

УДК 504.05

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

*А.М. Гафуров¹, Б.М. Осипов¹, Р.З. Гагина², Н.М. Гафуров²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

*ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3470-4933>, progress150987@rambler.ru

Резюме: В статье рассматриваются возможные пути снижения выбросов углекислого газа, особенности технологий извлечения CO₂ из дымовых газов. Проанализирован зарубежный опыт использования CO₂. Определены возможные области применения CO₂ в качестве рабочего тела для различных тепловых двигателей и термодинамических циклов. Исследованы термодинамические и теплофизические свойства углекислого газа.

Ключевые слова: глобальное потепление, выбросы углекислого газа, использование диоксида углерода, тепловой двигатель, термодинамический цикл.

POSSIBLE WAYS OF DECREASE IN EMISSIONS OF CARBON DIOXIDE GAS

*A.M. Gafurov¹, B.M. Osipov¹, R.Z. Gatina², N.M. Gafurov²

¹Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

²Kazan national research technological university, Kazan, Russia

*ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3470-4933>, progress150987@rambler.ru

Abstract: In article possible ways of decrease in emissions of carbon dioxide gas are considered. Features of technologies of extraction of CO₂ from flue gases. Foreign experience of use of CO₂ is analyzed. Possible ranges of application of CO₂ as working medium for different heat engines and thermodynamic cycles are defined. Thermodynamic and heatphysical properties of carbon dioxide gas are investigated.

Keywords: global warming, emissions of carbon dioxide gas, use carbon dioxide, heat engine, thermodynamic cycle.

Основным фактором влияния на глобальное потепление является эмиссия парниковых газов, в первую очередь углекислого газа (CO₂). Именно по этой причине CO₂ был выбран в качестве базисного газа при расчётах потенциала глобального потепления, который принимается равным 1. Соответственно степень влияния на глобальное потепление прочих парниковых газов сравнивается с воздействием CO₂.

Надо отметить также, что наиболее высоким потенциалом глобального потепления обладают синтетические холодильные агенты – фреоны, широко используемые в системах холодоснабжения и кондиционирования.

Для решения проблемы глобального потепления в 1997 г. был принят Киотский протокол, который обязывает развитые страны и страны с переходной экономикой сократить или стабилизировать выбросы парниковых газов.

Примерная оценка динамики выбросов парниковых газов в России (не включая

поглощение CO₂ лесами) и эффективности потенциально возможных мер по снижению выбросов в отдельных секторах экономики показана на рис. 1 [1].

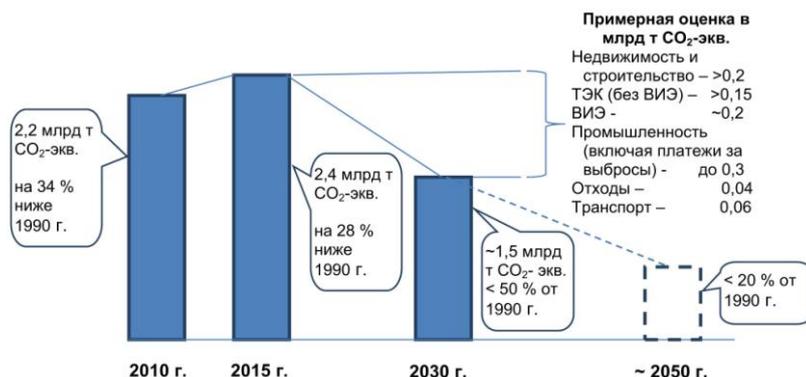


Рис. 1. Примерная оценка динамики выбросов парниковых газов в России

Показатели общего уровня выбросов парниковых газов в России с 2010 по 2015 г. возросли до 2,4 млрд. т CO₂-эквивалента; в основном это связано с вводом новых мощностей на тепловых электростанциях для удовлетворения все возрастающего объема электропотребления. К 2030 г. планируется снизить показатели выбросов парниковых газов примерно до уровня 1,5 млрд. т CO₂-эквивалента. Именно такая динамика нужна для достижения к 2050 году уровня выбросов, ведущего к решению проблемы антропогенного изменения климата.

Сегодняшний повышенный интерес к технологиям улавливания и хранения CO₂ (CO₂ capture and storage, CCS) связан со снижением выбросов CO₂, когда нет реальных возможностей радикально сократить масштабы сжигания углеводородного топлива. В отличие от других технологий, CCS не экономит топливо и не содействует решению иных задач, кроме проблемы изменения климата.

Технология включает улавливание и сепарирование CO₂, транспортировку, и собственно закачивание и хранение. В принципе ни один из компонентов не связан с разработкой каких-то новых технологических решений, но долгосрочное захоронение огромных объемов – задача не дешевая и энергоемкая. Известно, что углекислый газ образуется при самых разнообразных процессах (например, брожении, гниении, дыхании), но одним из основных источников углекислого газа являются промышленные выбросы, образующиеся при сжигании твердых, жидких и газообразных топлив. Поэтому установки для сепарации (отделения CO₂ из выбросов) делают технологию относительно рентабельной только для крупных источников. Относительно высокая стоимость транспортировки заставляет искать подземные резервуары недалеко от источника выбросов, причем обязательно глубокие, от 600 м и более. Поэтому в будущем можно ожидать применения CCS на крупных современных угольных станциях, что особенно актуально для Китая, где около 80% тепловых электростанций работают на угле, который сжигается без предварительной очистки, что является главным источником загрязнения воздуха и постоянного смога в стране [2].

Основными компонентами дымовых газов являются азот, углекислый газ и пары воды. Пары воды не представляют какой-либо ценности и удаляются из дымового газа соприкосновением с охлаждаемыми поверхностями. Извлечение углекислого газа, как правило, производится абсорбционно-десорбционным способом с использованием в качестве абсорбента водного раствора моноэтаноламина. Количество углекислого газа CO₂, которое можно получить из дымовых газов, зависит от вида сжигаемого топлива (табл. 1) [3].

Примерные показатели извлечения CO₂ из дымовых газов

| Вид сжигаемого топлива | Количество CO ₂ при сжигании 1 м ³ или 1 кг топлива |
|---|---|
| Природный газ (метан) | 1,9 |
| Каменный уголь | 2,1–2,7 |
| Пропан, дизтопливо, мазут, печное топливо | 3,0 |
| Газ, выделяющийся из сточных вод | 3,7 |

Вероятно, применение CCS начнется со смежных технологий, в частности использования CO₂ для лучшего извлечения нефти, газа или угольного метана. Здесь основной вопрос – возможные утечки CO₂ в атмосферу, особенно пока нет опыта длительной эксплуатации.

Также выдвигают идеи CCS, связанные с закачкой жидкого или газообразного CO₂ в глубокие слои океана. В принципе, в океане может быть растворено огромное количество CO₂, которое практически не будет выходить в атмосферу. Как вариант, CO₂ может по трубопроводам закачиваться в глубоководные впадины и образовывать своего рода озера. Пока данная идея находится в стадии начальной разработки и анализа воздействия на океанские экосистемы.

Но уже сейчас можно сказать, что вариант использования океана для растворения огромного количества CO₂ не позволит в будущем развивать такие технологии как волновая и градиент-температурная энергетика океанов (рис. 2), так как использование данных технологий уже сейчас способствует выделению огромного количества углекислоты, снижению давления, нагреву глубинных вод и остыванию вод поверхностных слоев. По расчетам NASA из волновой энергии океана ежегодно можно извлекать более 91000 ТВт·ч. Перепад же температур между водами на глубине в сотни метров и водами на поверхности океана – огромный источник энергии, который оценивается в 20–40 тыс. ТВт, из них можно использовать только 4 ТВт [4; 5].

Преобразование энергии температурного градиента морской воды – это процесс, который использует теплую морскую воду для нагрева и испарения жидкости с низкой температурой кипения (например, аммиак), а холодную морскую воду, поступающую из недр океана, – для конденсации отработавшего в турбине газа (рис. 2).

Поэтому наиболее экономически эффективным решением должно стать улавливание и непосредственное использование диоксид углерода в качестве рабочего тела. Во-первых, хладагент CO₂ (R744) все шире используется в холодильных установках, не имеет цвета, запаха и тяжелее воздуха. Во-вторых, применение CO₂ чрезвычайно перспективно не только из-за простоты его получения, но и потому, что использование этого газа в различных агрегатных состояниях (газ, жидкость, твердое вещество) позволяет решать различные технологические задачи. При этом обезвоженный диоксид углерода (как газообразный, так и жидкий) не подвергает коррозии металлы [6].

В настоящее время группа исследователей корейского института передовых технологий (KAIST) предложили проект микромодульного реактора. В состав группы входят профессора Jeong Ik Lee, Yonghee Kim и Yong Hoon Jeong. Они предлагают инновационный проект реактора с циклом Брайтона на углекислом газе сверхкритических параметров (S-CO₂), который представляет собой газоохлаждаемый реактор электрической мощностью 12 МВт и длительным сроком службы (20 лет) без дозаправки. В качестве топлива используется нитрид урана низкого обогащения, а теплоносителем выступает S-CO₂. Использование S-CO₂ позволяет упростить систему преобразования тепловой энергии активной зоны в электроэнергию, выдаваемую потребителю. Кроме того, в проекте имеется пассивная система отвода тепла за счёт естественной циркуляции на случай аварийных ситуаций. Данный проект предлагается использовать в таких местах, как морские буровые платформы, химическое и

сталелитейное производство, или для энергоснабжения в удалённых районах – полярные регионы, пустыни, космическое пространство, и так далее [7].

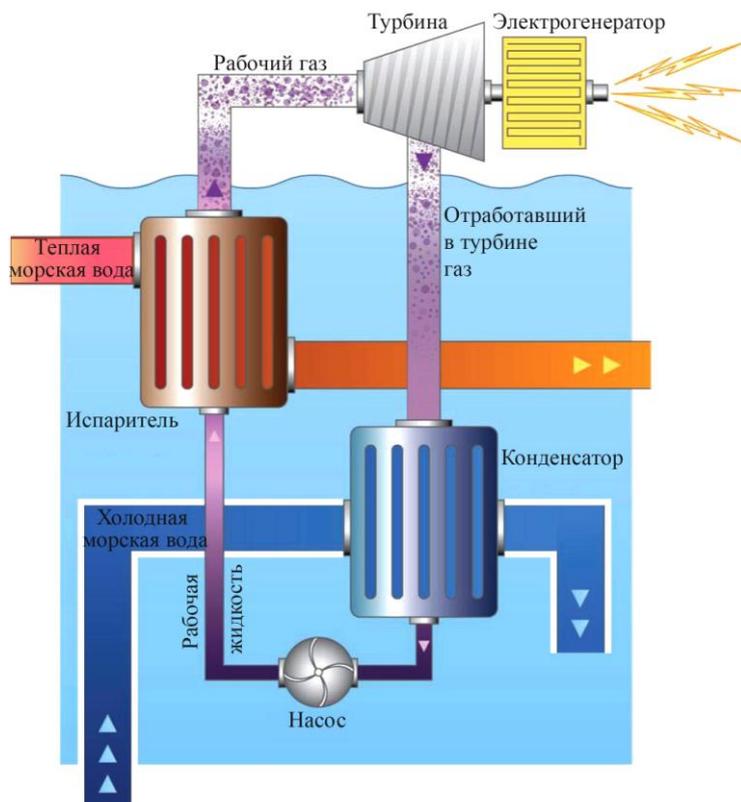


Рис. 2. Принципиальная схема градиент-температурной энергоустановки с использованием морской воды

Японские специалисты сосредоточили значительное внимание на тепловых насосах на основе CO₂, а одна японская компания, *Mayekawa*, занимается в Северной Америке продажей в промышленных масштабах тепловых насосов на основе CO₂ в течение нескольких лет. *Mayekawa* предлагает три различных CO₂ тепловых насоса, водо-водяной тепловой насос *EcoCute*, тепловой насос воздух-вода *Unimo* и водо-воздушный тепловой насос *Sirocco*. К примеру, тепловые насосы *Mayekawa EcoCute* характеризуются коэффициентом полезного действия около 4,19 (табл. 2) и оснащаются электроприводными поршневыми компрессорами мощностью в 25 кВт. С точки зрения производительности, большим отличием тепловых насосов на основе CO₂ является то, что они могут производить гораздо более высокую выходную температуру [8].

Таблица 2

Показатели эффективности теплового насоса в зависимости от температуры нагрева воды

| Показатель параметра, размерность | Хладагент CO ₂ |
|--|----------------------------|
| Теплопроизводительность / потребляемая мощность компрессора при нагреве воды с 15°C до 65°C, кВт | 102,9 / 22,5 КПД – 4,57 |
| Теплопроизводительность / потребляемая мощность компрессора при нагреве воды с 15°C до 85°C, кВт | 104,9 / 25,0 КПД – 4,19 |
| Теплопроизводительность / потребляемая мощность компрессора при нагреве воды с 15°C до 90°C, кВт | 105,0 / 26,8 КПД – 3,91 |

Исследователи Фраунгоферовского Института безопасности окружающей среды и энергетических технологий (*UMSICHT*) в Оберхаузене придумали новое применение углекислому газу – процесс насыщения пластмассы сжатым CO_2 , который позволит расширить сферу применения пластмассы. При температуре 304,13 К и давлении 7,38 МПа CO_2 вступает в сверхкритическое состояние, которое дает газу растворимые свойства. В этом состоянии, он может быть введен в полимеры или предстать в роли вещества, в котором могут быть растворены краски, добавки, медицинские составы и другие субстанции. Новый процесс имеет огромный потенциал, так как углекислый газ не огнеопасен, не токсичен и не дорог по сравнению с другими растворителями [9].

Фонд *X-Prize* уже в течение многих лет проводит соревнования, направленные на решение различных мировых проблем. Одним из последних проектов фонда стали соревнования по нахождению прорывной технологии использования углекислого газа. Представители *X-Prize* предполагают, что CO_2 можно использовать для создания прочных строительных материалов, одежды или для совершения различных открытий в медицине. Среди победителей соревнований должны оказаться те команды, которые смогут преобразовать как можно больше углекислого газа в различные продукты. Конкурс будет включать в себя два направления: первое будет сосредоточено на тестировании новой технологии с помощью угольных электростанций, а второе – на тестировании технологии с помощью природного газа [10].

Стоит отметить, что одним из направлений снижения выбросов CO_2 является развитие альтернативной энергетики на возобновляемых источниках энергии, которая имеет свои особенности. К примеру, в России развитие ветроэнергетики ограничивается непостоянством скорости ветра (от 3 до 15 м/с) в зависимости от погодных условий, дороговизной установки ветрогенераторов и их обслуживанием. Применение гелиоэлектростанций ограничивается интенсивностью солнечного излучения в зависимости от времени года, суток и метеоусловий, неэффективностью в ночное время суток. Наиболее востребованным для российских широт остается развитие геотермальной энергетики. Однако основным недостатком геотермальных электростанций (ГеоЭС) является низкий эффективный КПД станции (не превышает 20%) по сравнению с традиционными тепловыми электростанциями (40–42%).

Проводятся исследования и разработки использования сжиженного CO_2 в качестве низкокипящего рабочего тела (НРТ) в тепловом контуре органического цикла Ренкина (ОЦР). Особенно это актуально для различных вариантов утилизации сбросной низкопотенциальной теплоты (отработавшего в турбине пара или оборотной воды) тепловых электростанций для дополнительной выработки электроэнергии на собственные нужды станции [11].

Возможность применения CO_2 в качестве НРТ обусловлена его термодинамическими и теплофизическими свойствами (табл. 3).

Из табл. 3 видно, что CO_2 характеризуется высокой плотностью и теплопроводностью газообразной фазы, имеет низкую кинематическую вязкость жидкой и газообразной фазы, характеризуется низкой теплотой парообразования.

Температурный диапазон использования сжиженного газа CO_2 в качестве НРТ в тепловом контуре ОЦР ограничивается показателями критической температуры 304,13 К (31°C) и температурой в тройной точке 216,59 К (минус 56,56°C) (рис. 3). Поэтому использование сжиженного газа CO_2 в температурном диапазоне от 333,15 (60°C) до 223,15 К (минус 50°C) позволит обеспечить приемлемые давления контура циркуляции теплового двигателя и затраты на его сжатие [12].

Использование сжиженного CO_2 в качестве рабочего тела и охлаждающей жидкости при температуре от 290,15 до 304,13 К (от 17°C до 31°C) характеризуется повышенной изобарной теплоемкостью от 3 до 39 кДж/кг·К, что является соизмеримым показателем для воды H_2O при докритических параметрах (рис. 4).

Таблица 3

Основные термодинамические и теплофизические свойства CO₂ в сравнении с водой

| Показатель параметра, размерность | CO ₂ | H ₂ O | Преимущества |
|---|-----------------|------------------|------------------|
| Температура тройной точки, К | 216,59 | 273,16 | CO ₂ |
| Давление тройной точки, МПа | 0,518 | 0,00061 | CO ₂ |
| Плотность жидкой фазы, кг/м ³ | 896 | 1000 | H ₂ O |
| Плотность газообразной (паровой) фазы, кг/м ³ | 114 | 0,0068 | CO ₂ |
| Кинематическая вязкость жидкой фазы, см ² /с | 0,001 | 0,015 | CO ₂ |
| Кинематическая вязкость газообразной (паровой) фазы, см ² /с | 0,0013 | 13,36 | CO ₂ |
| Теплопроводность жидкой фазы, Вт/м·К | 0,1043 | 0,57 | H ₂ O |
| Теплопроводность газообразной (паровой) фазы, Вт/м·К | 0,0216 | 0,0173 | CO ₂ |
| Удельная теплота парообразования (фазового перехода), кДж/кг | 215 | 2489 | CO ₂ |
| Изобарная теплоемкость жидкой фазы при критических параметрах, кДж/кг·К | 39,174 | 39,039 | CO ₂ |
| Критическая температура, К | 304,13 | 647,1 | CO ₂ |
| Критическое давление, МПа | 7,3773 | 22,064 | CO ₂ |
| Критическая плотность, кг/м ³ | 467,6 | 322 | CO ₂ |
| Максимальная температура нагрева, К | 2000 | 2000 | - |

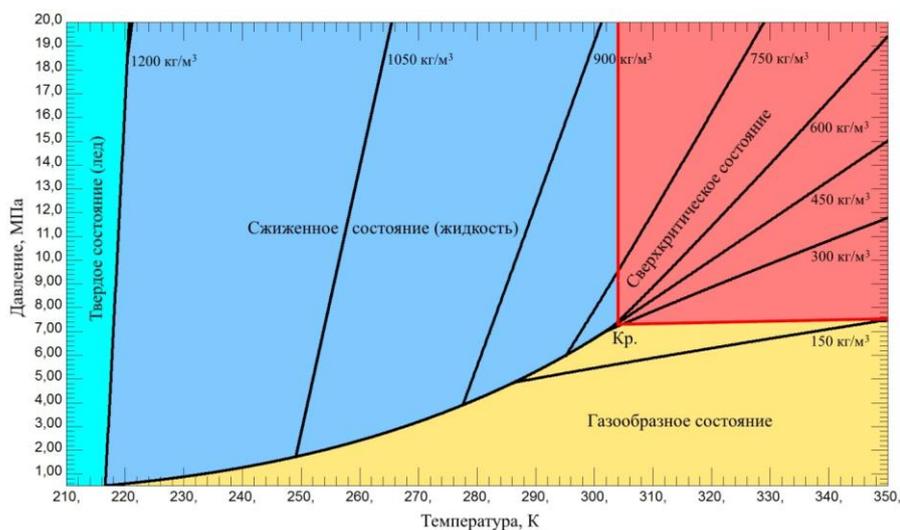


Рис. 3. Диаграмма равновесного фазового состояния CO₂ в координатах $P - T - \rho$ (давления – температуры – плотности)

На нефтехимических производствах тепловые потоки низкого потенциала с температурой меньше 90°C для жидких сред и температурой меньше 150°C для газообразных сред практически не находят применения, т.е. попросту выбрасываются в окружающую среду. Причем объем тепловых выбросов соизмерим с объемом потребления топливно-энергетических ресурсов и представляет собой термическое загрязнение окружающей среды. Примером может служить стадия газоразделения совместного производства этилена и пропилена, в котором имеется значительный резерв неиспользуемого низкопотенциального тепла оборотной воды (до 47°C и 240,2 кг/ч), отработанного пара низких параметров (до 143°C и 160,9 кг/ч), пропан-пропиленовой фракции (до 5°C и 1,5 кг/ч), метан-этиленовой фракции (до 15°C и 0,9 кг/ч). Наибольшую ценность для создания технологии утилизации с целью экономии топливно-энергетических

ресурсов имеют тепловые потоки оборотной воды и пара вследствие их высоких расходных и термодинамических характеристик [13].

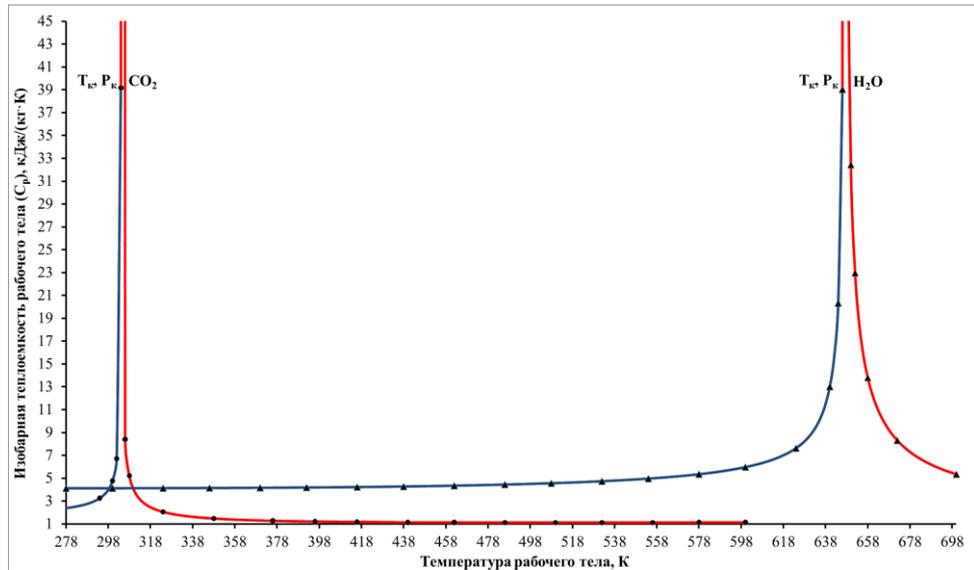


Рис. 4. Показатели изобарной теплоемкости рабочего тела при критических параметрах: —●— CO₂ ($T_k=304,13$ К; $P_k=7,3773$ МПа), —▲— H₂O ($T_k=647,1$ К; $P_k=22,064$ МПа)

Одним из возможных вариантов утилизации теплоты рассматриваемых потоков является установка теплового двигателя на CO₂, в котором происходит утилизация (отбор) теплоты низких параметров для выработки электроэнергии (рис. 5). Включение установки теплового двигателя на CO₂ в схему производства позволит производить дополнительную электроэнергию для покрытия собственных нужд производства, что, в свою очередь, приведет к значительной экономии энергоресурсов [14].

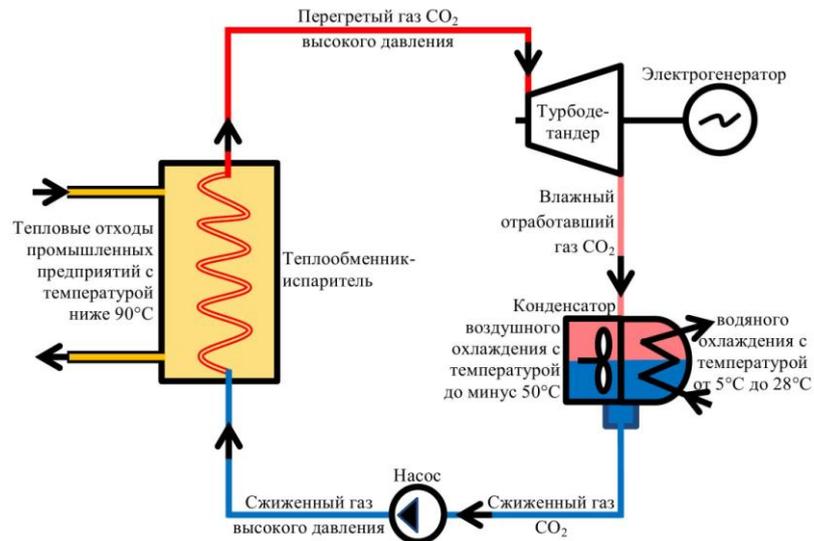


Рис. 5. Принципиальная схема теплового двигателя с замкнутым контуром циркуляции на CO₂ для утилизации тепловых отходов

Тепловой двигатель работает следующим образом (рис. 5 и 6). Сжиженный газ CO_2 сжимают в насосе (процесс $I-II$) до высокого давления, нагревают (процесс $II-III$) и испаряют (процесс $III-IV$) в теплообменнике-испарителе за счет подводимой теплоты промышленных отходов с температурой ниже 90°C . После чего, с температурой перегретого газа (процесс $IV-V$), его направляют на расширение (процесс $V-VI$) в турбодетандер теплового двигателя, который соединен с электрогенератором, затем расширенный газ с влажностью до 12% направляют на охлаждение (процесс $VI-I$) в теплообменник-конденсатор воздушного или водяного охлаждения, где в процессе охлаждения газа CO_2 ниже его температуры насыщения происходит интенсивное сжижение, после чего сжиженный газ направляют в насос и цикл повторяется.

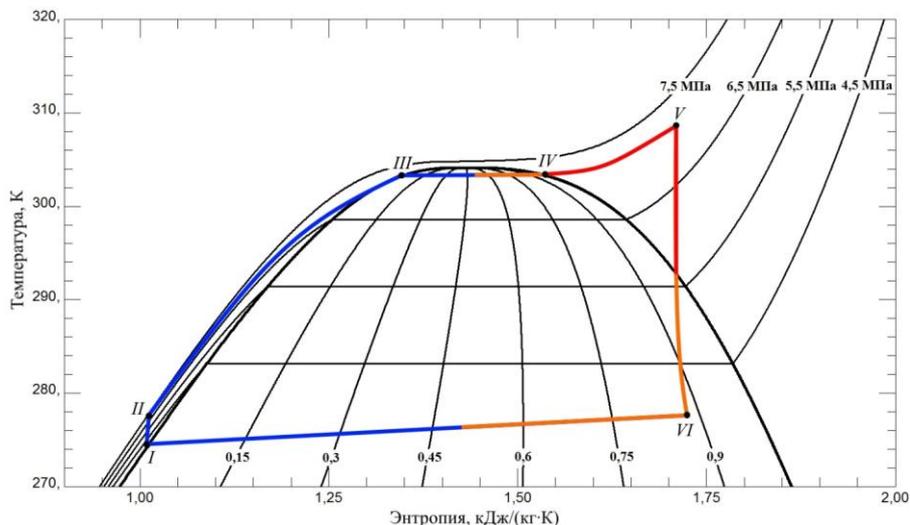


Рис. 6. Осуществление термодинамического цикла Ренкина в $T-s$ диаграмме для углекислого газа CO_2

Также нужно отметить, что кривая линия насыщения углекислого газа (рис. 7) имеет отрицательный тангенс угла наклона $ds/dT < 0$ (полого убывает с ростом энтропии), который определяется как отношение приращения энтропии рабочего тела (ds) к приращению температуры рабочего тела (dT). Это позволяет осуществлять процесс расширения в турбодетандере углекислого газа до влажного состояния в области насыщенного газа, что характерно для традиционных паровых циклов.

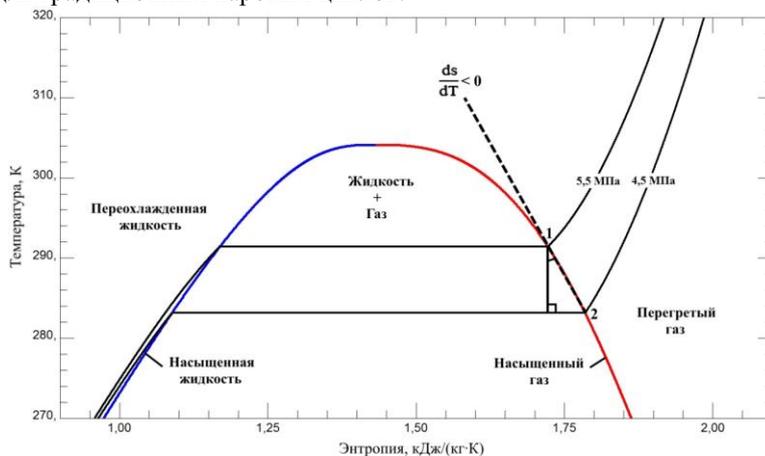


Рис. 7. $T-s$ диаграмма для углекислого газа CO_2 «влажного» рабочего тела

Предлагаемый способ утилизации тепловых отходов обеспечивает дополнительную выработку электроэнергии при минимально допустимых температурных перепадах (разницах температур) между источником сбросной теплоты и окружающей среды, равных 39°С. Причем для выработки 1 кВт полезной электрической мощности с помощью теплового двигателя на CO₂ необходимо утилизировать в среднем около 160 кВт тепловой энергии. При этом эксергетический КПД данной установки может достигать 20% (табл. 4).

Таблица 4

Эксергетические КПД различных технических систем

| Наименование | Эксергетический КПД, % |
|---|------------------------|
| Конденсационная электростанция | 39–42 |
| Парокомпрессионная холодильная установка | 30–35 |
| Абсорбционная водоаммиачная холодильная установка | 12–15 |
| Парокомпрессионный тепловой насос | 35–40 |
| Исследуемый тепловой двигатель на CO ₂ | ≤20 |

Поэтому новые решения в эффективном использовании CO₂ или преобразовании его в другие виды продуктов должны способствовать снижению эмиссии парниковых газов в окружающую среду.

Выводы

1. Помимо «захоронительных» технологий утилизации CO₂ возможны и иные способы его применения.

2. Улавливание CO₂ из дымовых газов промышленных предприятий и непосредственное его использование на самих предприятиях в качестве рабочего тела для различных тепловых машин является одним из экономически выгодных решений для снижения выбросов CO₂ в атмосферу и повышения топливной экономичности самих предприятий.

3. Уникальность термодинамических и теплофизических свойств CO₂ позволяет использовать его в различных температурных режимах и термодинамических циклах (Ренкина, Брайтона, Лоренца), что в будущем должно обеспечить большие объемы использования CO₂ в контурах циркуляции различных технологических решений.

Литература

1. Кокорин А.О. Меры по снижению в России выбросов парниковых газов и приоритеты работы российских неправительственных организаций. Москва, WWF России, 2012. 34 с.
2. Экологическая эффективность технологии газификации угля на примере Красноярской агломерации. Режим доступа: <http://modernproblems.org.ru/ecology/24-hlebopros8.html>.
3. Технология извлечения углекислого газа при утилизации дымовых газов. Режим доступа: <http://www.neroaera.com/?p=89>.
4. Энергия океана: волновая электростанция Oceanlinx. Режим доступа: <http://aenergy.ru/1981>.
5. Экологические проблемы энергетического обеспечения человечества. Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/ecol/ecol05.htm>.
6. Гафуров А.М. Утилизация сбросной низкопотенциальной теплоты ТЭС в зимний период времени для дополнительной выработки электроэнергии // Энергетика Татарстана. 2014. № 2 (34). С. 21–25.
7. Supercritical CO₂-cooled micro modular reactor. Режим доступа: <https://www.sciencedaily.com/releases/2016/03/160309210043.htm>.
8. Alex Wilson. A Heat Pump Using Carbon Dioxide as the Refrigerant, Building Green, 2013. Режим доступа: http://www.polel.ru/all_news/jarn/heat-pump-co2/.
9. Impregnating plastics with carbon dioxide. Fraunhofer Press. Research News 01-2011. Topic 2. Режим доступа: <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2011/january/impregnating-plastics.html>.

10. Фонд X-Prize найдет новое применение углекислому газу. Режим доступа: <https://naked-science.ru/article/hi-tech/fond-x-prize-naydet-novoe>.

11. Гафуров А.М. Способ преобразования сбросной низкопотенциальной теплоты ТЭС в работу низкотемпературного теплового двигателя с замкнутым контуром // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2016. № 3 (31). С. 73–78.

12. Гафуров А.М., Гагина Р.З., Гафуров Н.М. Температурный диапазон использования сжиженного газа CO₂ в качестве низкокипящего рабочего тела // Теория и практика современной науки. 2016. № 9 (15). С. 88–91.

13. Утилизация вторичных энергоресурсов в нефтехимической промышленности. Режим доступа: http://www.ateffekt.ru/publ/teploobmenniki/utilizacija_vtorichnykh_energoresurov_v_neftekhimicheskoy_promyshlennosti/6-1-0-95.

14. Гафуров А.М., Осипов Б.М., Гафуров Н.М., Гагина Р.З. Способ утилизации тепловых вторичных энергоресурсов промышленных предприятий для выработки электроэнергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 11–12. С. 37–43.

Авторы публикации

Гафуров Айрат Маратович – инженер I категории отдела «Управление научно-исследовательской работы» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: progress150987@rambler.ru.

Осипов Борис Михайлович – канд. техн. наук, профессор кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: obm0099@yandex.ru.

Гагина Резеда Зуфаровна – студентка 4 курса, кафедры «Химия и технология высокомолекулярных соединений» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ).

Гафуров Наиль Маратович – студент 4 курса, кафедры «Химия и технология высокомолекулярных соединений» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). E-mail: hankmpo@mail.ru.

References

1. Kokorin A.O. Measures for decrease in Russia emissions of greenhouse gases and priorities of work of the Russian non-governmental organizations. Moscow, WWF of Russia, 2012. 34 p.

2. Ecological efficiency of technology of gasification of coal on the example of Krasnoyarsk agglomeration. Access mode: <http://modernproblems.org.ru/ecology/24-hlebopros8.html>.

3. Technology of extraction of carbon dioxide at utilization of combustion gases. Access mode: <http://www.neroaera.com/?p=89>.

4. Energy of the ocean: wave power plant Oceanlinx. Access mode: <http://aenergy.ru/1981>.

5. Environmental problems of power providing mankind. Access mode: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/ecol/ecol05.htm>.

6. Gafurov A.M. Utilization of waste low-potential warmth of thermal power plant during the winter period of time for additional power generation // Power industry of Tatarstan. 2014. No. 2 (34). Pp. 21–25.

7. Supercritical CO₂-cooled micro modular reactor. Access mode: <https://www.sciencedaily.com/releases/2016/03/160309210043.htm>.

8. Alex Wilson. A Heat Pump Using Carbon Dioxide as the Refrigerant // Building Green, 2013. Access mode: http://www.polel.ru/all_news/jarn/heat-pump-co2/.

9. Impregnating plastics with carbon dioxide. Fraunhofer Press. - Research News 01-2011-Topic 2. Access mode: <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2011/january/impregnating-plastics.html>.

10. The fund X-Prize will find new application to carbon dioxide. Access mode: <https://naked-science.ru/article/hi-tech/fond-x-prize-naydet-novoe>.

11. Gafurov A.M. A way of transformation of waste low-potential warmth of thermal power plant to operation of the low-temperature heat engine with the closed contour // Bulletin of the Kazan state power university. 2016. No. 3 (31). Pp 73-78.

12. Gafurov A.M., Gatina R.Z., Gafurov N.M. Temperature range of use of the liquefied CO₂ gas as the low-boiling working body // Theory and practice of modern science. 2016. No. 9 (15). Pp. 88-91.

13. Utilization of secondary energy resources in the petrochemical industry. Access mode: http://www.ateffekt.ru/publ/teploobmenniki/utilizacija_vtorichnykh_energoresursov_v_neftekhimicheskoy_promyshlennosti/6-1-0-95.

14. Gafurov A.M., Osipov B.M., Gafurov N.M., Gatina R.Z. A way of utilization of thermal secondary energy resources of the industrial enterprises for power generation // News of higher educational institutions. Power problems. 2016. No. 11-12. Pp. 37-43.

Authors of the publication

Airat M. Gafurov – engineer of the I category of department “Management of research work” Kazan state power engineering university (KSPEU). Email: progress150987@rambler.ru.

Boris M. Osipov – cand. tech. sci., professor department “Power engineering” Kazan state power engineering university (KSPEU). Email: obm0099@yandex.ru.

Reseda Z. Gatina – 4th year student, department “Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds” Kazan National Research Technological University (KNRTU).

Nail M. Gafurov – 4th year student, department “Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds” Kazan National Research Technological University (KNRTU). Email: hankmpro@mail.ru.

Поступила в редакцию

28 мая 2017 г.