



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ CO₂-ЦИКЛОВ ПРИ КИСЛОРОДНОМ СЖИГАНИИ МЕТАНОЛА

Щинников П.А., Садкин И.С., Боруш О.В., Романенко Р.В.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

shchinnikov@corp.nstu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ работы заключается в определении массо-расходных характеристик рабочих веществ и энергетических показателей установки на основе CO₂-цикла с двухступенчатым повышением давления (цикла Аллама) при кислородном сжигании метанола. МЕТОДЫ. Представлена методика, в которой массо-расходные характеристики рабочих веществ определяют на основе реакций горения и синтеза метанола и электролиза воды. Эти реакции являются основными для обеспечения рабочих процессов в установке. В основе метода лежат мольные соотношения веществ, участвующих в реакциях при стехиометрических условиях. С использованием термодинамических параметров цикла и при заданной мощности установки определяют расходы рабочего тела, долю обновления углекислоты, количество метанола, получаемого в установке синтеза, количество свежего метанола, подводимого к циклу, количество водорода, получаемого в установке электролиза воды и количество кислорода, необходимого для процессов горения топлива. Одновременно определяют количество коммерческого водорода, то есть выводимого на склад. Затраты электроэнергии на определение мощности собственных нужд определяют по нормативными методам и данным заводов изготовителей оборудования. РЕЗУЛЬТАТЫ. Показано, что при близких значениях термических КПД CO₂-циклов на основе кислородного сжигания метана и метанола у последнего количество углекислоты, выводимой из цикла на захоронение на 11% меньше. Показано, что CO₂-цикл, работающий на метаноле, одновременно с выработкой электроэнергии способен вырабатывать коммерческий водород. Удельные затраты электроэнергии на его производство составят на ~22 % меньше, чем при производстве без сочетания с CO₂-циклом.

Ключевые слова: цикл Аллама; метанол; водород; кислородное сжигание; метод исследования; эффективность.

Для цитирования: Щинников П.А., Садкин И.С., Боруш О.В., Романенко Р.В. Энергетические особенности CO₂-циклов при кислородном сжигании метанола // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 150-159. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-150-159.

ENERGY FEATURES OF CO₂-CYCLES DURING OXYGEN COMBUSTION OF METHANOL

Shchinnikov P.A., Sadkin I.S., Borush O.V., Romanenko R.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

shchinnikov@corp.nstu.ru

Abstract: The PURPOSE of the work is to determine the mass-flow characteristics of working substances and energy indicators of an installation based on a CO₂ cycle with a two-stage pressure increase (Allam cycle) during oxygen combustion of methanol. METHODS. A research methodology is presented in which the mass-flow characteristics of working substances are determined based on the reactions of combustion and synthesis of methanol and electrolysis of water. These reactions are basic for ensuring operational processes in the installation. The method is based on the molar ratios of substances participating in reactions under stoichiometric conditions. Using the thermodynamic parameters of the cycle being implemented and at a given installation power, the consumption of the working fluid, the share of carbon dioxide renewal in

the cycle, the amount of methanol produced in the synthesis unit, the amount of fresh methanol, the amount of hydrogen produced in the water electrolysis unit and the amount of oxygen are determined, necessary to ensure fuel combustion processes. At the same time, the amount of commercial hydrogen is determined. Electricity consumption for own needs is determined using regulatory methods and data from equipment manufacturers. RESULTS. The article shows that with similar values of thermal efficiency of CO₂ cycles based on oxygen combustion of methane and methanol, the amount of carbon dioxide removed from the cycle for disposal is 11% less. It has been shown that a CO₂ cycle operating on methanol is capable of producing commercial hydrogen simultaneously with electricity generation. The specific electricity consumption for hydrogen production is 22% less than for its production without combination with the CO₂ cycle.

Keywords: Allama cycle; methanol; hydrogen; oxygen combustion; research method; indicators.

For citation: Shchinnikov P.A., Sadkin I.S., Borush O.V., Romanenko R.V. Energy features of CO₂-cycles during oxygen combustion of methanol. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 150-159. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-150-159.

Введение (Introduction)

В условиях сохранения в мировом энергетическом балансе высокой доли органического топлива, что характерно и для России, требуется разработка углероднейтральных технологий его использования при производстве электроэнергии. Одним из направлений развития таких технологий является создание энергетических установок на основе CO₂-циклов с нулевыми выбросами углекислоты в атмосферу [1-10]. В их основе лежит кислородное сжигание топлива [8, 11, 12]. Могут быть реализованы разные варианты термодинамических циклов [9, 13-15] и разные технические особенности энергетических установок [15-17]. Одновременно рассматривают разные виды топлива - от метана до синтез-газа из угля [2, 8, 9, 16, 18, 19]. Активность исследований CO₂-циклов возросла после практической реализации подобной экспериментальной установки компанией NetPower в г.Ла-Порте, США [6, 20, 21]. Многие научные коллективы США [6, 17, 18], Китая [9], стран Евросоюза [1, 13, 15] развивают данное направление энергетики. В России этим направлением активно занимаются в НИУ МЭИ [12, 22], ОИВТ РАН [3, 10], НГТУ [14, 23]. К последнему коллективу принадлежат авторы статьи.

Постановка задачи (Formulation of the problem)

В основе работы CO₂-циклов лежит использование в качестве рабочего тела углекислоты, полученной при кислородном сжигании углеводородного топлива, например, метана по реакции



В этом случае избыток углекислоты, полученный при сжигании топлива и не требующийся для обеспечения работоспособности цикла, а также вся вода выводятся за его рамки [4, 11, 14, 20]. Углекислота выводится для захоронения, а вода сбрасывается в окружающую среду. Подобная организация цикла характерна для сжигания любого газообразного углеводородного топлива, очищенного от негорючих элементов и примесей. Вместе с тем из выводимых за рамки цикла продуктов сгорания может быть получен метанол по реакции



в которой водород берут в результате электролизного разложения воды, так же выводимой за рамки цикла



Таким образом, при использовании в качестве топлива метанола можно обеспечить его частичное восполнение по реакции (2).

Реакция горения метанола



Кислород, полученный по реакции (3), может быть использован в реакции горения (4) и частично компенсировать полные затраты кислорода, а избыток водорода отправлен на склад для последующей реализации.

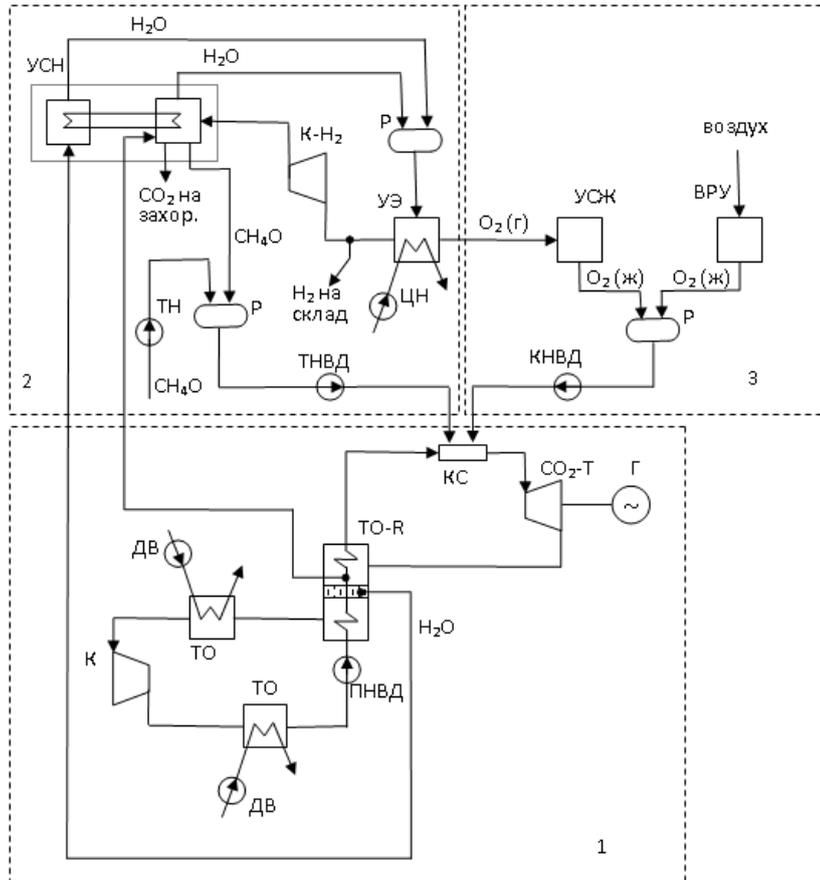


Рис. 1. Принципиальная схема установки на основе CO_2 -цикла при кислородном сжигании метанола: 1, 2, 3 – функциональные части установки; КС – камера сгорания; CO_2 -Т – CO_2 -турбина; К- CO_2 – компрессор первой ступени подъема давления; Р – ресивер; ВРУ – воздухоразделительная установка; УСЖ – установка по сжижению кислорода; УЭ – установка электролиза воды; УСН – установка синтеза метанола; ТО – теплообменники; ТН – топливный насос; ТНВД – топливный насос высокого давления; КНВД – кислородный насос высокого давления; ПНВД – питательный насос высокого давления второй ступени подъема; ДВ – дутьевой вентилятор; ЦН – циркуляционный насос; К- H_2 – компрессор водорода; ТО-Р – регенеративный теплообменник; Г – генератор; CH_4O – метанол

Fig. 1. Schematic diagram of an installation based on the CO_2 -cycle for oxygen combustion of methanol: 1, 2, 3 – functional parts of the installation; КС – combustion chamber; CO_2 -Т – CO_2 -turbine; К- CO_2 – compressor of the first stage of pressure rise; Р – receiver; ВРУ – air separation unit; УСЖ – oxygen liquefaction unit; УЭ – water electrolysis installation; УСН – methanol synthesis unit; ТО – heat exchangers; ТН – fuel pump; ТНВД – high pressure fuel pump; КНВД – high pressure oxygen pump; ПНВД – high-pressure feed pump of the second stage of lift; ДВ – blower fan; ЦН – circulation pump; К- H_2 – hydrogen compressor; ТО-Р – regenerative heat exchanger; Г – generator; CH_4O – methanol

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Установку можно представить в виде функциональных частей (рис. 1). Первая часть включает оборудование, объединяющее процессы, реализуемые в термодинамическом цикле и предназначенное для генерации электроэнергии. В эту группу оборудования входят камера сгорания, CO_2 -турбина, регенеративный теплообменник, теплообменники для отвода теплоты в окружающую среду, нагнетатели, генератор. Вторая функциональная часть предназначена для обеспечения подвода топлива к камере сгорания. В ней сосредоточены установка синтеза метанола, установка электролиза воды, вспомогательное оборудование и нагнетатели. Здесь же обеспечивается вывод избытка углекислоты на захоронение и вывод избытка водорода на склад. Третья функциональная часть

обеспечивает подвод окислителя к камере сгорания. В ней сосредоточены установка сжижения кислорода, получаемого при электролизе воды, воздухоразделительная установка, а так же вспомогательное оборудование и нагнетатели.

В камере сгорания (КС) обеспечивают сжигание метанола в кислороде по реакции (4) и нагрев рабочего тела в виде углекислоты за счет смешения с продуктами сгорания, рис.1. Полученную смесь углекислоты и водяных паров направляют в CO₂-турбину (CO₂-Т), где совершается работа. Затем смесь направляют в регенеративный теплообменник (ТО-Р), где сбросным потоком обеспечивают нагрев углекислоты, подводимой к камере сгорания. Повышение давления рабочего тела обеспечивают по двухступенчатой схеме в компрессоре (К-CO₂) и насосе (ПНВД), что отражает реализацию цикла Аллама [4, 5]. Отвод теплоты в окружающую среду обеспечивают в воздушных теплообменниках (ТО) при нагнетании охлаждающего воздуха дутьевыми вентиляторами (ДВ). Избыток углекислоты направляют в установку синтеза метанола (УСН). Полученный в результате рециклинга углекислоты по реакции (2) метанол направляют в ресивер (Р) для смешения со свежим метанолом. Затем, при помощи топливного насоса высокого давления (ТНВД), направляют в камеру сгорания. Вода, полученная в результате реакции (4) выводится из цикла и направляется в ресивер, где смешивается с водой, полученной по реакции (2) в установке синтеза метанола. Затем ее направляют в установку электролиза (УЭ). Полученный при электролизе воды по реакции (3) водород при помощи нагнетателя (К-Н₂) направляют в установку синтеза метанола, а его избыток выводят на склад. Полученный при электролизе кислород направляют в установку сжижения (УСЖ), откуда в ресивер для смешения с кислородом, полученным в воздухоразделительной установке (ВРУ). Затем кислородным насосом высокого давления (КНВД) направляют в камеру сгорания. Для функционирования установки электролиза обеспечивают ее охлаждение водой в собственном контуре замкнутого типа при помощи циркуляционного насоса (ЦН).

Представленная установка обладает следующими преимуществами: высокая термодинамическая эффективность; замкнутость всех контуров; минимальное использование воды; отсутствие жидких стоков; сниженный выброс CO₂; рециклинг топлива; наработка коммерческого H₂ на склад.

Анализ работоспособности установки по представленной схеме представляет интерес. Задачей исследования является оценка энергетических и массо-расходных показателей установки. Эта информация необходима при проектировании ее узлов и агрегатов.

Методика исследования (Research methodology)

Массовые расходы веществ, обусловленные химическими реакциями горения (4) и синтеза (2) метанола и электролиза (3) воды определяются на основании их мольных отношений на 1 кг CO₂ рабочего тела при стехиометрических условиях

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{H_2O} = \frac{\mu_{H_2O}}{\mu_{CO_2}}; \\ G_{O_2} = \frac{\mu_{O_2}}{\mu_{CO_2}}; \\ G_{CH_3OH} = \frac{\mu_{CH_3OH}}{\mu_{CO_2}}; \\ G_{CO_2} = \delta G_{CH_3OH} \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{CH_3OH}}; \\ G_{H_2} = \delta G_{CH_3OH} \frac{\mu_{H_2}}{\mu_{CH_3OH}}; \\ G_{H_2O} = \delta G_{H_2} \frac{\mu_{H_2O}}{\mu_{H_2}}. \end{array} \right. \quad (1)$$

В этих выражениях G – расход вещества, кг/с; μ – мольная масса вещества; δ – доля обновления углекислоты в цикле.

Расход рабочего тела при обеспечении заданной мощности установки определяют выражением, кг/с

$$D_0 = \frac{N \cdot 10^3}{(h_0 - h_1) \eta_{oi}}, \quad (2)$$

где N – электрическая мощность установки, МВт; h_0, h_1 – энтальпия на входе в CO₂-турбину и выходе из нее, кДж/кг; η_{oi} – внутренний относительный КПД CO₂-турбины.

Количество метанола, получаемого в установке синтеза, кг/с

$$D_{\text{СНЗОН}}^{\text{синтез}} = 0,2 \cdot \frac{\mu_{\text{СНЗОН}}}{\mu_{\text{СО}_2}} \cdot \delta \cdot D_0. \quad (3)$$

При работе установки синтеза метанола учитывают, что секвестрируется 20% подведенной углекислоты [24].

Количество свежего метанола, подводимого к циклу, кг/с

$$D_B = B - D_{\text{СНЗОН}}^{\text{синтез}}, \quad (4)$$

где B – расход топлива на выработку электроэнергии, кг/с

$$B = \frac{N}{Q_n^p \cdot \eta_3}. \quad (5)$$

В этом выражении $Q_n^p=22,7$ МДж/кг – низшая рабочая теплота сгорания метанола; $\eta_3 = \eta_t \eta_{oi} \eta_{к.с} \eta_{эм}$ – КПД выработки электроэнергии (η_t – КПД цикла термический; η_{oi} – внутренний относительный КПД CO_2 -турбины; $\eta_{к.с}$ – КПД камеры сгорания; $\eta_{эм}$ – КПД электромеханический).

Мощность собственных нужд определяется выражением

$$N_{с.н} = \sum_i N_i, \quad (6)$$

где i – характеризует затраты электроэнергии на обеспечение работы установок электролиза воды, сжижения кислорода, воздухоразделения, насосов высокого давления, топливного и циркуляционного насосов, компрессоров и дутьевых вентиляторов.

Затраты электроэнергии на привод вращающихся механизмов определяют по нормативным методам, а затраты на работу электролизёра, воздухоразделения и сжижения кислорода на основе данных заводов изготовителей установок.

Представленный метод позволяет оценить энергетические и массо-расходные показатели установки на основе CO_2 -цикла при кислородном сжигании метанола.

Обсуждение результатов (Discussions and results)

Условия проведения расчетов. Массо-расходные характеристики потоков веществ определены на 1 кг CO_2 рабочего тела при условии стехиометричности процессов химических преобразований. Расчеты выполнены при давлении и температуре на входе в CO_2 -турбину 300 бар и 1200 °С соответственно для цикла с двухступенчатым повышением давления (цикла Аллама). Термический КПД цикла (η_t) определен по известной методологии [14], внутренний относительный турбины, камеры сгорания и электромеханический КПД приняты в порядке оценки $\eta_{oi}=0,92$, $\eta_{к.с} =0,99$, $\eta_{эм}=0,99$. Расчеты выполнены при использовании двух видов топлива: метана и метанола (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Массо-расходные характеристики рабочих веществ CO_2 -циклов
Mass and flow characteristics of working substances of CO_2 cycles

Наименование показателя	Метан (CH_4)	Метанол (CH_3OH)
Расход топлива для обеспечения горения при генерации 1 кг CO_2 , кг/кг CO_2	0,363	0,727
Расход кислорода при горении для генерации 1 кг CO_2 , кг/кг CO_2	1,45	1,091
Образование водяных паров при горении топлива и генерации 1 кг CO_2 , кг/кг CO_2	0,818	0,818
Теплоты, выделяемая при горении топлива и генерации 1 кг CO_2 , МДж/кг	18,232	16,5
Доля обновления углекислоты в цикле, от.ед.	0,0454	0,0506
Расход углекислоты в систему рециклинга, кг/кг CO_2	–	0,0506
Углекислота, направленная на захоронение, кг/кг CO_2	0,0454	0,0404
Расход водорода в системе рециклинга на синтез метанола, кг/кг CO_2	–	0,00138
Метанол, полученный в системе рециклинга, кг/кг CO_2	–	0,00736
Вода, полученная в результате синтеза метанола, кг/кг CO_2	–	0,00414
Водород, нарабатанный "на склад", кг/кг CO_2	–	0,00368
Расход топлива в камере сгорания, кг/кг CO_2	0,0166	0,03649
Расход кислорода в камере сгорания, кг/кг CO_2	0,0658	0,0552
Образование водяных паров в камере сгорания, кг/кг CO_2	0,0371	0,0413

Свежий метанол, подводимый к камере сгорания, кг/кг CO ₂	–	0,0294
Кислород от ВРУ, кг/кг CO ₂	0,0658	0,0147
Термический КПД цикла с учетом работы сжатия, от.ед	0,64	0,635

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Можно видеть, что при близких значениях термических КПД циклов на основе сжигания метана и метанола у последнего количество углекислоты, выводимой за рамки цикла на 11% ниже. Одновременно цикл, работающий на метаноле способен генерировать коммерческий водород в количестве 3,68 г на каждый килограмм рабочего тела. При циркуляции в контуре 100 кг/с углекислоты (что приблизительно соответствует 50 МВт установленной мощности) установка в сутки будет производить около 318 т водорода. Кроме того, для цикла, работающего на метаноле требуется в 4,47 раза меньше кислорода, подготовленного в воздуходелительной установке. Вместе с тем следует отметить, что для этого цикла требуется установка электролиза воды и сжижения кислорода. Обе эти установки потребуют затрат электроэнергии собственных нужд.

Далее в статье рассматриваются три варианта исполнения энергетической установки мощностью 100 МВт на основе CO₂-цикла с двухступенчатым повышением давления (цикла Аллама), при кислородном сжигании метанола.

Вариант 1. Установка обеспечивает переработку 20-ти % выводимого из цикла CO₂ с превращением его в метанол. Обеспечивается полная переработка выводимой из рабочего тела воды в электролизёре с выработкой водорода и кислорода. Водород используют для синтеза метанола, а его избыток направляют на склад для последующей реализации. Недостаток кислорода, необходимый для сжигания топлива, получают в воздуходелительной установке. Схема, представленная на рисунке 1, в этом варианте реализована в полном объеме.

Вариант 2. Установка обеспечивает переработку 20-ти % выводимого из цикла CO₂ с превращением его в метанол, аналогично варианту 1. Водород в электролизёре вырабатывают только для обеспечения реакции синтеза метанола, без наработки на склад. Недостаток кислорода, необходимый для сжигания топлива, получают в воздуходелительной установке так же, как в варианте 1. Схема, представленная на рисунке 1, в этом варианте так же реализована в полном объеме, но при меньшей загрузке электролизёра и большей загрузке воздуходелительной установки.

Вариант 3. Установка обеспечивает переработку 20-ти % выводимого из цикла CO₂ с превращением его в метанол, аналогично вариантам 1 и 2. Водород в установку синтеза метанола поступает (закупается) от внешнего источника. Весь кислород, необходимый для сжигания топлива получают в воздуходелительной установке. Электролизёр и установка сжижения кислорода отсутствуют.

Таблица 2

Table 2

Расходные и энергетические характеристики установки на основе цикла Аллама с кислородным сжиганием метанола

Consumption and energy characteristics of a plant based on the Allama cycle with oxygen combustion of methanol

Наименование показателя	Значение показателя		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Установленная мощность, МВт	100		
Расходы, кг/с			
Рабочего тела	196,5		
Расход топлива в камере сгорания	7,228		
CO ₂ в установку синтеза метанола	9,94		
CO ₂ на захоронение	7,952		
CO ₂ на синтез метанола	1,988		
H ₂ на синтез метанола	0,271		
Вывод воды из установки синтеза метанола	0,813		
Метанол из установки синтеза	1,446		
Подвод свежего метанола	5,782		
Вода в установку электролиза	8,945	2,445	–
H ₂ на склад	0,719	–	–
O ₂ из воздуходелительной установки	2,892	8,677	10,846
Вода, выводимая из цикла	0	6,5	8,945
Мощности установок собственных нужд, МВт			
Установка электролиза *	164,5	45	–

Установка сжижения O ₂	4	1,1	–
Воздухоразделительная установка	5,8	17,5	21,87
Суммарная мощность всех насосов, компрессоров и вентиляторов	23,4	23,2	23,43
Суммарная мощность собственных нужд (СН)	197,7	86,8	45,3
Коэффициент собственных нужд с учетом потерь энергии в трансформаторе СН	–	0,88	0,46
Полезная мощность, МВт	–	12	54

* – при удельных затратах электроэнергии 4,2 кВт·ч/м³ H₂

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Можно видеть, что во всех вариантах при заданной электрической мощности установки расходы рабочего тела, топлива, работа камеры сгорания, работа установки синтеза метанола и вывод углекислоты на захоронение остаются неизменными (табл. 2). Несложные расчеты показывают, что при реализации варианта 1 с производством коммерческого водорода, удельные затраты электроэнергии составят ~3,43 кВт·ч/1 м³ H₂, что на ~22 % меньше, чем при условии поставки электроэнергии для его производства только от внешнего источника.

Вариант 2 характеризуется отсутствием наработки коммерческого водорода, при этом его энергетическая эффективность невысока, так как полезная мощность составляет лишь 12 МВт. Вариант, характеризуемый внешней поставкой водорода для работы синтеза метанола обладает полезной мощностью в 54 МВт.

Авторы обращают внимание, что для принятия решений о практической реализации рассмотренных вариантов необходимо провести их технико-экономический анализ с оценкой коммерческой эффективности продукции, однако подобный анализ является самостоятельной задачей и требует отдельного исследования.

Выводы (Conclusions)

1. Показано, что при близких значениях термических КПД CO₂-циклов на основе кислородного сжигания метана и метанола у последнего количество углекислоты, выводимой из цикла на захоронение на 11% меньше.

2. Показано, что CO₂-цикл, работающий на метаноле, одновременно с выработкой электроэнергии способен вырабатывать коммерческий водород. Удельные затраты электроэнергии на его производство составят ~3,43 кВт·ч/1 м³ H₂, что на ~22 % меньше, чем при его производстве без сочетания с CO₂-циклом.

3. При реализации цикла без выработки коммерческого водорода, полезная мощность для установки в 100 МВт составит лишь 12 МВт, а при внешней поставке водорода на уровне 54 МВт.

Литература

1. Sanz, W., Jericha, H., Moser, M., Heitmeir, F., 2004, "Thermodynamic and Economic Investigation of an Improved Graz Cycle Power Plant for CO₂ Capture", ASME Paper GT2004-53722, ASME Turbo Expo 2004, Vienna, Austria. (Conference presentation).

2. Wimmer, K., Sanz, W., 2020, "Optimization and comparison of the two promising oxy-combustion cycles NET Power cycle and Graz Cycle", International Journal of Greenhouse Gas Control 99 (2020), 103055 (DOI).

3. Парогазовые установки с полным улавливанием диоксида углерода для чистой энергетики / В.В. Даценко, Ю.А. Зейгарник, Е.А. Калашникова, А.А. Косой, А.С. Косой, М.В. Синкевич // Теплофизика и аэромеханика, 2020, том 27, № 5. - С.1-8.

4. R. J. Allam, J. E. Fetvedt, B. A. Forrest and D. A. Freed, "The oxy-fuel, supercritical CO₂ Allam Cycle: New cycle developments to produce even lower-cost electricity from fossil fuels without atmospheric emissions," in ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition (American Society of Mechanical Engineers, 2014).

5. R. Allam, S. Martin, B. Forrest, J. Fetvedt, X. Lu, D. Freed and J. Manning, Demonstration of the Allam Cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture, ENRGY PROCED, Letters 114, 5948-5966 (2017).

6. Zero Emissions Power from Natural Gas. NET Power Performance Data. - <https://netpower.com/wp-content/uploads/2021/05/2021-NET-Power-Performance-Data-1-pager.pdf>. - Чтение с экрана.

7. Разработка методики предварительного расчета проточной части газовых турбин цикла R.J. Allam на сверхкритическом диоксиде углерода / А.Н. Рогалев, Е.Ю. Григорьев, В.О. Киндра, С.К. Осипов, С.А. Павлычев // «Вестник ИГЭУ» Вып. 3 2018 г. - С. 5-14.

8. Thermodynamic features of the regenerative system of direct fired sCO₂ power cycles with oxygen combustion of methane / I. S. Sadkin, P. A. Shchinnikov. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2023.121301. – Text : direct // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 234. – Art. 121301.
9. Zhu, Z., Chen, Y., Wu, J., Zhang, S., Zheng, S.: A modified Allam cycle without compressors realizing efficient power generation with peak load shifting and CO₂ capture. Energy. 174, 478–487 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.165>
10. Концептуальная схема парогазовой установки с полным улавливанием диоксида углерода из продуктов сгорания / А.С.Косой, Ю.А.Зейгарник, О.С.Попель, М.В.Синкевич, С.П.Филиппов, В.Я.Штеренберг // Теплоэнергетика, 2018. - С.1-10.
11. Садкин И.С., Щинников П.А. Способ производства электроэнергии на основе закритического CO₂-цикла. – Патент на изобретение RU2810854 C1, 28.12.2023. Заявка от 06.07.2023.
12. Modeling methods for oxy-fuel combustion cycles with multicomponent working fluid / Andrey Rogalev, Vladimir Kindra and Sergey Osipov // AIP Conference Proceedings 2047, 020020 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5081653>.
13. Michel Moliere, Romain Privat, Jean-Noel Jaubert, Frederic Geiger Supercritical CO₂ Power Technology: Strengths but Challenges. – Energies 2024, 17, 1129. <https://doi.org/10.3390/en17051129>
14. Effect of thermodynamic parameters on energy characteristics of CO₂ power cycles during oxygen combustion of methane / S. V. Alekseenko, P. A. Shchinnikov, I. S. Sadkin. – DOI [10]1134/S0869864323010109. – Text : direct // Thermophysics and Aeromechanics. – 2023. – Vol. 30, iss. 1. – P. 83–92.
15. Sanz, W., Braun, M., Jericha, H., Platzer, M.F., 2016, "Adapting the Zero-Emission Graz Cycle for Hydrogen Combustion and Investigation of its Part Load Behaviour", ASME Paper GT2016-57988, ASME Turbo Expo 2016, Seoul, South Korea (Conference presentation).
16. Влияние термодинамических параметров на мощность воздухоразделительной установки в цикле Аллама / П. А. Щинников, Е. М. Корепанова. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-74-81. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 74–81.
17. The 8th International Supercritical CO₂ Power Cycles Symposium will be held in San Antonio, Texas, February 26-29, 2024 / February 26 – 29, 2024 Hilton Palacio del Rio 200 South Alamo Street San Antonio, Texas . - [https://co2olheat-h2020.eu/wp-content/uploads/2024/03/2024-sCO₂-symposium_detailed-agenda-4.pdf](https://co2olheat-h2020.eu/wp-content/uploads/2024/03/2024-sCO2-symposium_detailed-agenda-4.pdf) - Чтение с экрана. Дата обращения 16.05.2024
18. Allam Cycle Zero Emission Coal Power / Reference Number: 89243319CFE000015 Coal-Based Power Plants of the Future. - May 19th, 2020. - <https://netl.doe.gov/sites/default/files/2020-06/8-Rivers-Capital-Final-Pre-FEED-Report-Allam-Cycle-Coal-%208924331RFE000015-Public-Version-May-19.pdf> - Чтение с экрана. Дата обращения 16.05.2024
19. U.S. Department of Energy Invests \$7 Million for Projects to Advance Coal Power Generation under Coal FIRST Initiative. NETL, October 11, 2019 - <https://netl.doe.gov/node/9282> - Чтение с экрана. Дата обращения 16.05.2024
20. NET Power's CO₂ cycle: the breakthrough that CCS needs. Modern Power System.- <https://web.archive.org/web/20161130185339/http://www.modernpowersystems.com/features/featurenet-powers-co2-cycle-the-breakthrough-that-ccs-needs/featurenet-powers-co2-cycle-the-breakthrough-that-ccs-needs-3.html>. - Чтение с экрана.
21. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide / Allam R.J. et al. // Energy Procedia. – 2013. – Т. 37. – P. 1135–1149.
22. Разработка методики предварительного расчета проточной части газовых турбин цикла R.J.Allam на сверхкритическом диоксиде углерода / А.Н. Рогалев, Е.Ю. Григорьев, В.О. Киндра, С. К. Осипов, С.А. Павлычев //«Вестник ИГЭУ» Вып. 3, 2018 г. - С. 5-14.
23. Сравнительный анализ расходов топлива перспективными энергетическими установками на основе CO₂-циклов / П. А. Щинников, Е. М. Корепанова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Т. 15, № 3 (59). – С. 94–106. – Работа выполнена: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00035, <https://rscf.ru/project/23-29-00035/>.
24. Исмагилов З.И., Пармон В.Н. Каталитические методы переработки углекислого газа. – 10 прорывных идей в энергетике на следующие 10 лет. Глобальная энергия, 2021. – С.49-67.

Авторы публикации

Щинников Павел Александрович – докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Тепловых электрических станций (ТЭС) ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет». *ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-4313-6907>

Садкин Иван Сергеевич – аспирант кафедры Тепловых электрических станций (ТЭС) ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

Боруш Олеся Владимировна – докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры Тепловых электрических станций (ТЭС) ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

Романенко Роман Владимирович – студент кафедры Тепловых электрических станций (ТЭС) ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

References

1. Sanz, W., Jericha, H., Moser, M., Heitmeir, F., 2004, "Thermodynamic and Economic Investigation of an Improved Graz Cycle Power Plant for CO₂ Capture", ASME Paper GT2004-53722, ASME Turbo Expo 2004, Vienna, Austria. (Conference presentation).
2. Wimmer, K., Sanz, W., 2020, "Optimization and comparison of the two promising oxy-combustion cycles NET Power cycle and Graz Cycle", International Journal of Greenhouse Gas Control 99 (2020), 103055 (DOI).
3. Combined-cycle plants with complete carbon dioxide capture for clean energy / V.V. Datsenko, Yu.A. Zeigarnik, E.A. Kalashnikova, A.A. Kosoy, A.S. Kosoy, M.V. Sinkevich // Thermophysics and aeromechanics, 2020, volume 27, no. 5. - P.1-8.
4. R. J. Allam, J. E. Fetvedt, B. A. Forrest and D. A. Freed, "The oxy-fuel, supercritical CO₂ Allam Cycle: New cycle developments to produce even lower-cost electricity from fossil fuels without atmospheric emissions," in ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition (American Society of Mechanical Engineers, 2014).
5. R. Allam, S. Martin, B. Forrest, J. Fetvedt, X. Lu, D. Freed and J. Manning, Demonstration of the Allam Cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture, ENRGY PROCED, Letters 114, 5948-5966 (2017).
6. Zero Emissions Power from Natural Gas. NET Power Performance Data. - <https://netpower.com/wp-content/uploads/2021/05/2021-NET-Power-Performance-Data-1-pager.pdf>. - Reading from the screen.
7. Development of a methodology for preliminary calculation of the flow path of gas turbines of the R.J. cycle. Allam on supercritical carbon dioxide / A.N. Rogalev, E.Yu. Grigoriev, V.O. Kindra, S.K. Osipov, S.A. Pavlychev // "Bulletin of ISEU" Vol. 3 2018 - pp. 5-14.
8. Thermodynamic features of the regenerative system of direct fired sCO₂ power cycles with oxygen combustion of methane / I. S. Sadkin, P. A. Shchinnikov. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2023.121301. // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 234. – Art. 121301.
9. Zhu, Z., Chen, Y., Wu, J., Zhang, S., Zheng, S.: A modified Allam cycle without compressors realizing efficient power generation with peak load shifting and CO₂ capture. Energy. 174, 478–487 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.165>
10. Conceptual diagram of a combined cycle plant with complete capture of carbon dioxide from combustion products / A.S. Kosoy, Yu.A. Zeigarnik, O.S. Popel, M.V. Sinkevich, S.P. Filippov, V.Ya. Shterenberg // Thermal power engineering, 2018. - pp. 1-10.
11. Sadkin I.S., Shchinnikov P.A. A method for producing electricity based on a supercritical CO₂ cycle. – Patent for invention RU2810854 C1, 12/28/2023. Inception dated 07/06/2023.
12. Modeling methods for oxy-fuel combustion cycles with multicomponent working fluid / Andrey Rogalev, Vladimir Kindra and Sergey Osipov // AIP Conference Proceedings 2047, 020020 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5081653>.
13. Michel Moliere, Romain Privat, Jean-Noel Jaubert, Frederic Geiger Supercritical CO₂ Power Technology: Strengths but Challenges. – Energies 2024, 17, 1129. <https://doi.org/10.3390/en17051129>
14. Effect of thermodynamic parameters on energy characteristics of CO₂ power cycles during oxygen combustion of methane / S. V. Alekseenko, P. A. Shchinnikov, I. S. Sadkin. – DOI 10.1134/S0869864323010109. – Text : direct // Thermophysics and Aeromechanics. – 2023. – Vol. 30, iss. 1. – P. 83–92.
15. Sanz, W., Braun, M., Jericha, H., Platzer, M.F., 2016, "Adapting the Zero-Emission Graz Cycle for Hydrogen Combustion and Investigation of its Part Load Behaviour", ASME Paper GT2016-57988, ASME Turbo Expo 2016, Seoul, South Korea (Conference presentation).
16. Effect of thermodynamic parameters on the capacity of an air separation unit in the Allam cycle / P.A.Shchinnikov, E.M.Korepanova. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-74-81. // Power engineering: research, equipment, technology. – 2023. – T. 25, № 1. – С. 74–81.
17. The 8th International Supercritical CO₂ Power Cycles Symposium will be held in San Antonio, Texas, February 26-29, 2024 / February 26 – 29, 2024 Hilton Palacio del Rio 200 South Alamo Street San

Antonio, Texas . - https://co2olheat-h2020.eu/wp-content/uploads/2024/03/2024-sCO2-symposium_detailed-agenda-4.pdf - Reading from the screen. Date of the application 16.05.2024

18. Allam Cycle Zero Emission Coal Power / Reference Number: 89243319CFE000015 Coal-Based Power Plants of the Future. - May 19th, 2020. - <https://netl.doe.gov/sites/default/files/2020-06/8-Rivers-Capital-Final-Pre-FEED-Report-Allam-Cycle-Coal-%208924331RFE000015-Public-Version-May-19.pdf> - Reading from the screen. Date of the application 16.05.2024

19. U.S. Department of Energy Invests \$7 Million for Projects to Advance Coal Power Generation under Coal FIRST Initiative. NETL, October 11, 2019 - <https://netl.doe.gov/node/9282> - Reading from the screen. Date of the application 16.05.2024

20. NET Power's CO2 cycle: the breakthrough that CCS needs. Modern Power System.- <https://web.archive.org/web/20161130185339/http://www.modernpowersystems.com/features/featurenet-powers-co2-cycle-the-breakthrough-that-ccs-needs/featurenet-powers-co2-cycle-the-breakthrough-that-ccs-needs-3.html>. - Reading from the screen.

21. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide / Allam R.J. et al. // Energy Procedia. – 2013. – Т. 37. – P. 1135–1149.

22. Development of a method for preliminary calculation of the flow path of gas turbines of the R.J.Allam cycle on supercritical carbon dioxide / A.N. Rogalev, E.Yu. Grigoriev, V.O. Kindra, S.K. Osipov, S.A. Pavlychev // “Bulletin of ISEU” Vol. 3, 2018 - pp. 5-14.

23. Comparative analysis of fuel consumption by advanced power plants based on CO2-cycles / P. A. Shchinnikov, E. M. Korepanova // Bulletin of the Kazan State Energy University. – 2023. – Т. 15, No. 3 (59). – pp. 94–106. – Work completed: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00035, <https://rscf.ru/project/23-29-00035/>.

24. Ismagilov Z.I., Parmon V.N. Catalytic methods for carbon dioxide processing. – 10 breakthrough ideas in the energy sector for the next 10 years. Global Energy, 2021. – pp. 49-67.

Authors of the publication

Pavel A. Shchinnikov – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *ORCID:* <http://orcid.org/0000-0002-4313-6907>

Ivan S. Sadkin – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Olesya V. Borush – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Roman V. Romanenko – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **28.07.2024 г.**

Отредактировано **05.08.2024 г.**

Принято **15.08.2024 г.**