

# ОХОТА НА ДИОКСИД УГЛЕРОДА В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ

А.О. МАЙБОРОДА

(Научно-исследовательская компания "АВАНТА-Консалтинг")

DOI: 10.7868/S0233361922090014

 Дымовые газы тепловых электростанций, прежде всего угольных, – главные загрязнители атмосферы. Как экономично и эффективно удалять диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ) из дымовых газов – вот в чём вопрос. Концентрация  $\text{CO}_2$  достаточно низкая в дымовых выбросах тепловых двигателей, и её сепарация обходится очень дорого. Если удастся понизить затраты на её извлечение, то такая технология также решит задачу, поставленную Илоном Маском на конкурсе XPRIZE Carbon Removal, – извлекать углекислый газ непосредственно из атмосферы. Это возможно в том случае, когда модернизированные электростанции будут потреблять не ископаемое, а биотопливо. Углерод, изъятый растворениями из атмосферы, при сжигании на тепловых электростанциях, после изъятия из дымовых газов подвергается захоронению и не возвращается в атмосферу.

Сейчас технология сокращения затрат на удаление  $\text{CO}_2$  из дымовых газов путем повышения концентрации  $\text{CO}_2$  в дымовых газах находится на стадии лабораторного тестирования.

Звучит несколько парадоксально. Но этот парадокс объясняется просто: чем выше концентрация, тем меньше

затраты. При низкой концентрации затраты могут быть многократно выше, чем при высокой. Если удастся повысить концентрацию  $\text{CO}_2$  до 100%, то затраты на его извлечение сократятся десятикратно по сравнению с фактическим уровнем.

К примеру, у турбин генераторов, потребляющих природный газ, очень низкая концентрация  $\text{CO}_2$  в дымовых газах – всего 2.5–5%. Топки паровых турбин выдают дым с концентрацией около 20%. Авторы новой технологии в решении проблемы сделали ставку на замену воздуха кислородом. Понятно, что при такой замене дымовой газ становился практически чистым  $\text{CO}_2$  с примесью легко сепарируемого водяного пара. Однако до сих пор работы по этой технологии так и не вышли из экспериментальной стадии – напряженный тепловой режим работы деталей газовых турбин при замене воздуха кислородом требует применения особо жаропрочных и жаростойких материалов. Единственное исключение – двигатели внешнего сгорания, используемые на угольных электростанциях с паровыми турбинами. Тем не менее на пути создания экологически чистых электростанций есть препятствие – высокая стоимость замены воздуха кислородом.



Действительно, новая технология требует использования кислорода, производство которого во многих случаях не всегда дёшево. Самый дешёвый способ – выделение кислорода из воздуха на больших криогенных воздухоразделительных установках (ВРУ). В издержках ВРУ значительная часть приходится на затраты энергии. Большие установки сокращают затраты энергии до 300 кВт · ч на получение 1 т газообразного кислорода. Если ВРУ потребляет электроэнергию, то в США при дневном тарифе в 0.1 долл./кВт · ч издержки составят 30 долл./т O<sub>2</sub>, а при ночном тарифе, который, кстати, рекомендует Илон Маск для владельцев электрокаров, равном 0.02–0.04 кВт · ч, издержки производства 1 т кислорода составляют 6–12 долл. Таким образом, выгодный режим работы ВРУ – ночной, за счёт ночного тарифа или за счёт мощностей обслуживаемой электростанции, которые оказываются недогруженными в ночной период.

**Схема рационального использования бросового хладоресурса СПГ. Составлена автором.**

Как это сказывается на цене удаления CO<sub>2</sub> из дымовых газов? При сжигании каменного угля (C<sub>2</sub>H) на 1 т потребленного кислорода производится 1.222 т углекислого газа. Таким образом, минимальные затраты составляют 4.9–9.8 долл./т CO<sub>2</sub> (при генерации кислорода в ночной период). Для сравнения: в Евросоюзе плата за квоты на выбросы CO<sub>2</sub> ещё в прошлом году превысила 100 долларов за тонну, что делает возможным маржу до 90 долл./т. В других регионах возможная плата за квоты прогнозируется в диапазоне 25–50 долл./т CO<sub>2</sub>. Маржа – 20–40 долл./т.

Таким образом, рассматриваемая технология рентабельна – пользователи не только окупают затраты, но и получают прибыль. Загрязнители атмосферы платят углеродный налог, а поглотители CO<sub>2</sub> получают премию.

Вместе с тем имеется хорошая перспектива ещё больших сокращений затрат на получение кислорода – примерно в три-четыре раза. Дело в том, что мире есть бросовый ресурс, исчисляемый миллионами тонн, рациональное использование которого способно многократно понизить цену производства кислорода и, соответственно, цену очищения дымовых газов от  $\text{CO}_2$ .

Этот ресурс существует в виде ныне не используемого и растратываемого хладоресурса сжиженного природного газа (СПГ). Например, СПГ, поставляемого в Европу. Хладоресурс сжиженного природного газа сейчас бесполезно рассеивается на регазификационных станциях. Это при том, что на сжижение газа (на энергоснабжение криогенного оборудования) тратится до 25% от его первоначальной массы. Испарение 1 т СПГ создает условия для сжижения воздуха и выделения из него кислорода при минимальных затратах. Криогенные ВРУ, комбинированные с регазификационными станциями, при высоком КПД рекуперации холода, на 1 т СПГ способны производить до 4 т газообразного кислорода.

В Европе создана внушительная по объёмам инфраструктура приёма сжиженного газа. На данный момент в странах ЕС имеется 32 крупнейших СПГ-терминалов. Мощность в 2016 году – 218.9 млрд кубометров, или 159 млн т СПГ. Мощность в 2025 году – 296 млрд кубометров, или 215 млн т СПГ. Использование этого дарового хладагента для получения кислорода в криогенных воздухоразделителях за счёт высокоэффективной рекуперации холода (89%) может дать до 860 млн т недорогого газообразного кислорода, то есть на 1 т СПГ это гарантиру-

ет получение до 4 т кислорода. Сгорание этой массы кислорода и каменного угля даст продукты сгорания массой более 1 млрд т  $\text{CO}_2$  в год.

С учётом других стран потенциал хладоресурсов значительно больше. К примеру, Япония занимает первое место в мире по суммарным мощностям регазификационных СПГ-терминалов. По состоянию на январь 2020 года в стране функционировало 37 СПГ-терминалов суммарной мощностью 298.2 млрд кубометров в год, или 217 млн т СПГ. Японский хладоресурсный потенциал может дать до 868 млн т кислорода, что обеспечивает удаление  $\text{CO}_2$  из дымовых газов электростанций, работающих на каменном угле, свыше 1 млрд тонн.

Таким образом, с учётом потенциала Европы и Японии (432 млн т СПГ) ресурс ежегодной аккумуляции  $\text{CO}_2$  из дымовых газов составляет около 2.1 гигатонны. Это составляет 21% от потребности в удалении  $\text{CO}_2$ , которая оценивается примерно в 10 гигатонн в год: чтобы удержать повышение глобальной температуры на уровне менее 1.5 или 2 °C.

Понятно, что растущий хладоресурс регазификационных терминалов всего мира таким образом способен обеспечить удаление более значительных объёмов  $\text{CO}_2$ .

Приведённая выше оценка относится к удалению  $\text{CO}_2$  из дымовых газов электростанций, потребляющих каменный уголь. Полученная масса кислорода применима к очищению выбросов других промышленных объектов, включая и газовые электростанции. Причём не только в Евросоюзе и Японии, но значительно шире – за счёт экспорта по морю сжиженного кислорода, аналогично перевозкам СПГ.

---

В перспективе, когда объёмы производства биогаза из водорослей и наземных растений достигнут величин, соизмеримых с нынешними объёмами СПГ, начнётся удаление CO<sub>2</sub> из атмосферы и океанов в требуемых масштабах. Без этого трудно достичь стабилизации климата. Если повышенная концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере сохранится, то даже с нулевыми выбросами потепление будет продолжаться по инерции несколько столетий.

Если стремиться к большим объёмам удаления CO<sub>2</sub>, то после исчерпания криоресурса на основе СПГ возможно увеличение производства кислорода за счёт массового производства и сокращения стоимости больших криогенных ВРУ. Программа круглосуточного поточного производства судов типа "Либерти" даёт образец технологии для достижения низкой стоимости крупных ВРУ. За счёт последовательных усовершенствований срок постройки был уменьшен до 42 суток. В 1942 году поставили рекорд – спуск судна на воду менее через 5 дней после закладки. Воспроизведение этой программы в увеличенном масштабе применительно к крупным ВРУ обеспечит изъятие CO<sub>2</sub> до требуемой величины в 10 гигатонн и более.

Сокращение расходов на декарбонизацию экономики жизненно важно. В соответствии с целями Парижского соглашения по климату в ближайшие десять лет необходимо существенно сократить объёмы выбросов диоксида углерода, продолжая при этом удовлетворять материальные потребности постоянно растущего населения. Без внедрения инноваций существует реальная угроза ухудшения жизни человечества. Пока же цена декарбонизации будет расти.

По оценкам аналитиков, снижение выбросов на 25% обойдётся России в 1.3% ВВП ежегодно; снижение на 50% потребует изъятия уже 2.7% ВВП ежегодно; а сокращение выбросов на 100% к 2060 году потребовало бы затрат, в годовом выражении эквивалентных 15% ВВП.

Билл Гейтс, основатель программы Breakthrough Energy Catalyst, считает, что имеется достаточно идей с высокими шансами на успех, особенно при адекватной господдержке. Фонд Breakthrough Energy Catalyst намерен вложить 15 млрд долларов в чистую энергетику.

Однако не всё так просто – государственная поддержка инновационной деятельности в декарбонизации мировой экономики становится невозможной для многих стран в условиях тотальных экономических санкций. Для бедных стран планы дорогостоящей декарбонизации превращаются в утопию – защита падающего жизненного уровня населения становится приоритетом. Поэтому не просматривается перспектива перевода угольных электростанций на газовое топливо, создание транспорта с нулевыми выбросами CO<sub>2</sub>, выделение обширных площадей, – в ущерб продовольственной программе, – под производство сырья для биотоплива.

Научное сообщество с тревогой отмечает, что мы прилагаем недостаточно усилий для ограничения глобального потепления в пределах 1.5 °C. Необходимо срочно договариваться о том, как быть с соглашением по климату в условиях выстраивания нового железного занавеса, – в атмосфере и океанах планеты барьера нет, – последствия затронут все страны.