

# Охота на CO<sub>2</sub>

Кандидат химических наук  
**В.В.Благутина**

Улавливание и хранение CO<sub>2</sub> может сыграть важную роль в борьбе с потеплением климата. К такому выводу пришла Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) в специальном докладе, который составляли 100 экспертов из более чем 30 стран мира. И хотя существует диаметрально противоположная оценка полезности и реальности этих проектов, ученые продолжают работать над новыми технологиями.

Естественно, эксперты не думают, что это — основной путь решения проблемы потепления. (В этот раз мы не будем обсуждать, теплеет на Земле или холодает, а просто примем, что огромные количества углекислого газа, которые человечество выбрасывает в атмосферу, там совершенно лишние.) Все равно нужно будет повысить эффективность преобразования энергии, переходить на менее углеродоемкие виды топлива (природный газ вместо угля), атомную энергию, возобновляемые источники энергии, а также совершенствовать поглотители и сокращать выбросы и других парниковых газов. Но все же улавливание и хранение CO<sub>2</sub> (эти технологии называются УХУ) — хорошее дополнение к тем усилиям, что предпринимаются в данной области. Подсчитано, что они могут уменьшить последствия от изменения климата в ближайшие 100 лет на тридцать или даже больше процентов.

## Где и как ловить

В большинстве сценариев ученые прогнозируют существенное увеличение выбросов CO<sub>2</sub> в XXI веке. Для того чтобы его концентрация в атмосфере стабилизировалась на безопасном уровне, нужно будет предотвратить выбросы в сотни или даже тысячи гига-

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) была учреждена в 1988 году совместно Всемирной метеорологической организацией и Программой Организации Объединенных Наций по окружающей среде. Круг полномочий МГЭИК включает оценку имеющейся информации об изменении климата и его последствиях, вариантах смягчения последствий изменения климата и адаптации к нему, научные, технические и социально-экономические консультации.

Таблица 1  
**Крупные стационарные источники CO<sub>2</sub>**

Процесс	Количество источников	Выбросы (Мт CO <sub>2</sub> · год <sup>-1</sup> )
Энергетика	4 942	10 539
Производство цемента	1 175	932
Нефтеочистительные заводы	638	798
Сталелитейная промышленность	269	646
Нефтехимическая промышленность	470	379
Переработка нефти и газа	Данные отсутствуют	50
Другие источники	90	33
Биоэтанол и биоэнергетика	303	91
<b>Итого</b>	<b>7 887</b>	<b>13 468</b>

тонн CO<sub>2</sub>. Пока ни у кого не вызывает сомнений, что первичную энергию по меньшей мере до середины нынешнего века люди по-прежнему будут получать в основном из ископаемого топлива: сейчас его доля — 80%. Между тем сжигание и добыча ископаемого топлива — основные источники CO<sub>2</sub> (табл. 1).

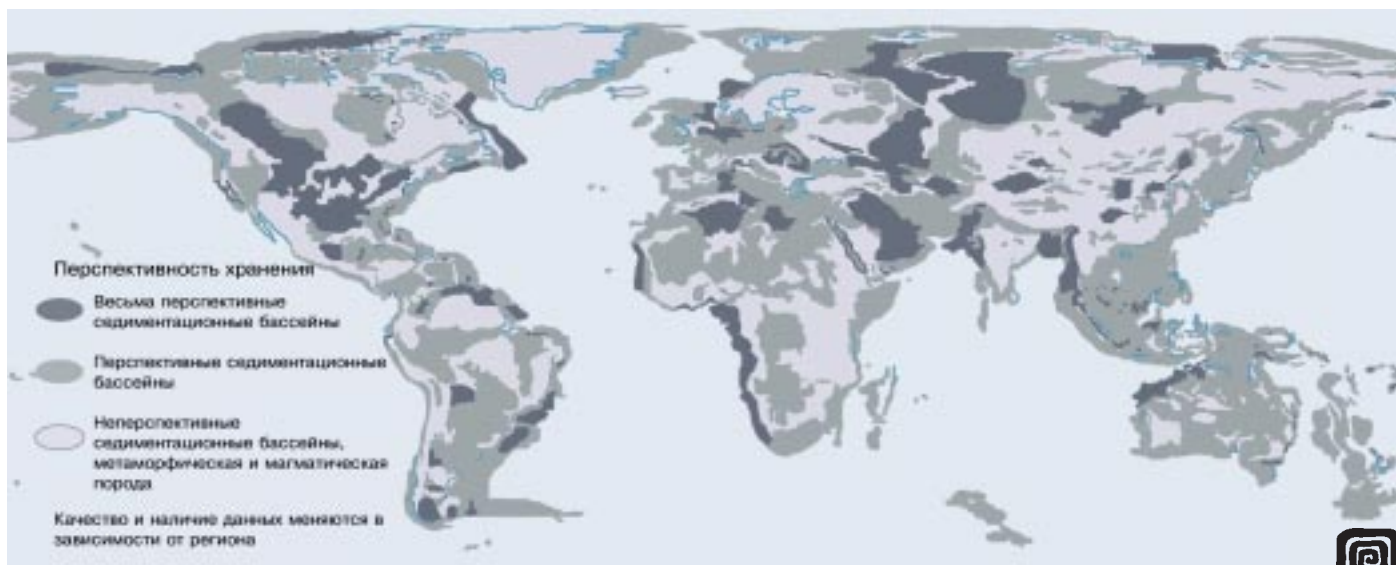
Улавливание и хранение углекислого газа планируют применять не везде, а в крупных точечных источниках его выброса. Например, в 2000 году из-за сжигания топлива в атмосферу попало 23,5 Гт CO<sub>2</sub>, и почти 60% этого количества пришлось на долю крупных стационарных источников. На Земле они сконцентрированы в основном в Северной Америке, Европе, Восточной и Южной Азии. Однако не на любом крупном предприятии можно улавливать углекислый газ, поскольку большинство из них выбрасывают смесь, в которой его концентрация менее 15%. Технология же рентабельна, если CO<sub>2</sub> в потоке много — ближе к 100%. По этим критериям подходят некоторые предприятия энергосектора, производства аммиака, водорода и предприятия по переработке биомассы (их пока в расчеты не включали, но

потенциально они подходящие кандидаты). Учитывая, что производство топлива будущего — водорода дает как раз нужный по концентрации поток CO<sub>2</sub>, то перспективы у УХУ могут быть больше, чем кажется сейчас.

Но вопрос не только в том, что надо найти крупный источник выброса углекислого газа, желательно также, чтобы он находился близко к месту будущего хранения (рис. 1). По подсчетам крупные выбросы и потенциальные хранилища могут оказаться на вполне разумных расстояниях — не больше 300 км. Правда, потенциальные бассейны, указанные на карте, еще не изучены подробно. Чтобы сказать точно, можно ли в них хранить CO<sub>2</sub>, потребуется специальный геологический анализ.

Сколько углекислого газа можно поймать и увести из атмосферы? Если улавливать только там, где сжигают ископаемое топливо, то, по расчетам, к 2020 году объемы улавливания могут быть 2,6–4,9 ГтCO<sub>2</sub> т/год (это 9–12% всех выбросов CO<sub>2</sub> к тому времени), а к 2050 году больше 30 Гт CO<sub>2</sub>/год (до 45% всех выбросов к тому времени).

Как любой технологический процесс, УХУ имеет несколько стадий: улавливание, концентрирование, транспортировку и хранение. Все составляющие этой технологии находятся на разных уровнях технической проработки (табл. 2). Настолько разных, что некоторые из них уже широко применяются (главным образом



**1**  
**Потенциальные места хранения CO<sub>2</sub>**

**Таблица 2**  
**Нынешнее состояние компонентов системы УХУ**

Компонент УХУ	Технология УХУ	Исследовательский этап	Демонстрационный этап	Экономически осуществимый при определенных условиях	Развитый рынок
Улавливание	После сжигания До сжигания Сжигание обогащенного кислородом топлива Промышленная сепарация (переработка природного газа, производство аммиака)		X	X X	X
Транспортировка	Трубопровод Перевозка судами			X	X
Геологическое хранение	Повышенное извлечение нефти (ПИН) Газовые или нефтяные месторождения Соленосные формации Повышенное извлечение угольного метана (ПИУМ)		X	X X	X
Хранение в океане	Прямое закачивание (по типу растворения) Прямое закачивание (по типу озера)	X X			
Карбонизация минералов	Природные силикатные минералы Материалы отходов	X	X		
Промышленные виды использования CO <sub>2</sub>					X

углекислый газ при этом выбрасывают в атмосферу. Есть три основные концепции улавливания CO<sub>2</sub> на производствах по сжиганию природных топлив: улавливание после сжигания, улавливание до сжигания и сжигание топлива с обогащением кислородом.

Первый способ применяется в современной энергоустановке, работающей на угольной пыли или с комбинированным циклом природного газа. Из названия понятно, что CO<sub>2</sub> отделяют от дымовых газов после сжигания топлива, для чего, как правило, используют органический растворитель. В системах улавливания до сжигания первичный поток топлива обрабатывают насыщенным воздухом или кислородом (получается синтез-газ), после чего смесь доокисляют и только потом CO<sub>2</sub> выделяют из потока. Этот способ — более сложный и дорогой по сравнению с первым, но зато образуется смесь с высокой концентрацией CO<sub>2</sub>. Третий способ еще дороже, поскольку предполагает обогащение топлива кислородом вместо воздуха. Появляется еще одна стадия — получение кислорода из воздуха, но и концентрации CO<sub>2</sub> в потоке получаются самые высокие. Эта технология находится на демонстрационном этапе.

Во всех трех методах нужно отделять CO<sub>2</sub> от основного газового потока, и это делают с помощью растворителей, мембран, твердых сорбентов или криогенного разделения. Современные системы первого или второго типа могут улавливать до 85–95% CO<sub>2</sub>. В принципе возможно и больше, но тогда сепараторы становятся слишком большими, энергоемкими и дорогостоящими.

в нефтегазовой промышленности), а другие до сих пор остаются на стадии исследований, разработки или демонстрации.

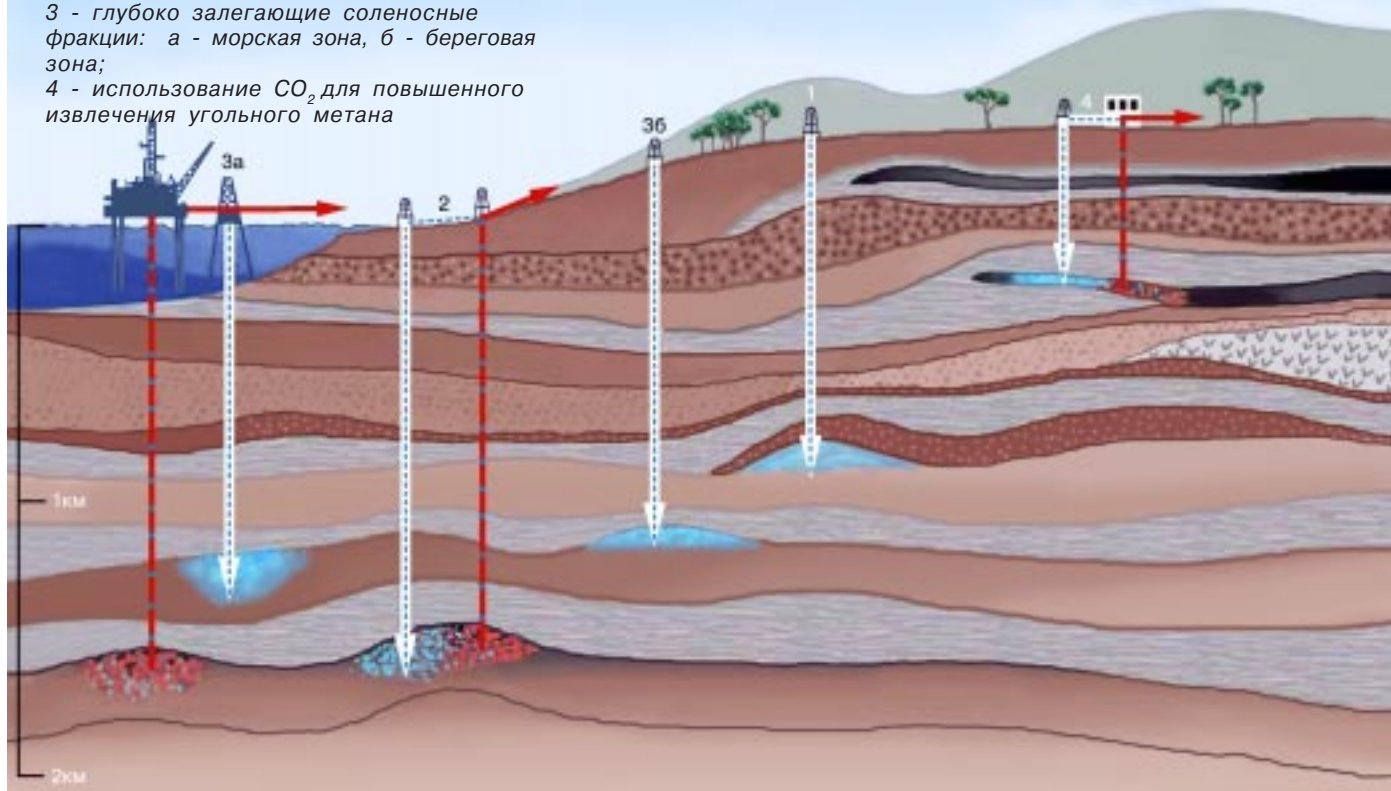
Как обстоит дело с улавливанием? В целом это как раз более-менее от-

ложено. Сегодня подобные устройства уже работают на производствах по переработке природного газа и синтезу аммиака. Правда, их задача состоит в том, чтобы очистить от CO<sub>2</sub> нужные промышленные газы, а сам

## 2

### Хранение CO<sub>2</sub> под землей

- 1 - выработанные нефтяные и газовые пласты;
- 2 - использование CO<sub>2</sub> для повышенного извлечения нефти и газа;
- 3 - глубоко залегающие соленосные фракции: а - морская зона, б - береговая зона;
- 4 - использование CO<sub>2</sub> для повышенного извлечения угольного метана



Второй этап технологии, транспортировка, видимо, также не вызовет больших затруднений. Уже сегодня трубопроводы — самая распространенная технология транспортировки CO<sub>2</sub> (обычно газ предварительно сжимают до давления более 8 Мпа). Первый трубопровод большой протяженности для доставки CO<sub>2</sub> начал действовать в США в начале 1970-х годов. По трубопроводу длиной больше 2500 км доставляют более 40 Мт CO<sub>2</sub>/год, чтобы использовать его в технологии повышенного извлечения нефти (углекислый газ закачивают под землю, а происходит это главным образом в Техасе). Углекислый газ можно также перевозить в жидком виде судами, автомобильным или железнодорожным транспортом.

### Где и как хранить

Где хранить диоксид углерода и не вырвется ли он наружу с еще более ужасными последствиями? Сегодня ученые рассматривают несколько методов хранения углекислого газа: закачивание не только в подземные геологические формации, но и на большие глубины в океан, а также промышленная фиксация в неорганических карбонатах.

### Под землей

Сначала о земле. Технологии подземного хранения более или менее понятны. Считают, что CO<sub>2</sub> можно будет закачивать в геологические формации трех типов: в резервуары, оставшиеся от нефти и газа, глубоко залегающие соленосные пласты и угольные пласты, не имеющие промышленного значения (рис. 2). Главное условие — породы должны быть пористыми. Под землей CO<sub>2</sub> сжимается и заполняет пористое пространство, частично вытесняя оттуда жидкости. В нефтяных и газовых пластах это может привести к освобождению большей части пористого объема для хранения. В соленосных формациях оценки объема гораздо более скромные — максимум около 30% от общего объема породы.

Угольные пласты можно использовать, только если их точно никогда не начнут разрабатывать, а также если верхний пласт месторождения непроницаемый. Технология хранения в угольных пластах находится пока на демонстрационном этапе (табл. 2).

Для того чтобы закачать CO<sub>2</sub> в глубинные геологические формации, нужны во многом те же самые тех-

нологии, которые были разработаны для добычи нефти и газа. Но сначала надо определить, хорошую ли герметизацию обеспечит перекрывающая порода, достаточно ли вместительна формация, хорошо ли она проницаема и не нарушат ли герметизацию заброшенные или действующие скважины. В принципе для ответа на эти вопросы тоже можно использовать методики, разработанные для разведки нефтяных и газовых пластов.

Предполагают, что хранить CO<sub>2</sub> под землей можно на глубинах более 800 м. Благодаря давлению и температуре углекислый газ там будет находиться в жидком или сверхкритическом состоянии. При этом плотность CO<sub>2</sub> составит 50–80% от плотности воды, что близко к плотности некоторых видов сырой нефти. Неизбежно возникнут выталкивающие силы, поэтому важно, чтобы сверху над резервуаром была хорошо герметизирующая порода. Однако часто одна или несколько сторон остаются открытыми, поэтому в проектах долгосрочного хранения расчет делают на дополнительные механизмы фиксации.

Например, дополнительную ловушку, возможно, создадут капил-

Таблица 3

Места, где уже осуществляется хранение CO<sub>2</sub> или планируется в будущем

Название проекта	Страна	Начало закачивания (год)	Приблизительный среднесуточный показатель закачивания (тCO <sub>2</sub> /сутки)	Планируемый объем хранения (тCO <sub>2</sub> )	Тип резервуара для хранения
Уэйберн	Канада	2000	3000–5000	20 000 000	ПИН
Ин-Салах	Алжир	2004	3000–4000	17 000 000	Газовое месторождение
Слейпнер	Норвегия	1996	3000	20 000 000	Соленосная формация
K12В	Нидерланды	2004	100 (на 2006 планируется 1000)	8 000 000	Повышенное извлечение газа
Фрио	США	2004	177	1600	Соленосная формация
Фенн Биг Веллей	Канада	1998	50	200	ПИУМ
Бассейн Циньшуй	Китай	2003	30	150	ПИУМ
Юбари	Япония	2004	10	200	ПИУМ
Рекопол	Польша	2003	1	10	ПИУМ
Горгон (планируется)	Австралия	~2009	10 000	Неизвестен	Соленосная формация
Снохвит (планируется)	Норвегия	2006	2000	Неизвестен	Соленосная формация

лярные силы, которые удержат диоксид углерода в пористой породе. Кроме того, со временем начнет работать геохимическая ловушка, то есть CO<sub>2</sub> вступит в реакцию с жидкостями и вмещающей породой. В первую очередь углекислый газ растворится в воде, и как только это произойдет (за сотню–тысячу лет), насыщенная CO<sub>2</sub> вода станет более плотной и погрузится на дно формации. Затем в результате химических реакций между растворенным диоксидом углерода и минералами породы образуются твердые карбонатные минералы (правда, на это потребуются миллионы лет). Кроме того, возможен еще один тип улавливания, когда CO<sub>2</sub> избирательно адсорбируется на угле или сланцах с большим содержанием органического вещества. Тогда CO<sub>2</sub> останется в ловушке до тех пор, пока будут сохраняться давление и температура.

Конечно, все оценки того, сколько же углекислого газа удастся захоронить, скорее всего, не очень точны, поскольку основаны на анализе литературы и общих подсчетах. По прикидкам в нефтяные и газовые месторождения удастся закачать 600–900 ГтCO<sub>2</sub>, в угольные 15–200, а с соленосными вообще не очень понятно. Хранить CO<sub>2</sub> придется довольно долго, а за это время возможны локальные и глобальные утечки, о которых надо думать и которые придется контролировать. Поэтому в стоимость технологий входит также постоянный мониторинг.

Тем не менее уже сейчас реализуются три проекта промышленного масштаба, благодаря которым около 1 Мт CO<sub>2</sub>/год или больше не попадают в атмосферу: проект Слейпнера в Северном море, Уэйберна в Канаде и Ин-Салаха в Алжире. Суммарно в этих трех проектах ежегодно исче-

зуют под землей 3–4 МтCO<sub>2</sub>. Есть и некоторые другие планы, которые скоро будут реализованы (табл. 3).

Помимо трех уже работающих проектов УХУ, ежегодно для повышенного извлечения нефти с закачиванием CO<sub>2</sub> расходуется 30 Мт CO<sub>2</sub> (главным образом в Техасе). Большую часть этого CO<sub>2</sub> получают из его естественных залежей, обнаруженных в западных регионах США, а часть добывают вместе с нефтью, отделяют и затем вновь закачивают под землю. Так что нельзя сегодня сказать, что на эти количества облегчили нашу атмосферу.

В общем, элементы УХУ потихоньку отлаживаются, совершенствуются, а также провоцируют развитие смежных отраслей, таких, как бурение скважин, технологии закачивания, компьютерная имитация резервуаров хранения и методов мониторинга.

### Под водой

Теперь о втором способе — хранении в океане, то есть о закачивании CO<sub>2</sub> под воду на глубину более 1000 м. Это можно осуществить, транспортируя углекислый газ по трубопроводам или на кораблях. Хотя этой разработкой занимаются около 25 лет, выполнить ее на практике еще никто не пробовал, пока она находится на этапе лабораторных исследований и моделирования.

Вообще-то диоксид углерода растворяется в воде, поэтому между атмосферой и поверхностью океана и без захоронения постоянно происходит естественный обмен CO<sub>2</sub>. Когда в атмосфере повышается концентрация CO<sub>2</sub>, он постепенно поглощается океаном, и этот процесс продолжается до достижения равновесия. Таким образом, океаны уже вобрали в себя около трети (500 Гт CO<sub>2</sub>) от общего количества антропогенных выбросов (1300 Гт CO<sub>2</sub>),



### ТЕХНОЛОГИЯ И ПРИРОДА

попавших в атмосферу за последние 200 лет. В результате деятельности человека океанам сегодня приходится поглощать около 7 Гт CO<sub>2</sub> /год.

Большая часть диоксида углерода остается сейчас в верхних слоях океана, из-за чего pH там уменьшился на 0,1. На океанских глубинах почти никаких изменений кислотности пока не отмечается. Физического предела объему углекислого газа, который может храниться в океане, нет, но в то же время его объем будет зависеть от равновесия между океаном и атмосферой. Так, если атмосферные концентрации CO<sub>2</sub> стабилизируются в пределах 350–1000 ppmv (ppmv — это объем газообразного загрязнителя на миллион объемов воздуха при н.у.), то это означает, что 2000 — 12 000 ГтCO<sub>2</sub> будут оставаться в океане (без дополнительного закачивания CO<sub>2</sub>). Собственно, считается, что это и есть предел емкости.

Есть идеи, как увеличить сохраняемую долю углекислого газа в океане, спровоцировав образование твердых гидратов CO<sub>2</sub> и/или жидких озер на морском дне. Кроме того, предлагают растворять в океанской воде щелочные минералы (известняк) для нейтрализации кислотного CO<sub>2</sub>. Природные карбонаты практически нерастворимы, поэтому сроки хранения тогда могут увеличиться до 10 000 лет, при этом сведутся к минимуму изменения pH океанской воды. Но в этом случае понадобится много известняка и энергии (величины такого же порядка, как те,

Таблица 4

**Стоимость компонентов УХУ в ценах 2002 года в зависимости от типа энергоустановки или промышленного источника.**

**Все цифры посчитаны при ценах на природный газ 2,8–4,4 долл.США/ГДж и ценах на уголь 1–1,5 долл. США/ГДж**

Компоненты системы УХУ	Диапазон стоимости	Замечания
Улавливание из энергоустановки на угле или газе	5–55 долл. США/ чистая захваченная тСО <sub>2</sub>	Стоимость захваченного СО <sub>2</sub> по сравнению с такой же установкой без улавливания
Улавливание из других промышленных источников	25–115 долл. США/ чистая захваченная тСО <sub>2</sub>	Применяется к источникам высокой чистоты, где нужно просто высушить и сжать СО <sub>2</sub>
Транспортировка	1–8 долл. США/ транспортируемая тСО <sub>2</sub>	На 250 км трубопровода или перевозкой судами для массового расхода в 5 — 40 МтСО <sub>2</sub> /год
Геологическое хранение*	0,5–8 долл. США/ чистая закачанная тСО <sub>2</sub>	Исключая потенциальные прибыли от ПИН или ПИУМ
Геологическое хранение: мониторинг и проверка	0,1–0,3 долл. США/ закачанная тСО <sub>2</sub>	Включает мониторинг до закачивания, в процессе и после. Зависит от нормативных требований
Хранение в океане	5–30 долл. США/ чистая закачанная тСО <sub>2</sub>	Включая морскую транспортировку на расстояние в 100–500 км, без учета мониторинга и проверки
Карбонизация минералов	50–100 долл. США/ чистая минерализованная тСО <sub>2</sub>	Диапазон для наиболее показательного изученного случая. Включает использование дополнительной энергии для карбонизации

\* Через какое-то время могут появиться дополнительные расходы, связанные с восстановительными мерами

что требуются для карбонизации тонны СО<sub>2</sub>, — см. ниже).

Вообще, даже те, кто занимается этой проблемой, похоже, не очень уверены в целесообразности дополнительного складирования углекислого газа в океане. Уже совершенно очевидно, что даже несколько Гт СО<sub>2</sub> приведет к закислению океана в районе закачивания. А при большой кислотности перестают размножаться и погибают флора и фауна.

## В промышленности

Наконец, третий способ складирования углекислого газа — карбонизация минералов и использование его в промышленности. Первое — это когда берут силикатные породы естественного происхождения, такие, как серпентин и оливин, содержащие оксид магния (MgO) и оксид кальция (CaO), и проводят реакцию с СО<sub>2</sub>. Получаются карбонат магния (MgCO<sub>3</sub>) и карбонат кальция (CaCO<sub>3</sub> — известняк). Уже сейчас понятно, что оксидов металлов, которые можно добыть в природе, совершенно недостаточно для фиксации всего СО<sub>2</sub>, который полу-

чается после сжигания всех запасов ископаемого топлива. Немного этих оксидов можно найти в промышленных отходах. Другой вопрос — куда девать полученные карбонаты. Карбонаты и кремнезем очень стабильны, их можно сваливать в силикатные шахты или повторно использовать для строительных целей. Впрочем, очевидно, что их будет гораздо больше, чем нужно для повторного использования.

Карбонизация минералов («выветривание») происходит и в природе, только очень медленно. Как его ускорить, чтобы процесс можно было использовать в промышленных масштабах, — это и есть предмет исследования. Пока технология карбонизации минералов с применением природных силикатов находится в стадии эксперимента, однако кое-что уже даже на демонстрационном этапе.

Ясно, что это путь дорогой. Надо будет плюс к получению концентрированного потока СО<sub>2</sub> из улавливающей установки добывать, дробить и обогащать руды, а также доставлять их к месту переработки. В результате карбонизация минералов потребует на 60–180% больше энергии в расчете на киловатт-час.

Еще один способ — использовать СО<sub>2</sub> в промышленности, казалось бы, самый простой и естественный. Ведь его можно применять как реагент в химических и биологических процессах — производстве мочевины и метанола, а также в садоводстве, холодильном оборудовании, при упаковке пищевых продуктов, сварке, в напитках и огнетушителях. Все это забирает примерно 120 Мт СО<sub>2</sub> в год (исключая технологии повышенного извлечения нефти).

Часть углекислого газа для этих целей добывают из природных скважин, а часть берут из производств, в которых улавливают СО<sub>2</sub>, — например, из производств аммиака и водорода. Чтобы этот способ был хорош, должны соблюдаться некоторые условия: срок хранения СО<sub>2</sub> должен быть значительным, а количества «уводимого» газа должны быть большими. Между тем срок хранения большей части СО<sub>2</sub>, который утилизируют таким образом, составляет от нескольких дней до месяцев, поскольку потом полученные из него вещества снова окисляются и СО<sub>2</sub> снова попадает в атмосферу. Кроме того, общая цифра промышленного использования, 120 Мт СО<sub>2</sub>/год, мизерна по сравнению с выбросами из основных антропогенных источников (табл. 1). Чтобы оценить, может ли этот способ сократить выбросы СО<sub>2</sub>, надо провести подробный анализ его цикла жизни, а сделать это довольно трудно из-за отсутствия данных. В теории результаты иногда получаются даже со знаком минус, то есть углекислого газа в атмосфере становится даже больше в результате его использования в промышленности.

## Финансовый и другие вопросы

Немаловажный вопрос — сколько же стоят эти технологии (табл. 4). Ведь чтобы реализовать их, надо потратить энергию, а значит, сначала ее надо получить, сжигая полезные ископаемые, что приведет к еще большему выбросу СО<sub>2</sub>... И еще один нюанс. Если оценки делали вчера, то в расчет брали вчерашнюю стоимость нефти, а завтра могут получиться совсем другие цифры.

Оценить, насколько рентабельны современные технологии, довольно трудно, поскольку никто не изучал как следует, сколько будет стоить модернизация энергоустановок, если их переоборудовать системами улавливания СО<sub>2</sub>. Те немногие исследования, которые все-таки были сделаны, говорят о том, что нужно сочетать повышение эффективности и производительности самой энер-

гоустановки (реконструируя бойлер и турбину) с системой улавливания углекислого газа. Подсчеты также осложнены тем, что  $\text{CO}_2$  из разных процессов отличается показателями давления и концентрации. В результате стоимость улавливания, например, на цементных, сталелитейных предприятиях и нефтеочистительных заводах имеет большой разброс — 25–115 долл./т  $\text{CO}_2$  (к чистому захваченному  $\text{CO}_2$ ). Правда, там, где получается относительно чистый поток  $\text{CO}_2$  (переработка природного газа, производство водорода и производство аммиака), стоимость захваченного газа колеблется в пределах 2–56 долл./т  $\text{CO}_2$ .

Непонятно, как быстро будут дешеветь установки для этих технологий, но все-таки вполне возможно, что их стоимость сократится на 20–30% в ближайшие 10 лет.

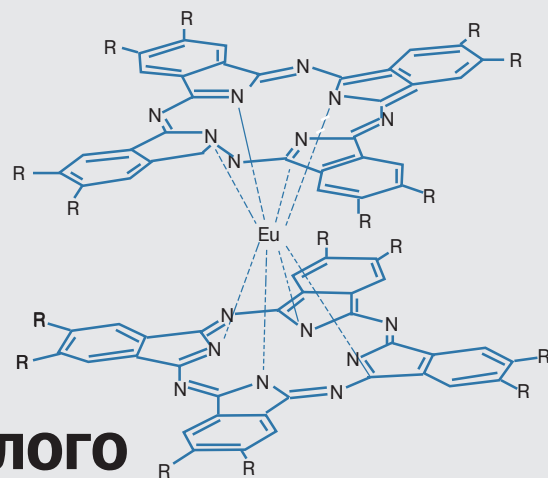
Похоже, если не появится четко сформулированной политики по ограничению выбросов парниковых газов в атмосферу, то системы УХУ вряд ли будут применяться в широких масштабах. И второе, от чего будет зависеть внедрение технологий, — их стоимость. Если будут установлены пределы выбросов парниковых газов, то можно наверняка утверждать, что с этого момента в течение нескольких десятилетий будут внедрены системы складирования  $\text{CO}_2$ .

Если не будет жестких мер по ограничению выбросов  $\text{CO}_2$ , то современный промышленный опыт показывает, что технологии по улавливанию будут внедрены только там, где есть благоприятные предпосылки: поток  $\text{CO}_2$  с высокой чистотой и низкой стоимостью, близко расположенные места для захоронения газа (менее 50 км) и его применения для повышенного извлечения нефти. Потенциал таких благоприятных вариантов составляет около 360 Мт  $\text{CO}_2$  в год. Поскольку системы УХУ совершенствуются, то все же, по мнению экспертов, есть шанс, что рано или поздно они смогут конкурировать с другими вариантами крупномасштабного смягчения антропогенных воздействий, такими, как атомная энергия и технологии возобновляемой энергии. Скорее всего, это произойдет не раньше второй половины этого столетия.

**По материалам доклада  
МГЭИК**

## Полимер из углекислого газа

ТЕХНОЛОГИЯ И ПРИРОДА



На химфаке МГУ группа под руководством доктора химических наук Л.Г.Томиловой разработала технологию непрерывного превращения  $\text{CO}_2$  в полимеры. Такая технология только кажется невозможной, но ведь растениям легко удается перерабатывать гигантские количества углекислого газа, а ученые постепенно постигают природные хитрости.

Исследования идут по нескольким направлениям — речь идет не только об улавливании  $\text{CO}_2$ , но и о связывании оксидов азота и серы. Поймать углекислый газ не слишком трудно, труднее превратить его во что-нибудь полезное, вместо того чтобы закачивать под землю.

Новая технология подразумевает получение в непрерывном режиме из углекислого газа экологически безопасных поликарбонатов. Если ее введут в практику, то без преувеличения можно утверждать, что это будет уникальный способ выведения двуоксида углерода из оборота.

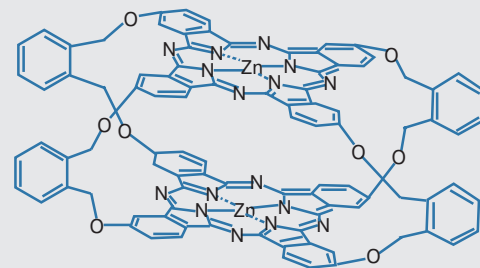
Ключевую роль в технологии играют фталоцианиновые комплексы металлов, поэтому значительная часть работы группы посвящена их синтезу и детальному исследованию. Фталоцианины — синтетические аналоги природных порфиринов, играющих ключевую роль в фотосинтезе, — в последнее время стали весьма популярным объектом исследований. Ведь они имеют уникальные спектральные характеристики и полупроводниковые свойства. В частности, эти соединения, как и природные порфирины, способны поглощать квант света в видимой области и потом запускать целую цепь невозможных до того реакций.

Неудивительно, что фталоцианины оказались избирательными катализаторами превращения экологически вредных газообразных оксидов в полезные материалы. Чтобы отработать условия протекания этих реакций, пришлось потрудиться. Фталоцианиновых комплексов очень много, и надо было найти самые активные, а кроме того, оказалось, что плохо изученные двойные комплексы, имеющие сэндвичевую структуру (диф-

талоцианины, в которых одно металлическое ядро соединено с двумя большими органическими молекулами), проявляют еще большую активность, чем хорошо известные (рис. наверху).

Поэтому первой важной задачей был направленный синтез новых потенциальных катализаторов, изучение их свойств и установление связи «структура — свойство». Попутно исследователи разработали новые способы направленного синтеза фталоцианиновых комплексов определенного строения, с использованием микроволнового облучения. Это упростило синтез, сократило его время до нескольких минут и позволило впервые синтезировать фталоцианины сэндвичевого строения высокой степени чистоты.

Известно, что в биологических системах работают не индивидуальные порфирины, а их молекулярные ансамбли. Предполагая, что большие сложные структуры будут иметь более высокую каталитическую активность, химики синтезировали биядерные фталоцианины различного строения. Биядерные — значит, в одну объединены две большие молекулы, каждая из которых имеет свое металлическое ядро (рис. внизу).



Оказалось, что новые комплексы очень хорошо катализируют превращение в полезные материалы не только оксида углерода, но и оксидов азота и серы.

Технология каталитического непрерывного способа превращения диоксида углерода в пропиленкарбонат готова к практическому использованию. Интересно, что сама реакция также происходит в сверхкритическом жидком  $\text{CO}_2$ .