существуют два основных варианта снижения объема выбросов парниковых газов от транспортных средств: электрификация с использованием возобновляемых источников электроэнергии и применение топлива из возобновляемых источников, а именно – биотоплива. Постепенная электрификация парка легковых и грузовых автомобилей уже происходит, но электрификации авиаперевозок, по всей видимости, придется ждать еще долго, если она вообще когда-либо будет проводиться. Разработка возобновляемых видов биотоплива и биопродуктов (для снижения цены на биотопливо), уменьшающих нашу зависимость от нефти, имеет решающее значение для энергетической, экологической и экономической безопасности (Kircher 2015).

Два основных вида биотоплива, для которых уже налажено серийное производство в широком масштабе - это этанол, получаемый биологическим путем из различных источников, и биодизельное топливо, получаемое из гидрогенизированных растительных масел. До сего момента их использование было ограниченным из-за отсутствия инфраструктуры, пределов, установленных для содержания этанола в бензине – так называемой «стенки смеси» (например, предельная доля этанола в смеси с бензином сейчас составляет в США 10%, хотя в некоторых других странах она больше), количества гибких в отношении топлива автомо-

билей (например, таких, которые могут использовать смесь с более 10% этанола), качества этого топлива (например, дизельное топливо, изготовленное из растительного масла) и его стоимости. Биотопливо можно было бы использовать в более широком масштабе, если бы 1) оно имело свойства, аналогичные свойствам тех видов топлива, которые в настоящее время производятся из нефти, и 2) оно было значительно дешевле.

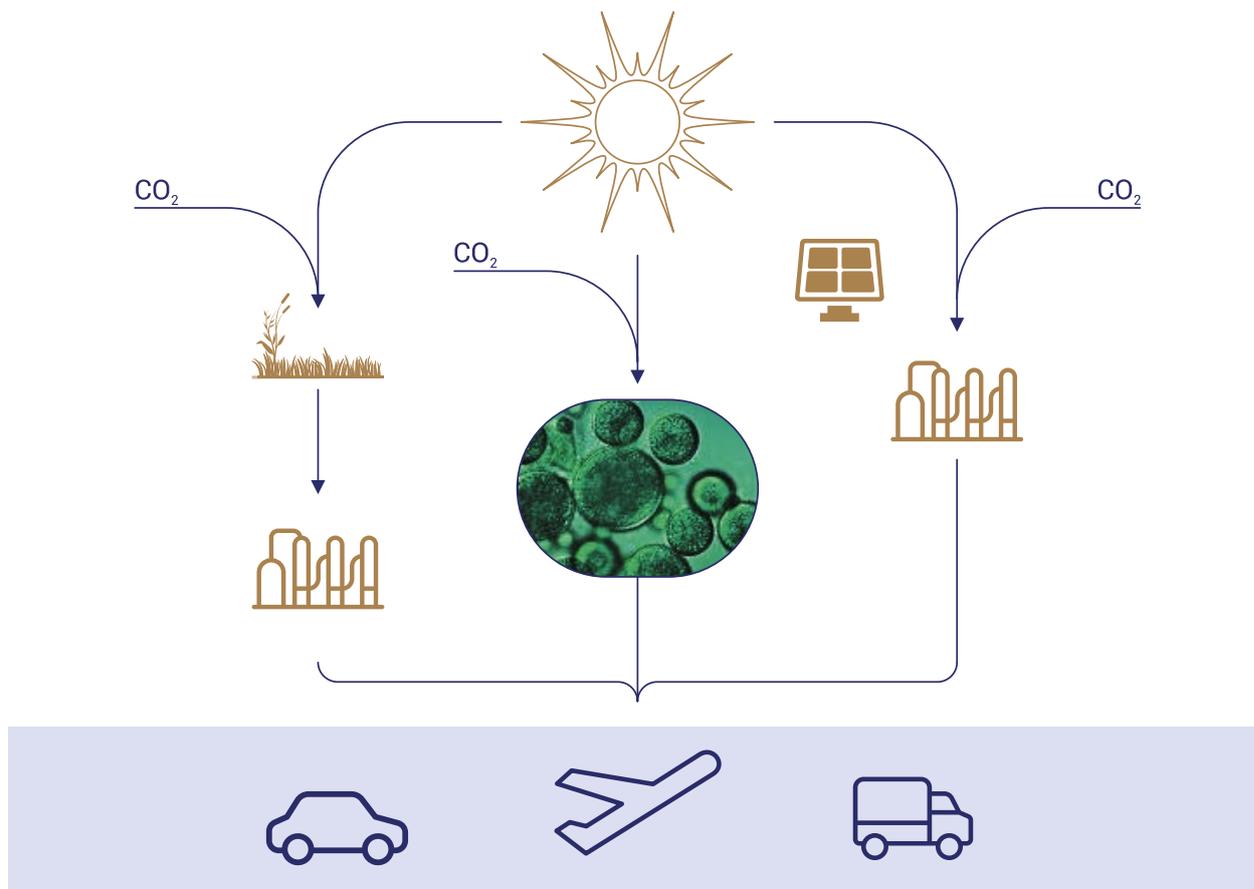
Под перспективными видами биотоплива здесь понимается топливо, которое производится биологическим путем из возобновляемых ресурсов и имеет аналогичные, равные или лучшие свойства по сравнению с топливом на основе нефти. Для замены бензина современное биотопливо должно содержать молекулы с сильно разветвленным строением, похожие на молекулы октана. Для замены дизельного топлива молекулы должны включать углеводороды с прямой или слабозветвленной цепью. Усовершенствованное реактивное биотопливо должно быть похоже на дизельное топливо, состоящее из длинноцепочечных углеводородов с малым количеством ответвлений. Такие молекулы не генерируются естественным образом в какой-либо биологической системе, и их сложно производить биологическими методами, поскольку для этого необходимы новые ферменты/пути биосинтеза. Кроме того, такие молекулы имеют сильно восстановленную форму, в то время как большинство микроорганизмов растут за счет окисления источников углерода, большая часть которых окислена гораздо сильнее, чем топливо, которое мы хотели бы получить. Тем не менее, производство биотоплива с такими молекулами позволило бы напрямую заменить его аналоги на нефтяной основе, не внося изменения в конструкцию двигателей.

## «СЫРАЯ НЕФТЬ» ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВА

Подобно тому, как топливо на основе нефти получают из содержащего углерод источника (например, нефти), для производства биотоплива необходим источник углерода и восстанавливающие эквиваленты в качестве субстратов для синтеза высокоэнергетических видов топлива с высокой степенью восстановления. Существует несколько способов получения биотоплива: 1) производство методами биологического или

химического синтеза из биомассы; 2) фотосинтетическая фиксация углекислого газа с использованием водорослей, фотосинтезирующих бактерий или растений для непосредственного производства биотоплива; и 3) фиксация диоксида углерода с использованием возобновляемой электроэнергии в качестве источника восстановительных эквивалентов и бактерий или другого катализатора (рис. 1).

РИСУНОК 1. Три возможных пути производства перспективного биотоплива.



Слева: фотосинтез для фиксации  $\text{CO}_2$  в растениях, которые затем подвергаются расщеплению и ферментации до перспективного биотоплива на биоперерабатывающем предприятии. В центре: фотосинтез для фиксации  $\text{CO}_2$  водорослями, специально сконструиро-

ванными методами биоинженерии для производства перспективного биотоплива. Справа: электробиосинтез перспективного биотоплива с использованием бактерий, которые могут утилизировать  $\text{CO}_2$  непосредственно от электрода, работающего на фотоэлектрических элементах.

Большая часть используемого сегодня этанола производится с использованием сахарозы (например, из сахарного тростника, сахарной свеклы или другой сахароносной культуры) или крахмала (например, из кукурузы или другой крахмалистой культуры) в качестве сырья. Используя дрожжи или бактерии, можно относительно простыми методами подвергнуть ферментации и тот, и другой источник углерода для производства этанола. К сожалению, эти культуры, как правило, требуют широкомасштабного внесения удобрений, достаточного полива и почвы, и их выращивание для производства топлива создает прямую конкуренцию с выращиванием для производства продуктов питания.

Одним из лучших источников углерода для производства биотоплива является лигноцеллюлозная биомасса, которая на 70% состоит из полимеризованных сахаров и является самой распространенной формой биомассы

на Земле (Isikgor and Becer 2015; Liu et al. 2021). Биотопливо, полученное из лигноцеллюлозы, имеет хорошие перспективы, потому что для него итоговый углеродный след (выделенный углерод – потребленный углерод) может быть нейтральным или даже отрицательным (Field et al. 2020), а его производство из сельскохозяйственных и лесных отходов снижает цену этого топлива по сравнению с видами, произведенными из специализированных энергетических культур. Недавний анализ выращивания проса на переходных сельскохозяйственных/пастбищных землях показал, что на самом деле его потенциал смягчения эффекта парниковых газов сопоставим с аналогичным показателем для лесовозобновления на этих землях и в несколько раз превосходит потенциал смягчения при восстановлении пастбищ (Field et al. 2020). Кроме того, способность энергетических культур (например, сорго) расти на маргинальных землях открывает такие возмож-

ности для производства, которые ограничат конкуренцию в отношении обрабатываемых земель, необходимых для удовлетворения потребностей в еде растущего по численности населения.

Перед преобразованием в биотопливо лигноцеллюлозная биомасса должна быть разложена на метаболизируемые промежуточные продукты с использованием предварительной термической, химической и/или биохимической обработки. Основным препятствием для эффективной биоконверсии является стойкость исходного материала и ингибирующий эффект, который лигнин оказывает на этот процесс (*Dos Santos et al. 2019*). Биоинженерные методы воздействия на клеточную стенку показали многообещающие результаты в смысле возможности уменьшить общую сопротивляемость, снизить содержание лигнина и уменьшить ацетилирование полимеров клеточной стенки, которые ограничивают эффективность конверсии исходного материала, а также увеличить соотношение шестиуглеродных и пятиуглеродных сахаров (многие микроорганизмы предпочитают шестиуглеродные сахара пятиуглеродным сахарам) (*Aznar et al. 2018*). Хотя лигнин - это основной фактор стойкости сырья, он также является многообещающим субстратом для специализированных микробов, которые превращают эти ароматические полимеры в полезные продукты (*Fang, Weisenberger, and Meier 2020*). Внедрение специализированных микробных организмов-хозяев в различные системы обработки может оптимизировать преобразование всех компонентов лигноцеллюлозного сырья в продукты с экономической ценностью, ограничивая потоки отходов для производства биотоплива и повышая целесообразность их использования в глобальном масштабе.

Также возможно производить топливо непосредственно путем использования солнечного света и углекислого газа фотосинтезирующими организмами (такими, как фотосинтезирующие цианобактерии, водоросли или даже растения). Благодаря тому, что весь процесс производства топлива происходит в одном организме, этот процесс становится более прямым и эффективным, теоретически не требующим затрат энергии на ферментируемые части - такие, как стебли, корни и листья растений. Фактическая эффективность преобразования солнечной энергии у цианобактерий и водорослей выше, чем у растений - у микроводорослей она может достигать 3% по сравнению с менее 1% у большинства сельскохозяйственных культур (*Wijffels and Barbosa 2010*). Более того, многие виды бактерий и водорослей могут расти в сточных

водах или в морской среде, на простых питательных веществах, и поэтому не создадут для сельского хозяйства конкуренции в смысле землепользования. Многие из этих фотосинтезирующих бактерий и водорослей могут быть изменены методами биоинженерии для производства перспективного биотоплива (*Miao, Xie, and Lindblad, 2018*).

Несмотря на привлекательные особенности фотосинтетических микроорганизмов, разведение этих микроорганизмов является сложным и дорогим. В отличие от выращивания растений в почве, технология крупномасштабного культивирования фотосинтетических микроорганизмов все еще находится на ранней стадии развития. Выращивание может производиться либо в открытой системе (например, выростной пруд), либо в закрытой системе - такой, как фотобиореактор. Эксплуатационные расходы для открытых прудов гораздо ниже, но такие водоемы подвержены риску загрязнения; кроме того, существуют строгие правила, не допускающие культивирования генетически модифицированных организмов в неконтролируемых системах (*Abdullah et al. 2019*). С другой стороны, в закрытых системах можно обеспечить более строгий контроль условий выращивания и низкий риск заражения, но эксплуатационные расходы для таких систем выше, чем для открытых.

В качестве альтернативы использованию солнечного света как источника энергии для фиксации  $\text{CO}_2$ , некоторые микроорганизмы могут использовать  $\text{H}_2$  как источник энергии для восстановительных реакций, или принимать электроны непосредственно от металла или электродов (*Lee et al. 2021*). Методами биоинженерии уже созданы микроорганизмы для производства перспективного биотоплива из  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}_2$  (*Grenz et al. 2019*). Учитывая прогнозируемые очень низкие цены на возобновляемую электроэнергию в некоторых частях мира, это могло бы стать хорошим вариантом для производства биотоплива. Кроме того, для получения биотоплива можно использовать в качестве субстратов другие одноуглеродные соединения - такие, как  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_4$ . Конверсия синтез-газа ( $\text{CO}/\text{CO}_2/\text{H}_2$ ) в этанол была реализована в промышленных масштабах для промышленных отходящих газов компанией Lanzatech, с использованием бактерий *Clostridia*, которые естественным образом производят этанол. Наконец, были созданы метанотрофы для производства биотоплива из  $\text{CH}_4$  (*Nguyen, Kim, and Lee 2020*). Однако если  $\text{CH}_4$  происходит из ископаемого сырья, то эти виды топлива на самом деле ничем не отличаются от топлива на нефтяной основе в том смысле, что при сжигании они добавляют  $\text{CO}_2$  в атмосферу.

## ИСТОРИЧЕСКОЕ БИОТОПЛИВО

Наиболее широко используются те виды биотоплива, которые можно производить естественным путем. Как упоминалось выше, этанол является одним из наиболее распространенных видов биотоплива, поскольку в природе бактерии и грибы генерируют его из различных источников углерода. Эта тема уже была подробно рассмотрена и не будет рассматриваться здесь.

Бутанол является потенциальной альтернативой этанолу в качестве замены бензина, поскольку он имеет более высокое энергосодержание и более низкую растворимость в воде. Его можно транспортировать по существующим трубопроводам и использовать как дополнение к бензину и дизельному топливу. Исторически бутанол производился биологическими методами с использованием бактерий *Clostridia* (Papoutsakis 2008). Многие из способов производства бутанола этими сольвентогенными *Clostridia* были реализованы с помощью обычных методов мутагенеза. Хотя из-за более высокого содержания энергии, меньшей гигроскопичности и коррозионной активности бутанол превосходит этанол в качестве биотоплива, но он производится с более низким титром и намного токсичнее этанола. Кроме того, из-за своей высокой температуры кипения бутанол требует больше энергии, чем этанол, для очистки на основе дистилляции от ферментационного бульона.

Что касается замены дизельного и авиационного топлива, в альтернативных видах чаще всего используются производные натуральных

жиров, вырабатываемые растениями и микроорганизмами. В настоящее время при производстве большинства видов биодизельного топлива в качестве основного исходного материала используются растительные масла (Fukuda, Kondo, and Noda, 2001). При этом существуют многие микроорганизмы (дрожжи и водоросли), способные вырабатывать большое количество жиров (White et al. 2005). Эти микроорганизмы накапливают 40-70% или более своей сухой клеточной массы в жирах. Манипулирование условиями роста, например, путем добавления CO<sub>2</sub>, ограничения доступа азота и света, может увеличить содержание липидов в этих водорослях (Metzger and Largeau 2005). Переэтерифицированные жирные кислоты, такие, как метиловые (FAME) и этиловые (FAEE) эфиры жирных кислот обеспечивают длину углеродной цепи, совместимую с показателями, необходимыми для работы двигателей с воспламенением от сжатия, и поэтому были разработаны для использования в качестве биодизельного топлива. Однако эти молекулы не идеальны. Если поставлена цель удовлетворить значительную часть текущих потребностей в дизельном топливе за счет биодизеля, то обработанные методами генной инженерии микробы, которые вырабатывают более подходящие для замены дизельного топлива молекулы, могут стать более устойчивым и адаптируемым «инструментом» для его производства, особенно если они используют при этом недорогой и обильный источник углерода.

## ПЕРСПЕКТИВНОЕ БИОТОПЛИВО: ТОПЛИВО БУДУЩЕГО?

Усовершенствованные виды биотоплива, которые по своим свойствам эквивалентны топливам на основе нефти, могут напрямую заменить свои нефтяные аналоги. Более того, некоторые виды перспективного биотоплива имеют более высокую плотность энергии, чем нефтяные виды топлива, и поэтому будут полезны при замене нефтяного горючего в обычных двигателях (Baral et al. 2019). Это топливо может быть получено практически из любого источника углерода с использованием сконструированных методами метабо-

лической инженерии путей синтеза на основе изопреноидов, жирных кислот, поликетидов и других путей, которые образуют углерод-углеродные связи.

Являющиеся продолжением этанола и бутанола спирты сивушных масел получают путем реакции катаболизма разветвленных аминокислот с использованием схемы Эрлиха, которая в природе встречается в дрожжах. Поскольку их молекулы содержат большее количество углерода на спирт, чем молекулы этанола, сивушные спирты, как правило,

являются более предпочтительным вариантом топлива, чем этанол. Путь биосинтеза сивушных спиртов был внедрен в различных микробных организмах-хозяевах (*Atsumi, Hanai, and Liao, 2008*). Среди этих спиртов путем использования бесклеточной системы удалось получить изобутанол с почти коммерческим титром и выходом продукта (*Sherkhanov et al. 2020*).

Как упоминалось выше, особенно хорошим источником для перспективных видов топлива являются жирные кислоты. Разнообразие жирных кислот, доступных из микробных источников, дает потенциальную возможность достичь сочетания длин цепей и разветвлений, необходимого для идеальной топливной смеси. Процессы, которые не протекают естественным путем, можно обеспечить с помощью генной инженерии. Биосинтез жирных кислот происходит из пула ацетил-КоА, продуцируемого несколькими центральными метаболическими путями. Принятые на сегодняшний день основные методы повышения уровня содержания свободных жирных кислот в микробах были направлены либо на переключение пула ацетил-КоА на биосинтез жирных кислот, либо на снижение клеточного потребления жирных кислот. Хотя жирные кислоты являются непосредственными продуктами пути биосинтеза жирных кислот, восстановленные и модифицированные соединения жирного ряда также могут продуцироваться микроорганизмами (*Schirmer et al. 2010*). Эти жирные спирты, сложные эфиры и алканы могут быть получены с такой длиной цепи, которая необходима для их использования в биодизельном топливе.

Изопреноиды – семейство природных соединений, которые синтезируются с использованием активированных углеводородных мономеров изопренилпирофосфата (*IPP*) и его изомера диметилаллилпирофосфата (*DMAPP*), являются превосходным источником биотоплива (*Kuzuyma 2002*). Их молекулы имеют ответвления у каждого четвертого угле-

рода (когда они находятся в своей линейной форме), что идеально подходит для бензина и необходимо для предотвращения гелеобразования дизельного и реактивного топлива при низких температурах. Путем биосинтеза изопреноидов можно производить несколько видов имеющих разветвленную структуру спиртов, алканов, алкенов и циклических углеводородов. Помимо углеводородов с разветвленной цепью, этот путь можно использовать в производстве изопентанола для двигателей с искровым зажиганием, а насыщенные, моно- или диненасыщенные монотерпены и сесквитерпены могут применяться для дизельного и реактивного топлива. Одним из наиболее успешных примеров топлива на основе изопреноидов был фарнезан, производимый компанией Amyris и испытанный в дизельных и реактивных двигателях (*Meadows et al., 2016*).

Третьим источником биотоплива являются поликетиды. Хотя обычно считается, что поликетидсинтазы (ПКС) синтезируют антибиотики и родственные природные продукты, они способны продуцировать гораздо более разнообразный набор молекул, чем пути изопреноидов и жирных кислот. Биоинженерные разработки по контролируемому манипулированию поликетидсинтазами привели к производству шести- и семиуглеродных этилкетонов, а также пяти- и шестиуглеродных метилкетонов (*Yuzawa et al. 2018*). Эти короткоцепочечные кетоны можно добавлять в бензин в виде оксигенатов для повышения октанового числа, и тот факт, что эти молекулы могут быть получены из гидролизатов растительной биомассы, подтверждает перспективы эффективного и возобновляемого производства биотоплива с использованием ПКС. Учитывая способность поликетидсинтаз продуцировать миллионы различных органических молекул, должна быть возможность получения даже более сложных молекул, специально предназначенных для бензиновых, дизельных, реактивных и даже ракетных двигателей.

## ПЛАНЫ ПО СОЗДАНИЮ ПЛАТФОРМЫ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

При выборе/конструировании микробного организма-хозяина необходимо учитывать несколько важных аспектов. Во-первых, чрезвычайно важна углеродная эффективность биосинтетического пути. Каждый углерод, потерянный из-за побочных продуктов или  $\text{CO}_2$ , является углеродом, которого нет в самом топливе. Поскольку биотопливо должно конкурировать по стоимости с топливом на нефтяной основе, важно, чтобы как можно большее количество углерода в субстрате было преобразовано в конечный продукт. Это может предусматривать существенную перестройку метаболических путей микробного организма-хозяина для сохранения углерода (Meadows et al., 2016). В качестве альтернативы (как упоминалось выше) потенциальным источником таких восстанавливающих эквивалентов может быть недорогая электроэнергия, вырабатываемая с использованием солнечных или ветровых электростанций.

Многие виды биотоплива токсичны, как и многие источники углерода, которыми предполагается «кормить» микробного хозяина.

Найти микробы-хозяева, которые смогут переносить такой источник углерода, а также сам продукт, может оказаться очень трудной или даже невозможной задачей; поэтому создание микробных организмов-хозяев, способных выдерживать исходные материалы и продукты, может иметь решающее значение. При биоинженерной разработке толерантных к субстратам и продуктам микробных хозяев также возможно развивать их в направлении повышения толерантности.

Наконец, критически важна генетическая стабильность сконструированного хозяина. Многие сконструированные биосинтетические пути являются обременительными для микроорганизма-хозяина: промежуточные продукты метаболизма, которые могут быть выделены для роста, «похищаются» у него для производства биотоплива. Спасение микробного хозяина состоит в том, чтобы избавиться от генетического материала, вызывающего такое бремя. Существуют методы противодействия генетической нестабильности, но все же необходимы серьезные исследования.

## ПРОБЛЕМЫ С МАСШТАБОМ

Чтобы внедрять перспективное биотопливо в больших масштабах, его производство должно стать массовым. На момент написания этой статьи в мире ежегодно производится около 30 миллиардов галлонов этанола («Центр данных по альтернативному топливу», н.о.) и потребляется примерно 920 миллиардов галлонов разных видов транспортного топлива, большинство из которых основано на нефти. Чтобы полностью заменить нефтяное топливо на биотопливо, нам нужно будет построить и ввести в действие современные предприятия по производству биотоплива, производящие в 30 раз больше этанола, чем производится в настоящее время. (В США на биотопливо приходится 5% от общего количества потребляемого топлива; необходимо будет построить объекты с объемом производства биотоплива в 20 раз больше, чем в настоящее время).

Такое повышение масштабов производства на основе биологических процессов вызовет множество проблем. Во-первых, нам нужно будет отвести значительную часть пахотных земель под выращивание биомассы, которая станет субстратом для этого биотоплива (что нереалистично). Второй серьезной проблемой является разработка оборудования для сбора и транспортировки биомассы на централизованные объекты и строительство таких объектов. Привезенные туда ферментируемые сахара необходимо будет извлекать из биомассы и ферментировать (в очень больших емкостях) до получения усовершенствованного топлива. Наконец, топливо нужно будет доставлять на заправочные станции. Поскольку биотопливо будет производиться вдали от густонаселенных районов, а использоваться в основном внутри таких районов, большая часть нашей

существующей инфраструктуры для производства и распределения топлива на нефтяной основе может оказаться бесполезной.

Что касается самого процесса ферментации, из-за огромного размера коммерческих ферментеров биотоплива – до 500 м<sup>3</sup> для аэробных процессов и 4000 м<sup>3</sup> для анаэробных процессов – преодоление проблем с расширением масштабов имеет первостепенное значение для успешной коммерциализации (Benz 2014). Достижение стабильно высоких титров, скоростей и выходов продукции в производственных условиях требует точного контроля параметров процесса, включая pH, скорость подачи субстрата, растворенный кислород и удаление продукта на месте.

В дополнение к необходимости строгого контроля процесса нужно учесть, что при серийном производстве рабочая среда отличается такими показателями по давлению, скорости сдвига, титрам продукта и пространственной неоднородности, которые не являются аналогичными этим показателям при культивировании небольшими партиями. Эта неоднородность окружающей среды способствует генетической неоднородности, при этом микробное загрязнение и генетическая нестабильность создают угрозу для стабильности и устойчивости процесса в большом масштабе, что требует внедрения новых механизмов контроля (Rugbjerg and Sommer 2019). Традиционные антибиотики и противомикробные препараты являются слишком дорогостоящими для промышленного применения, однако уже появились многообещающие альтернативы

в смысле гигиенического контроля, в том числе достигнутая методами биоинженерии устойчивость к хлоритам (Wang and Coates, 2017) и генетические модификации, кодирующие аффинность к ксенобиотическим источникам азота и фосфора (Shaw et al., 2016). Еще предстоит проделать большую работу по нестерильной ферментации.

Чтобы бороться с воздействием вредных мутаций на продуктивность, размножение клеток можно эффективно связать с образованием продукта, используя методы, описанные выше, путем «сцепления роста и продукции». И наоборот – генетическая стабильность также может быть повышена за счет полного разделения фаз роста и продукции, при котором во время фазы продукции воспроизводство ограничивается либо путем индукции ограничивающих рост генов, либо путем устранения ключевых питательных веществ, необходимых для роста.

Высокие титры продукта часто представляют собой угрозу для производительности из-за токсичности и подавления обратной связи. В дополнение к подходам, основанным на повышении толерантности, эти проблемы можно решить с помощью технологических схем, предусматривающих удаление продукта на месте (Dafoe and Daugulis 2014). Извлечение продукции на месте является важным компонентом недавних успешных примеров увеличения масштабов производства, демонстрируя возможность непрерывного извлечения в промышленных масштабах (Meadows et al., 2016; Xue et al., 2014).

## ■ ПЕРСПЕКТИВЫ

Хотя известные метаболические пути предлагают несколько возможных решений для биосинтеза топливных молекул, перед их применением в промышленных условиях необходимо проанализировать несколько других факторов, прежде всего – физические свойства потенциальной молекулы материала биотоплива. Эти свойства влияют на все, от его пригодности в качестве топлива до процессов очистки и способа его транспортировки потребителям.

Основная проблема при производстве биотоплива – это достижение таких показателей по уровню титра, нормам расхода и выхода, которые делают это топливо

конкурентоспособным по стоимости в сравнении с продуктами на основе нефти. Для успеха любого из описанных биоинженерных подходов решающее значение имеет разработка эффективного разложения лигноцеллюлозы до моносахаридов. Разработка этой ключевой технологии позволит производить биотопливо, вырабатываемое микробами, из культур, которые имеют более высокие темпы роста, лучшие урожаи, оказывают меньшее воздействие на почву и менее нуждаются в воде, удобрениях и пестицидах, чем используемые в настоящее время культуры (например, масличные пальмы, кукуруза или соя) (Tilman, Hill, and Lehman 2006). Эти характеристики

должны способствовать повышению конкурентоспособности биотоплива по сравнению с нефтью таким образом, чтобы для пахотных земель его производство не создавало конкуренции производству продуктов питания.

На сегодняшний день манипуляции с путями в значительной степени ограничиваются использованием существующих генов и обычных методов экспрессии генов. Хотя эти подходы привели к существенному увеличению продукции молекул-мишеней, требуется общеклеточный подход к метаболической инженерии, чтобы максимизировать скорость биосинтеза в дополнение к выходу желаемого соединения.

Другой важной задачей метаболической инженерии является удовлетворение энергетических проблем клетки (т.е. снятие термодинамических ограничений). Важным параметром при оптимизации штаммов является баланс энергии и потребности в кофакторах для метаболических путей, используемых для генерации целевой молекулы. Замена ценных вырабатываемых из нефти товаров, таких, как пластмассы, возобновляемыми материалами - важный первый шаг на пути к созданию устойчивых источников для

производства той продукции, на которую мы привыкли полагаться в своей повседневной жизни. Мы ожидаем, что благодаря постоянному совершенствованию метаболической инженерии производство массовых товаров с применением технологий микробного синтеза станет экономически конкурентоспособным по сравнению с нефтехимией.

Чтобы достигнуть успеха в производстве альтернативных видов биотоплива, необходимо будет разработать целевые и эффективные транспортные системы, повысить толерантность производителей биотоплива к токсическим эффектам накопления биомолекул, оптимизировать поток углерода к желаемым продуктам и создать микроорганизмы, устойчивые к условиям промышленных процессов. Не вызывает сомнений, что быстрый прогресс в развитии этих технологий будет способствовать эффективному и надежному производству систем для нового биотоплива. В конечном итоге политические силы, экономика процесса, технология двигателей и инфраструктура поставок будут диктовать повсеместную приемлемость и использование этих альтернативных источников топлива.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Abdullah, Bawadi, Syed Anuar Fua'ad Syed Muhammad, Zahra Shokravi, Shahrul Ismail, Khairul Anuar Kassim, Azmi Nik Mahmood, and Md Maniruzzaman A. Aziz. 2019. "Fourth Generation Biofuel: A Review on Risks and Mitigation Strategies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 107 (June): 37–50.
2. "Alternative Fuels Data Center." n.d. <https://afdc.energy.gov/>.
3. Atsumi, Shota, Taizo Hanai, and James C. Liao. 2008. "Non-Fermentative Pathways for Synthesis of Branched-Chain Higher Alcohols as Biofuels." *Nature* 451 (7174): 86–89.
4. Aznar, Aude, Camille Chalvin, Patrick M. Shih, Michael Maimann, Berit Ebert, Devon S. Birdseye, Dominique Loqué, and Henrik V. Scheller. 2018. "Gene Stacking of Multiple Traits for High Yield of Fermentable Sugars in Plant Biomass." *Biotechnology for Biofuels* 11 (January): 2.
5. Baral, Nawa, Olga Kavvada, Daniel Mendez Perez, Aindrila Mukhopadhyay, Taek Soon Lee, Blake Simmons, and Corinne D. Scown. 2019. "Techno-Economic Analysis and Life-Cycle Greenhouse Gas Mitigation Cost of Five Routes to Bio-Jet Fuel Blendstocks." *Energy & Environmental Science* 12 (3): 807–24.
6. Benz, Gregory T. 2014. "Large Scale Microbial Production of Advanced Biofuels: How Big Can We Go?" *Biofuels Digest*.
7. Center, Bipartisan Policy. 2020. "Annual Energy Outlook 2020." Energy Information Administration, Washington, DC. [https://www.eia.gov/pressroom/presentations/capuano\\_01292020.pdf](https://www.eia.gov/pressroom/presentations/capuano_01292020.pdf).
8. Committee, D02, and D02 Committee. n.d. "Specification for Aviation Turbine Fuels." <https://doi.org/10.1520/d1655-14c>.
9. Dafoe, Julian T., and Andrew J. Daugulis. 2014. "In Situ Product Removal in Fermentation Systems: Improved Process Performance and Rational Extractant Selection." *Biotechnology Letters* 36 (3): 443–60.
10. Dos Santos, Antonio Carlos, Eduardo Ximenes, Youngmi Kim, and Michael R. Ladisch. 2019. "Lignin-Enzyme Interactions in the Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass." *Trends in Biotechnology* 37 (5): 518–31.
11. Fang, Zhen, Matthew C. Weisenberger, and Mark S. Meier. 2020. "Utilization of Lignin-Derived Small Molecules: Epoxy Polymers from Lignin Oxidation Products." *ACS Applied Bio Materials* 3 (2): 881–90.
12. Field, John L., Tom L. Richard, Erica A. H. Smithwick, Hao Cai, Mark S. Laser, David S. LeBauer, Stephen P. Long, et al. 2020. "Robust Paths to Net Greenhouse Gas Mitigation and Negative Emissions via Advanced Biofuels." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117 (36): 21968–77.
13. Fukuda, H., A. Kondo, and H. Noda. 2001. "Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils." *Journal of Bioscience and Bioengineering* 92 (5): 405–16.
14. Ghosh, Prasenjeet, Karlton J. Hickey, and Stephen B. Jaffe. 2006. "Development of a Detailed Gasoline Composition-Based Octane Model." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 45 (1): 337–45.
15. Ghosh, Prasenjeet, and Stephen B. Jaffe. 2006. "Detailed Composition-Based Model for Predicting the Cetane Number of Diesel Fuels." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 45 (1): 346–51.

16. Grenz, Sebastian, Philipp T. Baumann, Christian Rückert, Bernd A. Nebel, Daniel Siebert, Andreas Schwentner, Bernhard J. Eikmanns, et al. 2019. "Exploiting Hydrogenophaga Pseudoflava for Aerobic Syngas-Based Production of Chemicals." *Metabolic Engineering* 55 (September): 220–30.
17. Hockstad, L., and L. Hanel. 2018. "Inventory of U.s. Greenhouse Gas Emissions and Sinks." *Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem*. <https://doi.org/10.15485/1464240>.
18. Isikgor, Furkan H., and C. Remzi Becer. 2015. "Lignocellulosic Biomass: A Sustainable Platform for the Production of Bio-Based Chemicals and Polymers." *Polymer Chemistry* 6 (25): 4497–4559.
19. Jarboe, L. R., T. B. Grabar, L. P. Yomano, K. T. Shanmugan, and L. O. Ingram. 2007. "Development of Ethanogenic Bacteria." *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology* 108: 237–61.
20. Kircher, Manfred. 2015. "Sustainability of Biofuels and Renewable Chemicals Production from Biomass." *Current Opinion in Chemical Biology* 29 (December): 26–31.
21. Kuzuyama, Tomohisa. 2002. "Mevalonate and Nonmevalonate Pathways for the Biosynthesis of Isoprene Units." *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry* 66 (8): 1619–27.
22. Lee, Soo Youn, You-Kwan Oh, Sangmin Lee, Hana Nur Fitriana, Myoungsoon Moon, Min-Sik Kim, Jiye Lee, et al. 2021. "Recent Developments and Key Barriers to Microbial CO<sub>2</sub> Electrobiorefinery." *Bioresource Technology* 320 (Pt A): 124350.
23. Liu, Yuzhong, Pablo Cruz-Morales, Amin Zargar, Michael S. Belcher, Bo Pang, Elias Englund, Qingyun Dan, Kevin Yin, and Jay D. Keasling. 2021. "Biofuels for a Sustainable Future." *Cell* 184 (6): 1636–47.
24. Meadows, Adam L., Kristy M. Hawkins, Yoseph Tsegaye, Eugene Antipov, Youngnyun Kim, Lauren Raetz, Robert H. Dahl, et al. 2016. "Rewriting Yeast Central Carbon Metabolism for Industrial Isoprenoid Production." *Nature* 537 (7622): 694–97.
25. Metzger, P., and C. Largeau. 2005. "Botryococcus Braunii: A Rich Source for Hydrocarbons and Related Ether Lipids." *Applied Microbiology and Biotechnology* 66 (5): 486–96.
26. Miao, Rui, Hao Xie, and Peter Lindblad. 2018. "Enhancement of Photosynthetic Isobutanol Production in Engineered Cells of *Synechocystis* PCC 6803." *Biotechnology for Biofuels* 11 (1): 267.
27. Nguyen, Anh Duc, Donghyuk Kim, and Eun Yeol Lee. 2020. "Unlocking the Biosynthesis of Sesquiterpenoids from Methane via the Methylerythritol Phosphate Pathway in Methanotrophic Bacteria, Using  $\alpha$ -Humulene as a Model Compound." *Metabolic Engineering* 61 (September): 69–78.
28. Papoutsakis, Eleftherios T. 2008. "Engineering Solventogenic Clostridia." *Current Opinion in Biotechnology* 19 (5): 420–29.
29. Rugbjerg, Peter, and Morten O. A. Sommer. 2019. "Overcoming Genetic Heterogeneity in Industrial Fermentations." *Nature Biotechnology* 37 (8): 869–76.
30. Sawyer, R. F. 1993. "Trends in Auto Emissions and Gasoline Composition." *Environmental Health Perspectives* 101 Suppl 6 (December): 5–12.
31. Schirmer, Andreas, Mathew A. Rude, Xuezhi Li, Emanuela Popova, and Stephen B. del Cardayre. 2010. "Microbial Biosynthesis of Alkanes." *Science (New York, N.Y.)* 329 (5991): 559–62.

32. Shaw, A. Joe, Felix H. Lam, Maureen Hamilton, Andrew Consiglio, Kyle MacEwen, Elena E. Brevnova, Emily Greenhagen, et al. 2016. "Metabolic Engineering of Microbial Competitive Advantage for Industrial Fermentation Processes." *Science* (New York, N.Y.) 353 (6299): 583–86.
33. Sherkhonov, Saken, Tyler P. Korman, Sum Chan, Salem Faham, Hongjiang Liu, Michael R. Sawaya, Wan-Ting Hsu, Ellee Vikram, Tiffany Cheng, and James U. Bowie. 2020. "Isobutanol Production Freed from Biological Limits Using Synthetic Biochemistry." *Nature Communications* 11 (1): 4292.
34. Tilman, David, Jason Hill, and Clarence Lehman. 2006. "Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass." *Science* (New York, N.Y.) 314 (5805): 1598–1600.
35. Wang, Ouwei, and John D. Coates. 2017. "Biotechnological Applications of Microbial (per)Chlorate Reduction." *Microorganisms* 5 (4). <https://doi.org/10.3390/microorganisms5040076>.
36. White, Stephen W., Jie Zheng, Yong-Mei Zhang, and Rock. 2005. "The Structural Biology of Type II Fatty Acid Biosynthesis." *Annual Review of Biochemistry* 74: 791–831.
37. Wijffels, René H., and Maria J. Barbosa. 2010. "An Outlook on Microalgal Biofuels." *Science* (New York, N.Y.) 329 (5993): 796–99.
38. Xue, Chuang, Jing-Bo Zhao, Li-Jie Chen, Feng-Wu Bai, Shang-Tian Yang, and Jian-Xin Sun. 2014. "Integrated Butanol Recovery for an Advanced Biofuel: Current State and Prospects." *Applied Microbiology and Biotechnology* 98 (8): 3463–74.
39. Yuzawa, Satoshi, Mona Mirsiaghi, Renee Jovic, Tatsuya Fujii, Fabrice Masson, Veronica T. Benites, Edward E. K. Baidoo, et al. 2018. "Short-Chain Ketone Production by Engineered Polyketide Synthases in *Streptomyces Albus*." *Nature Communications* 9 (1): 4569.

# ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ

**Елистратов Сергей Львович**

Заведующий кафедрой тепловых  
электрических станций, Новосибирский  
государственный технический университет

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективное использование в топливном балансе практически неисчерпаемых ресурсов низкопотенциального (до 40°C) тепла возобновляемых (тепло окружающего воздуха, грунта, воды подземных и наземных источников и др.) и вторичных (промышленные и бытовые стоки) теплоисточников с использованием тепловых насосов (ТН) является актуальным направлением энергосбережения и охраны окружающей среды.

В настоящее время в мире работает более 30 млн ТН различной мощности – от нескольких кВт до сотен МВт [1]. В США более 30% жилых зданий оборудованы ТН (совмещенные системы отопления и кондиционирования на базе ТН). В Швеции за последние годы введены в действие более 100 теплонасосных установок мощностью от 5 до 80 МВт. В Японии ежегодно продается 3 млн ТН (для сравнения, в США – 1 млн. ТН).

В связи с бурным развитием цифровых технологий актуальным стало использование тепловой энергии из систем охлаждения центров обработки данных (ЦОД) на нужды теплоснабжения. Общее энергопотребление всеми ЦОД в мире составляет порядка 10% общего спроса на электроэнергию и с каждым годом эта потреб-

ность увеличивается на 12%, занимая 5 место по совокупному годовому объему после электропотребления таких стран, как США, Китай, Россия и Япония [2]. Система охлаждения ЦОД расходует до половины всей потребляемой электроэнергии дата-центром. Максимальная температура нагрева в отдельных частях ЦОД достигает 46°C. Использование систем охлаждения на базе ТН для полезной утилизации тепловой энергии ЦОД позволяет на 80% снизить затраты электроэнергии на охлаждение по сравнению с менее прогрессивными системами на базе воздушного охлаждения и на 13% по сравнению с традиционными системами жидкостного охлаждения – чиллерами. Стабильная работа космических объектов и других специальных объектов также нуждается в применении эффективных технологий охлаждения бортового цифрового оборудования. Это далеко не полный перечень новых вызовов современных технологий постиндустриального общества, на которые могут дать эффективный ответ технологии низкопотенциальной энергетики, в частности высокотемпературные тепловые насосы (ВТН).

## КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Классификация ТН по четырем основным признакам представлена в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Общая классификация ТН технического назначения [3].

| Классифицирующий признак  | Наименования                |                     | Виды приводной энергии             |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------------------|
| 1. Принцип работы         | 1.1 Компрессионные          |                     | Электрическая, механическая        |
|                           | 1.1.1 Паровые               | 1.1.2 Газовые       |                                    |
|                           | 1.2 Сорбционные             |                     | Тепловая энергия                   |
|                           | 1.2.1 Абсорбционные         | 1.2.2 Адсорбционные |                                    |
|                           | 1.3 Струйные                |                     | Кинетическая энергия пара или газа |
|                           | 1.3.1 Эжекторные            | 1.3.2 Вихревые      |                                    |
|                           | 1.4 Термоэлектрические      |                     | Электрическая                      |
|                           | 1.5 Магнитные               |                     |                                    |
| 2. Тип рабочего цикла     | 2.1 Замкнутый               |                     |                                    |
|                           | 2.2 Разомкнутый             |                     |                                    |
| 3. Характер трансформации | 3.1 Повысительная           |                     |                                    |
|                           | 3.2 Расщепительная          |                     |                                    |
| 4. Периодичность          | 4.1 Непрерывного действия   |                     |                                    |
|                           | 4.2 Периодического действия |                     |                                    |

Среди большого числа классифицирующих признаков наиболее важным является принцип классификации по рабочим циклам, среди которых выделяют практически важные газовые компрессионные, пароконпресссионные, сорбционные (абсорбционные и адсорбционные), которые определяют конструктивный облик и режимы работы ТН. Часто к числу ТН также относят комбинированные устройства, обеспечивающие совместную выработку коммерчески ценных или технологически важных потоков тепла и холода (режимы работы: отопление, горячее водоснабжение, охлаждение). Такие устройства наряду с использованием в промышленности нашли применение для перераспределения тепловых потоков внутри крупных зданий в кольцевых системах круглогодичного кондиционирования воздуха [4, 5]. Широкое практиче-

ское применение получили только два вида ТН: пароконпресссионного (ПКТН) и абсорбционного (АБТН) типов.

По режиму температур нагреваемого теплоносителя ТН условно подразделяют на низкотемпературные НТН (40...45°C, кондиционирование, система «теплый пол»); среднетемпературные СТН (до 60...65°C, горячее водоснабжение, среднетемпературное отопление) и высокотемпературные ВТН (более 80°C). Практически 90 % всех ТН в мире работают в режиме нагрева теплоносителей на нужды среднетемпературного отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования [6-8]. Отдельные модели ННТ и СНТ снабжаются дополнительными устройствами прямого нагрева, позволяющими при необходимости произвести догрев теплоносителя до более высоких температур.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТН

Общим для всех ТН является выполнение второго начала термодинамики, согласно которому трансформация тепловой энергии возобновляемых и вторичных источников  $Q_{\text{НИТ}}$  с температурного уровня  $T_1$  на более высокий уровень  $T_2$  для последующего полезного потребления должна сопро-

вождаться совершением работы  $A$  или затратами равноценных ей по работоспособности (эксергии) других видов энергии [3]. С ростом разницы температур  $\Delta T = T_2 - T_1$  увеличиваются затраты энергии  $A$ . В процессе термотрансформации в ТН выполняется закон сохранения энергии:

$$1 \quad Q_{\text{НИТ}} + A = Q,$$

где  $Q$  – количество полезно выработанного тепла с температурой  $T_2$ .

В общем случае эффективность выработки тепловой энергии для ТН различного типа можно

определить по значению коэффициента  $COP$  (Coefficient of Performance):

$$2 \quad COP = \frac{Q}{A} = 1 + \frac{Q_{\text{НИТ}}}{A},$$

где всегда  $COP > 1$ . При  $COP \rightarrow 1,0$  ТН практически не использует энергию возобновляемых и вторичных источников ( $Q_{\text{НИТ}} \rightarrow 0$ ) и нагрев осуществляется только за счет подведенной к нему работоспособной энергии  $A$ . Для большин-

ства практических применений  $COP \approx 3...5$ , что позволяет обеспечить конкурентные преимущества ТН по отношению к обычным теплоисточникам (электрические, газо-мазутные, угольные котлы).

Эффективность работы большинства сорбционных тепловых насосов характеризует значение коэффициента термотрансформации:

$$3 \quad \mu = \frac{Q}{Q_{\text{ГЕН}}},$$

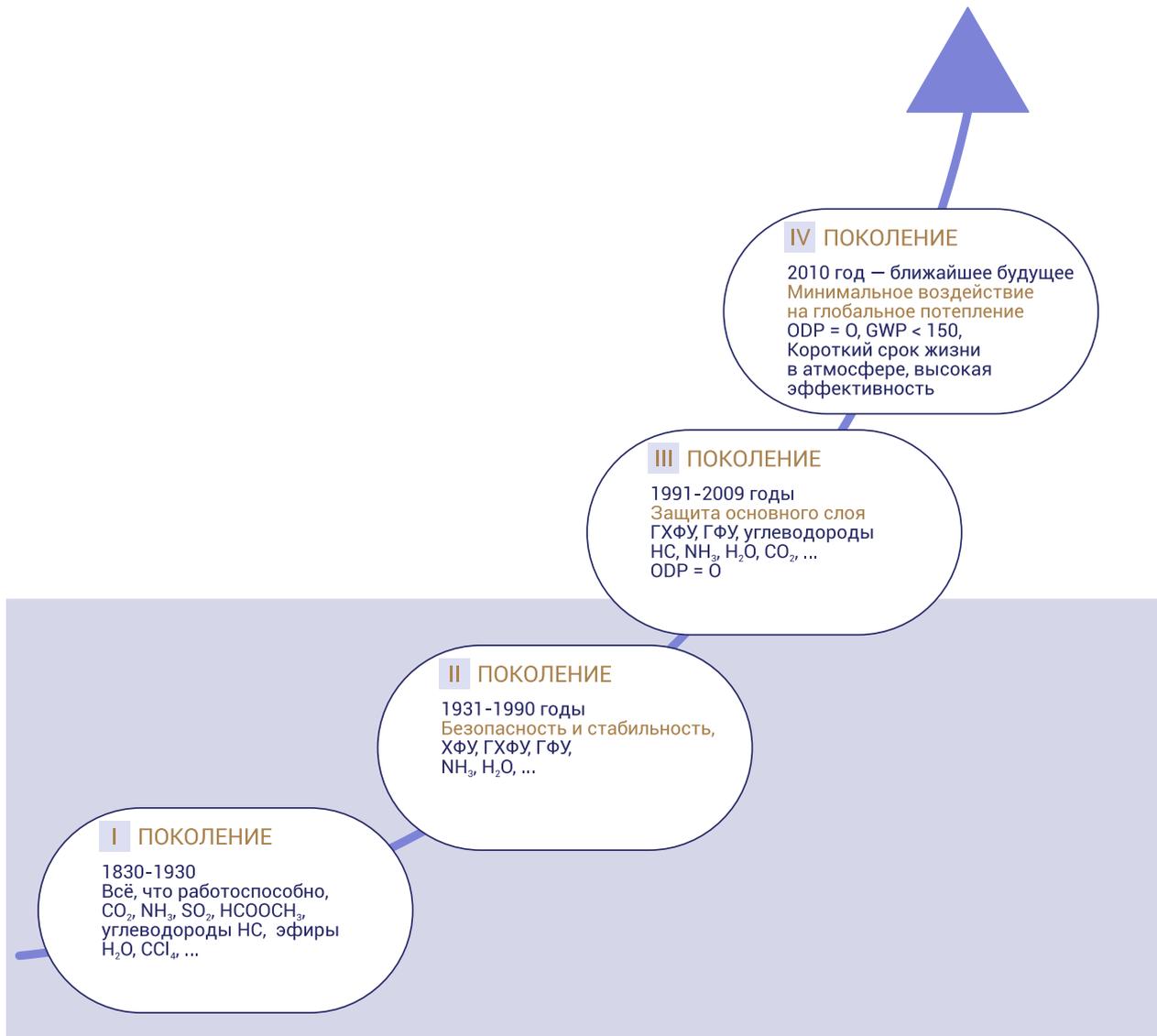
где  $Q_{\text{ГЕН}}$  – количество теплоты высокого потенциала, подведенной к генератору для выпаривания рабочего раствора.

## ПРОБЛЕМА ВЫБОРА РАБОЧИХ ТЕЛ ДЛЯ ВТН

Актуальной является проблема использования в ТН хладагентов, не влияющих на озоновый слой и на глобальное потепление климата [9-12].

На рис. 1 представлен исторический вектор движения по практическому использованию рабочих тел в ТН и холодильных машинах.

РИСУНОК 1. Эволюция в области хладагентов.



**При выборе хладагентов нового поколения необходимо учесть ряд факторов:**

- Озоноразрушающий потенциал (ODP, относительно R11);
- Потенциал воздействия на глобальное потепление (GWP, относительно R747);
- Пожаробезопасность;
- Эффективное использование природных ресурсов;
- Энергоэффективность;
- Доступность в любом количестве.

Показатели основных рабочих тел (хладагентов), характеризующие их влияние на озоновый слой Земли и глобальное потепление климата, приведены в табл. 2.

**ТАБЛИЦА 2. Свойства различных хладагентов.**

| Уровень воздействия на озоновый слой и потепление климата | Хладагент  | Озоноразрушающий потенциал (ODP) | Потенциал глобального потепления климата (GWP) | Мольная масса, г/моль | Нормальная температура кипения при давлении 1 атм, °С | Критическое давление, МПа | Критическая температура, °С |
|---|--|----------------------------------|--|-----------------------|---|---------------------------|-----------------------------|
| Озоноразрушающие вещества (содержат атомы хлора)          | R-12 (CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> )                  | 0,9                              | 10900  | 120,9                 | -29,8   | 4,13                      | 112,0                       |
|   | R142b (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ClF <sub>2</sub> )  | 0,1                              | 630  | 100,5                 | -9,8  | 4,12                      | 137,2                       |
|   | R-22 (CHClF <sub>2</sub> )                               | 0,055                            | 1780   | 86,5                  | -40,8   | 4,99                      | 96,1                        |
| Озонебезопасные   | R-134a (CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F)               | 0                                | 1430   | 102                   | -26,1   | 4,06                      | 101,1                       |
|   | R-32 (CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )                   | 0                                | 720  | 52,0                  | -51,7   | 5,79                      | 78,1                        |
|   | R-407C*  | 0                                | 1800   | 86,2                  | -43,6   | 4,63                      | 86,0                        |
| Озонебезопасные с малым влиянием на глобальное потепление | R-290 (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> ) | 0                                | 20   | 44,1                  | -42   | 4,25                      | 96,8                        |
|   | R-717 (NH <sub>3</sub> )                                 | 0                                | 0  | 17,0                  | -33,3   | 11,33                     | 132,3                       |
|   | R-744 (CO <sub>2</sub> )                                 | 0                                | 1  | 44,01                 | -78,4   | 7,38                      | 30,98                       |
|   | R-1234yf (CF <sub>3</sub> CF=CH <sub>2</sub> )           | 0                                | 4  | 114                   | -29   | 3,38                      | 95,0                        |
|   | R718 (вода)  | 0                                | < 1  | 18,02                 | 100   | 22,1                      | 374,2                       |

\* Смесь хладонов R-32/R125/R134a (23/25/52 %).

Евросоюз пересмотрел законодательство (Регламент № 517/2014) по фторсодержащим хладагентам (ГФУ), утвердив график частичного отказа от них в некоторых классах оборудования. В период между 2016 и 2030 годом использование ГФУ должно сократиться на 79 %. R410A, R134A и R407C не будут полностью запрещены, но их использование будет значительно ограничено. В отдельной проработке

нуждаются вопросы о взаимном влиянии составных компонентов неазеотропных смесей однокомпонентных хладагентов [13] на общий процесс теплообмена и эффективность расширения зоны температурного «глайда» циклов ПКТН с учётом их различной индивидуальной токсичности, воспламеняемости и воздействия на озоновый слой.

Переход к использованию в ТН рабочих тел природного происхождения сейчас является **общемировой тенденцией** и отвечает международным требованиям энергетической, экологической и экономической эффективности.

Здесь именно углекислый газ R744 ( $\text{CO}_2$ ) определил один из основных трендов будущего развития ВТН благодаря экологической безопасности и физическим свойствам: низкому потенциалу глобального потепления ( $\text{GWP} = 1$ ); отсутствию влияния на озоновый слой ( $\text{ODP} = 0$ ); экологической безопасности (в малых концентрациях в воздухе нетоксичен, участвует в природных процессах фотосинтеза, производя кислород); полному отсутствию горючести (используется в качестве средства пожаротушения); высокой удельной холодо- и теплопроизводительности. Стоимость производства  $\text{CO}_2$  невелика: она в 100–120 раз меньше, чем у фреона R134a. Основные трудности, связанные

с применением в качестве хладагента, обусловлены его низкой критической температурой  $31,05^\circ\text{C}$  и высокими рабочими давлениями при реализации прямого и обратного термодинамических циклов.

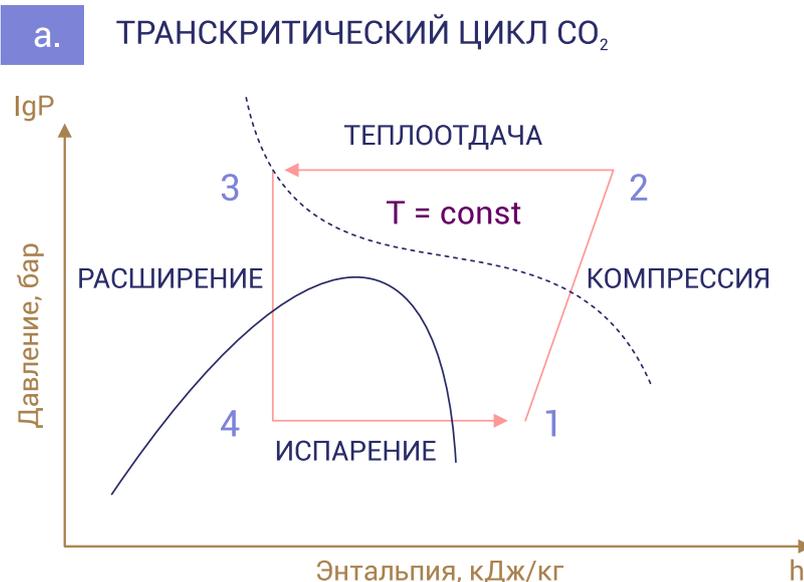
$\text{CO}_2$  является парниковым газом. Однако, технологии его пассивной утилизации давно существуют. Например, в США 20 млн тонн закачивается в пустоты, которые остаются после разработки нефтяных скважин, рассматриваются также технологии его захоронения на дне морей в газогидратном состоянии. Тепловые насосы на  $\text{CO}_2$  и энергоустановки, работающие по замкнутому циклу Аллама [14], позволяют бороться с глобальным потеплением, не сокращая при этом его выбросы в атмосферу. По образному выражению автора работы [15], это технологические «ловушки для  $\text{CO}_2$ », обеспечивающие его активное использование.

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ ПАРКОМПРЕССИОННОГО ТИПА НА R744 ( $\text{CO}_2$ )

Одним из примеров коммерческой реализации ВТН на  $\text{CO}_2$  является продукция китайской фирмы TICA [16]. ВТН производится по технической лицензии компании Mauekawa Japan (рис.2). Изделие предназначено для

нагрева водопроводной или рециркулирующей воды до  $65^\circ\text{C}$  или до  $90^\circ\text{C}$  с использованием теплоты окружающего воздуха. В основе работы теплового насоса – транскритический цикл на  $\text{CO}_2$ .

РИСУНОК 2. Высокотемпературный тепловой насос на R 744 ( $\text{CO}_2$ ): транскритический рабочий цикл



Благодаря реализации транскритического цикла можно нагревать воду до 90 °С в течение

всего года, причем без дополнительного электронагревателя (табл.3).

ТАБЛИЦА 3. Технические характеристики ВТН марки ТСАН 200 НН на R744(CO<sub>2</sub>)

| Наименование  | Параметр   | Показатели                           |
|---|--|--------------------------------------|
| Источник питания  | переменный ток                                     | 3-фазный, 380В, 50Гц                 |
| Хладагент   | тип, масса заправки                                | R744(CO <sub>2</sub> ), 20 кг        |
| Расчетное давление хладагента в рабочем цикле                 | МПа (бар)  |                                      |
|   | на стороне высокого давления (рис. 2, процесс 2-3) | 15 (150)                             |
|   | на стороне низкого давления (рис. 2, процесс 4-1)  | 6,4 (64)                             |
| Диапазон рабочих температур                                   | окружающий воздух                                  | - 15 ...+43°С                        |
| Воздушный теплообменник                                       | отбор тепла от окружающего воздуха                 | Медные трубки с алюминиевыми ребрами |
| Компрессор  | тип и мощность двигателя                           | 4-полюсной, 25 кВт                   |
|   | режим пуска  | частотно-регулируемый                |
| Встроенный водяной насос                                      | тип и мощность двигателя                           | 2-полюсной, 250 Вт                   |
| Вентилятор воздушный  | мощность, количество                               | 0,75кВт, 2 шт.                       |
| Нагрев воды до 65°С (стандартный режим)                       | производительность, кВт                            | 80                                   |
|   | потребляемая мощность, кВт                         | 15,96                                |
|   | расход нагреваемой воды, м <sup>3</sup> /ч         | 1,38                                 |
| Нагрев воды до 90°С (режим мощного нагрева)                   | производительность, кВт                            | 79                                   |
|   | потребляемая мощность, кВт                         | 17,35                                |
|   | расход нагреваемой воды, м <sup>3</sup> /ч         | 0,92                                 |
| Поддержание температуры воды в баке-накопителе на уровне 90°С | производительность, кВт                            | 56                                   |
|   | потребляемая мощность, кВт                         | 19,1                                 |
|   | расход нагреваемой воды, м <sup>3</sup> /ч         | 1,22                                 |
| Максимальный уровень шума                                     | в теплое/холодное время года, дБ                   | 62/66                                |
| Температура воды  | на входе   | от 5 до 65°С                         |
|   | на выходе  | 65 или 90°С                          |
| Габариты  | Ш x Д x В, мм                                      | 1250 x 1900 x 2065                   |
| Масса   | нетто, кг  | 1344                                 |

Наряду с другими странами ранние экспериментальные аналоги ВТН на CO<sub>2</sub> для индивидуальных домов создавались в России [17] компа-

нией ЭКИП (г. Москва). Тепловой насос THCO<sub>2</sub>-20 теплопроизводительностью 20 кВт обеспечивал отопление дома на двух температурных уровнях:

■ Высокотемпературном (традиционное отопление), температура сетевой воды 85 °С;

■ Низкотемпературном (напольное отопление), температура сетевой воды 45 °С.

В качестве источника низкопотенциального тепла использовалась грунтовая вода с температурой 8°C. В конструкции был использован поршневой компрессор итальянской фирмы «Dorip» для работы на R744 с давлениями нагнетания до 40 МПа.

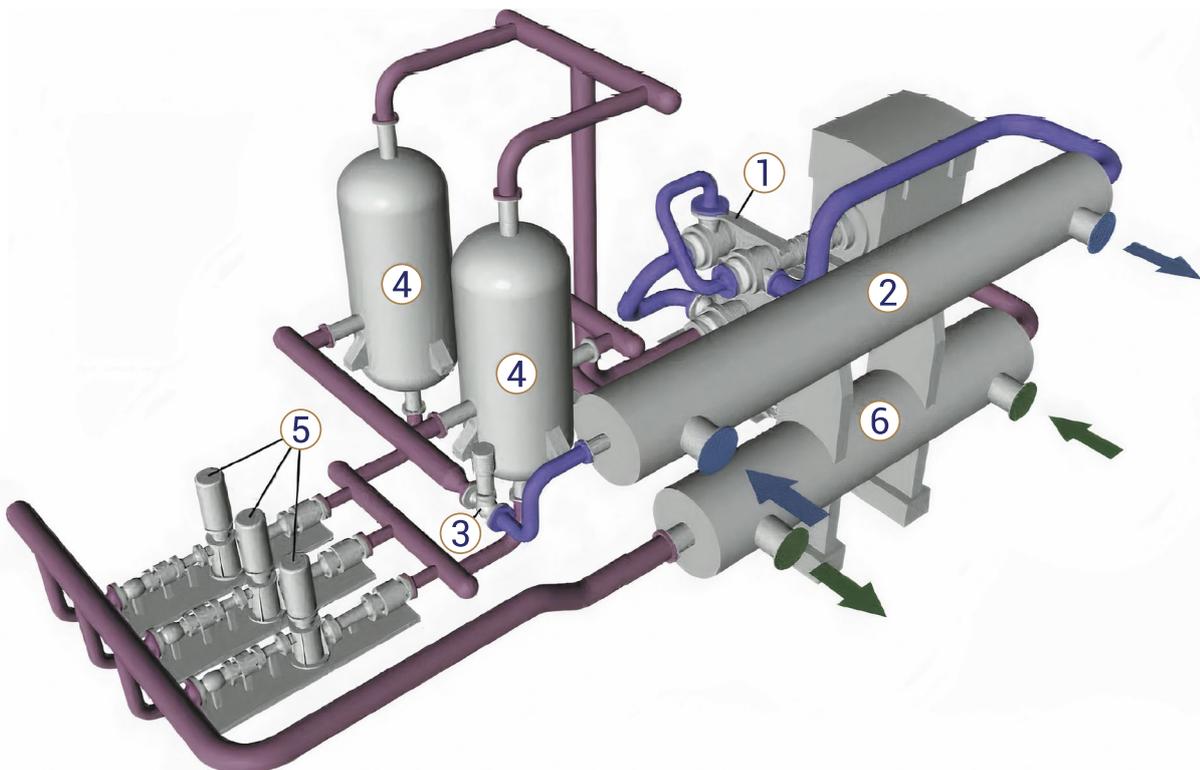
В настоящее время ТН на CO<sub>2</sub> малой мощности широко представлены на рынке. Так, например агентство Environmental Building News включило тепловой насос для нагрева воды от компании Sanden производительностью 4,5 кВт в список 10 лучших товаров 2016 года. В апреле 2016 года компания Toshiba Carrier объявила о поэтапном выводе на японский рынок 59 новых моделей серии Estia 5 линейки водонагревательных ВТН EcoCute, использующих в качестве хладагента R744. Компания Mitsubishi Electric выпустила на британский рынок систему Ecodan QUNZ, представляющую собой моноблочный тепловой насос «воздух-вода» производительностью 4 кВт, способный нагревать воду до 70°C. В 2016 году тепловой насос Ecodan FTC5 был удостоен награды RAC Cooling Award в номинации «Инновации в области кондиционирования воздуха или тепловых насосов».

Бурно развивающийся рынок ТН малой мощности (до 100 кВт) позволяет предположить возможность эффективного использования аналогичных устройств большой мощности – до 30 МВт и более. Их применение особо актуально в городах, где остро стоит проблема утилизации тепловых отходов, например городских и промышленных сточных вод. Важно, что высокий уровень давления в транскритическом цикле CO<sub>2</sub> позволяет существенно сократить габариты ВТН по сравнению с другими ПКТН, использующими субкритические циклы. Это является принципиальным преимуществом при создании мощных ТН, работающих на R-744. Попытки создания техники мощностью до 50 МВт для экологически чистого централизованного теплоснабжения предпринимались в России в 2002-2006 гг. в рамках выполнения федеральной программы [17,18]. Такие ВТН позволят использовать в качестве источника низкопотенциального тепла тепловую энергию промышленных стоков, выбросов ТЭС, предприятий металлургической, нефтехимической отраслей. Схема одного из вариантов ВТН на CO<sub>2</sub>, обеспечивающего нагрев воды до 90°C, представлена на рис. 3.

РИСУНОК 3.

Схема ВТН теплопроизводительностью 23 МВт типа «вода-вода» на R744: 1 – турбокомпрессор; 2 – водонагреватель; 3 – регулирующий клапан; 4 – отделитель жидкости; 5 – насос для циркуляции CO<sub>2</sub>; 6 – водоохладитель. Трубопро-

воды: оранжевые – высокого давления (9,0-13,0 МПа), зеленые – низкого давления (4,0-6,0 МПа); стрелки: красные – нагреваемая сетевая вода (5-90°C), синие – источник бросовой теплоты (15-40°C).



На основе сравнительного анализа рабочих циклов на R744 (CO<sub>2</sub>), R718 (вода) и фреонов R134a, R142b при нагреве воды с 40 до 80°C с использованием в качестве низкопотенциального источника тепла воды

- Малая требуемая объемная производительность и размеры компрессора благодаря более высокой плотности пара и высокой удельной объемной теплопроизводительности;
- Малое отношение давлений в рабочем цикле создает благоприятные условия для эффективной работы компрессора (при использовании центробежного компрессора потребуется только одна ступень сжатия);
- Высокий уровень давлений и высокая плотность газообразного R744 позволяют при одинаковом с хладагентами относительном

с температурой 10°C и соответственно температурах испарения и конденсации рабочих тел 5 и 85°C (кроме R744) авторами [19] выделены преимущества использования R744 (CO<sub>2</sub>) для создания мощных ВТН:

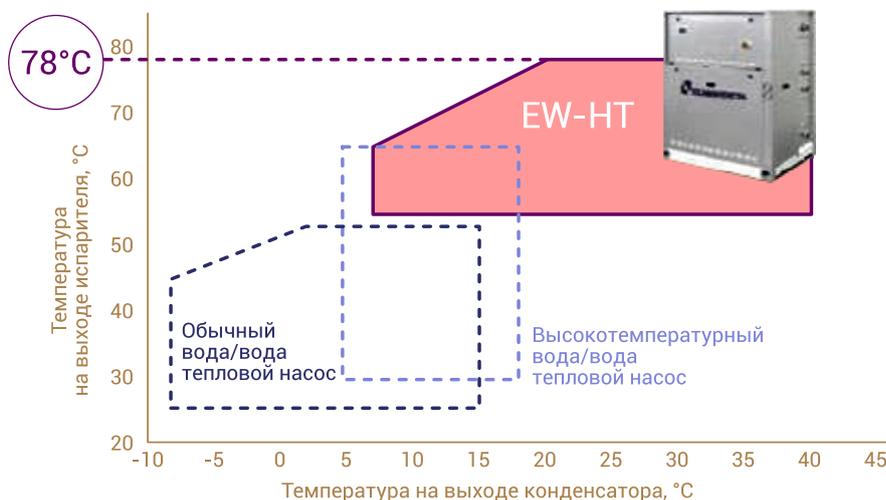
- гидросопротивлению в трактах иметь более высокие массовые скорости потока (соответственно сокращаются проходные сечения каналов и диаметры труб);
- Высокие массовые скорости потока R744 в теплообменных аппаратах позволяют достичь высоких коэффициентов теплоотдачи и сократить массу и габариты теплообменников;
- Существенно большая по сравнению с хладагентами доля работы расширения в работе цикла создает условия для использования детандера с целью повышения значения COP.

## ДРУГИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТИПЫ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ВТН

Перспективы перевода работы на высокотемпературный уровень выработки тепла традиционных ПКТН, использующих субкритические циклы, также являются технически обоснованными. В реверсивных ПКТН используют двухкомпрессорные схемы, позволяющие поднять до 80°C температурный уровень нагреваемого теплоносителя. Так, например линейка высокотемпературных тепловых насосов серии EW-HT

позволяет получить от 70 до 279 кВт тепла с нагревом теплоносителя до 78°C (рис.4). Они используют среднетемпературную воду как источник тепла для производства воды с более высокой температурой. Расширенный за счет двухкомпрессорной схемы рабочий диапазон нагрева теплоносителя позволяет ВТН этой серии интегрироваться в любые сложные системы теплоснабжения, включая централизованные.

РИСУНОК 4. Температурные уровни работы ВТН серии EW-HT [20].



### Появление на рынке ВТН серии EW-НТ - это результат симбиоза высоких технологий и новых сфер применения ВТН:

- Использован спиральный компрессор с особой формой спирали (расширяет рабочий температурный диапазон работы, смещая как температуру кипения, так и конденсации);
- Появилась возможность эффективной работы в составе систем централизованного теплоснабжения (различные источники тепла и потребители подсоединяются к общей системе с температурой 40-45°C, а EW-НТ часть этого тепла эффективно преобразует в тепло 70-80°C);
- Произведена рекуперация теплоты без прямых потерь в промышленных производствах (один технологический поток охлаждается, нагревая с помощью EW-НТ другой);
- Реализовано охлаждение мощных серверов (IT cooling) в режиме работы 24/7 с одновременным производством тепла для отопления, горячего водоснабжения и технологий тригенерации.

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ СОРБЦИОННОГО ТИПА

ВТН сорбционного типа имеют различную природу сорбентов, обеспечивающих реализацию обратных термодинамических циклов.

### АБСОРБЦИОННЫЕ ВТН

Абсорбционные бромистолитиевые тепловые насосы (АБТН) обеспечивают нагрев воды до 90°C с использованием в качестве источника энергии для реализации рабочего цикла теплоты греющего пара с давлением до 0,75 МПа или природного газа, а также низкопотенциальной сбросной или природной теплоты различных теплоисточников с температурой 20-40°C. Доля низкопотенциальной теплоты, используемой в одноступенчатой АБТН для выработки полезной теплоты составляет около 40%. Введение многоступенчатой схемы регенерации водно-солевого раствора позволяет увеличить этот показатель почти вдвое. Рабочим веществом (хладагентом) в АБТН является вода, абсорбентом – водный раствор

соли бромид лития (LiBr). Это экологически чистые рабочие тела. АБТН имеют высокую энергетическую эффективность ( $\mu = 1,7-2,2$ ), низкий уровень шума при работе, просты в обслуживании, имеют длительный срок службы, полностью автоматизированы. Для АБТН не требуется больших количеств электроэнергии, как для ПКТН. АБТН могут использоваться для получения горячей воды на нужды отопления и горячего водоснабжения, для нагрева и охлаждения технологических сред в промышленности, энергетике, сельском хозяйстве и т.д. В России их разработкой занимается ООО «ОКБ Теплосибмаш» (г. Новосибирск), а мировыми лидерами производства являются фирмы Thermax (Индия) и Broad (Китай).

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВОДОРОДНЫЕ АБТН

В связи с развитием водородных и нанотехнологий стоит обратить внимание на совершенствование металлгидридных ТН (водородных АДТН), которые в отличие от АБТН с жидкими сорбентами могут работать в условиях пониженной гравитации и полной невесомости. Их рабочим телом является обратимо циркулирующий водород [21-23]. В качестве сорбентов рассматриваются твердые гидриды металлов, например LaNi, LaNiAl, LaNiSn

и LaNiMn. Водородные АДТН обладают высокой термодинамической эффективностью в широком диапазоне изменения температур, но требуют обеспечения высокого уровня надежности эксплуатации при высокой стоимости. Действие этих теплотехнических устройств основано на использовании теплового эффекта обратимой реакции гидрирования металла или интерметаллического соединения:



При сорбции водорода выделяется теплота, при его десорбции поглощается теплота из окружающей среды, т. е. генерируется холод или происходит передача тепла от низкопотенциального возобновляемого или сбросного теплоисточника. Использование этих тепловых эффектов дает

возможность осуществлять работу гидридных ТН в широком диапазоне температур от -50 до +200°C. Свойства гидридообразующего материала определяют его эффективность. Для оценки эффективности устройства используются два ключевых соотношения:

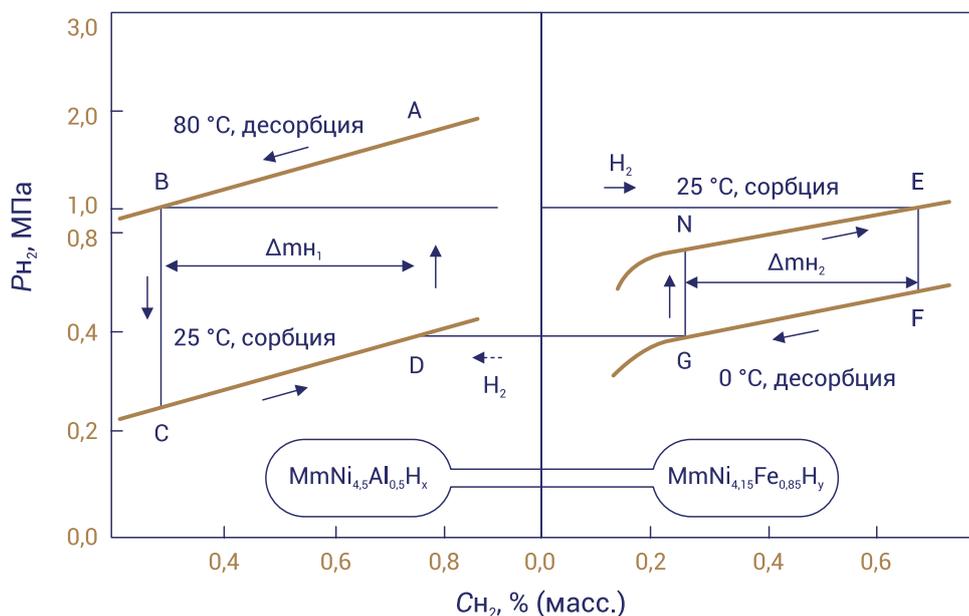
$$5 \quad \ln p = \Delta H / RT - \Delta S / R$$

$$6 \quad \text{COP} = \frac{\Delta m_H \Delta H_1 - c_{m_1} \Delta t_1}{\Delta m_H \Delta H_h - c_{m_h} \Delta t_h}$$

Где  $p$  – равновесное давление водорода;  $\Delta H$  – энтальпия образования гидрида;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура, К;  $\Delta S$  – энтропия образования гидрида;  $\Delta m_H$  – масса водорода, принимающего участие в процессах

сорбции – десорбции;  $\Delta t_l$ ,  $\Delta t_h$  – изменение температуры сорбера за один цикл;  $m_l$ ,  $m_h$  – масса сорбера;  $c_l$ ,  $c_h$  – теплоемкость сорберов; индексы «l» и «h» соответственно относятся к низкотемпературному и высокотемпературному гидридам.

РИСУНОК 5. Цикл работы гидридного водородного АДТН на основе пары  $MmNi_{4,5}Al - MmNi_{4,15}Fe_{0,85}$ .

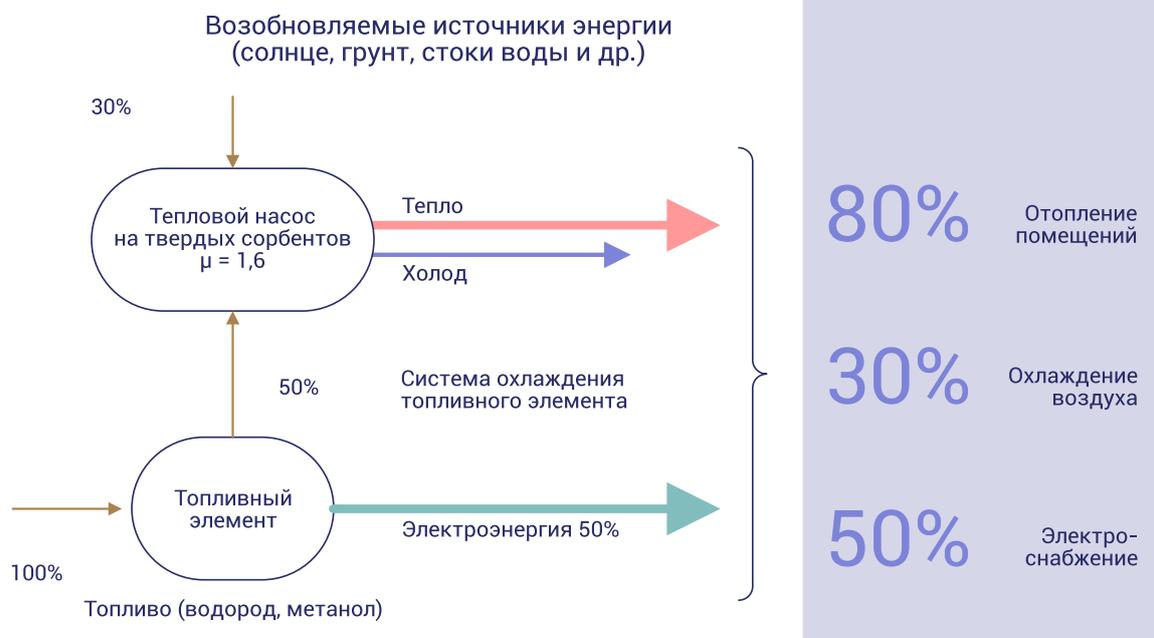


Движущей силой для перетекания водорода от одного металлгидрида к другому является перепад давлений между гидридными зонами при соответствующих температурах. При выравнивании давлений поток водорода и сопровождающие его тепловые эффекты за счет сорбции и десорбции прекращаются. Точки предельных состояний соответствуют условиям при неизменной общей массе водорода в системе. Для условий, представленных на рис.5, авторами [22] определены величины  $\mu = 0,45\%$  и  $\mu = 1,3$ . Общепринятой для металлгидридных ТН является схема, при которой генерация тепла и холода, а соответственно сорбция и десорбция водорода происходят попеременно в одном и том же рабочем объеме в зависимости от направления потока водорода. Ее неоспоримым достоинством является отсут-

ствии движущихся частей, а недостатком – необходимостью в значительном количестве вентилях или клапанов в системе управления. Температурные возможности металлгидридных ТН могут быть существенно расширены, а эффективность увеличена за счет использования двух и более ступенчатых схем. Однако, работы по созданию промышленных образцов металлгидридных ТН ограничиваются пока только малыми машинами, где лидером является Япония.

Перспективы водородных АДТН периодического действия связывают с развитием водородных технологий (рис. 6), в частности, с созданием эффективных систем тригенерации [24] на основе высокотемпературных топливных элементов (ТЭ). На рис.6 представлен вариант одной из таких систем.

РИСУНОК 6. Схема тригенерации, выполненная на базе топливных элементов (ТЭ) и адсорбционных тепловых насосов (АДТН).



**Для широкого практического использования ВТН в ближайшие годы необходимо принять во внимание системные преимущества теплонасосных технологий для России, которые были сформулированы ранее в [25]:**

- 1** **Возможность расширения ресурсной базы теплоснабжения**, делающую ее менее зависимой от поставок ископаемых топливных ресурсов, что весьма важно в условиях растущей стоимости топлива и нестабильности его поставки.
- 2** **Рациональное использование электроэнергии** в системах теплоснабжения, особенно в часы ночных провалов потребляемой мощности.
- 3** **Более широкое понимание централизации теплоснабжения.** Применение ТН с электроприводом не сокращает централизацию теплоснабжения, а переводит ее на более высокий качественный уровень, присущий электроснабжающим системам. При этом упрощается система регулирования подачи теплоты потребителям, от несовершенства которой в настоящее время теряется до 20% потребляемой теплоты.

- 4 Совместная с ТЭЦ работа в действующих теплофикационных системах.** Здесь они могут применяться для снижения температуры обратной сетевой воды с обеспечением дополнительной выработки электроэнергии по экономичному теплофикационному циклу, а также в системах оборотного водоснабжения для улучшения работы градирен. Перспективно для этих целей использование внутриквартальных установок на базе АБТН с газовой топкой.
- 5 Свобода выбора привода для ТН.** Электропривод является самым распространенным устройством, связывающим ТН с энергосистемой напрямую. Однако, в конкретных условиях города в качестве привода для ТН могут применяться детандер-генераторные установки, использующие избыточное давление природного газа в газоснабжающей системе, небольшие гидроэнергетические установки, использующие избыточное давление воды в системе городского водоснабжения и водоотведения вследствие разницы геодезических отметок местности, ветроэнергетические установки, а также газотурбинные установки и двигатели внутреннего сгорания.
- 6 Возможность использования для гибкого регулирования структуры топливопотребления города и отдельных регионов.**
- 7 Связь со смежными областями народного хозяйства.** В промышленности ВТН производят тепло, охлаждая технологические потоки, то есть совмещают функции нагревательных и охлаждающих устройств, что снижает энергозатраты на производство промышленной продукции.
- 8 Развитие экологически чистого теплоснабжения в зонах рекреации и на территории особо охраняемых природных территорий.** Экологический фактор в рекреационных зонах является одним из определяющих системообразующих факторов социально-экономической деятельности, направленной на сохранение исходного природного многообразия флоры и фауны, здоровья населения планеты.

*Надеемся, что тепловые насосы и технологии на их основе позволят человечеству сохранить планету Земля своим потомкам.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Закиров Д.Г. Будущее за теплонасосными технологиями//Журнал «Новости теплоснабжения» № 8 (72), 2006 г.
2. Пузаков В.С. «Облачные» технологии – энергоемкий потребитель или эффективный источник теплоснабжения? // Журнал «Новости теплоснабжения» № 2, 2017 г.
3. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., перераб. - М.: Энергоиздат, 1981. - 320 с.
4. Применение кольцевых теплонасосных систем // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы», № 2, февраль 2009.
5. Шабанов В.Е. Применение кольцевых теплонасосных систем// АВОК, № 4,-2006 -с. 46-55
6. Быстро растущий рынок тепловых насосов// Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы», № 5, май 2009.
7. Милова Л. Тепловые насосы для водяных систем отопления и горячего водоснабжения // С.О.К.: Сантехника, отопление, кондиционирование. - 2009. - N 4. - С.50-58.
8. Мировой рынок тепловых насосов. Краткий обзор // АВОК. - 2006. - N 4. - С.56-58.
9. Киотский протокол к рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата» Официальный текст на русском языке. - ООН, 1998г. Источник - <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprus.pdf>
10. Вирт Д.А. Парижское соглашение: новый компонент климатического режима ООН // Вестник международных организаций. — 2017. — Т. 12. — № 4. — С. 196. — С. 185—214.
11. Цветков О.Б., Лаптев Ю.А. Хладагенты и климатические мифологемы // Холод. техника. - 2009. - N 2. - С.56-59.
12. Малафеев И.И. Рабочие тела высокотемпературных тепловых насосов. Современное состояние вопроса и направления развития // И.И.Малафеев, Г.А. Ильин, К.С. Крысанов/ Известия МГТУ «МАМИ» № 3(21), 2014, т.3 с.53 – 58.
13. R. Radermacher, Y.Hwang. Vapor Compression Heat Pumps with Refrigerant Mixtures. – New York: Taylor and Francis Group, 2005. – p. 307
14. Чистая генерация на основе «Цикла Аллама»: первая в мире ТЭС с нулевыми выбросами в окружающую среду.
15. Источник: <http://www.energsovet.ru/news.php?zag=1554794571>
16. Глобальная энергия: книга о людях, изменивших мир / Ирина Белашева.- Москва: Яуза-каталог, 2017.-336с.
17. Источник: <https://tica.pro/shop/heat-pump/>
18. Калнинь И.М., Фадеков К.Н. Оценка эффективности термодинамических циклов парокompрессионных холодильных машин и тепловых насосов // Холодильная техника. 2006, №3.– с. 16 – 25.

19. Калнинь И.М. Диоксид углерода экологически безопасное рабочее вещество для тепловых насосов. // V Международная конференция, Москва, МГУИЭ, Сборник докладов, 2003, с. 7779.
20. Султангузин И. А. Тепловые насосы для российских городов // И. А. Султангузин, А. А. Потапова, А. В. Говорин и др./ Журнал «Энергосбережение», №1, 2011. – С.66-71
21. Источник: <https://hiconix.ru/products/ew-ht-0152-0612-teplovye-nasosy-tipa-voda-voda-tolko-rezhim-nagreva-podgotovka-goryachey-vody-ochen-/>
22. Боровских О.В. Моделирование процессов тепломассообмена в металлгидридных аккумуляторах водорода. Автореферат диссертации на соискание степени к.т.н.- М.: 2008. – 106с.
23. Ижванов Л.А., Соловей А.И. Разработка гидридных тепловых насосов // Рос. хим. журн. - 2001. - Т.45, N 5-6. - С.112-118.
24. Матвеева О.П., Патрикеев Ю.Б., Семячков Д.А. Методический подход к выбору водородопоглощающих сплавов для металлгидридных тепловых насосов // Двойные технологии. - 2008. - N 4(45). - С.59-62
25. Васильев Л.Л. Современное состояние проблемы тепловых насосов и холодильной техники // Инж.-физ. журн. - 2010. - Т.83, N 4. - С.763-778.
26. Гашо Е. Г. Особенности эволюции и повышение эффективности распределенных коммунальных систем энергообеспечения городов // Известия РАН. Энергетика. 2006. №4.- С. 77-88.

# ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

**Мещеряков Станислав Васильевич**  
Профессор, Заведующий кафедрой  
промышленной экологии РГУ нефти  
и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

## АННОТАЦИЯ

Нефтегазовая промышленность играет ведущую роль в мировой экономике и тесно связана с другими отраслями промышленности. Это сложная система, включающая разведку нефтегазовых месторождений, добычу полезных ископаемых, транспортировку, хранение, переработку и их дальнейшую реализацию. В тоже время, используя полезные ископаемые в качестве ресурсов для развития, мы сталкиваемся с проблемой образования и накопления нефтесодержащих отходов (далее

– НСО). Данный класс отходов наносит непоправимый вред окружающей среде. В связи с тем, что нефтяные отходы имеют различное происхождение, невозможно унифицировать технологические решения их переработки или утилизации. Анализируя все то, что реализуется в настоящее время в технологиях переработки нефтяных отходов, мы пришли к выводу о необходимости осуществления системного подхода к переработке этого вида отходов.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, проблема накопления НСО является приоритетной для нефтегазовой отрасли. Это связано с тем, что ежегодно увеличиваются объемы образования отходов, а также остаются не переработанными исторические объекты накопленного экологического вреда. Из так называемых «законов экологии»

Барри Коммонера мы знаем, что «все должно куда-то деваться» и «ничто не дается даром», поэтому вопросы эффективного обезвреживания НСО и ликвидации объектов их накопления в условиях борьбы за чистую и безопасную окружающую среду выступают сегодня на первый план.

На предприятиях нефтегазового комплекса, накоплено несколько большое количество НСО, которые образуются при бурении, подготовке нефти, зачистке танкеров и резервуаров, ремонтных работах, разливах нефти, очистке сточных вод. Работы по ликвидации объектов накопленного экологического вреда проводятся не в полной мере, требуют особого внимания, а также проведение ранжирования по классам НСО.

Классифицировать НСО достаточно сложно, так как каждый из них обладает уникальным составом и отличается по своим реологическим и физико-химическим характеристикам, поэтому существующий классификатор не полностью отражает информацию о их свойствах. Проанализировав, существующие литературные источники в области образования нефтяных отходов и объединив их, мы классифицировали НСО следующим образом [1-4] табл. 1:

ТАБЛИЦА 1. Классификация НСО по источнику их образования.

| Источники образования НСО | Тип отхода   |
|---------------------------|--|
| Бурение скважин           | Буровой шлам   |
|                           | Отработанные буровые технологические жидкости          |
|                           | Буровые сточные воды                                   |
| Добыча нефти и газа       | Нефтешлам  |
|                           | Жидкие отходы с высоким содержанием нефтепродуктов     |
|                           | Отходы при обслуживании оборудования                   |
|                           | Отработанные масла                                     |
|                           | Нефтезагрязненные пески                                |
|                           | Проппант   |
|                           | Асфальтосмолопарафиновые отложения                     |
|                           | Сточные воды   |
| Транспорт и хранение      | Асфальтосмолопарафиновые отложения                     |
|                           | Резервуарные нефтешламы                                |
|                           | Танкерные нефтешламы                                   |
|                           | Нефтесодержащие воды                                   |
|                           | Нефтесодержащие отходы после зачистки оборудования     |
|                           | Образование техногенных линз под объектами хранения    |
| Переработка нефти и газа  | Нефтешлам прудов шламонакопителей                      |
|                           | Нефтешламы зачистки нефтяных и мазутных резервуаров    |
|                           | Кубовые остатки процессов нефтепереработки             |
|                           | Нефтесодержащие осадки из кустовых очистных сооружений |
|                           | Горючие материалы                                      |
|                           | Промывочные жидкости                                   |
|                           | Смазочные материалы                                    |
|                           | Нефтесодержащие осадки из очистных сооружений          |
|                           | Водонефтяные эмульсии                                  |
|                           | Кислые гудроны   |
| Ликвидация разливов нефти | Нефтезагрязненный грунт                                |
|                           | Высокозабитуминизированная нефть                       |
|                           | Водонефтяные эмульсии                                  |
|                           | Отработанные сорбирующие материалы                     |
|                           | Отработанные боновые загрязнения                       |

Данная классификация позволяет показать, что на разных технологических процессах образуются по названию одни и те же отходы, например, нефтешламы, но по своему физико-химическому составу они будут существенно отличаться, и будут требовать индивидуального подхода их переработки.

НСО весьма разнообразны и представляют собой сложные системы, состоящие преимущественно из углеводородной, водной и минеральной фазы, процентное соотношение которых различно в зависимости от типа отхода. Так, например, содержание углеводородной фазы в буровых шламах может быть не более 1% масс., а в резервуарных нефтешламах достигает порядка 90% масс. Степень обводненности нефтешламов также отличается, в зависимости от их типа, условий образования и длительности хранения. Кроме этого, нефтяные отходы, находящиеся в резервуарах, прудах-накопителях, местах временного хранения, на поверхности природных объектов (вода, почвы) в настоящее время перерабатываются технологиями, не всегда отвечающими современным экологическим требованиям. Например, при сепарации нефтяных отходов, выделяемая углеводородная масса имеет различный состав, в зависимости от объекта разделения и не всегда достигает параметров ГОСТа на нефтепродукты. В то же время водная часть и твердые остатки (кек) требуют дальнейшей очистки. Для этого необходимо использовать дополнительное оборудование для достижения требуемых параметров по всем трем продуктам разделения. С такой же проблемой мы сталкиваемся и с термическими процессами переработки нефтяных отходов. Это и загрязнение воздушного бассейна, и необходимость утилизации твердых отходов (зола, кек). Недостатки этих процессов достаточно полно описаны в технической литературе.

Когда проблема накопления НСО стала приобретать глобальный характер, было разработано несколько методов их переработки и утилизации. С экономической точки зрения самыми выгодными способами были те, которые несут наименьшее количество энергетических и финансовых затрат. Поэтому, практически все используемые методы были направлены не на переработку НСО, а на их уничтожение. Причем, после уничтожения НСО могли появиться дополнительные отходы в виде газовых выбросов, недогоревших, недомытых или непрореагировавших остатков. Практически все способы работы с НСО нацелены либо на разделение отхода на составляющие фазы, либо на его уничтожение и только малая доля методов направлена на переработку до безопасных или коммерческих

продуктов, поэтому, существующие методы переработки или утилизации НСО классифицируют на механические, химические, физико-химические, термические, биологические [5].

Механический метод используется при сборе НСО после ее попадания в объекты окружающей среды. С помощью механической техники срезают и экскавируют тяжелые нефтяные остатки, а с помощью вакуумной техники откачивают жидкую углеводородную фазу. Далее собранные отходы отвозят на места складирования и дальнейшей переработки.

К физическим методам относятся способы гидростатического и гидромеханического воздействия, включающие такие операции как разделение, отстаивание, фильтрация, центрифугирование.

При отстаивании происходит разделение НСО за счет разницы плотности нефти и воды, а также осаждения механических примесей. При отстаивании образующийся на поверхности слой нефти откачивают и вовлекают в дальнейшие процессы переработки. Данный процесс не решает проблемы утилизации НСО, однако позволяет их разделить на составляющие с дальнейшим вовлечением в технологический процесс [6].

Процесс фильтрации достаточно длителен и сложен, особенно если НСО является нефтешлам, а его углеводородная фаза обладает высокой вязкостью, плотностью и низкой температурой застывания. Поэтому фильтрацию НСО могут проводить на специальных вакуум-фильтрах и фильтр-прессах [7].

При центрифугировании используют декантеры и трикантеры, на которых происходит механическое центробежное разделение НСО за счет разницы плотностей разделяемых фаз. При декантации НСО разделяют на две фазы, например на нефть и воду, а при трикантации отходы разделяют на нефть, воду и механические примеси. Данный метод показывает высокие результаты по разделению НСО, однако после его использования существует риск образования воды и механических примесей, содержащих остаточные нефтепродукты, которым необходима организация дополнительных ступеней очистки после их разделения [8].

Физико-химические методы используются при разделении и утилизации НСО. Во время технологических операций используются процессы флотации, флокуляции, коагуляции, сорбции, экстракции, ионного обмена. Данный метод требует дополнительных затрат на реагенты и обеспечение необходимых условий работы технологического процесса. В данной области были достигнуты интересные резуль-

таты по повышению эффективности процессов седиментации и флотации с помощью ультразвуковой обработки [9].

Химический метод подразумевает использование различных реагентов, способствующих протеканию реакций окисления и/или восстановлений, замещения, комплексообразования и осаждения [10].

Отдельно стоит выделить способ химического комплексообразования. Он является одним из самых распространенных, особенно при работе с буровыми и нефтяными шламами. Данный метод заключается в разбавлении НСО вязкими веществами как неорганического, так и органического происхождения, наиболее распространенными являются различные типы извести, цемента, бентонита, золы, силикатов, песка, торфа. Метод является одним из экономически выгодных, так как не требует затрат кроме закупки вязких веществ и технологического оборудования для их смешивания. Однако, он абсолютно не решает задач по переработке отходов, так как разбавляя отходы мы всего лишь понижаем их класс опасности. То есть, из 1 м<sup>3</sup> отхода III класса опасности получаем 5 или 10 м<sup>3</sup> отхода IV класса опасности. Формально, загрязняющие вещества так и остаются в окружающей среде в иммобилизованном состоянии, однако за ними необходим постоянный экологический и химический контроль, а также нельзя забывать, что «ничто не вечно», и за счет биотических и абиотических факторов материал из иммобилизованного состояния может в любое время перейти в мобилизованное.

Самым распространенным примером на практике является то, что комплексобразованные материалы проявляют неустойчивость к влаге, поступающей из атмосферы или грунтовых вод, что приводит к их разрушению и высвобождению в окружающую среду загрязняющих веществ. Также высок риск того, что при смешивании буровых НСО с вязкими материалами в состав буровых шламов будут входить глины с низкой проницаемостью воды, что может привести при обильных атмосферных осадках к подтоплению территорий, где будут размещаться «обезвреженные» отходы.

Биологический метод переработки НСО основан на использовании микробиологических культур в качестве средства для разложения нефтяных углеводородов в окружающей среде. Данный метод обладает высокой эффективностью по борьбе с нефтяными загрязнениями, однако требует длительного времени работы, а также наличия специальных условий. Кроме этого, в зависимости от химического состава НСО необходимо тщательно подбирать микробиологические культуры устойчивые к конкретному типу отходов, а также способные к биодеструкции углеводородного загрязнения [11]. Перспективным направлением в данной области будет объединение биологических методов очистки с сорбционными. Используя биоразлагаемые сорбирующие материалы в качестве носителей микробиологических культур, можно достичь высоких показателей очистки.

Основные преимущества и недостатки каждого метода приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Преимущества и недостатки методов переработки НСО.

| Способы переработки НСО | Преимущества   | Недостатки   |
|-------------------------|--|--|
| Термические             | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Уменьшается объем отходов</li> <li>■ Понижение класса опасности до безопасного</li> <li>■ Получение полезных продуктов</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ В случае инсинерации – необходимо очищать дымовые газы сложными и дорогостоящими системами</li> </ul>   |
| Химические              | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Можно получить строительные материалы</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Затраты на реагенты, экологическая нагрузка процесса переработки шлама достаточно велика</li> </ul>     |
| Механические/физические | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Благодаря декантеру можно экстрагировать 90% нефти</li> <li>■ Полученный концентрат экономит дальнейшую переработку</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Дорогостоящее, 100% импортное оборудование, которое требует квалифицированного обслуживания.</li> </ul> |

|                   |   |  |
|-------------------|---|--|
| Физико-химические | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Уменьшение нагрузки на окружающую среду из-за нейтрализации шлама</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Стоимость реагентов, экологическая нагрузка переработки шлама велика</li> </ul>   |
| Биологические     | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Наименее трудозатратный способ</li> <li>■ Нанесение активного биологического вещества</li> <li>■ Малая нагрузка на окружающую среду</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Жесткие требования эксплуатации.</li> <li>■ Невозможность применения в условиях отрицательных температур, а также при глубоком просачивании нефти в почву.</li> </ul> |

Желаемая цель переработки нефтяных отходов – это получение из них коммерческих материальных ресурсов с гарантийными эколого-гигиеническими показателями всех продуктов (вода, почва, кек), которые образуются в результате реализуемого процесса.

Сегодня на российском рынке технологий существуют компании, предлагающие различные технологические решения по переработке и утилизации НСО. Несмотря на достоинства и успехи, их деятельность направлена на уничтожение и нейтрализацию отходов, что часто приводит к вторичному загрязнению окружающей среды в виде золы, газовых выбросов и стоков. Необходимо модернизировать существующие технологии, которые бы приводили к снижению образования вторичных загрязнителей.

Анализируя все то, что реализуется в настоящее время в технологиях переработки нефтяных отходов, мы пришли к выводу, что существующие индивидуальные технические решения не могут полностью обеспечить 100% перера-

ботку с гарантированными материальными и экологическими показателями. Однако, если данные технологии встроить в единую рабочую технологическую цепочку, то их производительность и глубина переработки НСО увеличится в несколько раз результатами повышенной экологической значимости. Данное технологическое решение может осуществляться только в рамках единого системного подхода, ориентированного на получение материальных ресурсов из отходов и снижения экологической нагрузки до требуемых нормативов.

Такая технология впервые была реализована фирмой Rohrer Group (<https://www.rohrer-grp.com>), куда свозились на выделенный для этих целей полигон все нефтяные отходы с оправданной экономической логистикой.

На полигоне имеется каскад из трех прудов, где последовательно перемешиваются с водой нефтяные отходы, и на последнем происходит отстой взвешенных частиц, а верхний углеводородный слой перекачивается на сепарацию (рис. 3-4).

РИСУНОК 3. Пруд-накопитель 1.



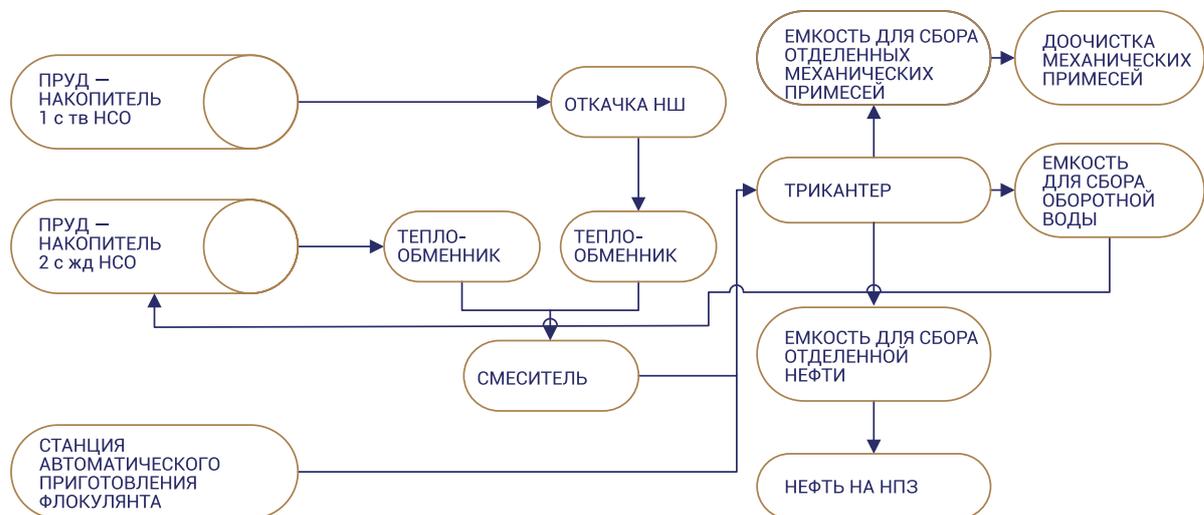
РИСУНОК 4. Пруд-накопитель 2.



Если блочно изобразить схему по комплексной переработке НСО, то она будет

состоять из следующих основных узлов (рис. 5).

РИСУНОК 5. Схема переработки НСО.



Как видно из приведенной схемы, НСО с разных объектов смешиваются в прудах-накопителях. Далее проводится их предварительная подготовка и смешивание. С помощью трикантера возможно разделить гомогенизированный НСО на составные фазы. Потому результатом сепарации является стабильная углеводородная масса (нефть), которая продается на НПЗ, вода идет в оборот на пруды, а кек (твердая фаза) выводится на площадки, где

путем аэрации в нем окисляются остатки углеводородов до требуемых параметров.

Таким образом, на сегодняшний день нет универсальной технологии, которая могла бы эффективно решить все проблемы с НСО. Достичь максимальных результатов мы сможем, только пересмотрев существующие модели по обращению с отходами и создав единые пункты по сбору для комплексной переработки отходов.

В настоящее время проводятся работы по адаптиванию такой технологии в России в районах интенсивной добычи и переработки нефти. Однако, в виду того, что в этих районах работают несколько нефтяных и газовых компаний, то объединить их по созданию совместных общих таких полигонов пока затруднительно. Большую и основную роль в этом объединении должна играть администрация региона для внедрения такой технологии.

Решением другой очень важной проблемы является переработка накопленных нефтяных

и химических отходов. В России есть достаточное количество объектов накопленного экологического вреда окружающей среде и прошлого экологического ущерба. Под моим руководством учеными РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина и РАЕН РФ был разработан системный подход к переработке отходов на таких объектах. Понятно, что ликвидация таких накоплений или их переработка являются чрезвычайно затратными. Однако, такой новый подход к решению проблемы дает основание на снижение затрат за счет извлечения из накопленных отходов материальных ресурсов.

## ■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание новых или более результативных технологий для переработки НСО связано с большими научно-исследовательскими работами, инженерными изысканиями, конструктивными проектами и опытно-промышленными испытаниями.

Такие технологии должны содержать комплекс современных аппаратов, работающих в единой последовательной системе,

обеспечивающей высокие экологические, экономические, материальные, ресурсосберегающие показатели. Применение системного подхода в области переработки НСО является, по нашему, мнению прорывным направлением, которое в будущем позволит систематизировать общие отходы различных нефтегазовых компаний и обеспечить их единый сбор и переработку.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мазлова Е.А., Мещеряков С.В. Проблемы утилизации нефтешламов и способы их переработки. – М.: Издательский дом «Ноосфера», 2001. – 56 с.
2. Переработка и утилизация нефтесодержащих отходов: Монография / Соколов Л.И., - 2-е изд., испр. и доп. - Вологда: Инфра-Инженерия, 2017. - 160 с.
3. Литвинова Т.А. Современные способы обезвреживания и утилизации нефтесодержащих отходов для ликвидации загрязнения окружающей среды // Научный журнал КубГАУ. 2016. № 123(09).
4. Жаров, О.А. Современные методы переработки нефтешламов / О.А. Жаров, В.Л. Лавров // Экология производства. – 2004. – №5. – С. 43 – 51.
5. Мещеряков, С.В. Нефтесодержащие отходы как полезный ресурс / С.В. Мещеряков, И.С. Еремин // Энергетическая политика. – 2020. - № 6. – С. 88 - 95.
6. Ахметов, А.Ф. Методы утилизации нефтешламов различного происхождения / А.Ф. Ахметов, А.Р. Гайсина, И.А. Мустафин// Прикладные и академические исследования. – 2011.- Т.9 - № 3. – С. 98 – 101.
7. Аксенов В.И., Мигалатий Е.В., Никифоров А.Ф. П27 Переработка осадков сточных вод: Учебное пособие. Екатеринбург: ГОУ УГТУ-УПИ, 2002. 75 с
8. Бакастова, Н.В. Решение проблем по переработке нефтешламов методом центробежной сепарации / Н.В. Бакастова // Экологическая и промышленная безопасность. – 2005. – №3 – С. 36 – 37.
9. Мещеряков, С.В. Реагентно-ультразвуковая интенсификация процесса седиментации поверхностных стоков на нефтеперекачивающих станциях / Мещеряков С.В., Гонопольский А.М., Муллакаев М.С., Половков С.А., Николаева А.В. // Экология и промышленность России. - 2018. - Т. 22. - № 2. С. 8-12.
10. Коваленко, Н. А. Химические методы количественного анализа : учеб.-метод. пособие по дисциплине «Аналитическая химия» для студентов специальностей 1-47 02 01 «Технология полиграфических производств», 1-48 01 05 «Химическая технология переработки древесины» / Н. А. Коваленко, Г. Н. Супиченко. – Минск : БГТУ, 2007. – 84 с.
11. Бахонин, Е.И. Современные технологии переработки и утилизации углеводородсодержащих отходов. Сообщение 2. Физико-химические, химические, биологические методы утилизации и обезвреживания углеводородсодержащих отходов/Бахонин Е.И. // Башкирский химический журнал.- 2015.-Том 22.- № 2.- С. 41-49.
12. Лыков, О.П. Реализация технологических процессов переработки нефтешламов /Мещеряков С.В., Курченко А.Б.// В книге: Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России. Материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции. 2007. С. 270-271.

# ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

**Джинлян Хэ**

Глава научно-исследовательского института техники высокого напряжения, Университет Цинхуа

## ВВЕДЕНИЕ

Проблемы нехватки энергии и загрязнения окружающей среды становятся все более серьезными. Они усугубляются необходимостью обеспечения энергоснабжения при одновременном снижении уровня загрязнения окружающей среды. Хотя наша планета и обладает большим запасом возобновляемых ресурсов, передача их в густонаселенные районы, находящиеся на расстоянии сотен или даже тысяч миль от источника, представляется сложной задачей. В то же время во многих странах существует проблема неравномерного распределения энергии и нагрузки. Центры энергоснабжения и нагрузки зачастую находятся очень далеко друг от друга. Следовательно, для обеспечения оптимального распределения энергии по всему миру необходимо разработать технологию её передачи на большие расстояния.

В последние 10 лет энергосети активно развивались. Напряжение в линиях электропередач постепенно увеличивалось и прошло две стадии: высокого напряжения (ВН) и сверхвысокого напряжения (СВН). В настоящее время мы перешли к стадии ультравысокого напряжения (УВН). По мере своего развития, УВН может сыграть значительную роль в рациональном формировании энергоструктуры и оптимизации распределения.

Технология УВН подразделяется на технологию передачи энергии переменного тока и технологию передачи энергии постоянного тока. Согласно определению Международной электротехнической комиссии, УВН переменного тока относится к линиям электропередачи переменного тока с уровнем напряжения 1000 кВ и выше. УВН постоянного тока обычно относится к линиям электропередачи постоянного тока с уровнем напряжения  $\pm 800$  кВ и выше. В разных странах данные технологии начали изучать в конце 1960-х годов. Советский Союз построил линию электропередачи УВН переменного тока на 1150 кВ в 1985 году. Япония в начале 1990-х годов также построила двухцепную линию электропередачи переменного тока на 1000 кВ, выполненную на одних и тех же опорах, но обе линии не были введены в эксплуатацию на уровне УВН. Кроме того, США, Франция и другие страны также провели испытания проектов подобных линий<sup>59</sup>. В Китае, по состоянию на 2020 год, было построено в общей сложности 13 линий УВН переменного тока и 11 линий УВН постоянного тока, а общая протяженность линий достигла 28352 км. В Бразилии были построены УВН постоянного тока. Предполагается, что к 2024 году общая протяженность линий УВН в Китае достигнет 40021 км.<sup>60</sup>

## ПОЧЕМУ УВН

УВН имеет множество преимуществ по сравнению с СВН. Технология УВН позволяет увеличить пропускную способность, дальность

передачи электроэнергии и общую структуру энергосети при уменьшении коридоров ЛЭП и снижении потерь.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение технологий передачи энергии с различным уровнем напряжения.

|                               | ±1100 кВ УВН<br>постоянного<br>тока | ±500 кВ СВН<br>постоянного<br>тока | 1000 кВ УВН<br>переменного<br>тока | 500 кВ СВН<br>переменного<br>тока |
|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Пропускная способность</b> | 12000 МВт                           | 1200 МВт -3200 МВт                 | 6000 МВт                           | 1200 МВт                          |
| <b>Дальность передачи</b>     | >3000 км                            | 1000-1500 км                       | >1500 км                           | 600-800 км                        |
| <b>Потери при передаче</b>    | 1,5%/1000 км                        | 4.5%/1000 км                       | 2.7%/1000 км                       | 4.0%/1000 км                      |
| <b>Эффективность коридора</b> | 100%                                | 25%                                | 100%                               | 25%                               |

\* Эффективность коридора соответствует пропускной способности на единицу площади.

### 1 Большая пропускная способность.

Линии УВН называют «электрическими магистралями». Натуральная мощность ЛЭП переменного тока составляет:

$$P = \frac{U^2}{Z_c} = U^2 \times \sqrt{C/L}$$

Где  $U$  – линейное напряжение,  $Z_c$  – волновое сопротивление линии,  $L$  и  $C$  – погонная индуктивность и емкость линии соответственно. Натуральная мощность  $P$  линии

переменного тока пропорциональна квадрату напряжения  $U$ . Аналогичные выводы можно применить и к линиям постоянного тока<sup>61</sup>.

Согласно расчетам, пропускная способность линий электропередачи УВН переменного тока на 1000 кВ превышает 5 миллионов киловатт, что почти в пять раз выше, чем у линий СВН переменного тока на 500 кВ. Пропускная способность линий УВН постоянного тока ± 800 кВ достигает 7 миллионов киловатт,

что в 2,4 раза превышает пропускную способность линий СВН постоянного тока на ± 500 кВ. Технология передачи электроэнергии большой мощности может решить проблему удаленности источника энергии от центра нагрузки и позволит обеспечить дополнительный доступ к энергии.

### 2 Большая дальность передачи.

Пропускная способность линий электропередачи переменного тока уменьшается с увеличением расстояния, поэтому для передачи энергии на большие расстояния требуется более высокое напряжение. Экономически целесообразная протяженность линии электропередачи СВН переменного тока на 500 кВ

обычно составляет от 600 до 800 км, в то время как линия электропередачи УВН переменного тока на 1000 кВ обладает более высоким напряжением и меньшими потерями, что позволяет увеличить ее протяженность до 1000-1500 км или даже выше. При этом дальность передачи ЛЭП УВН постоянного тока на ± 1000 кВ может

достигать 5000 км. УВН особенно подходит для межрегиональной или межконтинентальной передачи энергии в районы с её неравномерным распределением. Это может способствовать и интенсивному развитию, эффективному

3

### Уменьшение полосы отвода.

С увеличением нагрузки и развитием энергосетей повышается и потребность в полосах отвода под линии электропередачи. Благодаря высокой пропускной способности УВН, использование линий электропередачи переменного

4

### Снижение потерь.

Потери в линии электропередачи – важный фактор, определяющий ее экономичность. Потери в линии электропередачи  $P_{\text{loss}}$  определяются следующим образом:

Где  $S$  – пропускная способность линии,  $U$  – напряжение, а  $R$  – последовательное сопротивление линии. При увеличении напряжения потери в линии уменьшаются. Стандартный коэффициент потерь в линиях СВН переменного

использованию и транспортировке возобновляемой энергии (например, гидроэнергии, энергии ветра и солнечной энергии) в отдаленные районы к центрам нагрузки (в больших масштабах и на большие расстояния).

и постоянного тока позволяет сократить количество цепей передачи энергии и снизить потребности в полосах отвода. Получение общественной выгоды от применения таких энергосетей и их экономичность очевидны.

$$P_{\text{loss}} = \frac{S^2}{U^2} R$$

ного тока на 500 кВ может быть в 1,25–1,79 раза выше, чем в линиях УВН переменного тока на 1000 кВ. Следовательно, УВН может сделать линии электропередачи значительно экономичнее<sup>62</sup>.

5

### Улучшение структуры энергосети.

При использовании сети УВН, обладающей большой пропускной способностью, электростанции сверхбольшой мощности могут быть подключены к энергосети напрямую. При этом линии электропередачи УВН позволяют снизить потребность в строительстве электростанций в центрах нагрузки, а также способствуют оптимизации распределения энергоресурсов. В то же время, использование комбинированной электропередачи переменного/постоянного тока УВН позволяет

решить проблемы недостаточной пропускной способности линии электропередачи и слабой поддержки реактивного напряжения энергосетью 500 кВ при отказе системы постоянного тока. Это позволяет снизить риск отключения электроэнергии и создать условия для плавной многоуровневой и зонированной работы энергосистемы, а также решить проблемы, ограничивающие её развитие (такие, как превышение уровня расхода тока при коротком замыкании), и повысить гибкость и надежность её работы.

Уникальными достоинствами обладают и линии УВН постоянного тока (передача на большие расстояния и с большой пропускной способностью). При реализации соединения между островом и материком или между островами с помощью подводных кабелей большой протяженности передача по линиям постоянного тока также показывает очевидные преимущества. Использование линий электропередачи УВН постоянного тока имеет такие преимущества, как низкая стоимость, быстрая регулировка и надежная работа. Однако сопряжено с такими пробле-

мами, как высокая стоимость преобразователей, большое потребление реактивной мощности и гармонические помехи.

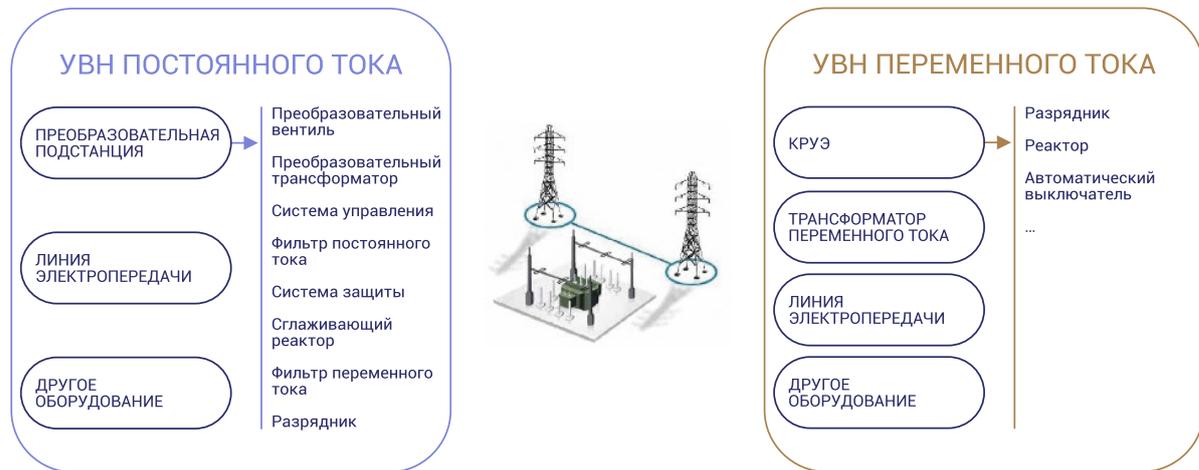
Таким образом, технология передачи УВН позволяет решить проблемы, долгое время преследовавшие энергетическую отрасль. Технология передачи УВН позволяет развивать и использовать возобновляемые источники энергии, например, ветер и солнце. В то же время УВН позволяет передавать энергию из удаленных районов в места с высоким энергопотреблением без существенных потерь мощности.

## КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Развитие УВН зависит от развития ключевых технологий. Стабильная работа основного

оборудования УВН определяет безопасность систем и саму возможность создания сетей УВН.

РИСУНОК 1. Оборудование, необходимое для осуществления технологии передачи электроэнергии УВН.



Как показано на рис. 1, основным оборудованием, необходимым для проекта УВН постоянного тока, является преобразовательная подстанция и линия электропередачи. Преобразовательная подстанция играет очень важную роль. Она предназначена для завершения преобразования энергии и выполнения требований, предъявляемых к энергосистеме в части безопасности, стабильности и каче-

ства электроэнергии. Основное оборудование преобразовательной подстанции включает в себя преобразовательные вентили, преобразовательные трансформаторы, фильтры постоянного тока, сглаживающие реакторы, фильтры переменного тока и т. д. Ядром подстанции является преобразовательное устройство, состоящее из трансформатора и вентилей.

**Преобразовательный трансформатор выполняет следующие функции:** (1) Использование магнитной связи обмоток с обеих сторон трансформатора при передаче энергии, позволяющее осуществить изоляцию и развязку систем переменного и постоянного тока. (2) Преобразование напряжения таким образом, чтобы с обеих сторон оно соответствовало

номинальному значению (с учетом допуска). (3) Ограничение бросков напряжения сети переменного тока с целью исключения их воздействия на преобразователь. В проекте Чанцзи-Гуцюань по созданию линии УВН постоянного тока  $\pm 1100$  кВ используются преобразовательные трансформаторы  $\pm 1100$  кВ, мощность каждого из которых достигает 607,5 МВА.

**Преобразовательный вентиль.** Преобразовательный вентиль состоит в основном из тиристоров. Он используется для преобразования переменного тока в постоянный (выпрямление) или преобразования постоянного тока в переменный (инверсия). Преобразователь ЕТТ (Electric Trigger Thyristor) состоит из тиристоров с электрическим управлением, обеспечивающих развязку низкого и высокого потенциалов между генератором пусковых

импульсов и преобразовательным вентилем. Он позволяет исключить электромагнитные помехи, снизить масса-габаритные показатели устройства, а также уменьшить энергопотребление и стоимость. В текущем проекте УВН постоянного тока используется в основном. Преобразователь LTT (Light Trigger Thyristor) состоит из оптотиристоров, исключающих использование фотоэлектрического преобразования, усилительной цепи и силовой цепи

блока управления. Он позволяет улучшить характеристики срабатывания вентиля и повышает его надежность.

Кроме того, есть и другие важные элементы оборудования. Например, высоковольтные кабели постоянного тока большой пропускной способности могут быть использованы для создания линии электропередачи УВН между островом и материком, а также между несколькими островами. Усовершенствованные ограничители перенапряжения (разрядники) способствуют усилению защиты преобразо-

#### **Трансформатор переменного тока.**

Основные проблемы трансформаторов УВН переменного тока – это сложность конструкции высоковольтной изоляции, контроль рассеяния магнитного потока и повышение температуры оборудования. В настоящее время усовершенствованные трансформаторы переменного тока позволили еще больше увеличить пропускную способность мачты линии УВН за счет решения таких проблем, как контроль

**КРУЭ.** Площадь, занимаемая КРУЭ, примерно на 30% меньше, чем у распределительного устройства с воздушной изоляцией (КРУВ). При этом КРУЭ обладают высокой адаптируемостью к окружающей среде, а его токоведущие части заключены в металлическую оболочку, что позволяет избежать воздействия электромагнитных помех на окружающую среду из-за высокого напряжения. При этом атмосфера не оказывает влияния на изоляционные характеристики оборудования. Сложность КРУЭ УВН заключается в его большом размере, большой отключающей способности и высоких требованиях

к изоляции. Большой размер требует учета механической прочности и сейсмических характеристик. При большой отключающей способности необходимо учитывать постоянную времени, абляцию дугогасительной камеры и номинальную мощность механизма отключения. Требования к изоляции должны учитывать размер изоляции и максимальное рабочее напряжение. При этом особенно важно подавление сверхбыстрого переходного перенапряжения (VFTO). В настоящее время номинальное напряжение перспективных КРУЭ достигает 1100 кВ, а уровень тока размыкания – 63 кА.

вательной подстанции от перенапряжения. Современные системы управления и алгоритмы позволяют оптимизировать стабильность линий электропередачи. В проектах УВН переменного тока очень важную роль играет комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией (КРУЭ) и трансформаторы переменного тока. Указанное малогабаритное КРУЭ состоит из автоматических выключателей, разъединителей, заземлителей, трансформаторов, ограничителей перенапряжения и т. д.

рассеяния магнитного потока и повышения температуры. Мощность трансформатора увеличена с 334 МВА на мачту до 500 МВА, а мощность одного устройства достигла 1500 МВА. При этом в усовершенствованных трансформаторах используются различные способы частичной и полной разборки, позволяющие снять ограничения по мощности трансформаторов УВН, связанные со сложностями их транспортировки.

к изоляции. Большой размер требует учета механической прочности и сейсмических характеристик. При большой отключающей способности необходимо учитывать постоянную времени, абляцию дугогасительной камеры и номинальную мощность механизма отключения. Требования к изоляции должны учитывать размер изоляции и максимальное рабочее напряжение. При этом особенно важно подавление сверхбыстрого переходного перенапряжения (VFTO). В настоящее время номинальное напряжение перспективных КРУЭ достигает 1100 кВ, а уровень тока размыкания – 63 кА.

## ПРИМЕРЫ ПРОЕКТОВ

1

### Проект Чанцзи-Гуцюань по созданию линии электропередачи УВН постоянного тока на $\pm 1100$ кВ.

Проект Чанцзи-Гуцюань по созданию линии электропередачи УВН постоянного тока на  $\pm 1100$  кВ был завершен в 2018 г.<sup>63</sup> Пропускная способность линии достигает 12000 МВт, дальность передачи — 3324 км. Проект Чанцзи-Гуцюань линии УВН постоянного тока рассчитан на передачу каждые 8 часов 20 минут 100 миллионов кВт·ч электроэнергии, что позволяет решить проблему дисбаланса между энергией и нагрузкой на востоке и западе Китая. В данном проекте по сравнению с проектом  $\pm 800$  кВ потери на тысячу километров сокращаются с 2,8% до 1,5%, а ежегодно

передаваемая с его помощью электрическая энергия составляет от 60 до 80 млрд кВт·ч. Проект Чанцзи-Гуцюань линии электропередачи УВН постоянного тока на  $\pm 1100$  кВ — это самый высокий в мире уровень напряжения, самая большая пропускная способность, самая большая дальность передачи и самые передовые технологии передачи УВН. Он позволяет снизить годовое потребление угля в Восточном Китае на 30 миллионов тонн и уменьшить ежегодный выброс сажи на 24 000 тонн, диоксида серы на 149 000 тонн и оксидов азота на 157 000 тонн.<sup>64</sup>

2

### Проект Сучжоу-Наньтун по созданию трубопроводного тоннеля линии электропередачи УВН переменного тока закрытого типа на 1000 кВ.

Проект Сучжоу-Наньтун по созданию трубопроводного тоннеля линии электропередачи УВН переменного тока закрытого типа на 1000 кВ является первым в мире проектом по созданию тоннеля УВН. В заполненном элегазом (SF<sub>6</sub>) металлическом кожухе линии электропередачи с газовой изоляцией (GIL) находятся высоковольтные токоведущие проводники, поддерживаемые изоляционными прокладками. Изоляционные характеристики SF<sub>6</sub> намного лучше, чем у воздуха, что позволяет значительно уменьшить размеры линии электропередачи. Габариты линии позволяют создавать очень компактную и миниатюрную конструкцию, превращая ее в компактное

решение для передачи энергии, заменяющее воздушные линии электропередачи. Проект Сучжоу-Наньтун предназначен для пересечения реки Янцзы. Общая длина линии составляет 5468,5 м, внешний диаметр выемки — 12,07 м, максимальный уклон — 5%, максимальное давление воды и почвы до 9,5 раз выше атмосферного давления. После ввода проекта в эксплуатацию регион Восточного Китая сможет ежегодно экономить 170 миллионов тонн угля для выработки электроэнергии, уменьшить ежегодный выброс углекислого газа — на 310 миллионов тонн, диоксида серы — на 960 000 тонн, оксидов азота на 530 000 тонн и сажи — на 110 000 тонн.

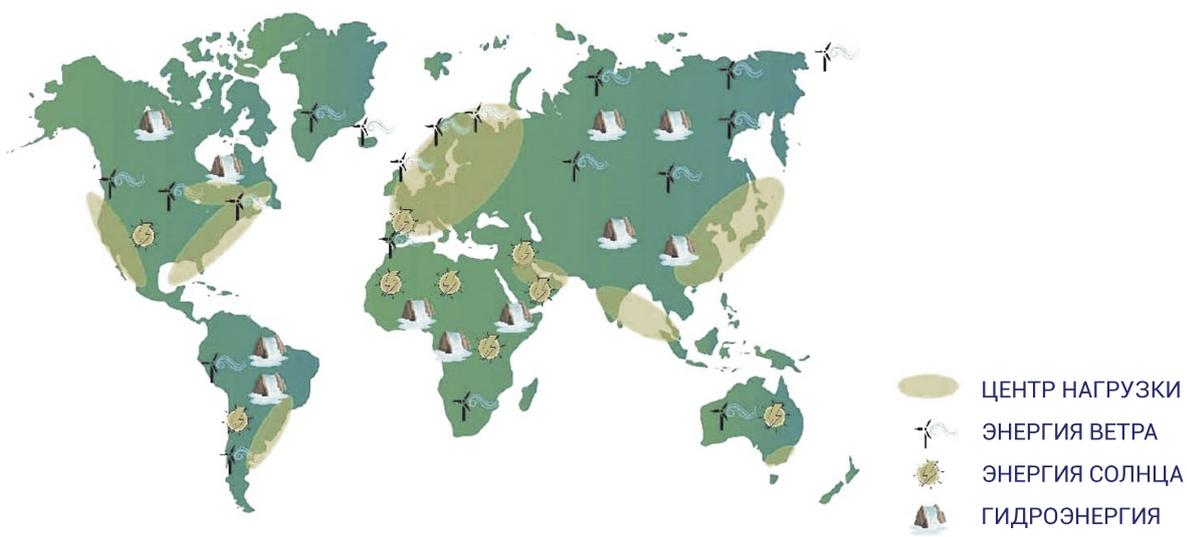
## ■ БУДУЩЕЕ УВН

Технология передачи энергии УВН обеспечивает высокий КПД и низкую удельную стоимость передачи. По сравнению с СВН 500 кВ, ультравысокое напряжение позволяет сэкономить более четверти инвестиций. Подсчитано, что пропускная способность одной линии электропередачи 1150 кВ может заменить от пяти до шести линий 500 кВ или трех линий 750 кВ. Это позволит снизить на одну треть количество материала, используемого для мачт, и вдвое сэкономить на проводниках. Экономия с учетом стоимости электросети на подстанции составляет 10-15%. Коридор линии электропередачи УВН на 1150 кВ составляет лишь около четверти от коридора, необходимого для линии 500 кВ с такой же пропускной способностью, что обеспечивает значительные экономические и социальные выгоды странам и регионам с густонаселенными территориями, ценной землей или сложными коридорами. Следовательно, передача энергии УВН имеет очевидные экономические преимущества.

Более того, использование возобновляемых источников энергии позволяет в значительной степени решить такую проблему, как

образование дымки. Поэтому их значение трудно переоценить. Ожидается, что в следующие 25 лет население мира увеличится на 2 миллиарда человек, а спрос на электроэнергию вырастет на 90%. Потребность развивающихся стран в энергии высока и большая часть роста в следующие 30 лет будет приходиться на эти страны. Ожидается, что в Азиатско-Тихоокеанском регионе потребление электроэнергии на душу населения удвоится. Загрязнение окружающей среды, вызванное выработкой энергии и глобальным потеплением, — это проблема, с которой мы должны бороться вместе. Технология УВН позволяет осуществлять ввод в эксплуатацию возобновляемых источников энергии наиболее устойчивым и эффективным образом. В будущем глобальный режим межсетевое взаимодействия претерпит серьезные изменения: от незначительных перетоков электроэнергии, оказания помощи в создании баланса между излишками и дефицитами энергии до передачи электроэнергии большой мощности, создания крупных энергетических баз и прямых поставок в центры нагрузки<sup>65</sup>.

РИСУНОК 2. Распределение глобальных центров нагрузки и чистой энергии.



С глобальной точки зрения, чистая энергия в мире распределяется неравномерно. Как показано на рисунке 2, ветроэнергетика в основном сконцентрирована в Арктике, Центральной и Северной Азии, Северной Европе, Центральной части Северной Америки, Восточной Африке и прибрежных районах всех континентов. Большая часть солнечной энергии в основном приходится на районы вблизи экватора, такие как Северная Африка, Восточная Африка, Ближний Восток, Океания, а также Центральная и Южная Америка. Большинство этих богатых ресурсами экологически чистых источников энергии находятся далеко от центров нагрузки (на расстоянии от сотен до тысяч километров). Глобальная энергетическая сеть, основанная на технологии передачи электроэнергии УВН, позволит решить эту проблему. Технология УВН обеспечит безопасную, эффективную и экологически чистую передачу энергии между странами, между регионами и между континентами, а также позволит скоординировать разработку, распределение и использование энергетических ресурсов в глобальном масштабе. С развитием технологии передачи энергии УВН электроэнергия с баз арктических ветряных электростанций и экваториальной солнечной энергии, расположенных за тысячи километров, может передаваться в центры нагрузки на всех континентах для удовлетворения потребностей человека в энергии.<sup>66</sup> Если взять в качестве примера межконтинентальную энергосистему между Китаем и Европой,

то сверхдальний канал передачи УВН Китай-Европа протяженностью от 4000 до 8000 км может быть построен для передачи в Европу ветровой, солнечной и гидроэнергии из Китая, России, Сибири, Монголии, Казахстана и других мест. Как уже было продемонстрировано, одна линия электропередачи с мощностью 10 миллионов киловатт может ежегодно обеспечивать Европу 60 миллиардами киловатт-часов чистой энергии, заменяя 20,52 миллиона тонн условного топлива и сокращая выбросы углекислого газа на 57,05 миллиона тонн и диоксида серы на 410 000 тонн. Построение глобальной энергетической сети будет, скорее всего, развиваться в три этапа: внутригосударственные сетевые межсетевые соединения, внутриконтинентальные межсетевые соединения и глобальные межсетевые соединения. Являясь ключевой технологией для реализации глобального энергетического объединения, технология передачи энергии УВН, в особенности УВН постоянного тока, имеет решающее значение для крупномасштабного распределения мировой энергии и потребления чистой энергии.

Развитие силовых кабелей УВН постоянного тока и линий с газовой изоляцией позволит прокладывать линии электропередачи под землей. Это позволит значительно уменьшить занимаемую ими территорию и обеспечить их защиту от таких воздействий окружающей среды, как удары молнии, выбросы загрязнений и обледенение, что сделает данные линии более привлекательными.

## ■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология передачи энергии УВН обладает такими преимуществами, как большая пропускная способность, большая дальность передачи, низкий уровень потерь и экономия земельных ресурсов. Эта передовая технология позволяет реализовать крупномасштабную передачу электроэнергии на большие расстояния, тем самым уменьшая неравномерность распределения и нагрузки. В то же время технология передачи УВН может повысить

экономичность энергосистемы и предоставить возможность для развития потребления энергии при сокращении выбросов загрязняющих веществ. Благодаря постоянным достижениям в ключевых технологиях УВН, будущая энергетическая сеть станет взаимосвязанной, экономичной, чистой и устойчивой, представляя, таким образом, возможность объединения глобальных энергосетей и глобального распределения энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Candas, M., & Meric, O. S. (2015). The application of ultra high voltage in the world. *Journal of Power and Energy Engineering*, 3(04), 453-457.
2. Huang, D. , Shu, Y. , Ruan, J. , & Yi, H. . (2009). Ultra high voltage transmission in china: developments, current status and future prospects. *Proceedings of the IEEE*, 97(3), 555-583.
3. Qingyu, Z. E. N. G. (2012). Study on power transmission capability of 1000 kV ultra high voltage transmission system [J]. *Power System Technology*, 36(2), 1-6.
4. Liu, Z., Zhang, F., Yu, J., Gao, K., & Ma, W. (2018). Research on key technologies in  $\pm 1100$  kV ultra-high voltage DC transmission. *High voltage*, 3(4), 279-288.
5. Wei, W., Wu, X., Li, J., Jiang, X., Zhang, P., Zhou, S., ... & Chen, G. (2018). Ultra-high voltage network induced energy cost and carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 178, 276-292.
6. Xu, Z., Dong, H., & Huang, H. (2015). Debates on ultra-high-voltage synchronous power grid: the future super grid in China?. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 9(8), 740-747.
7. Yu, S., Sun, Y., Niu, X., & Zhao, C. (2010). Energy internet system based on distributed renewable energy generation. *Electric Power Automation Equipment*, 5, 104-108.
8. Zhou, X., Wang, F., & Ma, Y. (2015, August). An overview on energy internet. In *2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)* (pp. 126-131). IEEE.

# ЭЛЕКТРОТОПЛИВО

## Фреде Блобьерг

Профессор, руководитель Центра отказоустойчивой силовой электроники (CORPE), Ольборгский университет

## СОВРЕМЕННАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕМЕН

Современное преобразование энергии сталкивается с вызовами, по крайней мере, в двух основных направлениях. Первая задача – удовлетворить растущий спрос на энергию на планете по мере повышения уровня жизни и роста населения. Вторая – разработать долгосрочное устойчивое производство электроэнергии, чтобы добиться желаемой декарбонизации, например, как того требует Парижское соглашение. На глобальной повестке стоит изменение климата, и потребность в осуществлении энергетического перехода высока; мы видим, что у многих стран уже составлены серьезные планы по изменению своих энергетических систем в краткосрочной и долгосрочной перспективе. Германия, США и Китай на данный момент обладают крупнейшими мощностями возобновляемых источников энергии. Однако эти показатели являются относительными, поскольку, например, ведущей страной с точки зрения получения возобновляемой энергии является Дания, где более 60% электроэнергии вырабатывается из возобновляемых источников. Все страны стали лидерами благодаря стратегическому планированию декарбонизации и желанию меньше зависеть от ископаемого топлива.

Также важно более эффективно использовать произведенную энергию и таким образом ограничить рост энергопотребления, а также потребность в новых генерирующих мощностях. В данном контексте необходимо, помимо прочего, повышать объемы электрификации, в том числе в общем транспортном секторе, чтобы сделать его более эффективным сократив выбросы углерода. Такая трансформация даст и дополнительные преимущества: в городах станет меньше шума и меньше загрязнений воздуха. Очевиден по крайней мере тройной выигрыш для общества. Поскольку ключевыми факторами для такой трансформации являются возобновляемые/устойчивые генерирующие мощности, то они, конечно, должны стать еще дешевле. Сегодня энергия ветра и солнца вполне способна конкурировать с ископаемым топливом, но ожидается, что технологии станут еще более эффективными и дешевыми благодаря закону подобию. Ветру и солнцу не нужно никакого топлива для производства энергии – кроме них самих – а следовательно, они являются устойчивыми источниками энергии, производя её, они не производят выбросов углерода.

## ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГИЯ И ХРАНЕНИЕ

Поскольку генерация возобновляемых источников энергии зависит от природных факторов, погоды и сезона, различные энергоносители (например, электричество, газ, тепло и т.д.) должны работать в комплексе, взаимодействуя друг с другом, обеспечивая высокую эффективность и надежность системы. Кроме того, большой проблемой сточки зрения энергосистемы является поиск решений по хранению энергии для более длительного срока службы и, таким образом, более быстрого, безопасного и плавного перехода к возобновляемой генерации. В качестве аккумуляторов электроэнергии все чаще используются батареи, являющиеся эффективным носителем. В некоторых местах до 60% всех фотоэлектрических систем для частного жилья продаются вместе с батареями; по мере снижения цен на эту технологию она станет еще более привлекательной. Батареи в настоящее время также интегрируются в ветряные электростанции и другие более крупные установки. Процесс, что называется, пошел, поэтому ожидается, что батареи значительно упадут в цене. Однако же, батареи не смогут хранить очень большие объемы энергии в течение более длительного времени, а в современной энергетической системе это является необходимым условием. Следовательно, электричество необходимо преобразовывать в другие энергоносители. Здесь на сцену выходит водород, получаемый через электролизер; данный метод известен

На рис. 1 также показана роль силовой электроники в преобразовании электроэнергии (AC/DC) в энергетической системе. Стоимость технологии будет стабильно снижаться, а сама технология – постоянно развиваться, обеспечивая более эффективный контроль над возобновляемыми источниками энергии и нагрузками, а также их интегрирование в сеть. Некоторые из будущих тенденций в силовой электронике – повышение напряжения участков постоянного тока ветряных и фотоэлектрических систем – сделают их более эффективными, но при этом принесут

уже несколько десятилетий. Но водород часто бывает необходимо переработать в другие виды топлива путем проведения химических процессов, например с использованием  $\text{CO}_2$ .

Переход общества к электрификации требует крупномасштабного преобразования электроэнергии с применением силовой электроники. К счастью, это вполне осуществимо с помощью существующих технологий. На рис. 1 показана упрощенная система энергоснабжения с электроприводом (E-Power), и проиллюстрировано использование силовой электроники от выработки электроэнергии до потребления, а также некоторые решения для хранения на будущее.

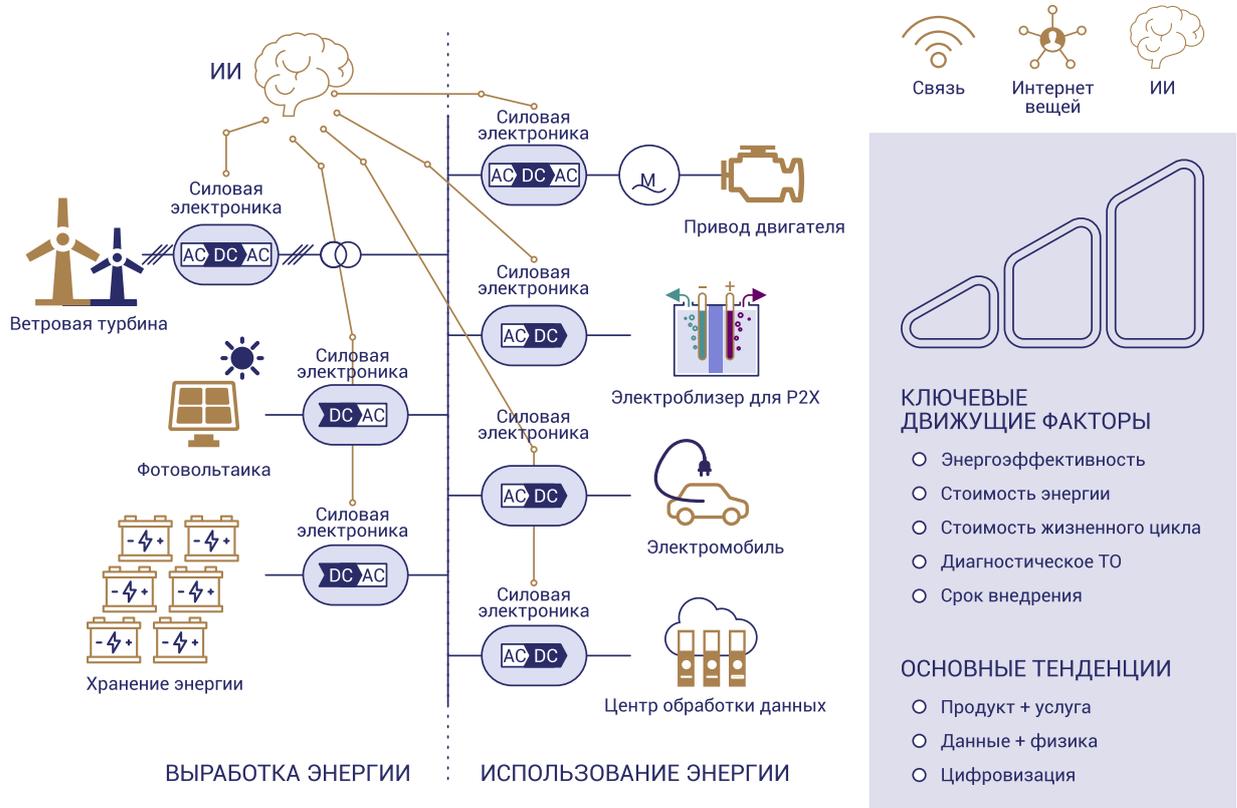
Батареи применяются и в электромобилях. Показано, что электричество преобразуется в водород с помощью электролизера, а затем его можно использовать или обрабатывать для преобразования в химический носитель энергии, например газ, E-топливо или аммоний. В таком случае ключевым энергоносителем является водород (P2X). На рис. 1 показаны другие важные аспекты развития современной энергетической системы. Они не обсуждаются подробно, хотя следует упомянуть, что в будущем крупными потребителями энергии станут центры обработки данных, важным аспектом является цифровизация системы E-Power, а ключевую роль в оптимизации работы такой сложной системы будет играть искусственный интеллект (ИИ).

и технические проблемы. Новые силовые полупроводники (широкозонные устройства) для силовых электронных компонентов снизят потребность в весе/материалах и повысят эффективность почти до 100%, обеспечив, таким образом, больший выход энергии и более эффективную эксплуатацию. Кроме того, силовая электроника способна передавать гигаватты электроэнергии эффективным и надежным способом из отдаленных районов (центров выработки электроэнергии) в городские районы, где спрос на электроэнергию высок.

РИСУНОК 1.

Современная декарбонизированная энергетическая система, где в качестве компонентов хранения применяются возобновляемые источники энергии, батареи и Power-X

(P2X). Определены некоторые из ключевых тенденций и факторов в такой системе, включая применение ИИ для эксплуатации и оптимизации.



## ТЕХНОЛОГИЯ «POWER TO X» (P2X)

Роль технологии «Power to X» (P2X) заключается в разработке новых способов долгосрочного хранения энергии, а также в обеспечении высокой плотности энергии в транспортной отрасли – например, для использования в тяжелых грузовиках, кораблях и самолетах. Проблема заключается в том, что общая эффективность преобразования энергии намного ниже по сравнению с хранением электроэнергии в батареях, но на данный момент это является очевидным решением для таких устройств. Водород может быть получен разными способами. Одним из

которых, естественно, является уже упоминавшееся ранее использование электролизеров, также частично показанное на рис. 2. Водород также можно получить из биогаза (например, из животных и других отходов) и других биомасс, а также из природного газа (в некоторых случаях его называют «синим» водородом).

На рис. 3 показаны два источника «генерации» в процессе P2X, включая большое количество потенциальных видов применения. Одними из конечных энергоносителей здесь являются метан и метанол, а также сам водород.

РИСУНОК 2. Роль водорода как чистого, безопасного и универсального энергоносителя. Показаны как создание, так и использование.

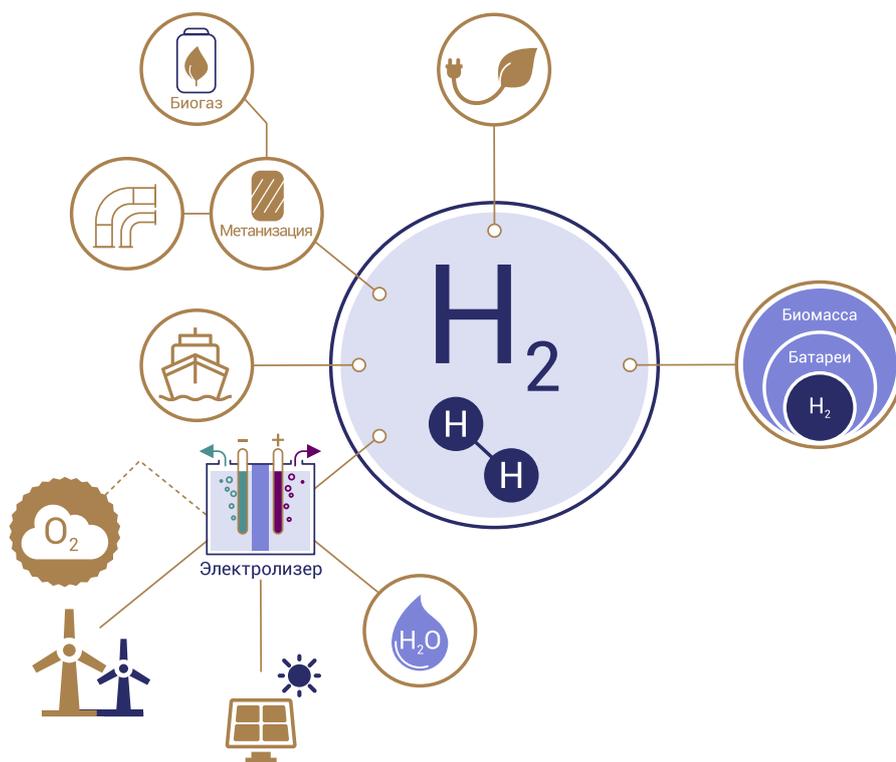
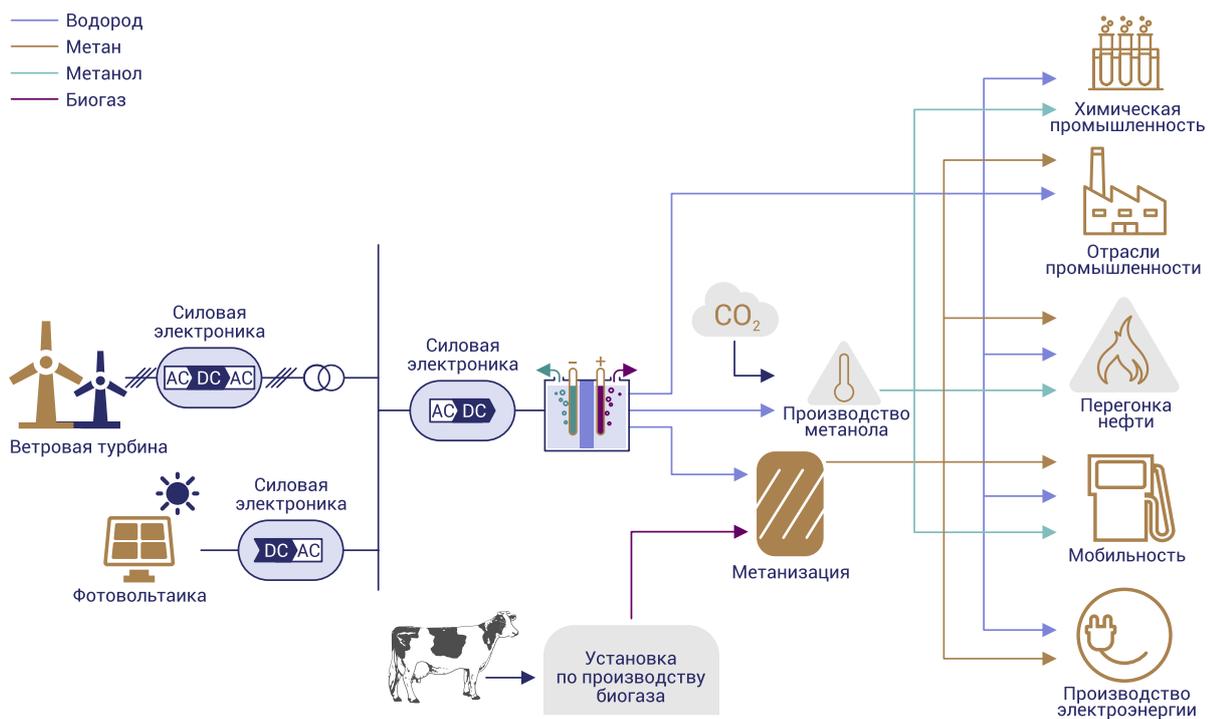


РИСУНОК 3. Принципы установки «P2X», где «X» может обозначать водород, метан, метанол и биогаз, включая области его применения.

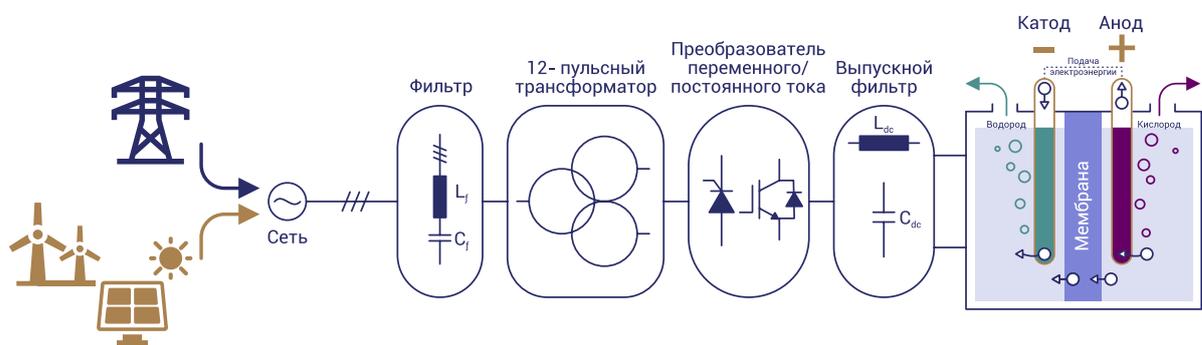


## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В ВОДОРОД ПОСРЕДСТВОМ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Чтобы удовлетворить потребности большегрузного транспорта и долгосрочного хранения, потребуются большие объемы электроэнергии и накопителей. Установки для достижения такого прогресса имеют большие размеры и требуют больших капиталовложений, высокой эффективности, получения хорошего качества электроэнергии в сети, а также обеспечения высокой надежности. На рис. 4 показан естественный и экономичный способ изготовления такой электролизной установки. Электролизеру чаще всего требуется постоянный ток при относительно низком напряжении, а это значит, что потребуются преобразование мощности переменного тока в постоянный, поскольку сеть явля-

ется сетью переменного тока. Источником энергии может быть непосредственно сеть или возобновляемый источник энергии. Затем применяется трансформатор (50 Гц/60 Гц) для ступенчатого преобразования напряжения сети с понижением, после чего применяется преобразователь переменного/постоянного тока, а также выпускной фильтр, позволяющий получить качественное напряжение для процесса электролиза. Для обеспечения качества электроэнергии используется электрофильтр в сочетании с трехобмоточным трансформатором (т.е. 12-пульсным выпрямительным трансформатором). Очень большим предприятиям, оперирующим гигаваттами энергии, такое решение обойдется недорого.

РИСУНОК 4. Упрощенная блок-схема питания силовой электроники для изготовления электролизера.



Система, показанная на рис. 4, может быть описана немного подробнее, поскольку для преобразования электроэнергии могут применяться по крайней мере два принципа — для управления выходным напряжением и, следовательно, током в электролизере. На рис. 5А показан классический способ регулирования напряжения с помощью тиристоров, а на рис. 5В показано решение на основе силовых транзисторов, в котором несколько силовых транзисторов работают параллельно и с чередованием.

Одним из потенциальных способов обеспечить такое преобразование мощности является отказ от трансформаторов 50/60 Гц и осуществление процесса, как показано на рис. 5С, где вместо этого обеспечивается

высокочастотная изоляция на стороне сети с переключающими преобразователями, выполняющими преобразование переменного/постоянного тока, а затем высокочастотное преобразование мощности постоянного/постоянного тока с гальванической развязкой. Поскольку рабочая частота принимается в кГц, размер трансформатора будет намного меньше по сравнению с трансформатором 50/60 Гц. Источник питания может иметь структуру ячеечного типа, где на стороне сети преобразователи включены последовательно для обработки высокого напряжения, а на стороне электролизера преобразователи включены параллельно для обеспечения необходимого тока для электролизера, что обеспечивает качественный ток

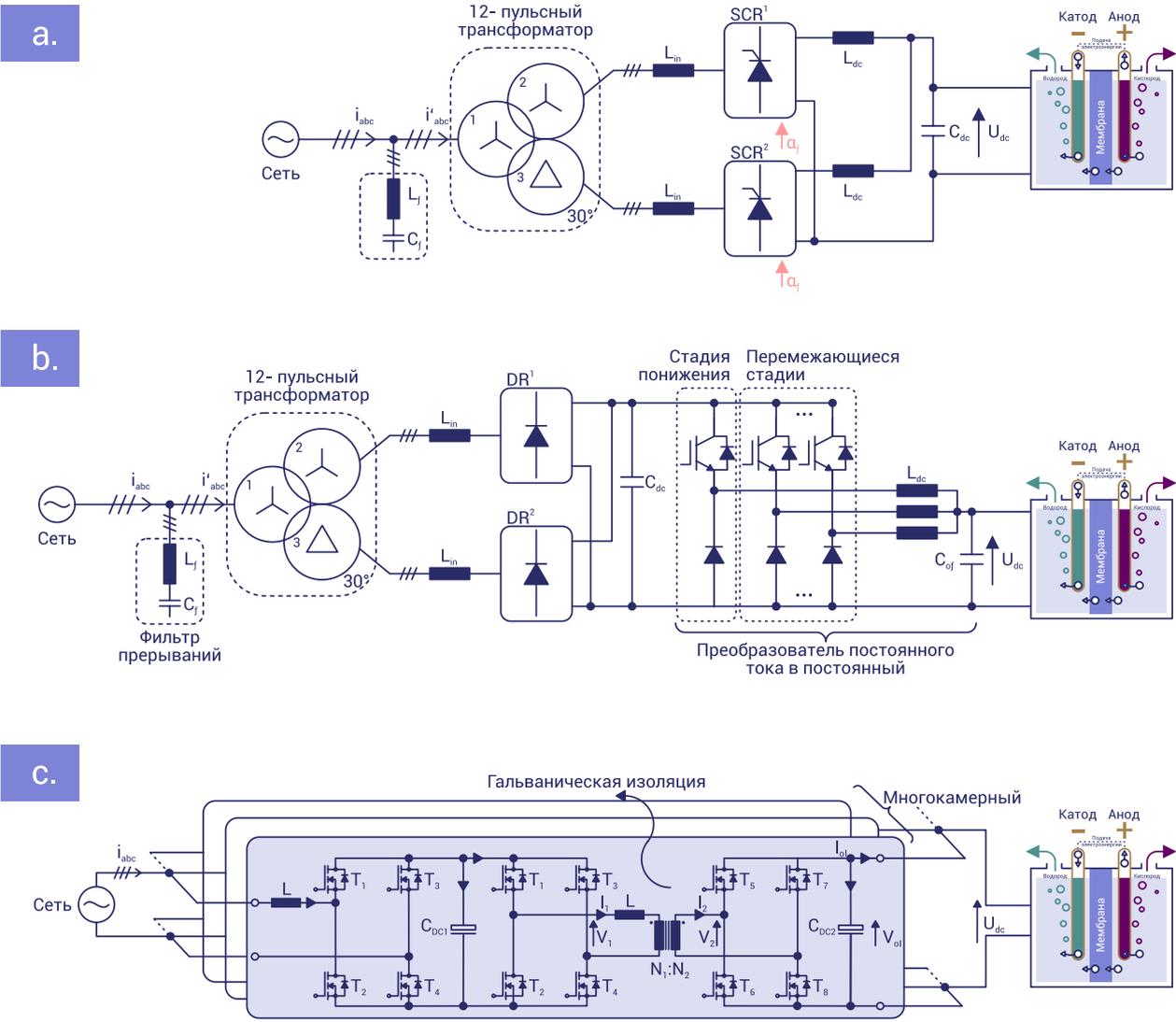
высокого напряжения. Это позволяет обойтись без использования тяжелого трансформатора и заменить его высокочастотным, намного меньшим по размеру. Проблема состоит в том, что в комплект входит больше силовых полупроводниковых устройств, что удорожает

процесс. Однако последнее решение обеспечивает более высокую модульность и масштабируемость, что позволит соответствовать различным требованиям к уровню мощности, основанным на концепции функционального блока для мощной электроники (ФБМЭ).

РИСУНОК 5.

Различные конфигурации источника питания для электролизера на очень высоком уровне мощности. (а) Тиристорный контроль напряжения электролизера и подключения трансформатора к сети, (б) Транзисторный

контроль подключения электролизера и трансформатора к сети, (с) Высокочастотный гальванически изолированный управляемый источник питания для подключения к сети среднего напряжения (модульный).



## КРУПНОМАСШТАБНЫЙ ПРОЕКТ – ОТ МОРСКОЙ ВЭС ДО P2X – ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ОСТРОВ

Дания является одной из ведущих стран в области масштабного внедрения производства электроэнергии из возобновляемых источников. Сегодня она делает следующий шаг, направленный на достижение нейтрального уровня выбросов углерода, переводя транспорт на электрическое питание. С одной стороны, происходит естественное расширение парка транспортных средств на базе аккумуляторных батарей, но существует и потребность в преобразовании электроэнергии в топливо для большегрузного транспорта, такого как грузовики, корабли и самолеты. Поскольку Дания окружена океанами, где дуют сильные ветра, в океане вдали от берега планируется построить энергетические острова, как показано на рис. 6.

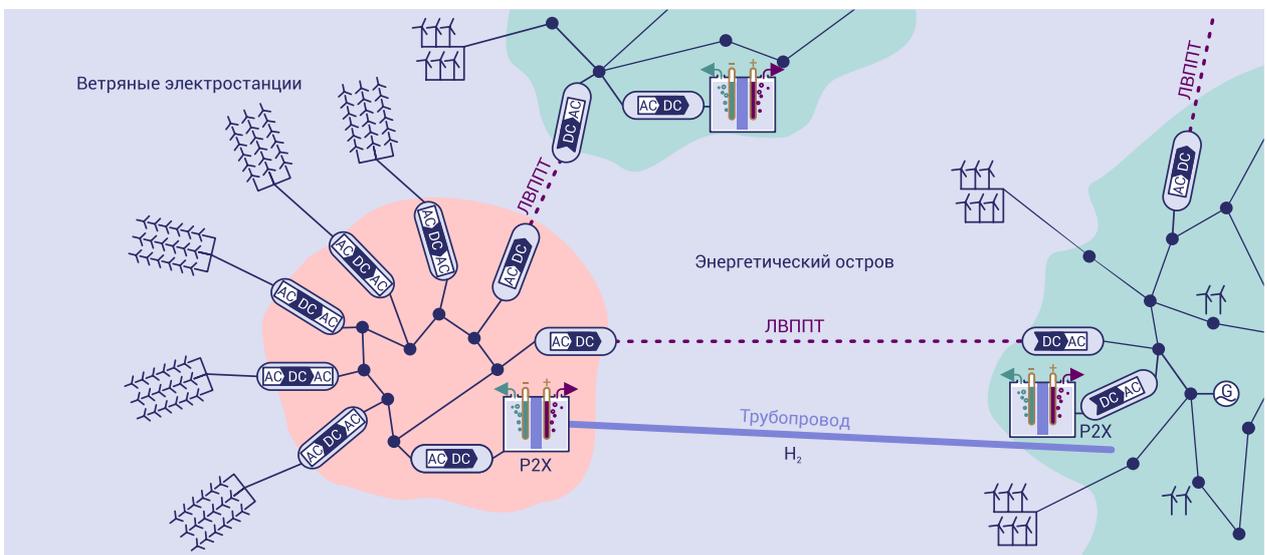
Планируется построить искусственный остров, на котором будет размещено несколько морских ветряных электростанций, производящих электроэнергию. Например, преобразование «P2X» будет выполняться на острове, а полученное в результате сырье будет транспортироваться по физическому трубопроводу на берег. Альтернативным решением может быть

транспортировка электроэнергии по линии высоковольтной передачи постоянного тока (ЛВППТ) на берег, а затем в береговую установку «Power-to-X», что позволит более эффективно использовать тепло, выделяемое в результате процесса «P2X» например, для промышленного отопления, обогрева городов или другим способом, могущим повысить общую эффективность системы. Если электричество транспортируется на берег, оно также может быть подключено к системе электропередач Дании и, таким образом, иметь дополнительную ценность для энергосистемы. Чтобы это стало реальностью, применяется множество технологий силовой электроники. Энергетический остров может также быть связан с другими странами через линии ЛВППТ, обеспечивая таким образом большую гибкость. Первоначальный план масштабирования заключается в том, что первым его шагом будет установка ветряной электростанции мощностью 2 ГВт, включающая в себя электролизер, а затем мощность будет повышена до 10 ГВт. Таким образом, осуществляется снабжение датского сектора большегрузного транспорта, а также долгосрочное хранение энергии.

РИСУНОК 6.

Энергетический остров с крупномасштабными морскими ветряными электростанциями, установкой «P2X», а также системами передачи электроэнергии и газа на берег. Установка «P2X» также может быть располо-

жена на берегу. Преобразование мощности переменного / постоянного / переменного тока показано на острове для подключения ветряной турбины, но на практике оно будет обеспечено в каждой ветряной турбине.



## НЕОБХОДИМЫЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДЛЯ БУДУЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ

**«P2X» выглядит как решение для будущего крупномасштабного энергетического перехода, но и у самой технологии, и у ее реализации существуют проблемы. Упомянем некоторые из них:**

- Общая эффективность преобразования относительно низкая, процесс требует усовершенствования, что означает необходимость развития технологии;
- Для повышения эффективности системы следует изыскать возможность использования тепла, выделяемого в ходе процессов, для получения энергетической и экономической выгоды;
- Производственные объекты «P2X» могут располагаться либо в месте производства электроэнергии, либо в конце линии передачи электроэнергии (ЛВППТ) для осуществления процесса «P2X» на берегу. Здесь следует учитывать такие факторы, как эффективность передачи электроэнергии, стоимость электроэнергии, система передачи, дополнительная прибыль для береговой энергосистемы, а также возможность использования вторичных тепловых ресурсов;
- Технология силовой электроники для преобразования энергии в электролизере должна обеспечивать еще более высокий КПД, более низкую стоимость и высокую надежность, чтобы иметь возможность работать 200000 часов и больше (срок службы 25 лет);
- Технология электролизера также должна обеспечивать длительный срок службы и низкие затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание.

## ЛИТЕРАТУРА

1. F. Blaabjerg, Y. Yang, D. Yang and X. Wang, "Distributed Power-Generation Systems and Protection," in Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 7, pp. 1311-1331, July 2017.
2. F. Blaabjerg and K. Ma, "Wind Energy Systems," in Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 11, pp. 2116-2131, Nov. 2017.
3. "Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells", International Energy Agency, 2015
4. "How hydrogen empowers the energy transition", Hydrogen Council, 2017
5. "Renewable Power to Hydrogen – Innovation Landscape Brief", International Renewable Energy Agency (IRENA), ISBN 978-92-9260-145-4, 2019
6. "PTX in Denmark before 2030 - Short term potential of PtX in Denmark from a system perspective", Energinet, 2019.
7. "Energy Islands", Danish Energy Agency, 2020, <https://ens.dk/en/our-responsibilities/wind-power/energy-islands>
8. D. M. F. Santos, C. A. C. Sequeira, J. L. Figueiredo, "Hydrogen production by alkaline water electrolyzer," Química Nova, vol. 36, no. 8, pp. 1176-1193, 2013.
9. M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, D. Stolten, "A comprehensive review on PEM water electrolyzer," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 38, no. 12, pp. 4901-4934, Apr. 2013.
10. J. C. Koj, C. Wulf, P. Zapp, "Environmental impacts of power-to-X systems - A review of technological and methodological choices in Life Cycle Assessments", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 112, 2019, pp. 865-879
11. R. de Vasconcelos Bruna, L. Jean-Michel, "Recent Advances in Power-to-X Technology for the Production of Fuels and Chemicals", Frontiers in Chemistry, Vol. 7, 2019, pp. 392
12. F. Blaabjerg, H. Wang, I. Vernica, B. Liu and P. Davari, "Reliability of Power Electronic Systems for EV/HEV Applications," in Proceedings of the IEEE, Vol. 109, 2021.
13. J. R. Rodriguez et al., "Large current rectifiers: State of the art and future trends," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 3, pp. 738-746, June 2005
14. M. Chen, P. Davari, F. Blaabjerg, "Overview of Power Converter Topologies for Large-Power-Scale Electrolyzer", Proc. of IEEE ECCE'2021, pp. 1-8, 2021.

