

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>

УДК 658.261:621.56

Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты

А. В. Овсянник¹⁾

¹⁾Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Представлена схема когенерационной и тригенерационной установки на диоксиде углерода с использованием вторичных энергоресурсов в виде продуктов сгорания или дымовых газов, позволяющая одновременно производить электроэнергию, тепловую энергию и холод для централизованного и децентрализованного снабжения потребителей. Кроме того, на установке возможно производство жидкой и газообразной углекислоты. Основными элементами установки являются теплофикационный блок, турбодетандерный агрегат и углекислотный блок для производства холода, жидкой и газообразной углекислоты. Проведены термодинамический расчет и краткий эксергетический анализ установки. В предлагаемой установке в качестве вторичных энергоресурсов могут использоваться отходящие газы от стеклоплавильных, металлургических печей, теплоэнергетических установок и других энергетических объектов с температурой вторичных энергоресурсов 250–400 °С и выше. Теплофикационный блок установки предназначен для получения тепловой энергии для систем отопления и горячего водоснабжения, углекислотный блок – для получения холода, электрической энергии и диоксида углерода в жидком и газообразном виде для обеспечения работы установки и использования в коммерческих целях. Холод в установке может быть получен в двух испарителях, работающих при различных температурах кипения. При более высокой температуре кипения диоксида углерода холод используется в системах кондиционирования воздуха и централизованных системах охлаждения и хранения продукции, а при более низкой температуре кипения диоксида углерода – в системах замораживания и хранения. Для осуществления обратного углекислотного цикла применяется трехступенчатый углекислотный компрессор с ресивером после третьей ступени. Для снижения работы сжатия компрессора должно быть предусмотрено полное промежуточное охлаждение диоксида углерода между ступенями.

Ключевые слова: когенерационная и тригенерационная установки, турбодетандер, продукты сгорания, электроэнергия, тепловая энергия, холод, диоксид углерода

Для цитирования: Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. В. Овсянник. *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 1. С. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>

Адрес для переписки

Овсянник Анатолий Васильевич
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,
просп. Октября, 48,
246746, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 40-20-36
ovsyannik@tut.by

Address for correspondence

Ovsyannik Anatolii V.
Sukhoi State Technical
University of Gomel
48 October Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 40-20-36
ovsyannik@tut.by

Carbon Dioxide Turbine Expander Plant Producing Liquid and Gaseous Carbon Dioxide

A. V. Ovsyannik¹⁾

¹⁾Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The scheme of carbon dioxide cogeneration and trigeneration plant with the use of secondary energy resources in the form of combustion products or flue gases that enables to produce electricity, thermal energy and cold for centralized and decentralized supply of consumers simultaneously, is presented. In addition, the plant can produce liquid and gaseous carbon dioxide. The main elements of the plant are a heating unit, a turbodetander unit and a carbon dioxide unit for the production of cold, liquid and gaseous carbon dioxide. A thermodynamic calculation and a brief exergy analysis of the plant were carried out. In the proposed plant, off-gases from glass-melting, metallurgical furnaces, heat power facility and other energy facilities with a secondary energy temperature of 250–400 °C and above can be used as secondary energy resources. The heating unit of the installation has been designed to produce thermal energy for heating and hot water supply systems. The carbon dioxide unit has been designed for the production of cold, electric energy and carbon dioxide in liquid and gaseous form in order to ensure the operation of the plant and the use for commercial purposes. The cold in the plant can be obtained in two evaporators operating at different boiling temperatures. At a higher boiling point of carbon dioxide, cold is used in air conditioning systems and in centralized cooling and storage systems, while at a lower boiling point of carbon dioxide – in freezing and storage systems. For the implementation of the reverse carbon dioxide cycle, a three-stage carbon dioxide compressor with a receiver after the third stage is used. To reduce compression performance of the compressor, complete intermediate cooling of carbon dioxide between stages should be provided.

Keywords: cogeneration and trigeneration plants, turboexpander, combustion products, electric power, thermal energy, cold, carbon dioxide

For citation: Ovsyannik A. V. (2019) Carbon Dioxide Turbine Expander Plant Producing Liquid and Gaseous Carbon Dioxide / A. V. Ovsyannik // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (1), 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87> (in Russian)

Введение

В настоящее время все больше внимания уделяется поиску как можно более эффективных и безопасных рабочих тел для энергетических установок прямого и обратного циклов. Одни из таких рабочих тел – природные хладагенты и, в частности, диоксид углерода [1, 2].

Точка зрения о вреде фреонов и пользе натуральных хладагентов ныне является доминирующей как в Евросоюзе, так и в мире. Соответствующие законы в Евросоюзе уже приняты и исполняются; все крупные европейские компании давно вписали холодильные системы на CO₂ в свои технические задания и проектные решения, а сейчас, спустя несколько лет после первых успешных внедрений таких установок, в крупных компаниях идет тиражирование ранее отработанных решений.

На практике это означает, что, приходя на рынки различных стран, компании приносят с собой обкатанные в Европе технические решения, среди которых находится CO₂ [3]. И хотя при использовании диоксида углерода возникает ряд технических проблем, существуют адекватные пути их решения. Еще 100 лет назад умели управляться со «стояночным давлением» и не боялись «критической точки». Не стоит бояться этого и сейчас. Можно определенно надеяться, что системы на CO₂ по мере роста их числа

и вывода из оборота фреоновых компонентов станут дешевле фреоновых аналогов и, что не менее важно, экологически более привлекательными и безопасными [3].

Приняв экологически грамотное решение, владельцы холодильных и энергетических систем в обозримом будущем могут избежать законодательного и надзорного давления, а также связанной с этим необходимости менять оборудование, т. е. через несколько лет решение окажется экономически грамотным [3].

Основные преимущества применения CO_2 в холодильной технике в сравнении с ГФУ-хладагентами – их эффективность, безопасность, экологичность и низкая стоимость, а также соответствие самым последним тенденциям в законодательстве [2].

Говоря о преимуществах CO_2 , важно отметить, что этот хладагент обладает рядом особенностей. В отличие от традиционных хладагентов CO_2 , помимо более высокой области рабочих давлений, имеет высокую тройную и низкую критическую точки. Тройную точку CO_2 (минус 56,6 °С; 5,2 бар), на практике связанную с выпадением «сухого льда», следует учитывать при установке и обслуживании системы. Учет критической точки CO_2 (плюс 31,1 °С; 73,6 бар) важен как при обслуживании, так и при проектировании систем на диоксиде углерода.

В зависимости от назначения и типа систем проектные давления CO_2 могут изменяться в диапазоне от 40 до 140 бар. При этом в промышленном холоде используются субкритические системы, а в коммерческом популярны как субкритические, так и транскритические установки [3].

Диоксид углерода может быть также использован как самостоятельный хладагент. Компрессорно-конденсаторные агрегаты в этом случае работают с большей эффективностью, чем агрегаты на фреонах в холодном и умеренном климате. Все три варианта, т. е. системы непосредственного охлаждения на углеводородах, системы с промежуточным холодоносителем и пароконденсационные системы на CO_2 , технически осуществимы, что подтверждается успешной их реализацией в промышленности [2, 3].

При применении CO_2 как хладагента для небольших систем непосредственного охлаждения годовое энергопотребление в умеренном климате обычно меньше, чем при использовании фреонов (ГФУ) [3]. Энергоэффективность стандартной системы на CO_2 выше, чем системы на ГФУ при наружной температуре ниже 22 °С, почти эквивалентна ей при температуре от 22 до 26 °С и ниже при более высокой температуре. Техническая осуществимость таких систем проверена более чем на 4000 работающих системах в Европе, еще на 1000 – в Азии и Австралии и более чем на 100 – в Северной Америке (на 2014 г.). Эффективность систем на CO_2 может быть повышена внедрением таких новых разработок, как эжекторные системы и расширительные машины (детандерные), причем настолько, что данные системы будут более эффективными даже в жарком климате [3].

Преимущества CO_2 перед ГФУ-хладагентами, такие как эффективность, безопасность, экологичность, низкая стоимость и соответствие самым последним тенденциям, в законодательстве рассмотрены в [2].

На основании рассмотренных энергетических, технических и экологических предпосылок использования CO_2 в энергетических установках для

получения тепловой энергии и холода предлагается использование диоксида углерода для получения электрической и тепловой энергии и холода в детандерном цикле. Отличительной особенностью такой установки является то, что используется только один хладагент – CO_2 .

Схема и принцип работы установки

Схема когенерационной установки на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты представлена на рис. 1 [4–6], где 1 – источник продуктов сгорания; 2 – абсорбер; 3 – десорбер; 4 – брызгоотделитель; 5 – осушитель; 6 – инжектор; 7 – ресивер; 8 – компрессор; 9, 13 – конденсатор; 10 – перегреватель; 11 – испаритель; 12 – паровая турбина (турбодетандер); 14 – электрогенератор; 15, 16, 17, 18 – насос; 19 – сборник; 20, 21 – дроссельное устройство; 22 – сепаратор 1; 23 – сепаратор 2; 24, 25, 26 – теплообменник.

Принцип работы предлагаемой установки основан на использовании теплоты отходящих продуктов сгорания (металлургических, стеклоплавильных печей, котлоагрегатов и т. д.) [7, 8] с целью повышения энергетической эффективности теплоэнергоустановок и снижения их тепловых потерь. Кроме того, решается экологическая проблема улавливания диоксида углерода и предотвращения выброса его в окружающую среду. Предлагаемая установка может работать на вторичных энергоресурсах, которые в настоящее время используются в крайне ограниченных объемах [7].

Установка подключается через теплофикационный узел, состоящий из двух теплообменников 24 и 25, к источнику продуктов сгорания или дымовых газов. В теплообменниках теплофикационного узла происходит их охлаждение до требуемой температуры, после чего продукты сгорания поступают последовательно в абсорбер с поглощением газообразной углекислоты из продуктов сгорания и десорбер, где осуществляется выделение из абсорбента CO_2 . Затем углекислый газ поступает через брызгоотделитель и осушитель в инжектор, где инжектируется в линейный ресивер, при этом его давление повышается до давления всасывания в компрессоре первой ступени. После трехступенчатого компрессора газообразный CO_2 направляется в конденсатор 9, охлаждается и поступает на первое дросселирование в дроссельное устройство 20, после которого температура и давление CO_2 снижаются, и далее – в сепаратор 22. Отделившаяся в сепараторе жидкая фаза CO_2 поступает на второе дросселирование в дроссельное устройство 21, где опять происходит снижение температуры и давления. Жидкий диоксид углерода из сепаратора 23 подается в конденсатор 13 турбогенераторной установки, кипит, поглощая теплоту конденсации газообразного CO_2 после его расширения в турбодетандере. Образовавшийся в результате кипения CO_2 газ направляется в инжектор, инжектирует газообразный CO_2 после десорбера и накапливается в линейном ресивере. Часть жидкой углекислоты после сепаратора 23 подается на конденсатор 9 для конденсации сжатого газообразного CO_2 после компрессора. Теплообменники 24 и 25 теплофикационного узла предназначены для подогрева сетевой воды для целей отопления и горячего водоснабжения.

Из ресивера-накопителя 19 жидкий CO_2 подается насосом 15 последовательно в испаритель и перегреватель, где испаряется и перегревается до необходимой температуры, после чего поступает на турбодетандер, расширяется, конденсируется в конденсаторе 13 и насосом 15 опять подается в ресивер-накопитель 19. Турбодетандерный контур (турбодетандер – испаритель – перегреватель – конденсатор 13 – насос 15 – ресивер-накопитель 19) может работать как на цикле с докритическими, так и на цикле с закритическими (транскритическими) параметрами. На схеме не показано охлаждение газообразного CO_2 после сжатия в первой и во второй ступенях компрессора.

Теоретические циклы турбодетандерного и углекислотного контуров в диаграмме $\lg p - h$ с полным промежуточным охлаждением представлены на рис. 2.

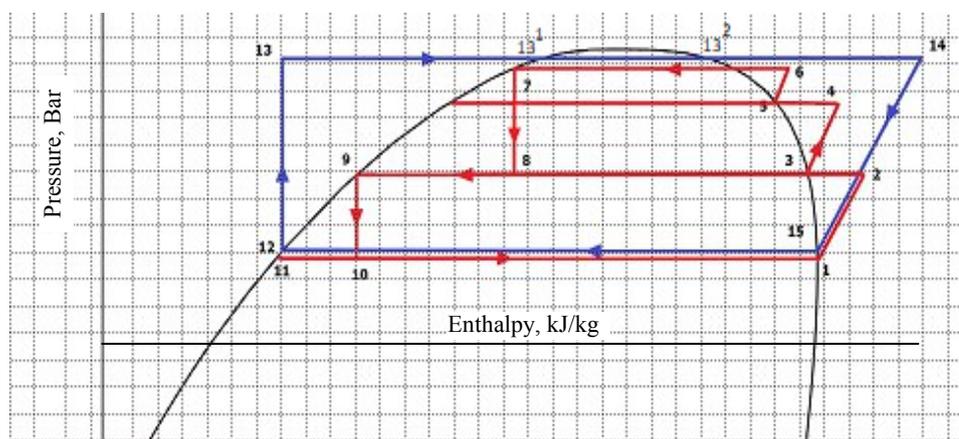


Рис. 2. Цикл турбодетандерной когенерационной установки на диоксиде углерода

Fig. 2. The cycle of turbo-expander carbon dioxide cogeneration plant

Циклы на рис. 2 состоят из следующих процессов: 12–13 – повышение давления жидкого CO_2 в насосе 15 (рис. 1); 13–13¹ – нагрев жидкого CO_2 до температуры кипения в испарителе; 13¹–13² – изобарно-изотермический процесс кипения CO_2 в испарителе; 13–14 – перегрев газообразного CO_2 в перегревателе; 14–15 – адиабатное расширение газообразного CO_2 в турбодетандере; 15–12 – изобарно-изотермический процесс конденсации диоксида углерода в конденсаторе 13. Процессы для холодильного цикла (рис. 2): 1–2 – адиабатное сжатие газообразного CO_2 в компрессоре первой ступени; 2–3 – охлаждение CO_2 перед компрессором второй ступени; 3–4 – адиабатное сжатие CO_2 в компрессоре второй ступени; 4–5 – промежуточное охлаждение CO_2 перед компрессором третьей ступени; 5–6 – адиабатное сжатие CO_2 в компрессоре третьей ступени; 6–7 – охлаждение и конденсация газообразного CO_2 в конденсаторе 9; 7–8 – первое адиабатное дросселирование жидкого диоксида углерода в дроссельном устрой-

стве 20 в сепаратор 22; 9–10 – второе адиабатное дросселирование CO_2 в дроссельном устройстве 21 в сепаратор 23; 11–1 – кипение жидкого CO_2 в конденсаторе-испарителе 13.

Термодинамический расчет и анализ цикла турбодетандерной установки

При расчете и анализе цикла турбодетандерной установки необходимо рассмотреть прямой цикл генерации тепловой и электрической энергии в теплофикационном и турбодетандерном контурах, а также обратный трехступенчатый цикл производства жидкой и газообразной углекислоты. Представленная на рис. 3 установка может работать как в режиме когенерации энергии, так и в режиме тригенерации.

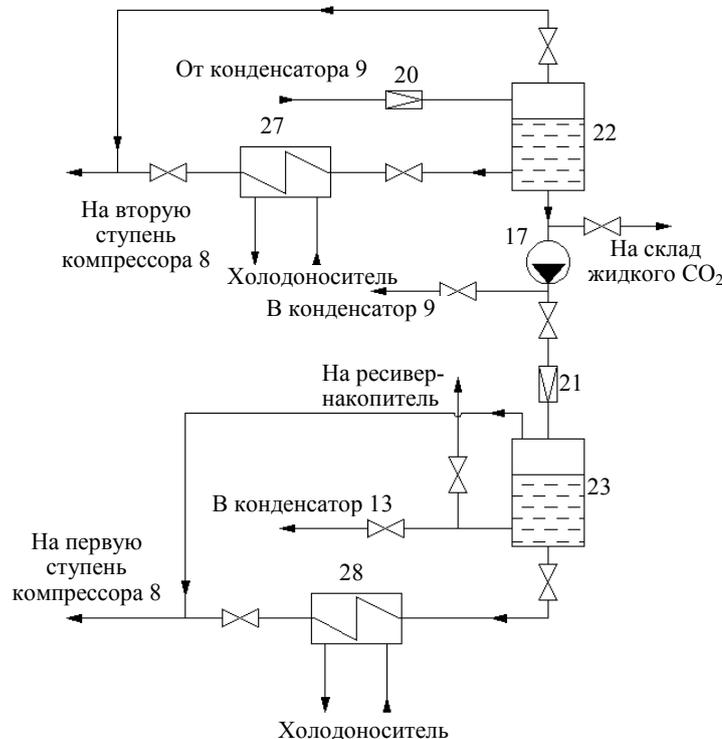


Рис. 3. Схема тригенерации энергии турбодетандерной установки на диоксиде углерода:

8, 9, 13, 17, 22, 23 – см. рис. 1; 20, 21 – дроссельное устройство;

27, 28 – испаритель второй и первой ступеней углекислотной установки

Fig. 3. The scheme of energy trigeneration of a carbon dioxide turbodetander unit:

8, 9, 13, 17, 22, 23 – see fig. 1; 20, 21 – choke device;

27, 28 – evaporator of the second and first stages of the carbon dioxide plant

Тригенерационная установка дополнительно включает в себя испарители 27 и 28 [9]. Испаритель 28 работает при температуре кипения T_{01} , соответствующей давлению насыщения p_{01} , а испаритель 27 – при температуре

кипения T_{02} , соответствующей давлению p_{02} . Газообразный CO_2 из сепаратора 22 и испарителя 27 и из сепаратора 23 и испарителя 28 поступает соответственно на вторую и первую ступени компрессора [9].

Рассмотрим термодинамический расчет когенерационной установки, представленный на рис. 1.

Удельная работа сжатия газообразного CO_2 в трехступенчатом компрессоре

$$l_s^k = (h_2 - h_1) + (h_4 - h_3) + (h_6 - h_5). \quad (1)$$

Удельная работа расширения газообразного CO_2 в турбодетандере

$$l_s^d = h_{14} - h_{15}. \quad (2)$$

Теоретическая (адиабатная) мощность сжатия CO_2 в компрессоре

$$N_t^k = G_d^k l_s^k. \quad (3)$$

Индикаторная мощность, потребляемая компрессором:

$$N_i^k = N_t^k / \eta_i = G_d^k l_s^k / \eta_i, \quad (4)$$

где η_i – индикаторный КПД компрессора.

Эффективная мощность (на валу) компрессора

$$N_b^k = N_i^k / \eta_m = G_d^k l_s^k / \eta_i \eta_m, \quad (5)$$

где η_m – механический КПД компрессора, учитывающий трение.

Электрическая мощность, потребляемая из сети компрессором:

$$N_3^k = N_b^k / \eta_n \eta_{дв} = G_d^k l_s^k / \eta_i \eta_m \eta_n \eta_{дв}, \quad (6)$$

где η_n – КПД передачи; $\eta_{дв}$ – то же электродвигателя компрессора.

Электрическая мощность, полученная в генераторе турбодетандера:

$$N_3^d = N_t^d / \eta_i \eta_m \eta_n \eta_r = G_d^d l_s^d / \eta_i \eta_m^d \eta_n \eta_r, \quad (7)$$

где G_d^d – действительный расход CO_2 через турбодетандер; η_r – КПД генератора; η_m^d – то же механический турбодетандера.

Предлагаемая установка предназначена в основном для производства электроэнергии на собственные нужды. Она должна оцениваться по тому, насколько покрывается потребность производства выработанной электроэнергией. Излишки выработанной электроэнергии могут выдаваться во внешнюю сеть, а ее недостаток – покрываться из внешней сети.

Турбодетандерная установка может работать и в режиме тригенерации энергии, если включить в схему испарители на первой и второй ступенях компрессора. Таким образом, холод может быть получен в двух испарителях: на более низком температурном уровне при температуре кипения T_{01} в испарителе 28 (рис. 3) и на высоком температурном уровне при температуре кипения T_{02} в испарителе 27. Удельная массовая холодопроизводительность испарителей 28 и 27 соответственно:

$$q_{01} = h_9 - h_3; \quad (8)$$

$$q_{02} = h_{11} - h_1. \quad (9)$$

Эксергетический КПД установки определяется по известному выражению [10]

$$\eta_e = \frac{\sum E_{\text{ВЫХ}}}{\sum E_{\text{ВХ}}}, \quad (10)$$

где $\sum E_{\text{ВХ}}$ – сумма эксергий всех потоков на входе в установку; $\sum E_{\text{ВЫХ}}$ – то же всех полезно используемых потоков на выходе из установки [1, 10].

Под полезно используемыми потоками эксергии понимаются электрическая и тепловая энергия в когенерационной установке (рис. 1) и электрическая и тепловая энергия и холод в тригенерационной установке (рис. 1, 3).

Для когенерационной установки (рис. 1) входящими являются потоки вторичных энергоресурсов в теплообменник 25 и испаритель 11.

Входящими потоками эксергии для тригенерационной установки (рис. 3), помимо вышеперечисленных, будут еще потоки холодоносителей в испарители 27 и 28.

Выходящие потоки эксергии для когенерационной установки:

- тепловая энергия из контура теплоснабжения;
- электрическая энергия, полученная в турбодетандере.

Выходящие потоки эксергии для тригенерационной установки:

- тепловая энергия из контура теплоснабжения;
- электрическая энергия, полученная в турбодетандере;
- холодильные мощности, выходящие из испарителей 27 и 28 [9].

Таким образом, эксергетические КПД [1, 10] для:

- когенерационной установки

$$\eta_e = \frac{\sum E_{\text{ВЫХ}}}{\sum E_{\text{ВХ}}} = \frac{E_{\text{теп}} + E_{\text{эл}}}{E_{\text{вт.тт}} + E_{\text{вт.тэ}}}, \quad (11)$$

– тригенерационной установки

$$\eta_e = \frac{\sum E_{\text{ВЫХ}}}{\sum E_{\text{ВХ}}} = \frac{E_{\text{ТЕП}} + E_{\text{ЭЛ}} + E_{\text{ХОЛ}}}{E_{\text{ВТ.ТТ}} + E_{\text{ВТ.ТЭ}} + E_{\text{ХЛ}}}. \quad (12)$$

ВЫВОДЫ

1. Разработана схема когенерационной и тригенерационной установки на диоксиде углерода с использованием вторичных энергоресурсов в виде продуктов сгорания или дымовых газов. Представлен цикл работы тригенерационной установки на докритических параметрах с производством жидкой и газообразной углекислоты. Холод, произведенный на тригенерационной установке, может быть использован в летний период при холодоснабжении систем вентиляции и кондиционирования воздуха промышленных и общественных зданий и сооружений.

2. Приведены методика термодинамического расчета цикла и его эксергетический анализ. Эксергетический КПД тригенерационной установки для производства тепловой, электрической энергии и холода превосходит аналогичный показатель традиционной когенерационной установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клименко, А. В. Возможность применения холода и дополнительной электроэнергии на тепловой электростанции / А. В. Клименко, В. С. Агабабов, П. Н. Борисова // Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 30–37. <https://doi.org/10.1134/s0040601517060015>.
2. Преимущества CO₂ в холодильной технике (по материалам JARN) // Холодильная техника. 2016. № 3. С. 25.
3. Современные альтернативные хладагенты на длительную перспективу и их возможные области применения (по материалам JARN) // Холодильная техника. 2016. № 6. С. 4–9.
4. Агабабов, В. С. О применении детандер-генераторных агрегатов в газовой промышленности / В. С. Агабабов // Энергосбережение и энергосберегающие технологии в энергетике газовой промышленности: материалы науч.-техн. совета ОАО «Газпром», Москва, нояб. 2000 г. М.: ИРЦ «Газпром», 2001. Т. 2. С. 50–53.
5. Агабабов, В. С. Бестопливные установки для производства электроэнергии, теплоты и холода на базе детандер-генераторных агрегатов / В. С. Агабабов // Новости теплоснабжения. 2009. № 1. С. 48–50.
6. Бестопливная установка для централизованного комбинированного электро- и хладоснабжения: полезная модель RU № 158931 / В. С. Агабабов, Ю. О. Байдакова, А. В. Клименко, У. И. Смирнова, Р. Н. Такташев. 20.01.2016.
7. Беспалов, В. В. Исследование и оптимизация глубины утилизации тепла дымовых газов в поверхностных теплообменниках / В. В. Беспалов, В. И. Беспалова, Д. В. Мельников // Теплоэнергетика. 2017. № 9. С. 64–70. <https://doi.org/10.1134/s0040601517090026>.
8. Беспалов, В. В. Технология осушения дымовых газов ТЭС с использованием теплоты конденсации водяных паров / В. В. Беспалов // Известия ТПУ. 2010. Т. 316, № 4. С. 56–59.

9. Овсянник, А. В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей / А. В. Овсянник. Гомель: ГГТУ имени П. О. Сухого, 2012. 284 с.
10. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973, 295 с.

Поступила 31.05.2018 Подписана в печать 25.09.2018 Опубликована онлайн 30.01.2019

REFERENCES

1. Klimenko A. V., Agababov V. S., Borisova P. N. (2017) On the Possibility of Generation of Cold and Additional Electric Energy at Thermal Power Stations. *Thermal Engineering*, 64 (6), 422–428. <https://doi.org/10.1134/s0040601517060015>.
2. Advantages of CO₂ Use in Refrigeration Technology (Based on JARN Materials). *Kholodilnaya Tekhnika*, 2016, (3), 25 (in Russian).
3. Modern Alternative Refrigerants for a Long-Term Perspective and their Possible Applications (Based on JARN Materials). *Kholodilnaya Tekhnika*, 2016, (6), 4–9 (in Russian).
4. Agababov V. S. (2001) On the Use of Expander-Generator Aggregates in the Gas Industry. *Energoberezhenie i Energoberegayushchie Tekhnologii v Energetike Gazovoi Promyshlennosti: Materialy Nauch.-Tekhn. Soveta OAO "Gazprom". T. 2* [Energy Conservation and Energy-Saving Technologies in the Power Engineering of the Gas Industry: Materials of the Scientific and Technical Council of JSC "Gazprom". Vol. 2]. Moscow, Publishing and Editorial Center "Gazprom", 50–53 (in Russian).
5. Agababov V. S. (2009) Nonfuel Plants for the Production of Electricity, Heat and Cold on the Basis of Expander-Generator Devices. *Novosti Teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], (1), 48–50 (in Russian).
6. Agababov V. S., Baidakova Yu. O., Klimenko A. V., Smirnova U. I., Taktashev R. N. (2016) *Nonfuel Plant for the Centralized Combined Electric and Cold Supply*. Patent No 158931 of the Russian Federation (in Russian).
7. Bespalov V. V., Bespalova V. I., Melnikov D. V. (2017) Investigation and Optimization of the Depth of Utilization of Flue Gas Heat Recovery in Surface Heat Exchangers. *Thermal Engineering*, (9), 680–685. <https://doi.org/10.1134/s0040601517090026>.
8. Bespalov V. V. (2010) Technology of Dehumidification of Thermal Power Plant Flue Gases with the Use of the Heat of Condensation of Water Vapor. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 316 (4), 56–59 (in Russian).
9. Ovsyannik A. V. (2012) *Modeling of Heat Transfer Processes when Liquids Are Being Boiled*. Gomel, Sukhoi State Technical University of Gomel. 284 (in Russian).
10. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energia Publ. 295 (in Russian).

Received: 31 May 2018

Accepted: 25 September 2018

Published online: 30 January 2019