

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-1-74-81

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА МОЩНОСТЬ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ В ЦИКЛЕ АЛЛАМА

Щинников П.А., Корепанова Е.М.

Новосибирский государственный технический университет

Резюме: ЦЕЛЬ работы заключается в установлении взаимосвязи термодинамических параметров цикла Аллама с мощностью воздухоразделительной установки, так как последняя является потребителем электроэнергии собственных нужд энергоблока. Для этого необходимо разработать расчетный метод и на его основе выявить функциональные зависимости влияния.

МЕТОДЫ. Представлена методика исследования, в которой обеспечивается взаимосвязанность термодинамических начальных параметров цикла Аллама с его эффективностью и расходами топлива, которые, в свою очередь, влияют на мощность воздухоразделительной установки, предназначенной для производства кислорода. В методике полагают, что обеспечение кислородного сжигания метана происходит при их стехиометрическом соотношении. Установлена взаимосвязанность термического КПД цикла и начальных параметров рабочего тела, представлены формулы по определению секундного расхода условного топлива на установку, КПД выработки электроэнергии и электрической мощности установки по подготовке кислорода. При получении конечного результата учитывают фактор влияния внутреннего относительного КПД СО2-турбины.

PEЗУЛЬТАТЫ. В статье показано, что при реализации цикла Аллама на основе углекислого газа при сжигании метана в кислороде, существенную роль играет установка по производству кислорода. Это энергозатратное оборудование собственных нужд. Проведены количественные оценки и показано как начальные параметры термодинамического цикла влияют на мощность воздухоразделительной установки, в которой и производят кислород. В статье показано, что ее мощность может быть обеспечена на уровне 20% от единичной мощности энергоблока.

Ключевые слова: термодинамические параметры; мощность; воздухоразделительная установка; цикл Аллама.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 213-29-00035, https://rscf.ru/project/23-29-00035/

Для цитирования: Щинников П.А., Корепанова Е.М. Влияние термодинамических параметров на мощность воздухоразделительной установки в цикле Аллама // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 74-81. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-74-81.

EFFECT OF THERMODYNAMIC PARAMETERS ON THE CAPACITY OF AN AIR SEPARATION UNIT IN THE ALLAM CYCLE

Shchinnikov PA., Korepanova EM.

Novosibirsk State Technical University

Abstract: The PURPOSE of the work is to establish the relationship between the thermodynamic parameters of the Allam cycle and the capacity of the air separation unit. The air separation plant is a consumer of electricity. To solve the problem, a calculation method is developed and functional dependencies are revealed.

METHODS. A research methodology is presented that provides a connection between the thermodynamic parameters of the Allam cycle and its efficiency and fuel consumption, which, in turn, affect the capacity of an air separation plant designed to produce oxygen. The method assumes that the provision of oxygen combustion of methane occurs at their stoichiometric ratio. The method establishes a connection between the thermal efficiency of the cycle and the

parameters of the working fluid. Formulas are presented for determining the consumption of standard fuel for the installation, the efficiency of electricity generation and the electric power of the oxygen preparation plant. When obtaining the final result, the factor of influence of the internal relative efficiency of the CO2 turbine is taken into account.

RESULTS. The article shows that in the implementation of the Allam cycle based on carbon dioxide by burning methane in oxygen, an oxygen production unit plays a significant role. This is an energy-consuming equipment for own needs. Quantitative estimates have been made and it has been shown how the initial parameters of the thermodynamic cycle affect the capacity of the air separation unit, in which oxygen is produced. The article shows that its capacity can be provided at the level of 20% of the capacity of the power unit.

Keywords: thermodynamic parameters; power; air separation plant; Allam cycle.

Anknowlegment: The study was funded by a grant Russian Science Foundation (RSF), № 23-29-00035, https://rscf.ru/ptoject/23-29-00035/

For citation: Shchinnikov PA, Korepanova EM. Effect of thermodynamic parameters on the capacity of an air separation unit in the Allam cycle. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(1): 74-81. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-74-81.

Введение (Introduction)

Различными сценариями развития энергетики на органическом топливе предусмотрено снижение углеродного следа от ее действия [1-4]. Рассматриваются различные варианты — от выделения CO_2 из продуктов сгорания при традиционном сжигании топлива с последующим захоронением (так называемые технологии CCS — Carbon Capture Storage [4, 5]) до создания циклов на основе использования углекислоты в качестве рабочего тела, в которых, при кислородном сжигании метана образуется углекислота и водяные пары. Водяные пары выводятся из цикла при конденсации, а углекислота образует рабочее тело [6-15]. В США компанией NET Power реализована установка мощностью 50 МВт [20, 21]. В 2018 году осуществлен ее успешный пуск, после испытаний обеспечена работа с выдачей электроэнергии в сеть. В настоящее время компанией заключены ряд соглашений на поставку энергоблоков, реализующих цикл Аллама-Фетведта (далее в статье цикл Аллама), при этом прогнозируемый КПД выработки электроэнергии составит 59%, а ее удельная стоимость 900-1200 \$/кВт [22].

Вместе с тем информация о разработках носит закрытый характер, а теория ${\rm CO}_2$ - циклов до настоящего времени не разработана, поэтому их анализ представляет интерес.

Постановка задачи

В принципиальном варианте цикл Аллама представляет собой следующую конфигурацию, (рис. 1).

Рис. 1. Принципиальная энергоблока с реализацией цикла Аллама: КС – камера сгорания; СО2- $T - CO_2$ -турбина; Γ – генератор; TOтеплообменник; воздухоразделительная установка: СН₄ – сжигаемый природный газ; ПНВД питательный давления; высокого ТНВЛ топливный насос высокого давления; КНВД - кислородный насос высокого давления; К ДВ компрессор; дутьевой вентилятор; О2 - подвод кислорода к камере сгорания; Н2О, СО2 - вывод из цикла конденсата водяных паров и избытка углекислоты; ТСН трансформатор собственных нужд; ВТО – воздушный теплообменник

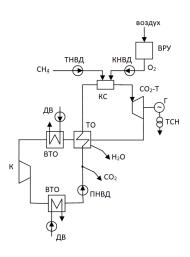


Fig.1. Schematic diagram of the power unit with the implementation of the Allama cycle: KC - combustion chamber; CO2-T - CO2 turbine; Γ - generator; TO heat exchanger; BPY - air CH4 unit: natural combusted ПНВД - high pressure feed ритр; ТНВД - high pressure fuel pump; КНВД - high pressure oxygen pump; K compressor; ДВ - blower fan; O2 - oxygen supply to the combustion chamber; H2O, CO2 - removal of water vapor and excess carbon dioxide from the condensate cycle; TCH - auxiliary transformer; BTO - air heat exchanger

В высокотемпературной камере сгорания сжигают метан в кислороде. Продукты сгорания в виде СО2 и водяных паров поступают в СО2-турбину, где совершают работу, передаваемую по валу электрогенератору. Содержание водяных паров в продуктах сгорания определяется реакцией окисления метана и не превышает 2-5% [23]. Отработавшие газы направляют в регенеративный теплообменник, после которого обеспечивается двух ступенчатое повышение их давления. Первой ступенью является компрессор, второй питательный насос высокого давления. Отвод теплоты в окружающую среду ведут в воздушных теплообменниках, которые установлены на линии рабочего тела до и после компрессора. Вывод конденсата водяных паров обеспечивают из регенеративного теплообменника, а вывод избытка СО2, который обусловлен непрерывным сжиганием топлива, после питательного насоса высокого давления.

Затраты электроэнергии собственных нужд для такой установки связаны не только с обеспечением работы вращающихся механизмов в виде насосов компрессора и вентиляторов, но и с генерацией кислорода в воздухоразделительной установке. Анализ принципиальной схемы показывает, что затраты электроэнергии последнего потребителя будут существенно зависеть от термодинамических параметров, обеспечиваемых камерой сгорания. Установление этих взаимосвязей является задачей настоящей работы.

Методика исследования (Materials and methods)

Воздухоразделительная установка (ВРУ) предназначена для получения кислорода высокой чистоты (99,5%). Кислород такой чистоты получают на криогенных установках с внутренним сжатием. Получаемый кислород имеет давление на уровне 4 МПа при удельном энергопотреблении на уровне 0,3-1 кВт·ч/м 3 O $_2$ [24].

При условии стехиометричности сжигания мощность установки по подготовке кислорода, МВт

$$N_{\rm Bpy} = 3.6 \cdot B \cdot V_{O_2} \cdot k_{\rm yg} \cdot k_{\rm 3a\pi}, \tag{1}$$

где 3,6 — переводной размерный коэффициент; B — расход условного топлива; $V_{O_2} = 1,63$ стехиометрический расход кислорода при сжигании метана, ${\rm M}^3/{\rm kr.y.t},\ k_{\rm vg}$ – удельный расход электроэнергии на производство кислорода, к $B t \cdot 4/M^3$; k_{3an} – коэффициент запаса мощности.

Секундный расход условного топлива на установку определяется выражением, кг/с
$$B = \frac{{\scriptscriptstyle N}}{{\scriptscriptstyle 29,3\cdot\eta_9}}\,, \tag{2}$$

Где 29,3 – низшая теплота сгорания условного топлива, МДж/кг; N – электрическая мощность установки, MBT; $\eta_3 - K\Pi Д$ выработки электроэнергии, который определяется выражением

$$\eta_{a} = \eta_{t} \cdot \eta_{oi}^{CO_{2}} \cdot \eta_{\kappa c} \cdot \eta_{aM} . \tag{3}$$

 $\eta_{\scriptscriptstyle 9} = \eta_t \cdot \eta_{oi}^{\mathit{CO}_2} \cdot \eta_{\scriptscriptstyle \mathrm{KC}} \cdot \eta_{\scriptscriptstyle \mathrm{9M}} \,. \tag{3}$ В этом выражении $\eta_{oi}^{\mathit{CO}_2}, \, \eta_{\scriptscriptstyle \mathrm{KC}}, \, \eta_{\scriptscriptstyle \mathrm{9M}} - \mathrm{K}\Pi \mathrm{\square}$ внутренний относительный CO_2 -турбины, камеры сгорания и электромеханический, η_t – термический КПД цикла Аллама.

Термический КПД (η_t) цикла зависит от начальных параметров – этот фактор, в свою очередь, обусловливает зависимость мощности воздухоразделительной установки от начальных температуры и давления.

На ph-диаграмме можно видеть, что снижение начальной температуры, характеризуемой смещением точки 0 в точку 0' и снижение начального давления, характеризуемого смещением точки 0 в точку 0" ведет к снижению располагаемого теплоперепада на ${\rm CO}_2$ -турбину, так как $H_0' < H_0$ и $H_0'' < H_0$, (рис.2).

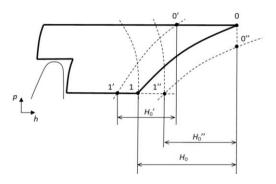


Рис. 2. Диаграмма цикла Аллама

Fig.2. Allama Cycle Diagram

В работе [23] показано, что именно этот фактор обусловливает снижение термодинамического КПД, так как в обоих случаях располагаемый теплоперепад на СО₂- турбину снижается быстрее, чем количество теплоты, подводимой к циклу. В этой же работе показано, что увеличение/снижение температуры на 50 °C ведет к увеличению/снижению термического КПД цикла на 1%, а увеличение/снижение начального давления на 10-15% ведет к увеличению/снижению термического КПД цикла так же на 1% (большие значения отклонения давления для меньших его абсолютных значений).

Перечисленные факторы определяют последующие расчеты.

Обсуждение результатов(Results)

Расчеты приведены для следующих условий в таблице 1.

Таблица 1

**			
Исходные	панные	ппа	nacuetor

№	Наименование параметра	Обозначение	Диапазон значений/
			значение
1	Диапазон расчетных единичных мощностей энергоблока, МВт	N	50 – 500
2	Диапазон начальных температур, °С	t_0	900 – 1400
3	Диапазон начальных давлений, бар	p_0	150 - 300
4	КПД • внутренний относительный СО ₂ -турбины • камеры сгорания • электромеханический • термический	$\eta^{CO_2}_{oi}$ $\eta_{\kappa c}$ $\eta_{_{9M}}$	0,86-0,92 0,99 0,99 0,55 – 0,63
5	Удельный расход электроэнергии на производство кислорода, кВт·ч/м ³	$k_{ m yg}$	0,56
6	Коэффициент запаса электрической мощности	$k_{ m 3a\pi}$	1,1

Диапазоны значений, принятые в расчетах и представленные в таблице, в своих верхних значениях характеризуют реалистичные, но труднодостижимые показатели высоких температур, давлений и термической эффективности. Внутренний относительный КПД СО2-турбины так же принят высоким. Удельный расход электроэнергии на производство кислорода характерен для современных установок, производимых ПАО Криогенмаш [24].

Результаты расчетов показывают, что для энергоблока единичной мощностью на уровне 100 МВт мощность воздухоразделительной установки может быть обеспечена в пределах 19-22 МВт (при максимально высоком η_{0i} =0,92), при этом большие значения для низких начальных параметров рабочего тела, (рис. 3, рис. 4). Очевидно, что рост начальных параметров сопровождается ростом термической эффективности цикла, который, в свою очередь вызывает снижение расхода топлива. Уже этот фактор обусловливает снижение потребности кислорода и соответствующее снижение затрат энергии на его производство, что и отражает метод исследования (выражение 1).

Снижение внутреннего относительного КПД СО2-турбины обусловливает снижение КПД выработки электроэнергии установкой (выражение 3), дальнейший рост топлива и затраты кислорода на его сжигание, что также сопровождается ростом мощности воздухоразделительной установки, (рис.3, рис. 4). При этом мощность воздухоразделительной установки прирастает на 9-16% при снижении начальных параметров рабочего тела. В рассмотренном диапазоне значений заметно более весомое влияние начальной температуры на мощность установки по производству кислорода (16%) по сравнению с начальным давлением (9%).

Рис. 3. Зависимость мощности воздухоразделительной установки ($N_{\rm BPY}$) от начального давления (p_0) и внутреннего относительного КПД СО2-турбины (η_{0i}) при t_0 =1400 °C и N=100 MBт

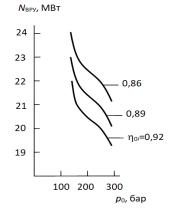


Fig. 3. The dependence of the power of the air separation plant (N_{BPY}) on the pressure (p_0) and internal efficiency of the CO2 turbine (η_{0i}) at t_0 =1400 $^{\circ}$ C and N=100 MW

Рис. 4. Зависимость мощности воздухоразделительной установки ($N_{\rm BPY}$) от начальной температуры (t_0) и внутреннего относительного КПД СО2-турбины (η_{0i}) при p_0 =300 бар и N=100 MBт

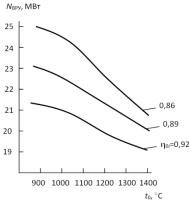


Fig.4. Dependence of air separation plant capacity (N_{BPV}) on temperature (t_0) and internal efficiency of the CO2 turbine (η_{0i}) at p_0 =300 bar and N=100 MW

В то же время рост установленной мощности энергоблока ведет к увеличению секундного расхода топлива (выражение 2), что сопровождается ростом потребности кислорода, а следовательно ростом мощности воздухоразделительной установки, (рис.5).

Рис. 5. Зависимость мощности воздухоразделительной установки $(N_{\rm BPY})$ от единичной мощности энергоблока и внутреннего относительного КПД СО2-турбины (η_{0i}) при p_0 =300 бар и t_0 =1400 °C

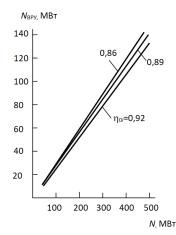


Fig.5. Dependence of the capacity of the air separation plant on the capacity (N_{BPY}) of the power unit (N) and internal efficiency of the CO2 turbine (η_{0i}) at p_0 =300 bar and t_0 =1400 °C

В диапазоне единичных мощностей энергоблоков 50-300 МВт, мощность воздухоразделительной установки составит 10-60 МВт (при максимально высоком η_{0i} =0,92), что соответствует ~20% от установленной мощности блока.

Выводы (Conclusions)

- 1. Показано, что для энергоблока, реализующего цикл Аллама, мощность воздухоразделительной установки для производства кислорода зависит от его начальных параметров и при максимально высоком внутреннем относительном КПД СО2-турбины (η_0 =0,92) и единичной мощности блока N=100 MBт колеблется в диапазоне 19-22 MBт.
- 2. Показано, что при p_0 =300 бар и t_0 =1400 °C и в диапазоне единичных мощностей 50-300 МВт мощность воздухоразделительной установки для цикла Аллама может быть обеспечена ~20% от установленной мощности блока.

Литература

- 2. Enviva and J-Power Join Efforts to Decarbonize Power Generation in Japan /businesswire.com:https://www.businesswire.com/news/home/20211116006425/en/ Дата обращения: 26.05.2022
- 3. Федорова В.А. и др. Трансформация индустрии СПГ в рамках декарбонизации мирового ТЭК. «Neftegaz.RU». N4, Апрель 2022.-https://magazine.neftegaz.ru/articles/spg/733425 transformatsiaindustrii-spg-v- ramkakh-dekarbonizatsii-mirovogo-tek/ Дата обращения: 20.05.2022
- 4. Филиппов С.П., Жданов О.В. Возможности использования технологий улавливания и захоронения диоксида углерода при декарбонизации мировой экономики (обзор). Теплоэнергетика. 2022.-N9. С.5-21.

- 5. Budinis S., Krevor S., Niall Mac Dowell, Brandon N., Nawkes A. An assessment of CCS costs, barriers and potential // Energy Strategy Reviews.-2018. vol.22, pp. 61-81. Doi: 10.1016/j.esr.2018.08.003
- 6. Comparative analysis of the Allam cycle and the cycle of compressorless combined cycle gas turbine unit / Mikhail Sinkevich, Anatoliy Kosoy and Oleg Popel // E3S Web of Conferences 209, 03023 (2020). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903023
- 7. Analysis of the compressorless combined cycle gas turbine unit performance efficiency in district heating systems / Yuriy Borisov, Nikolay Fominykh, Eldar Ramazanov and Oleg Popel // E3S Web of Conferences 209, 03008 (2020). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903008
- 8. 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.
- 9. Сравнительный анализ цикла Аллама и цикла бескомпрессорной парогазовой установки / М.В.Синкевич и др. // ENERGY-21: Sustainable Development & Smart Management / Международная конференция. Энергетика XXI века: Устойчивое развитие и интеллектуальное управление, Иркутск, ИСЭМ, 2020, 7-11 сетнтября 2020 г.
- 10. Проектирование макетного образца бескомпрессорной парогазовой установки / В.В. Волков, Музылёв // Всероссийская молодежная конференция с международным участием Системные исследования в энергетике 2021, Energy, System, Research. Иркутск, ИСЭМ, 2021, 25-28 мая 2021 г.
- 11. This power plant runs on co2 / ieee spectrum. for the technology insider. https://spectrum.ieee.org/this-power-plant-runs-on-co2 . Чтение с экрана.
- 12. Steam boilers' advanced constrictive solutions for the ultra-supercritical power plants / N. Rogalev, V. Prokhorov, A. Rogalev et al. // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. 11(18). P. 9297-9306.
- 13. Efficiency of zero emission cycles on the basis of their configuration / P.Shchinnikov, O.Borush, A.Frantseva, 1.Sadkin // E3S Web Conf.: InternationalConference of Young Scientists "Energy Systems Research 2021". Volume 289,2021. Article Number 02001 (6 p.) DOI https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128902001.
- 14. Sadkin I.S. Influence of the initial parameters on the thermodynamic efficiency ofcarbon dioxide power cycles / P. A. Shchinnikov, I. S. Sadkin, A. P. Shchinnikov, N. F.Cheganova, N. I. Vorogushina // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2150. Art.

012011. DOI 10.1088/1742-6596/2150/1/012011

- 15. Садкин И.С. Особенности циклов с применением углекислоты в качестве рабочего тела / П. А. Щинников, И. С. Садкин, А. П. Щинников.// Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики: сб. тр. 1 Все-рос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Ульяновск, 6-7 окт. 2021 г. Ульяновск :Изд-во УлГТУ, 2021. С. 169-171.
- 16. 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).
- 17. 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).
- 18. 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. T. 37. P. 1135-1149.
- 19. 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.
- 20. Zero Emissions Power from Natural Gas. NET Power Performance Data. https://netpower.com/wp-content/uploads/2021/05/2021-NET-Power-Performance-Data-I-pager.pdf, Чтение с экрана.

- 21. NET Power's CO2 cycle: the breakthrough that CCS needs. Modern Power System. //https://web.archive.org/web/20161130185339/http://www.modernpowersystems.com/features/fe aturenet-powers-co2-cycle-the-breakthrough-that-ces-needs/featurenet-powers-co2-cycle-the-breakthrough-that-ces-needs-3.html.- Чтение с экрана.
- 22. NET Power's First Allam Cycle 300-MW Cas-Fired Project Will Be Built in Texas.-powering.com/net-powers-first-allam-cycle-300-mw-gas-fired-project-will-be-built-in-texas/ Дата обращения: 12.02.2023. Чтение с экрана
- 23. Алексеенко С.В., Щинников П.А., Садкин И.С. Влияние термодинамических параметров на энергетические характеристики CO_2 -циклов при кислородном сжигании метана. Теплофизика и аэродинамика, 2023.- t.30, N1. t.30.
- 24. Криогенные BPУ, Криогенмаш.- www.cryogenmash.ru/catalog/kriogenye-vtu/ Дата обращения: 12.02.2023.- Чтение с экрана.

Авторы публикации

Щинников Павел Александрович – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Тепловых электрических станций (ТЭС), Новосибиский государственный технический университет.

Корепанова Ева Михайловна – студент, Новосибирского государственного технического университета.

References

- 1. Best Available Techniques (BAT) *Reference Document for LargeCombustion Plants. Industrial Emissions Directive2010/75/EU* (Integrated Pollution Prevention and Control) / Thierry Lecomte and outher. EUR 28836 EN, 2017, 940 p. doi:10.2760/949, ISBN 978-92-79-74303-0
- 2. Enviva and J-Power Join Efforts to Decarbonize Power Generation in Japan /businesswire.com:https://www.businesswire.com/news/home/20211116006425/en/ Date of the application: 26.05.2022
- 3. Fedorova VA, et al. *Transformation of the LNG industry as part of the decarbonization of the global fuel and energy complex.* «Neftegaz.RU». N4, April 2022.-https://magazine.neftegaz.ru/articles/spg/733425 transformatsiaindustrii-spg-v- ramkakhdekarbonizatsii-mirovogo-tek/ Date of the application: 20.05.2022
- 4. Filippov SP, Zhdanov OV. Possibilities of using technologies for capturing and storing carbon dioxide during the decarbonization of the world economy (review). *Thermal engineering*. 2022;9:5-21.
- 5. Budinis S, Krevor S, Niall Mac Dowell, et al. An assessment of CCS costs, barriers and potential. *Energy Strategy Reviews*.2018;22:61-81. doi: 10.1016/j.esr.2018.08.003
- 6. Mikhail Sinkevich, Anatoliy Kosoy and Oleg Popel. *Comparative analysis of the Allam cycle and the cycle of compressorless combined cycle gas turbine unit.* E3S Web of Conferences 209, 03023 (2020). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903023
- 7. Yuriy Borisov, Nikolay Fominykh, Eldar Ramazanov and Oleg Popel. *Analysis of the compressorless combined cycle gas turbine unit performance efficiency in district heating systems*. E3S Web of Conferences 209, 03008 (2020).https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903008
- 8. Datsenko VV, Zeigarnik YuA, Kalashnikova EA. Combined-cycle plants with complete capture of carbon dioxide for clean energy. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2020;2(5):1-8.
- 9. Sinkevich M.V. et al. *Comparative analysis of the Allam cycle and the cycle of a compressorless combined cycle plant.* ENERGY-21: Sustainable Development & Smart Management. International Conference. Energy of the XXI century: Sustainable development and intelligent management, Irkutsk, ISEM, 2020, September 7-11, 2020
- 10. Volkov VV, Muzylev *Designing a model sample of a non-compressor combined cycle plant.* All-Russian Youth Conference with International Participation System Research in Energy 2021, Energy, System, Research. Irkutsk, ISEM, 2021, May 25-28, 2021.
- 11. This power plant runs on co2 / ieee spectrum. for the technology insider. https://spectrum.ieee.org/this-power-plant-runs-on-co2 . Screen Reader.
- 12. Rogalev N, Prokhorov V, Rogalev A. et al. Steam boilers' advanced constrictive solutions for the ultra-supercritical power plants. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016;18:9297-9306.
- 13. Shchinnikov P, Borush O, Frantseva A, et al. *Efficiency of zero emission cycles on the basis of their configuration*. E3S Web Conf.: InternationalConference of Young Scientists "Energy

- Systems Research 2021". Volume 289,2021. Article Number 02001 (6 p.) doihttps://doi.org/10.1051/e3sconf/202128902001.
- 14. Sadkin IS, Shchinnikov PA, Shchinnikov AP, et al. Influence of the initial parameters on the thermodynamic efficiency of carbon dioxide power cycles. *Journal of Physics: Conference Series.* 2022.Vol. 2150. Art.012011. DOI 10.1088/1742-6596/2150/1/012011
- 15. Sadkin IS, Shchinnikov PA, Shchinnikov AP Features of cycles with the use of carbon dioxide as a working fluid. Development of applied mathematics for solving interdisciplinary problems of energy: Sat. tr. 1 All-gr. sci.-tech. conf. with international participation, Ulyanovsk, 6-7 Oct. 2021 Ulyanovsk: Publishing House of UlGTU, 2021. P. 169-171.
- 16. Allam RJ, Fetvedt JE, Forrest BA, et al. 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).
- 17. Allam R, Martin S, Forrest B, et al. 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).
- 18. Allam RJ. et al. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide. *Energy Procedia*, 2013;37:1135-1149.
- 19. 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 ISPU" Issue. 3, 2018 pp. 5-14.
- 20. Rogalev AN, Grigoriev EYu, Zero VO. *Emissions Power from Natural Gas.* NET Power Performance Data. https://netpower.com/wp-content/uploads/2021/05/2021-NET-Power-Performance-Data-I-pager.pdf, Screen Reader.
- 21. NET Power's CO2 cycle: the breakthrough that CCS needs. Modern Power System. //https://web.archive.org/web/20161130185339/http://www.modernpowersystems.com/features/fe aturenet-powers-co2-cycle-the-breakthrough-that-ces-needs/featurenet-powers-co2-cycle-the breakthrough-that-ces-needs-3.html.- Screen Reader.
- 22. NET Power's First Allam Cycle 300-MW Cas-Fired Project Will Be Built in Texas.-powering.com/net-powers-first-allam-cycle-300-mw-gas-fired-project-will-be-built-in-texas/ Дата обращения: 12.02.2023. Чтение с экрана
- 23. Alekseenko SV, Shchinnikov PA, Sadkin IS. Influence of thermodynamic parameters on the energy characteristics of CO2 cycles during oxygen combustion of methane. *Thermal physics and aerodynamics*, 2023;30(1):111-121.
- 24. Cryogenic ASU, Cryogenmash. www.cryogenmash.ru/catalog/kriogenye-vtu/ Date of the application: 12.02.2023. Screen Reader.

Authors of the publication

Pavel A. Shchinnikov - Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Eva M. Korepanova – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Получено 27.01.2023г.

Отредактировано 09.02.2023г.

Принято 09.02.2023г.