



## НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НА ОСНОВЕ ЦИКЛА АЛЛАМА С ВНУТРИЦИКЛОВОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ УГЛЯ

Таценко М.Е., Садкин И.С., Щинников П.А.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия  
tatsenko2010@yandex.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. Разработка новой технологии на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля. ЦЕЛЬ. Определить термическую эффективность цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля. Рассчитать процесс горения синтез-газа. Рассмотреть положения термодинамического анализа энергетических циклов. Провести сравнение рассматриваемой технологии с другими технологиями генерации электроэнергии на органическом топливе. МЕТОДЫ. Методика расчета процесса горения синтез-газа заключается в определении массо-расходных характеристик топлива, окислителя, рабочих тел и термического КПД, что позволяет вести сравнение рассматриваемой технологии с другими. В предложенном методе принято, что сжигают чистый синтез-газ, при стехиометричности соотношения подводимого кислорода. Ограничениями на представленный метод являются термодинамические параметры входа, которыми будут определяться энтальпии рабочего тела и водяных паров в расчетных точках, а также температура окружающей среды, от которой будет зависеть давление на выходе из  $\text{CO}_2$ -турбины. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье предлагается методика определения термической эффективности цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля. В основе методики лежат расчет горения синтез-газа и положения термодинамического анализа энергетических циклов. С использованием разработанного метода проведен анализ термической эффективности технологии производства электроэнергии на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией кузнецкого угля в процессе Техасо. Проведено сравнение рассматриваемой технологии с другими технологиями генерации электроэнергии на органическом топливе. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Расчетным путем получено, что расход синтез-газа для рассматриваемой технологии примерно в 4,3 раза выше, чем для цикла Аллама при кислородном сжигании метана. Показано, что доля обновления рабочего тела для технологии на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля в 1,6 раза выше, чем у аналогичного  $\text{CO}_2$ -цикла на метане. Показано, что термический КПД технологии составляет 65,5%, что сопоставимо с аналогичными технологиями разной архитектуры.

**Ключевые слова:** цикл Аллама; внутрицикловая газификация угля; углекислый газ; термодинамическая эффективность; процесс Тексако; синтез-газ; метан.

**Для цитирования:** Таценко М.Е., Садкин И.С., Щинников П.А. Новая технология на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 124-134. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-124-134.

## NEW TECHNOLOGY BASED ON THE ALLAM CYCLE WITH INTRA-CYCLE COAL GASIFICATION

Tatsenko M.E., Sadkin I.S., Shchinnikov P.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia  
tatsenko2010@yandex.ru

**Abstract:** RELEVANCE. Development of a new technology based on the Allam cycle with in-cycle coal gasification. THE PURPOSE. Determine the thermal efficiency of the Allam cycle with in-cycle coal gasification. Calculate the synthesis gas combustion process. Consider the provisions of thermodynamic analysis of energy cycles. Compare the considered technology with other technologies of electric power generation on organic fuel. METHODS. The method for calculating the synthesis gas combustion process consists in determining the mass-flow

characteristics of the fuel, oxidizer, working fluids and thermal efficiency, which allows comparing the considered technology with others. In the proposed method, it is assumed that pure synthesis gas is burned at a stoichiometric ratio of the supplied oxygen. Limitations of the presented method are the thermodynamic parameters of the input, which will determine the enthalpies of the working fluid and water vapor at the calculated points, as well as the ambient temperature, on which the pressure at the outlet of the CO<sub>2</sub> turbine will depend. **RESULTS.** The article proposes a method for determining the thermal efficiency of the Allam cycle with in-cycle coal gasification. The method is based on the calculation of synthesis gas combustion and the provisions of thermodynamic analysis of energy cycles. Using the developed method, the thermal efficiency of the electricity generation technology based on the Allam cycle with in-cycle gasification of Kuznetsk coal in the Texas process is analyzed. The considered technology is compared with other technologies for generating electricity on organic fuel. **CONCLUSION.** It was calculated that the synthesis gas consumption for the considered technology is approximately 4.3 times higher than for the Allam cycle with oxygen combustion of methane. It is shown that the proportion of working fluid renewal for the technology based on the Allam cycle with in-cycle coal gasification is 1.6 times higher than that of a similar CO<sub>2</sub> cycle on methane. It is shown that the thermal efficiency of the technology is 65.5%, which is comparable with similar technologies of different architectures.

**Keywords:** Allam cycle; in-cycle coal gasification; carbon dioxide; thermodynamic efficiency; Texaco process; synthesis gas; methane.

**For citation:** Tatsenko M.E., Sadkin I.S., Shchinnikov P.A. New technology based on the Allam cycle with intra-cycle coal gasification. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (6): 124-134. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-124-134.

### **Введение (Introduction)**

В связи с необходимостью сокращения углеродного следа [1, 11, 15], как в мировой энергетике, так и в энергетике нашей страны [2] возникает необходимость перехода на новые технологии генерации электроэнергии [3, 6]. Такой переход справедлив, в том числе, и для энергетики на органическом топливе [4, 5, 29]. В этом случае требуется создание технологий, которые позволят снизить выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу. В России ситуация осложняется наличием в энергобалансе страны высокой доли генерации электроэнергии на органическом топливе.

Одним из вариантов решения проблемы является разработка технологий на основе CO<sub>2</sub>-циклов при внутрицикловой газификации угля [6]. Наиболее известным из CO<sub>2</sub>-циклов и наиболее проработанным является цикл Аллама [7]. В основе его работы лежит применение углекислоты в качестве рабочего тела, которую получают при сжигании метана в кислороде. Рабочее тело непрерывно обновляют за счет сжигания свежего топлива, необходимого для подвода энергии к циклу. Избыток углекислоты непрерывно выводят из цикла. В этом случае не требуется процесс секвестирования углекислоты, что делает технологию экологически привлекательной. Также непрерывно выводят из цикла и водяные пары в процессе конденсации, которые образуются при сжигании метана.

Сочетание технологии на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля позволит вовлечь в энергобаланс твердое топливо без увеличения экологической нагрузки на атмосферу. Подобные технические решения рассматриваются компаниями 8 Rivers (США) [8]. Такие установки представляют несомненный интерес и требуют изучения.

В статье предлагается методика определения термической эффективности цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля. В основе методики лежат расчет горения синтез-газа и положения термодинамического анализа энергетических циклов. С использованием разработанного метода проведен анализ термической эффективности технологии производства электроэнергии на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией кузнецкого угля в процессе Техасо. Проведено сравнение рассматриваемой технологии с другими технологиями генерации электроэнергии на органическом топливе.

В установке реализуют принцип интеграции внутрицикловой газификации угля с углекислым циклом Аллама [7]. Это позволяет существенно повысить экологичность производства электроэнергии при использовании угля в качестве топлива, так как выбросы загрязняющих веществ связаны только с работой газификатора [9]. Они характеризуются золой и продуктами очистки синтез-газа [10]. Выбросов в атмосферу продуктов сгорания синтез-газа нет, так как углекислый цикл Аллама реализуют при кислородном сжигании, в результате которого образуются водяные пары, выводимые из цикла в процессе конденсации и углекислота, являющаяся рабочим телом, избыток

которой выводят на захоронение.

Принцип работы установки заключается в следующем. Уголь в системе топливоприготовления (ТП) преобразуют в водоугольную суспензию ВУС (рис. 1). ВУС направляют в газификатор типа Техасо (ГФ) [9], где получают синтез-газ. Для этого в газификатор подводят кислород и охлаждающую воду, которая циркулирует в замкнутом контуре. Кроме синтез-газа в газификаторе получают золу, которую выводят на захоронение. Синтез-газ после системы очистки (ОС) при помощи компрессора (КСГ) направляют в камеру сгорания (КС) для сжигания. Продукты, полученные в результате очистки синтез-газа так же выводят на захоронение. В КС обеспечивают сжигание синтез-газа за счет кислорода, подведенного с рабочим телом. В результате образуют смесь, состоящую из углекислоты и водяных паров, доля которых невысока. Полученная смесь, по сути, является обновленным рабочим телом, которое совершает работу в  $\text{CO}_2$ -турбине ( $\text{CO}_2 - \text{T}$ ) [12, 30]. После  $\text{CO}_2$ -турбины рабочее тело направляют в двухступенчатый рекуперативный теплообменник (ТО1, ТО2), где обеспечивают нагрев подводимого к КС потока. В этом процессе обеспечивается конденсация водяных паров и вывод их за пределы цикла, а также вывод избытка углекислоты на захоронение. Конденсат водяных паров используют также для производства ВУС. После рекуператора рабочее тело поступает в двухступенчатую систему повышения давления, где в качестве первой ступени выступает компрессор (К), а в качестве второй – питательный насос высокого давления (ПНВД). Здесь же обеспечивают отвод теплоты в окружающую среду через теплообменники (ТО) воздушного охлаждения. Подачу воздуха обеспечивают дутьевыми вентиляторами (ДВ). Кислород для обеспечения горения синтез-газа получают в воздухозаделительной установке (ВРУ) [13] и при помощи компрессора (КК) подают в контур рабочего тела, где он смешивается с углекислотой, после чего в виде смеси поступает в КС. Кроме того кислород подают на ГФ для обеспечения газификации угля. Электроэнергию получают в генераторе (Г).

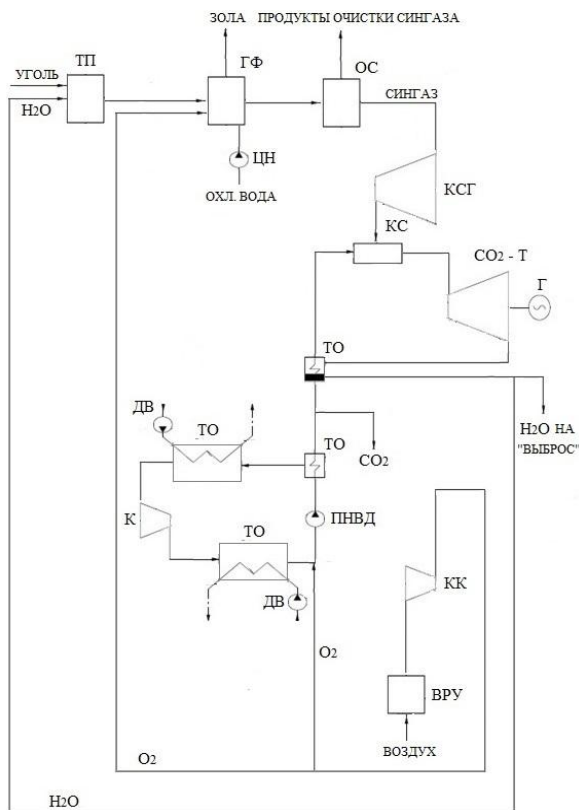


Рис. 1. Принципиальная схема установки на основе цикла Аллама и внутрицикловой газификации угля по методу Тексако [9]: ТП – топливоподача; ГФ – газификатор; ОС – система очистки сингаза; КС – камера сгорания; CO<sub>2</sub>-Т – CO<sub>2</sub>-турбина; Г – генератор; ТО – теплообменник; К – компрессор; ПНВД – питательный насос; КСГ – компрессор синтез-газа; КК – компрессор кислорода; ВРУ – воздухоразделительная установка; ДВ – дутьевой вентилятор; ЦН – циркуляционный насос

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

**Fig. 1. Schematic diagram of the Allam cycle and in-cycle coal gasification plant using the Texas method [9]:** ТП – fuel feed; ГФ – gasifier; ОС – syngas cleaning system; КС – combustion chamber; CO<sub>2</sub>-Т – CO<sub>2</sub> turbine; Г – generator; ТО – heat exchanger; К – compressor; ПНВД – feed pump; КСГ – synthesis gas compressor; КК – oxygen compressor; БВ – air separation unit; ДБ – blast fan; ЦН – circulation pump

Установка обладает следующими преимуществами [14]:

- использует уголь в качестве топлива при высокой термодинамической эффективности процессов, недостижимой в других угольных технологиях генерации электроэнергии;
- отсутствуют выбросы загрязняющих веществ в виде  $\text{CO}_2$  в атмосферу;
- обеспечивается интеграция термодинамического цикла Аллама, воздухоразделительной установки приготовления кислорода, системы приготовления водоугольного топлива и газификатора за счет организации перетоков вещества;
- установка имеет потенциал усовершенствования за счет энергетической интеграции потоков ее разных систем.

Анализ работоспособности представленной установки представляет интерес. Задачей исследования является оценка ее энергетических и массо-расходных показателей. Эти данные могут быть использованы при проектировании ее систем, узлов и агрегатов.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

В предложенном методе принято, что сжигают чистый синтез-газ, при стехеометричности соотношения подводимого кислорода. В этом случае процесс горения определяют две реакции:



Количество углекислоты и водорода, необходимого для генерации 1 кг  $\text{CO}_2$  можно определить по выражениям, кг/кг:

$$G_{\text{CO}} = \frac{\mu_{\text{CO}}}{\mu_{\text{CO}_2}} \quad (3)$$

$$G_{\text{H}_2} = \frac{\frac{\omega_{\text{H}_2} \cdot \rho_{\text{H}_2}}{\omega_{\text{CO}} \cdot \rho_{\text{CO}} + \omega_{\text{H}_2} \cdot \rho_{\text{H}_2}} \cdot \frac{\mu_{\text{H}_2\text{O}}}{\mu_{\text{H}_2}}}{\frac{\mu_{\text{CO}_2}}{\mu_{\text{CO}}}} \cdot \frac{\mu_{\text{H}_2}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (4)$$

В этих выражениях  $\mu$  – молярная масса вещества;  $\omega$  – объемные доли вещества;  $\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_{\text{CO}} = 1,25$ ;  $\rho_{\text{H}_2} = 0,0899$ ).

Расход синтез-газа на генерацию 1 кг  $\text{CO}_2$  определяют по формуле:

$$G_{\text{син-газ}} = G_{\text{CO}} + G_{\text{H}_2} \quad (5)$$

Расход кислорода при сжигании синтез-газа на генерацию 1 кг  $\text{CO}_2$  можно определить по выражению, кг/кг:

$$G_{\text{O}_2} = \frac{\mu_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{CO}_2}} + G_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{\mu_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (6)$$

где  $G_{\text{H}_2\text{O}}$  – количество водяных паров, получаемых при генерации 1 кг  $\text{CO}_2$ , кг/кг.

Количество теплоты [16], выделяемой при сжигании синтез-газа при генерации 1 кг  $\text{CO}_2$  определяется формулой, МДж:

$$Q = Q_n^p \cdot \zeta_{\text{син-газ}} \quad (7)$$

В этом выражении  $Q_n^p$  – низшая рабочая теплота сгорания синтез-газа, МДж/кг.

В расчете термодинамической эффективности рассматривается углекислый цикл Аллама, особенность которого заключается в двухступенчатом повышении давления рабочего тела (рис. 2) [17]. В процессе 5-0 обеспечивают подвод энергии (Q) за счет сжигания топлива в камере сгорания [18]. В процессе 0-1 совершается работа в  $\text{CO}_2$ -турбине [12]. В процессе 1-2' обеспечивают передачу теплоты в рекуператоре через сопряженный процесс 4-5. Отвод теплоты в окружающую среду ведут через процессы 2'-2 и 3'-3. Повышение давления обеспечивают сначала компрессором (процесс 2-3'), а затем насосом (процесс 3-4) [19]. В обоих случаях затрачивают работу сжатия  $l_k$  и  $l_n$ . Вывод водяных паров осуществляют после их конденсации в процессе 1-2', а вывод избытка  $\text{CO}_2$  при его рабочем давлении.

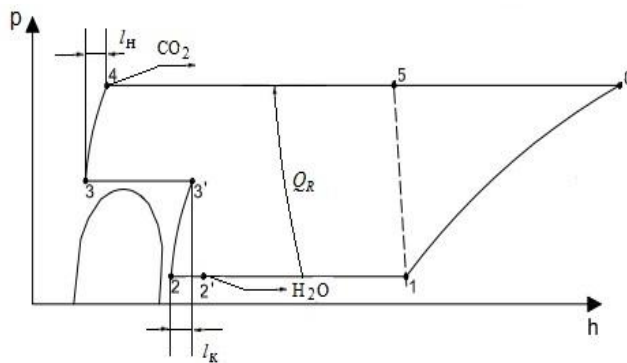


Рис. 2. Цикл Аллама в ph-диаграмме: *Fig. 2. Allam cycle in the ph-diagram: Q – supplied energy; QR – heat of testing in the recuperator; lH, lK – work in the pump and compressor; 0-5 – characteristic points of the mode*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для представленной схемы установки термический КПД цикла с учетом работы сжатия может быть найден по выражению:

$$\eta_t = \frac{(h_0^{CO_2} - h_1^{CO_2}) + (h_0^{H_2O} - h_1^{H_2O}) \cdot \zeta_{H_2O} \cdot \delta - l_k - l_n}{\delta \cdot Q \cdot 10^3} \quad (8)$$

В этом выражении: Q – подведенная энергия [16], МДж; h – энтальпия углекислоты и водяных паров в характерных точках цикл, кДж/кг; lK, lH – работа сжатия в компрессоре и насосе; кДж/кг;  $\delta$  – доля обновления рабочего тела в цикле.

Доля обновления углекислоты в цикле определяется выражением (9):

$$\delta = \frac{h_0^{CO_2} - h_5}{Q - h_5 - \zeta_{H_2O} \cdot h_0^{H_2O}} \quad (9)$$

Ограничениями на представленный метод являются термодинамические параметры входа [20], которыми будут определяться энтальпии рабочего тела и водяных паров в расчетных точках, а также температура окружающей среды, от которой будет зависеть давление ( $P_1$ ) на выходе из CO<sub>2</sub>-турбины [12].

Для определения термического КПД цикла ( $\eta_t$ ) без учета работы сжатия, в выражении (8) требуется приравнять к нулю значения lK и lH.

Представленный метод позволяет определить массо-расходные показатели установки, которые необходимы при последующем определении в проектных расчетах параметров и характеристик ее систем и агрегатов. Показатели термической эффективности позволят в последующем получить значения энергетической эффективности представленной технологии, в том числе и расходы топлива.

#### Результаты и обсуждение (Results and discussions)

В настоящей работе рассматривается газификация в процессе Тексако. В этом случае газифицируют водоугольное топливо. Процесс позволяет получить высококалорийный газ из-за наличия воды. При газификации в таком процессе каменного (например, Кузнецкого) угля [21], может быть получен синтез-газ с низшей теплотой сгорания более 15 МДж/кг, представленный в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Состав и свойства синтез-газа [22]

Composition and properties of synthesis-gas [22]

Объемные доли						Низшая теплота сгорания		Плотность
CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	A	SO <sub>2</sub>	кДж/м <sup>3</sup>	кДж/кг	кг/м <sup>3</sup>
0,397	0,531	0,013	0,058	0	0,001	10693	15426	0,693

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В работе полагают, что в камеру сгорания синтез-газ поступает очищенный от всех примесей, тогда объемные доли его компонентов составляют  $\omega_{CO} = 0,44$  и  $\omega_{H_2} = 0,56$ .

Расчеты ведут при параметрах входа  $P_0 = 300$  бар и  $t_0 = 1200^\circ\text{C}$ . Давление на выходе из  $\text{CO}_2$ -турбины составляет  $P_1 = 30$  бар. Термодинамические характеристики рабочего тела определены при помощи пакетов CoolPack и WaterSteamPro в таблице 2.

Таблица 2  
Table 2

Энтальпии рабочего тела в расчетных точках термодинамического цикла, кДж/кг  
*Enthalpies of the working fluid at the calculated points of the thermodynamic cycle, kJ/kg*

Наименование	Обозначение	Значение
Энтальпия $\text{CO}_2$ на входе в $\text{CO}_2$ -турбину	$h_0^{\text{CO}_2}$	1876
Энтальпия $\text{H}_2\text{O}$ на входе в $\text{CO}_2$ -турбину	$h_0^{\text{H}_2\text{O}}$	5078
Энтальпия $\text{CO}_2$ на выходе из $\text{CO}_2$ -турбины	$h_1^{\text{CO}_2} \approx h_5^{\text{CO}_2}$	1317
Энтальпия $\text{H}_2\text{O}$ на выходе из $\text{CO}_2$ -турбины	$h_1^{\text{H}_2\text{O}}$	4075
Энтальпия $\text{CO}_2$ на входе в камеру сгорания	$h_5$	1317
Затраты энергии на работу компрессора	$l_k$	40
Затраты энергии на работу насоса	$l_n$	30

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для сжигания синтез-газа применяют кислород с чистотой выше 99,5%, его количество определяется стехиометричностью реакций горения. Все расчеты проведены при условии выхода из камеры сгорания 1 кг  $\text{CO}_2$  (рис. 3).

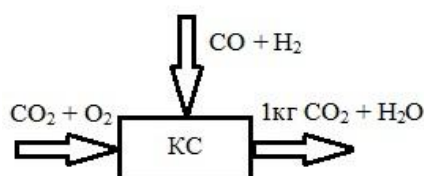


Рис. 3. К материальному балансу камеры сгорания Fig. 3. To the material balance of the combustion chamber

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты расчетов показывают, что количество топлива в виде синтез-газа, необходимого для получения на выходе из камеры сгорания 1 кг  $\text{CO}_2$ , в ~ 4,3 раза выше, чем при реализации установки на метане, представленной в таблице 3.

Таблица 3  
Table 3

Массо-расходные характеристики и показатели термической эффективности установки  
*Mass-consumption characteristics and thermal efficiency indicators of the installation*

Наименование	Обозначение	Величина	
		Расчет	Цикл Аллама на метане [23, 24]
Количество, подведенного к камере сгорания $\text{CO}$ , кг/кг $\text{CO}_2$	$G_{\text{CO}}$	0,636	-
Количество, подведенного к камере сгорания $\text{H}_2$ , кг/кг $\text{CO}_2$	$G_{\text{H}_2}$	0,058	-
Количество, подведенного к камере сгорания синтез-газа, кг/кг $\text{CO}_2$	$G_{\text{син-газ}}$	0,694	0,013
Количество, подведенного к камере сгорания $\text{O}_2$ , кг/кг $\text{CO}_2$	$G_{\text{O}_2}$	0,829	0,053
Теплота, подведенная при сжигании синтез-газа, МДж	$Q$	0,793	~0,775
Доля обновления углекислоты в цикле	$\delta$	0,059	~0,037
КПД термический с учетом работы сжатия	$\eta_t$	0,655	~0,605
КПД термический без учета работы сжатия	$\eta_t'$	0,754	~0,69

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Это обусловлено, с одной стороны, химическим составом метана [25] и синтез-газа [10], реакциями их горения и низшей теплотой сгорания топлив. В частности, в рассматриваемом примере теплота сгорания синтез-газа более чем в 3 раза ниже, чем у метана. Этот фактор обуславливает увеличение в 1,6 раза доли обновления ( $\delta$ ) углекислоты в цикле, так как снижение теплоты сгорания топлива требует увеличения его расхода для обеспечения заданных параметров входа (на уровне 1200°C).

Термический КПД рассматриваемого цикла ( $\eta_t$ ) практически сопоставим с аналогичным показателем ГТУ и с учетом работы сжатия составляет 65,5%.

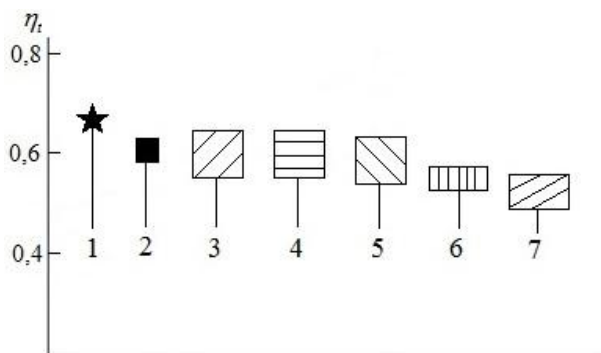


Рис. 4. КПД термический: 1 – расчетное значение для цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля; 2 – цикл Аллама при сжигании метанола [26]; 3 – CO<sub>2</sub>-цикл с одноступенчатым повышением давления насосом [23, 24]; 4 – CO<sub>2</sub>-цикл с конденсацией [23, 24, 27]; 5 – цикл Аллама при сжигании метана [23, 24, 28]; 6 – CO<sub>2</sub>-цикл с одноступенчатым повышением давления компрессором [23, 24]; 7 – ПСУ на органическом топливе

Fig. 4. Thermal efficiency: 1 – calculated value for the Allam cycle with in-cycle coal gasification; 2 – Allam cycle with methane combustion [26]; 3 – CO<sub>2</sub> cycle with single-stage pressure increase by a pump [23, 24]; 4 – CO<sub>2</sub> cycle with condensation [23, 24, 27]; 5 – Allam cycle with methane combustion [23, 24, 28]; 6 – CO<sub>2</sub> cycle with single-stage pressure increase by a compressor [23, 24]; 7 – PSU on organic fuel

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Кроме того, по показателю  $\eta_t$  цикл Аллама с внутрицикловой газификацией угля сопоставим с технологиями CO<sub>2</sub>-циклов различной конфигурации, среди которых рассмотрены варианты с одноступенчатым повышением давления насосом (3), с конденсацией (4) и с одноступенчатым повышением давления компрессором (6) (рис. 4). CO<sub>2</sub>-циклы подобной архитектуры, наряду с циклом Аллама при двухступенчатом повышении давления сначала компрессором, а затем насосом, рассмотрены в работах [23, 24, 27, 28]. Во всех случаях в качестве топлива применяют метан. Также рассмотрен вариант цикла Аллама при сжигании метанола в кислороде (2) [26], и для этого случая показатель  $\eta_t$  является сопоставимым с рассматриваемой в статье технологией.

Одновременно показано, что технология на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля по показателю  $\eta_t$  превосходит технологии ПСУ на органическом топливе (7). Значения термических КПД ПСУ представлены на основе сведений широкого круга публикаций по ним в научной и учебной литературе.

Следует отметить, что для детального сравнения всех рассмотренных в разделе технологий производства электроэнергии требуется проведение широкого исследования, выходящего за рамки представленных в статье материалов.

#### Заключение (Conclusion)

Таким образом, в статье представлена методика определения термического КПД технологии генерации электроэнергии на основе углекислого цикла Аллама при внутрицикловой газификации угля. В основе метода лежат расчет горения синтез-газа и положения термодинамического анализа энергетических циклов. Методика позволяет получить массо-расходные характеристики топлива, окислителя, рабочих тел и термического КПД, что позволяет вести сравнение рассматриваемой технологии с другими.

Расчетным путем получено, что расход синтез-газа для рассматриваемой технологии в ~ 4,3 раза выше, чем для цикла Аллама при кислородном сжигании метана,

что обусловлено разницей в химическом составе метана и синтез-газа и невысокой низшей теплотой сгорания синтез-газа, которая более чем в 3 раза ниже, чем у метана. Показано, что доля обновления рабочего тела для технологии на основе цикла Аллама с внутрицикловой газификацией угля в 1,6 раза выше, чем у аналогичного CO<sub>2</sub>-цикла на метане. Показано, что термический КПД технологии составляет 65,5%, что сопоставимо с аналогичными технологиями разной архитектуры.

#### Литература

1. Елистратов С.Л. Высокотемпературные тепловые насосы / Второй доклад «10 прорывных идей в энергетике на следующие десять лет» Ассоциации по развитию международных исследований и проектов в области энергетики «Глобальная энергия». -2021 -Вып.2 - С. 87-101.
2. Технологии улавливания, полезного использования и хранения двуокси углерода (CCUS) / А.А. Осипцов, И.В. Гайда, Е.В. Грушевенко, С.А. Капитонов // Технологии по улавливанию, хранению и использованию углерода (CCUS) – технологическая основа декарбонизации тяжелой промышленности в РФ, 2022 г. – С. 1-79.
3. Садкин И.С., Щинников П.А. Способ производства электроэнергии на основе закритического CO<sub>2</sub>-цикла. – Патент на изобретение RU2810854 C1, 28.12.2023. Заявка от 06.07.2023.
4. Пиролитическая декомпозиция углей месторождений Казахстана / Ж.М. Касенова // Томский политехнический университет, 2022 г. – С. 1-176.
5. Технологии улавливания диоксида углерода на ТЭС, его транспортировка, полезное использование и захоронение / С.А. Петелин, А.Н. Вивчар, П.В. Бублей, В.А. Сердюков, О.Ю. Сигитов // Экология, энергетика, энергосбережение. -2022 –Вып.3 – С. 1-32.
6. Обзор современных тенденций развития технологий / А.Н. Козлов // Известия РАН. Энергетика -2021 –Вып.1 – С. 130-148.
7. Rodney Allam, Scott Martin, Brock Forrest, Jeremy Fetvedt, Xijia Lu, David Freed, G. William Brown Jr.a, Takashi Sasaki, Masao Itohb, James Manninge Demonstration of the Allam Cycle: An update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture // Energy Procedia – 2017. –С. 5948-5966.
8. R. J. Allam, J. E. Fetvedt, B. A. Forrest and D. A. Freed, “The oxy-fuel, supercritical CO<sub>2</sub> 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).
9. Исследование газификатора Тексако в составе ПГУ / Н.В. Миронова // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 11 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014 – С. 33-37.
10. Обоснование режимов и условий организации процесса газификации твердого органического топлива на основе учета реакционной способности его взаимодействия с диоксидом углерода и водяным паром / Е.А. Бойко, А.В. Страшников // Известия РАН. Энергетика. -2021 – Вып.3 – С. 24-41.
11. IEA (2023), World Energy Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
12. Hideo Nomoto, Masao Itoh, William Brown, Jeremy Fetvedt, “Cycle and Turbine Development for the Supercritical Carbon Dioxide Allam Cycle”, The Proceedings of the International Conference on Power Engineering (ICOPE) (The Japan Society of Mechanical Engineers, 2015).
13. Интеграция воздухоразделительной установки в кислородно – топливные энергетические комплексы / С.К. Осипов, А.Н. Вегера, Д.Б. Куроптев, С.И. Шапалова // ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет "МЭИ". -2020 – 10 С.
14. Актуальность применения внутрицикловой газификации угля на основе CO<sub>2</sub> – цикла / М.Е. Таценко // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 8 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2025 – С. 382-384.
15. Глобальное изменение климата и его последствия / Л. В. Бондаренко, О. В. Маслова, А. В. Белкина, К. В. Сухарева // Вестник РЭУ им. Плеханова. – 2018. - №2. – С. 84-93.
16. Влияние состава синтез-газа на тепловой эффект и количество теплоты, выделяемой в результате его горения / М.Е. Таценко, П.А. Щинников // Енисейская теплофизика, 2025 - С. 69-70.
17. Pat. US 8596075 B2, F02C 1/00, F02C 7/08. System and method for high efficiency power generation using a carbon dioxide circulating working fluid / R. Allam et al; Assignees Palmer Labs, LLC; filed 31.08.2010; publish. 28.07.2011;– 46 p.
18. Progress Update on the Allam Cycle: Commercialization of NET Power and the NET Power Demonstration Facility / Scott Martin\*, Brock Forrest, Navid Rafati, Xijia Lu, Jeremy Fetvedt, Mike

McGroddy, Bill Brown, Rodney Allam, Damian Beauchamp, David Freed // 14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14. - October 2018. - 14 С.

19. Process and Carbon Footprint Analyses of the Allam Cycle Power Plant Integrated with an Air Separation Unit / D. Fernandes, S. Wang, Q. Xu, R. Buss and D. Chen // Clean Technologies. - October 2019. - №1. - pp.325-340

20. Thermodynamic optimization and equipment development for a high efficient fossil fuel power plant with zero emissions / A. Rogalev, E. Grigoriev, V. Kindra, N. Rogalev // Cleaner Production. - 2019. №236.

21. Заостровский А.Н. Петрографическая характеристика генетических типов углей Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 6 (160). С. 54-61. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-54-61, EDN: UUNSMR

22. Комплексное исследование энергоблоков электростанций и энергоустановок: монография/ под общ. ред. П.А. Щинникова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020 – 500 С.

23. Влияние термодинамических параметров на энергетические характеристики CO<sub>2</sub> – циклов при кислородном сжигании метана / С.В. Алексеенко, П.А. Щинников, И.С. Садкин // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. –Т.30, №1. – С.89-98.

24. Analysis of energy consumption for auxiliaries of zero emissions sCO<sub>2</sub> power plants / I.S. Sadkin, O.V. Borush, P.A. Shchinnikov // Energy Convers Manag. 2025. Vol. 323. P. 119266.

25. Углекислотная конверсия метана в синтез – газ / О.В. Крылов // Российский Химический Журнал. Том XLIV (2000) № 1. – С. 19-33.

26. Энергетические особенности CO<sub>2</sub> – циклов при кислородном сжигании метанола / П.А. Щинников, И.С. Садкин, О.В. Боруш, Р.В. Романенко // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т.26, №4 – С. 150-159.

27. Концептуальная схема парагазовой утсановки с полным улавливанием диоксида углерода из продуктов сгорания / А.С. Косой и др. // Теплоэнергетика. – 2018, №9. – С. 23-32.

28. R. J. Allam, Milles R. Palmer, G. William Brown, Jeremy Fetvedt, David Freed, Hideo Nomoto, Masao Itoh, Nobuo Okita, Charles Jones, “High Efficiency and Low Cost of Electricity Generation from Fossil Fuels While Eliminating Atmospheric Emissions, Including Carbon Dioxide”, Energy Procedia, 2013. Vol. 37.P.1135 – 1149.

29. Филиппов С.П., Жданов О.В. Возможности использования технологий улавливания и захоронения диоксида углерода при декарбонизации мировой экономики (обзор). – Теплоэнергетика. – 2022.-№9. – С.5-21.

30. 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.

### Авторы публикации

**Таценко Михаил Евгеньевич** – аспирант ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия. [tatsenko2010@yandex.ru](mailto:tatsenko2010@yandex.ru)

**Садкин Иван Сергеевич** – аспирант ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия.

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

### References

1. Elistratov S.L. High-temperature heat pumps / The second report is "10 Breakthrough Ideas in the energy sector for the next ten years" by the Global Energy Association for the Development of International Energy Research and Projects. -2021 -Issue.2 - pp. 87-101.

2. Technologies for carbon dioxide capture, useful use and storage (CCUS) / A.A. Osipov, I.V. Gaida, E.V. Grushevenko, S.A. Kapitonov // Technologies for carbon capture, storage and use (CCUS) – the technological basis for decarbonization of heavy industry in the Russian Federation, 2022. – P. 1-79.

3. Sadkin I.S., Shchinnikov P.A. A method of generating electricity based on a supercritical CO<sub>2</sub> cycle. – Patent for invention RU2810854 C1, 12/28/2023. Application dated 07/06/2023.

4. Pyrolytic decomposition of coal deposits of Kaazakhstan / J.M. Kasanova // Tomsk Polytechnic University, 2022, pp. 1-176.

5. Technologies for carbon dioxide capture at thermal power plants, its transportation, useful use and burial / S.A. Petelin, A.N. Vivchar, P.V. Bubley, V.A. Serdyukov, O.Y. Sigitov // Ecology, energy, energy conservation. -2022 –Issue.3 – p. 1-32.
6. Review of modern trends in technology development / A.N. Kozlov // Izvestiya RAS. Energy - 2021 –Issue 1 – pp. 130-148.
7. Rodney Allam, Scott Martin, Brock Forrest, Jeremy Fetvedt, Xijia Lu, David Freed, G. William Brown Jr.a, Takashi Sasaki, Masao Itohb, James Manninge Demonstration of the Allam Cycle: An update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture // Energy Procedural – 2017. –pp. 5948-5966.
8. R. J. Allam, J. E. Fetvedt, B. A. Forrest and D. A. Freed, “The oxy-fuel, supercritical CO<sub>2</sub> 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).
9. Texaco gasifier research in the CCGT / N.V. Mironova // Science. Technologies. Innovation. Materials of the All-Russian Scientific Conference of young scientists at 11 a.m. - Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2014 – pp. 33-37.
10. Substantiation of the modes and conditions of the organization of the gasification process of solid organic fuels based on the reactivity of its interaction with carbon dioxide and water vapor / E.A. Boyko, A.V. Strashnikov // Izvestiya RAS. Energy. -2021 –Issue.3 – pp. 24-41.
11. IEA (2023), World Energy Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
12. Hideo Nomoto, Masao Itoh, William Brown, Jeremy Fetvedt, “Cycle and Turbine Development for the Supercritical Carbon Dioxide Allam Cycle”, The Proceedings of the International Conference on Power Engineering (ICOPE) (The Japan Society of Mechanical Engineers, 2015).
13. Integration of an air separation plant into oxygen–fuel systems energy complexes / C.K. Osipov, A.N. Vegeera, D.B. Kuroptev, S.I. Shapalova // Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI". -20 -20 – 10 S .
14. The relevance of the use of intracycle coal gasification based on the CO<sub>2</sub> cycle / M.E. Tatsenko // Science. Technologies. Innovation. Materials of the All-Russian Scientific Conference of young Scientists at 8 a.m. - Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2025 – pp. 382-384.
15. Global climate change and its consequences / L. V. Bondarenko, O. V. Maslova, A.V. Belkina, K. V. Sukhareva // Bulletin of the Russian University of Economics. Plekhanov. – 2018. - №2. – C. 84-93.
16. The influence of the composition of synthesis gas on the thermal effect and the amount of heat released as a result of its gorenje / M.E. Tatsenko, P.A. Shchinnikov // Yeniseiskaya thermophysica, 2025 - pp. 69-70.
17. Pat. US 8596075 B2, F02C 1/00, F02C 7/08. System and method for high efficiency power generation using a carbon dioxide circulating working fluid / R. Allam et al; Assignees Palmer Labs, LLC; filed 31.08.2010; publish. 28.07.2011;– 46 p.
18. Progress Update on the Allam Cycle: Commercialization of NET Power and the NET Power Demonstration Facility / Scott Martin\*, Brock Forrest, Navid Rafati, Xijia Lu, Jeremy Fetvedt, Mike McGroddy, Bill Brown, Rodney Allam, Damian Beauchamp, David Freed // 14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14. - October 2018. – 14 P.
19. Process and Carbon Footprint Analyses of the Allam Cycle Power Plant Integrated with an Air Separation Unit / D. Fernandes, S. Wang, Q. Xu, R. Buss and D. Chen // Clean Techonologies. – October 2019. – №1. – pp.325-340
20. Thermodynamic optimization and equipment development for a high efficient fossil fuel power plant with zero emissions / A. Rogalev, E. Grigoriev, V. Kindra, N. Rogalev // Cleaner Production. – 2019. №236.
21. Zaoistrovsky A.N. Petrographic characteristics of genetic types of Kuzbass coals // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023. No. 6 (160). pp. 54-61. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-54-61, EDN: UUNSMR
22. Comprehensive study of power units of power plants and power plants: monograph/ under the general editorship of P.A. Shchinnikov. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2020 – 500 p.
23. Influence of thermodynamic parameters on the energy characteristics of CO<sub>2</sub> cycles during oxygen combustion of methane / S.V. Alekseenko, P.A. Shchinnikov, I.S. Sadkin // Thermophysics and aeromechanics. – 2023. –Vol.30, No. 1. – pp.89-98.
24. Analysis of energy consumption for auxiliaries of zero emissions sCO<sub>2</sub> power plants / I.S. Sadkin, O.V. Borush, P.A. Shchinnikov // Energy Conversmanag. 2025. Vol. 323. P. 119266.
25. Carbon dioxide conversion of methane into synthesis gas / O.V. Krylov // Russian Chemical Journal. Volume XLIV (2000) No. 1. pp. 19-33.

26. Energetic features of CO<sub>2</sub> cycles during oxygen combustion of methane / P.A. Shchinnikov, I.S. Sadkin, O.V. Borush, R.V. Romanenko // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2024. – Vol.26, No. 4 – pp. 150-159.

27. The final scheme of a paragasic assembly with complete capture of carbon dioxide from combustion products / A.S. Kosoy et al. // Teploenergetika. - 2018, No. 9, pp. 23-32.

28. R. J. Allam, Milles R. Palmer, G. William Brown, Jeremy Fetvedt, David Freed, Hideo Nomoto, Masao Itoh, Nobuo Okita, Charles Jones, "High Efficiency and Low Cost of Electricity Generation from Fossil Fuels While Eliminating Atmospheric Emissions, Including Carbon Dioxide", Energy Procedia, 2013. Vol 37.P.1135-1149.

29. Filippov S.P., Zhdanov O.V. Possibilities of using carbon dioxide capture and storage technologies in the decarbonization of the global economy (review). - Thermal Power Engineering. - 2022.- N9. - P.5-21.

30. Development of a methodology for the 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 IGEU" Issue. 3 2018 - P. 5-14.

### **Authors of the publication**

**Mikhail E. Tatsenko** – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. [tatsenko2010@yandex.ru](mailto:tatsenko2010@yandex.ru)

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

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

*Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы*

**Получено** **14.09.2025 г.**

**Отредактировано** **02.10.2025 г.**

**Принято** **01.11.2025 г.**