

УДК 620.4

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЛУЗАКРЫТЫХ ЦИКЛОВ С КИСЛОРОДНЫМ СЖИГАНИЕМ ТОПЛИВА И УГЛЕКИСЛОТНО-ПАРОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

© 2023 г. В. О. Киндра¹, *, И. И. Комаров¹, С. К. Осипов¹,
О. В. Злышко¹, В. Ю. Наумов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

*e-mail: kindra.vladimir@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.10.2022 г.

После доработки 17.02.2023 г.

Принята к публикации 20.02.2023 г.

Снижение выбросов вредных веществ при производстве электроэнергии на тепловых электрических станциях возможно за счет перехода на полужакрытые газотурбинные циклы с кислородно-топливным сжиганием и углекислотно-паровым рабочим телом. Их основными преимуществами по сравнению с закрытыми циклами Ренкина на водяном паре и открытыми циклами Брайтона на продуктах сгорания топливно-воздушной смеси являются отсутствие опасности образования токсичных веществ и эффективная, основанная на термодинамическом принципе сепарация компонентов теплоносителя, позволяющая впоследствии утилизировать диоксид углерода высокой чистоты. В настоящей работе представлены результаты термодинамического анализа энергетических показателей наиболее известных кислородно-топливных циклов с углекислотно-паровым рабочим телом. Подробно описана методика моделирования тепловых схем перспективных энергетических комплексов, учитывающая потери на охлаждение высокотемпературных углекислотных турбин, затраты энергии на производство и сжатие кислорода, а также сжатие углекислого газа перед захоронением. По результатам математического моделирования установлено, что электрический КПД нетто для полужакрытого комбинированного цикла с кислородным сжиганием топлива может достигать значения 44.5% при температуре на входе в газовую турбину 1400°С, а для цикла Аллама – 43.2% при 1100°С.

Ключевые слова: выбросы, диоксид углерода, эффективность, рециркуляция, воздуходелительная установка, энергетический баланс, моделирование

DOI: 10.31857/S0002331023030056, EDN: TAMVRV

ВВЕДЕНИЕ

Вклад энергетического сектора в глобальные экологические проблемы

Непрерывное увеличение численности населения и высокие темпы индустриализации привели к аномальному росту потребления ископаемого топлива, наблюдающемуся на протяжении последних 70 лет. Намечившаяся тенденция предопределила ряд серьезных экологических последствий, обусловленных значительными выбросами токсичных веществ и парниковых газов в атмосферу. Анализ многочисленных прогнозных данных позволяет прийти к выводу, что избежать существенных экономических потерь и обеспечить достижимость критериев устойчивого развития возможно за счет перехода к экологически безопасным технологиям производства [1].

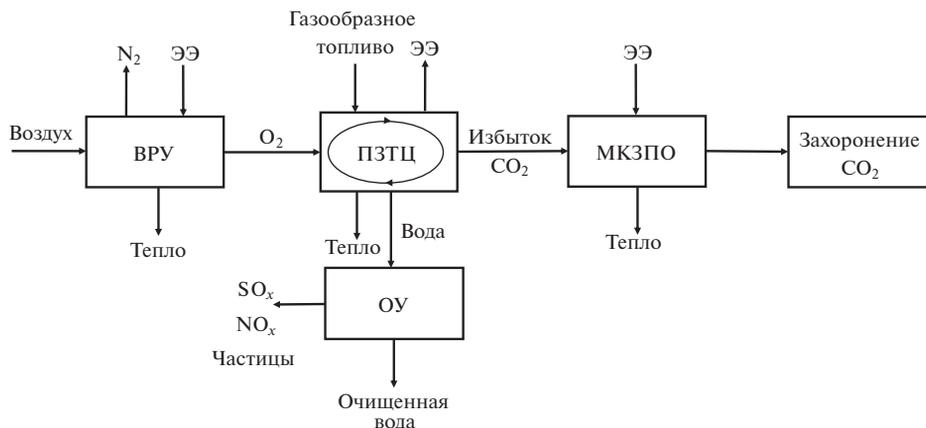


Рис. 1. Концептуальная схема материальных и энергетических потоков КТЭК.

Очевидно, что для эффективного снижения выбросов необходимо сосредоточить основные усилия на предотвращении их образования для наиболее крупных источников. Результаты статистического анализа свидетельствуют о существенном вкладе энергетического сектора в общей структуре выбросов токсичных веществ и парниковых газов [2]. В частности, в результате добычи и сжигания нефти, природного газа и угля на электростанциях образуется порядка 13–19% оксидов азота, 56–60% оксидов серы, 30% углекислого газа. При этом на долю тепловых электрических станций приходится примерно 25% мировых выбросов парниковых газов [3].

Значительный вклад энергетической отрасли в общей структуре выбросов связан с широким распространением тепловых электрических станций, работающих по циклам Ренкина, Брайтона и Брайтона–Ренкина. Традиционные технологии обладают высокой эффективностью, однако их недостатком является большое количество выбросов. При внедрении традиционных технологий предотвращения образования и улавливания вредных веществ, эффективность значительно снижается, а удельная стоимость установленной мощности растет. Более того, степень улавливания из уходящих газов диоксида углерода для существующих установок гораздо меньше заявляемых 90% [4].

Достичь практически полного сокращения выбросов токсичных веществ и неконденсирующихся парниковых газов от тепловых электрических станций возможно за счет перехода на кислородно-топливные энергетические комплексы (КТЭК) (рис. 1) [5]. Данные установки включают в себя полузакрытый топливный цикл (ПЗТЦ), многоступенчатый компрессор сжатия углекислого газа для подачи на захоронение (МКЗПО), воздухоразделительную установку (ВРУ) для получения кислорода и очистительное устройство (ОУ) для удаления из цикла конденсата и вредных веществ. Их основным преимуществом по сравнению с закрытыми циклами Ренкина на водяном паре и открытыми циклами Брайтона на продуктах сгорания топливно-воздушной смеси является кислородное сжигание углеводородов, обеспечивающее отсутствие опасности образования токсичных веществ и эффективную, основанную на термодинамическом принципе, сепарацию компонентов теплоносителя, позволяющую впоследствии утилизировать диоксид углерода высокой чистоты.

Первые модификации данных циклов появлялись еще в конце прошлого века. Сегодня США, Япония и европейские страны активно развивают данное направление. За счет выделения грантов, субсидирования “зеленых” технологий производства электро-

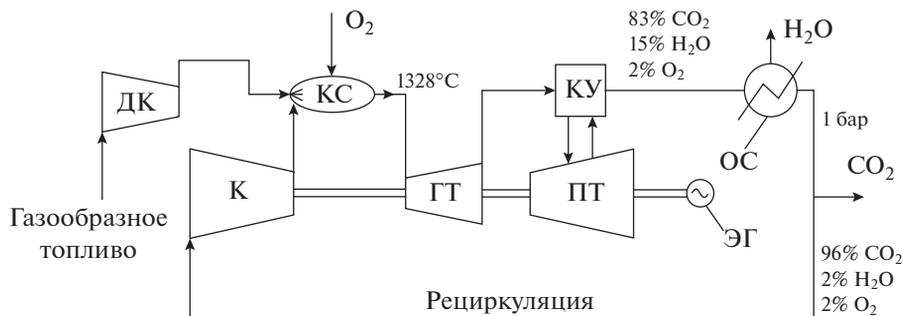


Рис. 2. Принципиальная тепловая схема полужакрытого цикла с кислородным сжиганием топлива.

энергии, создания законодательных баз, стимулирующих сокращение выбросов, проводятся научные исследования, строятся экспериментальные установки и создаются предпосылки для создания серийного производства энергоблоков с “нулевыми” выбросами вредных веществ. Крупные энергетические корпорации объединяют усилия с целью создания демонстрационных установок, способных отпускать до 50 МВт электроэнергии в сеть [6]. Для России данное направление также является актуальным в связи с необходимостью снижения выбросов вредных веществ в атмосферу и высокой вероятностью введения трансграничного углеродного налога. Для оценки перспективности использования КТЭК для производства электроэнергии необходимо провести ряд исследований, а именно: оценить термодинамическую эффективность, разработать энергетическое оборудование, произвести оценку экономической эффективности установки. Таким образом, целью настоящей работы является оценка и сравнение термодинамической эффективности перспективных КТЭК.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования были выбраны наиболее перспективные кислородно-топливные циклы с рециркуляцией диоксида углерода в камеру сгорания: полужакрытый комбинированный цикл с кислородным сжиганием топлива (SCOC-CC) и цикл Аллама. Основное отличие данных установок заключается в использовании различных способов утилизации теплоты потока на выходе из газовой турбины: в цикле SCOC-CC применяется утилизационный паротурбинный цикл, а в цикле Аллама – регенератор.

Полужакрытый комбинированный цикл с кислородным сжиганием топлива и углекислотно-паровым рабочим телом

Полужакрытый комбинированный цикл с кислородным сжиганием топлива имеет наиболее простую среди прочих кислородно-топливных циклов конфигурацию. По сути это аналог бинарного цикла Брайтона–Ренкина с кислородно-топливной камерой сгорания, в которую подается поток углекислого газа на рециркуляцию (рис. 2).

Цикл SCOC–CC работает следующим образом. В камеру сгорания (КС) дожимным компрессором (ДК) подается топливо и кислород. Образующиеся продукты сгорания более чем на 80% состоящие из диоксида углерода при температуре 1400°C подаются в газовую турбину (ГТ), соединенную с электрогенератором (ЭГ). После совершения работы в газовой турбине рабочая среда поступает в котел-утилизатор (КУ), служащий для генерации пара, направляющегося в паровую турбину (ПТ). Дымовые газы после КУ попадают в охладитель-сепаратор (ОС), где происходит конденсация и отделение

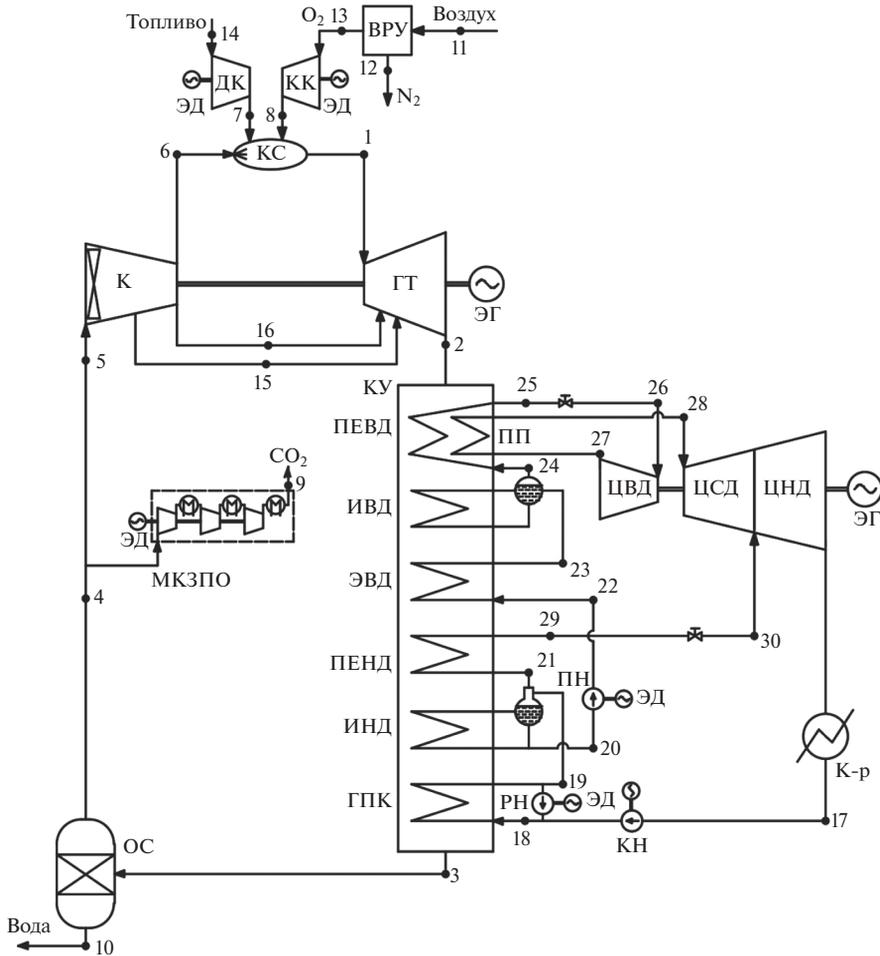


Рис. 3. Принципиальная тепловая схема цикла SCOC-CC: ПП – промежуточный пароперегреватель; ПЕВД и ПЕНД – пароперегреватели высокого и низкого давления; ИВД, ИНД – испарители высокого и низкого давления; ЭВД – экономайзер высокого давления; ГПК – газовый подогреватель конденсата; ЦВД, ЦСД, ЦНД – цилиндр высокого, среднего и низкого давления паровой турбины; К-р – конденсатор; КН – конденсатный насос; РН – рециркуляционный насос; ПН – питательный насос; ЭД – электродвигатель.

большей части воды при давлении, близком к атмосферному. Далее меньшая часть потока диоксида углерода выводится из цикла с целью последующего захоронения. Большая часть рабочей среды, состоящей преимущественно из углекислого газа, подается на вход компрессора (К) для последующей рециркуляции в камеру сгорания.

Более подробная принципиальная тепловая схема полузакрытого комбинированного цикла, представленная на рис. 3, использовалась при создании математической модели. Ее отличительными признаками являются:

- использование двухконтурного котла-утилизатора с промежуточным перегревом для генерации пара;
- использование барабана низкого давления, совмещенного с деаэрационной колонкой;

- использование ВРУ;
- использование дожимного компрессора для сжатия природного газа;
- использование компрессора кислорода (КК);
- использование многоступенчатого компрессора захоронения с промежуточным охлаждением.

Главным преимуществом данного цикла является использование отработанной паротурбинной технологии для утилизации теплоты потока на выходе из газовой турбины. Основным недостатком являются значительные затраты энергии на привод компрессора вследствие сжатия диоксида углерода в газообразном состоянии. Кроме того, необходима организация двух циклов на различных теплоносителях, что повышает стоимость установки.

Цикл Аллама

Ряд перечисленных выше недостатков цикла SCOC-CC были устранены в цикле Аллама, а именно: уменьшение работы сжатия углекислого газа за счет использования промежуточного охлаждения и использование одного вида теплоносителя. В цикле Аллама углекислый газ сжимается в многоступенчатом компрессоре с промежуточным охлаждением (МКПО CO₂) и поступает в углекислотный насос (Н), где давление рабочего тела повышается до максимального. После насоса диоксид углерода направляется в регенератор (Р), где нагревается за счет потока рабочего тела после газовой турбины и горячего потока воздуха из ВРУ. Использование низкопотенциальной теплоты ВРУ, получаемой за счет охлаждения воздуха после осевого компрессора, позволяет увеличить количество регенерируемой в цикле теплоты. После регенератора большая часть потока углекислого газа направляется в камеру сгорания для ограничения начальной температуры, оставшаяся подается в систему охлаждения газовой турбины. В камере сгорания углекислый газ смешивается с потоками сжатого кислорода и природного газа, после чего происходит кислородно-топливное сжигание и нагрев рабочей среды до температуры на входе в турбину. Благодаря рециркуляции диоксида углерода рабочее тело более чем на 90% состоит из углекислого газа. Расширение в проточной части газовой турбины происходит до давления 30 бар, что меньше критического давления для углекислого газа. Таким образом, степень расширения в турбине равняется 10 [7]. После газовой турбины рабочее тело подается в регенератор.

Принципиальная тепловая схема цикла Аллама, представленная на рис. 4, использовалась при разработке математической модели. Ее отличительными признаками являются наличие следующих элементов:

- регенератора, который состоит из двух двухпоточных теплообменников (первый теплообменник используется для подогрева теплоносителя, используемого в качестве хладагента газовой турбины, с помощью теплоты сжатого в ВРУ воздуха, а второй теплообменник осуществляет подогрев диоксида углерода на выходе из углекислотного насоса с помощью теплоты, содержащейся в выхлопных газах газовой турбины);
- многоступенчатого компрессора для сжатия кислорода с промежуточным охлаждением (МККПО);
- многоступенчатого компрессора с промежуточным охлаждением для сжатия углекислого газа в энергетическом цикле.

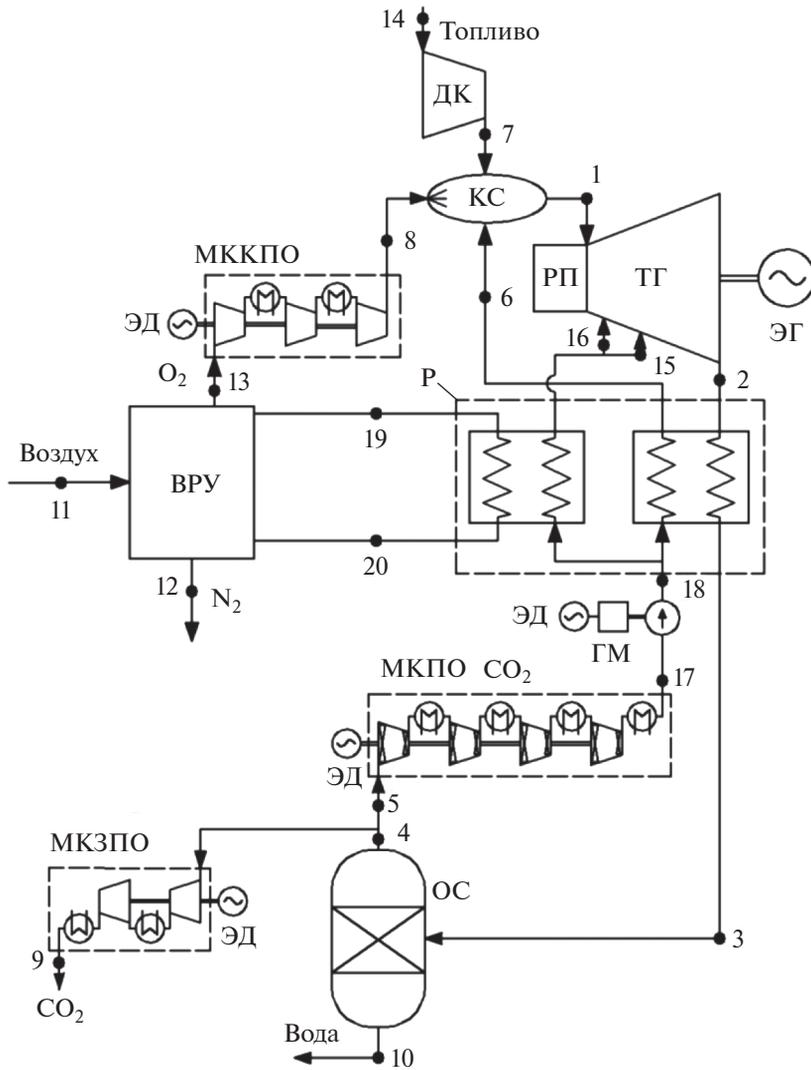


Рис. 4. Принципиальная тепловая схема цикла Аллама: ГМ – гидромuffа; РП – разгрузочный поршень.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ СХЕМ КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Общие подходы к моделированию

Разработанная математическая модель КТЭК состоит из трех частей, соединенных между собой материальными и энергетическими связями (рис. 1): модель ВРУ, модель ПЗТЦ и модель МКЗПО, сжимающего удаляемый на захоронение углекислый газ.

Для моделирования КТЭК использовался программный комплекс Aspen Plus [8], имеющий большое количество встроенных математических моделей оборудования и способов определения теплофизических свойств чистых веществ и их смесей. Система охлаждения газовой турбины моделировалась в соответствии с методикой, описан-

Таблица 1. Исходные данные для моделирования тепловых схем

Параметр	Единица измерения	SCOC-CC	Аллам
Температура на входе в газовую турбину	°С	1400	1100
Давление на входе в газовую турбину	МПа	6	30
Давление в охладителе-сепараторе	МПа	0.1	3
Температура топлива	°С	15	
Давление топлива	МПа	0.7	
Нижшая теплота сгорания топлива	МДж/кг	50	
Высшая теплота сгорания топлива	МДж/кг	55.5	
Давление пара ВД на входе в турбину	МПа	13	—
Давление промежуточного перегрева на входе в турбину	МПа	3	
Давление пара НД на входе в турбину	МПа	1	—
Недогрев в пароперегревателях котла-утилизатора	°С	20	—
Недогрев в испарителях котла-утилизатора	°С	10	—
Недогрев на выходе из экономайзера и ГПК	°С	10	—
Температура хладагента в газовой турбине	°С	330–450	200
Минимальный недогрев в регенераторе	°С	—	5
Давление захоронения CO ₂	МПа	10	
Минимальная температура в цикле	°С	30	
Мощность нетто энергоблока	МВт	200	

ной в [9]. Исходные данные для моделирования обеих тепловых схем представлены в табл. 1. Выбранные параметры являются близкими к оптимальным согласно результатам исследований, описанных в [10–14]. Потери давления в различных элементах тепловой схемы были приняты по результатам обзора литературы [6, 15–17].

В связи с отсутствием в открытых источниках результатов исследований полноты сгорания природного газа в среде диоксида углерода высокого давления избыток кислорода был принят равным нулю при расчетах. Кроме того, если сжигать природный газ в КС с избытком кислорода это приведет к накоплению его в цикле, так как КТЭК являются полузакрытыми.

Для определения теплофизических свойств рабочей среды использовалась база данных NIST REFPROP [18], которая содержит наиболее точные функции для расчета параметров углекислотных циклов [19, 20].

Влияние потери теплоты через теплоизоляцию, утечек через уплотнения, схемы движения рабочего тела и других конструктивных элементов не учитывалось при оценке эффективности установок из-за отсутствия реальных данных о характеристиках энергетического оборудования.

Для оценки энергозатрат на производство кислорода с высокой степенью чистоты 99.5–99.6% использовалась методика расчета наиболее эффективной воздухоразделительной установки низкого давления, представленная в [21]. В рассматриваемой ВРУ давление на выходе из воздушного компрессора составляет 0.609 МПа. По результатам расчетов была получена оценка затрат электроэнергии на производство кислорода 1092 кДж/кг O₂ или 0.428 кВт ч/нм³ O₂, что согласуется с данными о ВРУ ОАО “Крио-

генмаш” 0.4–0.45 кВт ч/нм³ O₂ [22]. В рассматриваемой ВРУ температура потока после воздушного компрессора составляет 241.4°C, при этом на входе в кислородные и азотные регенераторы температура воздуха обычно составляет 20–40°C, что достигается за счет использования водяного охлаждения. За счет охлаждения данного потока воздуха в регенераторе цикла Аллама возможно увеличить эффективность энергоустановки без изменения структуры ВРУ.

Методика расчета основных энергетических характеристик КТЭК

Основным энергетическим критерием сравнения рассматриваемых КТЭК являлся электрический КПД нетто, который рассчитывался по формуле (1).

$$\eta_{\text{нетто}}^{\text{э}} = \frac{N_{\text{э}}^{\text{отп}}}{B_{\text{т}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}} = \frac{N_{\text{ГТ}} + N_{\text{ПТ}} - (N_{\text{к}} + N_{\text{ДК}} + N_{\text{КК}} + N_{\text{ВРУ}} + N_{\text{КЗ}} + N_{\text{Н}})}{B_{\text{т}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{нетто}}^{\text{э}}$ – электрический КПД нетто энергоблоков, %; $N_{\text{э}}^{\text{отп}}$ – отпускаемая электрическая мощность энергоблока, МВт; $N_{\text{ГТ}}$ – электрическая мощность газовой турбины, МВт; $N_{\text{ПТ}}$ – электрическая мощность паровой турбины, МВт; $N_{\text{к}}$ – электрическая мощность компрессора CO₂, МВт; $N_{\text{ДК}}$ – электрическая мощность дожимного компрессора, МВт; $N_{\text{КК}}$ – электрическая мощность кислородного компрессора, МВт; $N_{\text{ВРУ}}$ – электрическая мощность воздуходелительной установки, МВт; $N_{\text{КЗ}}$ – электрическая мощность компрессора захоронения, МВт; $N_{\text{Н}}$ – электрическая мощность насосов, МВт; $B_{\text{т}}$ – расход метана в камеру сгорания энергоблока, кг/с; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая теплота сгорания топлива (метана), МДж/кг.

При проведении термодинамического анализа КТЭК составлялись уравнения материальных и энергетических балансов. В отличие от традиционных паротурбинных и газотурбинных установок, являющихся открытыми со стороны продуктов сгорания, ПЗТЦ являются полузакрытыми. Данный фактор обуславливает необходимость учета теплоты конденсации водяных паров, содержащихся в углекислотно-паровой смеси. Поэтому при составлении энергетических балансов для кислородно-топливных установок важно учитывать, что к циклу подводится топливо с высшей теплотой сгорания. Равенство входящих и выходящих из энергетического комплекса тепловых потоков может быть описано при помощи уравнения (2).

$$\begin{aligned} & Q_{\text{топл}}^{\text{хим}} + Q_{\text{топл}}^{\text{физ}} + Q_{\text{возд}}^{\text{физ}} = \\ & = N_{\text{э}}^{\text{отп}} + Q_{\text{N}_2}^{\text{физ}} + Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{физ}} + Q_{\text{CO}_2}^{\text{физ}} + Q_{\text{OC}} + \sum Q_{\text{пот}}^{\text{ВРУ}} + \sum Q_{\text{ПО}}^{\text{К}} + \sum Q_{\text{ПО}}^{\text{КЗ}} + \sum Q_{\text{проч}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $Q_{\text{топл}}^{\text{хим}}$ – химическая теплота топлива по высшей теплоте сгорания, МВт; $Q_{\text{топл}}^{\text{физ}}$ – физическая теплота топлива, МВт; $Q_{\text{возд}}^{\text{физ}}$ – физическая теплота воздуха, МВт; $Q_{\text{N}_2}^{\text{физ}}$ – физическая теплота сбрасываемого азота, МВт; $Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{физ}}$ – физическая теплота удаляемой воды, МВт; $Q_{\text{CO}_2}^{\text{физ}}$ – физическая теплота удаляемого углекислого газа, МВт; Q_{OC} – теплота, удаляемая в охладителе-сепараторе, МВт; $\sum Q_{\text{пот}}^{\text{ВРУ}}$ – потеря теплоты в ВРУ, МВт; $\sum Q_{\text{ПО}}^{\text{К}}$ – сумма потерь теплоты в промежуточных охладителях углекислотного компрессора, МВт; $\sum Q_{\text{ПО}}^{\text{КЗ}}$ – сумма потерь теплоты в промежуточных охладителях компрессора захоронения углекислого газа, МВт; $\sum Q_{\text{проч}}$ – сумма прочих потерь теплоты включая потери в маслоохладителях и охладителях электрогенератора, МВт.

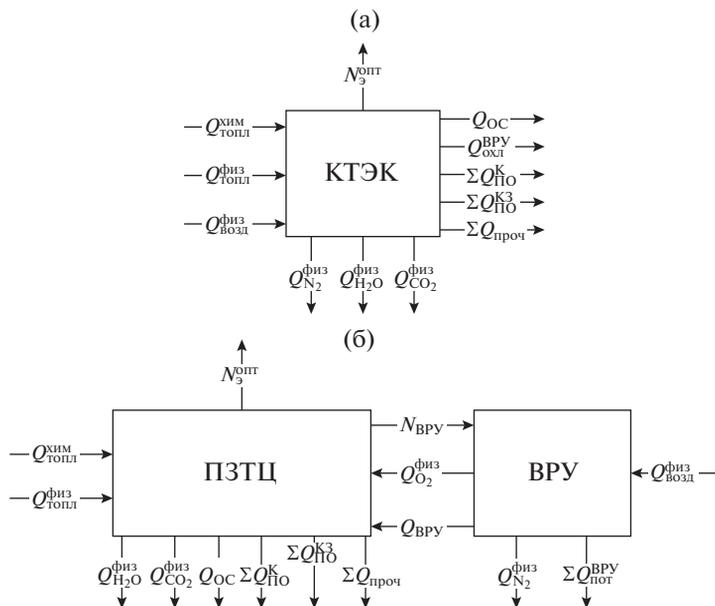


Рис. 5. Схема подвода и отвода энергетических потоков для кислородно-топливного энергетического комплекса. (а) ВРУ, ПЗТЦ и МКЗПО рассматриваются в составе КТЭК; (б) ПЗТЦ и МКЗПО рассматривается самостоятельно.

Другим важным отличием КТЭК является наличие воздуходелительной установки. Отмеченный фактор особенно важен, когда существует интеграция ВРУ в схему энергетической установки (характерно для цикла Аллама). В данном случае энергетический баланс кислородно-топливного энергетической установки целесообразно рассчитывать согласно уравнению (3).

$$Q_{\text{топл}}^{\text{хим}} + Q_{\text{топл}}^{\text{физ}} + Q_{\text{вру}} + Q_{\text{O}_2}^{\text{физ}} = N_{\text{э}}^{\text{отп}} + N_{\text{вру}} + Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{физ}} + Q_{\text{CO}_2}^{\text{физ}} + Q_{\text{ос}} + \Sigma Q_{\text{по}}^{\text{к}} + \Sigma Q_{\text{по}}^{\text{кз}} + \Sigma Q_{\text{проч}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{вру}}$ – теплота, переданная от ВРУ энергоустановке, МВт; $Q_{\text{O}_2}^{\text{физ}}$ – физическая теплота кислорода, МВт.

На рис. 5 приведены схемы подвода и отвода энергетических потоков для КТЭК для случаев, когда ВРУ и ПЗТЦ рассматриваются в рамках единого энергетического комплекса и отдельно, МКЗПО включен в обоих случаях.

Несмотря на тот факт, что сведение энергетического баланса для КТЭК производилось с использованием высшей теплоты сгорания топлива, электрический КПД нетто оценивался по нижней теплоте в соответствии с общепринятой практикой для обеспечения возможности сравнения энергетических показателей с параметрами паротурбинных, газотурбинных и парогазовых энергоблоков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КТЭК

По результатам расчета тепловых схем были получены показатели работы энергетических комплексов на базе циклов SCOC-CC и Аллама (табл. 2). Электрический КПД

Таблица 2. Результаты моделирования тепловых схем SCOC-CC и Аллама

Параметр	Единица измерения	SCOC-CC	Аллам
Электрическая мощность газовой турбины	МВт	356.34	342.89
Электрическая мощность CO ₂ компрессора	МВт	168.79	42.14
Электрическая мощность паровой турбины	МВт	94.70	–
Электрическая мощность питательного насоса	МВт	1.01	–
Электрическая мощность конденсатного насоса	МВт	0.10	–
Электрическая мощность CO ₂ насоса	МВт	–	30.65
Электрическая мощность CO ₂ компрессора захоронения	МВт	12.36	1.98
Электрическая мощность кислородного компрессора	МВт	24.79	26.94
Электрическая мощность дожимного компрессора	МВт	4.84	0.81
Расход метана	кг/с	8.99	9.27
Расход кислорода	кг/с	35.86	36.96
Электрическая мощность ВРУ	МВт	39.16	40.36
Электрическая мощность нетто энергоблока	МВт	200.00	200.00
Теплота топлива по низшей теплоте сгорания	МВт	449.42	463.26
КПД нетто энергоблока	%	44.50	43.17

нетто цикла Аллама находится на уровне 43.17%, что меньше, чем у полузакрытого цикла, имеющего эффективность на уровне 44.50%. При этом у полузакрытого цикла начальная температура на 300°C выше, чем у цикла Аллама, и имеет более низкое начальное и конечное давление. В случае с циклом SCOC-CC рабочее тело сжимается без промежуточного охлаждения, что обуславливает высокую температуру на входе в камеру сгорания и приводит к необходимости утилизации теплоты уходящих газов турбины в паровом котле-утилизаторе. В цикле Аллама поток сжимается с промежуточным охлаждением, а теплота уходящих газов и сжатого воздуха используется для подогрева потока после насоса на входе в камеру сгорания. Таким образом, цикл Аллама имеет большую долю регенерируемого тепла в цикле. Однако стоит отметить, что эффективность цикла SCOC-CC может быть еще несколько повышена за счет увеличения числа контуров и количества промежуточных перегревов в КУ.

Оценки эффективности цикла Аллама, приведенные в различных источниках, варьируются от 46 до 56% [15, 16, 23]. На итоговую эффективность влияют: подходы к оценке затрат энергии на производство кислорода, а также расходов и потерь с охлаждением газовой турбины, выбранная температура хладагента, схема регенеративного подогрева, оценка гидравлических сопротивлений и подходы к оценке теплофизических свойств рабочей среды. В настоящей работе произведен учет всех возможных потерь. При этом следует отметить, что существенное повышение эффективности цикла Аллама возможно за счет: перехода на высокотемпературные мембраны для производства кислорода, увеличения числа теплообменных аппаратов в регенеративной системе, совершенствования системы охлаждения газовой турбины, утилизации различных источников низкопотенциальной теплоты.



Рис. 6. Затраты электрической мощности брутто в энергоблоке на основе полужакрытого комбинированно-го цикла с кислородным сжиганием топлива.

Распределение потоков электрической мощности в рамках КТЭЖ, работающего по циклу SCOC-CC, представлено на рис. 6. Установлено, что основные затраты электрической энергии приходятся на сжатие углекислого газа в компрессоре, далее следуют затраты электроэнергии на ВРУ и кислородный компрессор. Затраты на захоронение углекислого газа, сжатие метана и воды в паротурбинной установке достаточно невелики за счет небольших массовых расходов и малых степеней сжатия.

На рис. 7 показано распределение энергии в цикле SCOC-CC. Доля электрической мощности нетто в структуре энергетического баланса энергоблока оказалась ниже значения электрического КПД нетто энергоблока, что обусловлено отличием подходов к составлению энергетического баланса и расчету КПД нетто: в первом случае рассматривается высшая теплота сгорания топлива, а во втором – низшая. При включении ВРУ в энергетический баланс видно, что значительная часть теплоты (12%) поступает с воздухом, при этом потери теплоты в ВРУ и с удаляемым азотом выше (17%) из-за подвода электроэнергии для сжатия воздуха. При расчете без включения ВРУ в энергетический баланс энергозатраты на производство кислорода явно видны в виде электрической мощности ВРУ. Таким образом, криогенная технология разделения воздуха, необходимая для работы полужакрытого комбинированного цикла, является причиной значительных потерь энергии. При этом из-за особенностей процесса получения кислорода потери энергии в ВРУ представлены в первую очередь теплотой, которая удаляется при охлаждении сжатого воздуха. Для полезной утилизации данной теплоты был разработан цикл Аллама, который позволяет за счет теплоты сжатого в ВРУ воздуха нагреть диоксид углерода в ПЗТЦ.

По результатам моделирования КТЭЖ на базе цикла Аллама построена диаграмма распределения потоков электрической мощности, представленная на рис. 8. Основная часть мощности углекислотной турбины отдается в сеть. Главная статья потерь энергии приходится на ВРУ, после чего следуют затраты электроэнергии на привод компрессоров и насоса для сжатия углекислотного рабочего. Из-за высокого начального давления доля затрат электроэнергии на сжатие кислорода увеличилась по сравнению с циклом SCOC-CC. Таким образом, основным источником собственных нужд для полужакрытого комбинированного цикла является многоступенчатый компрессор для сжатия углекислотной среды, а для цикла Аллама – воздуходелительная установка, что вызвано использованием промежуточного охлаждения во втором случае.

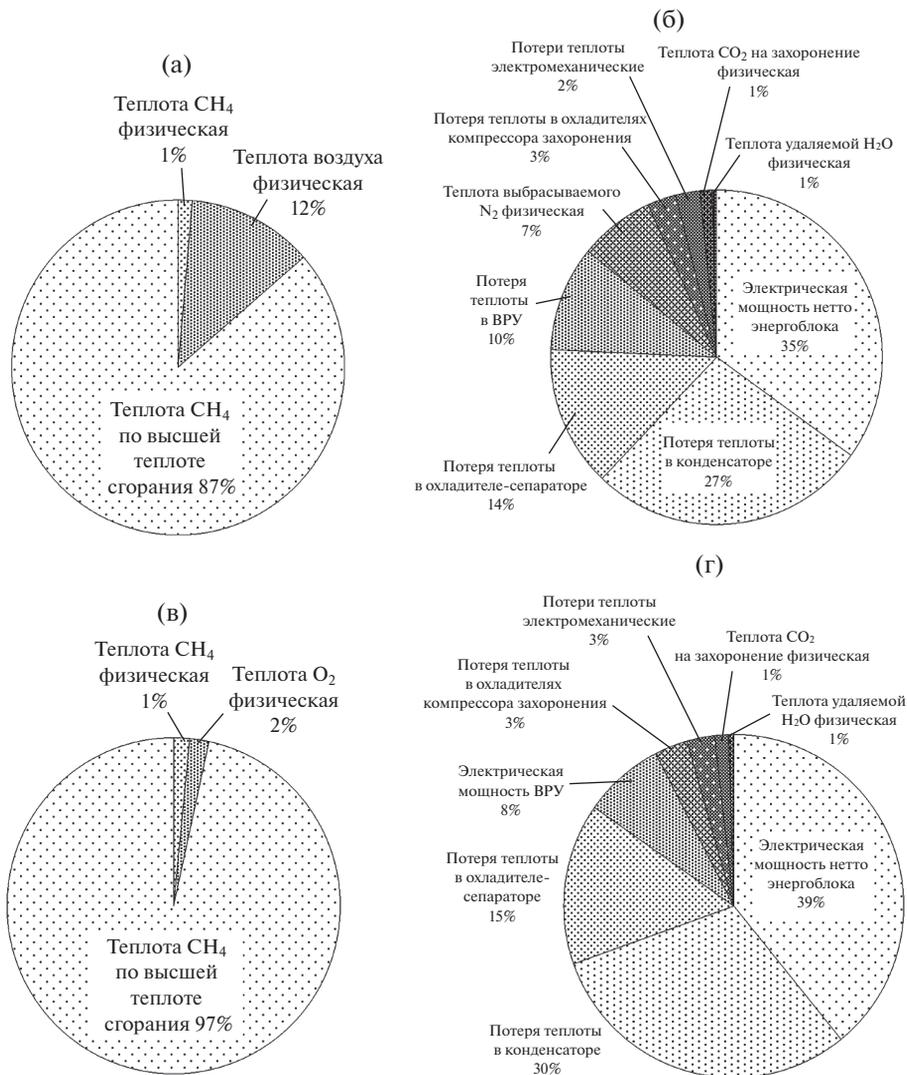


Рис. 7. Энергетические балансы энергоблока на основе цикла SCOC-CC.

(а) – поступление теплоты в КТЭК; (б) – расход теплоты в КТЭК; (в) – поступление теплоты в ПЗТЦ; (г) – расход теплоты в ПЗТЦ и МКЗПО.

Основные потери теплоты в цикле Аллама (рис. 9) приходятся на промежуточные охладители углекислотного компрессора и охладитель-сепаратор. Таким образом, в цикле Аллама значительная часть подведенной теплоты расходуется в холодном источнике (47% для КТЭК и 49% для ПЗТЦ), что сближает его с паротурбинными циклом. При включении ВРУ в энергетический баланс значительные потери теплоты связаны с удаляемым азотом, а при рассмотрении ПЗТЦ с затратами электроэнергии на ВРУ. Потери теплоты в ВРУ в цикле Аллама ниже за счет использования теплоты воздуха в системе регенерации установки, что в целом снижает потери энергии, связанной с производством кислорода.



Рис. 8. Затраты электрической мощности брутто в энергоблоке на основе цикла Аллама.

Таким образом, основные потери теплоты в кислородно-топливных циклах приходятся на холодный источник:

- конденсатор паротурбинной установки и охладитель-сепаратор в полужакрытом цикле;
- промежуточные охладители компрессора и охладитель-сепаратор в цикле Аллама.

Важным отличием рассматриваемых циклов является организация системы сжатия рабочей среды: в полужакрытом цикле для сжатия рабочего тела применяется компрессор, а в цикле Аллама – компрессор с промежуточным охлаждением и насос. С одной стороны, существенное снижение потерь на сжатие рабочей среды в цикле Аллама достигается за счет роста потерь в промежуточных охладителях, с другой – низкая температура рабочего тела на выходе из насоса позволяет эффективно применять регенерацию и утилизировать низкопотенциальную теплоту ВРУ. В случае полужакрытого цикла сжатие рабочего тела происходит с большими затратами энергии, однако высокая температура рабочей среды на выходе из компрессора обеспечивает относительно невысокий расход топлива в камеру сгорания.

ВЫВОДЫ

1. Создание полужакрытых термодинамических циклов с кислородным сжиганием топлива позволит значительно снизить выбросы вредных веществ в атмосферу при производстве электроэнергии. Их очевидным преимуществом по сравнению с возобновляемыми источниками является высокая энергоэффективность, компактность, возможность регулирования отпуска электроэнергии.

2. Описана методика расчета энергоустановок с охлаждаемой газовой турбиной, два способа составления энергетического баланса и методика определения электрического КПД нетто для кислородно-топливных энергетических комплексов.

3. По результатам моделирования кислородно-топливных энергоустановок при сопоставимых исходных данных и единой расчетной методике установлено, что электрический КПД нетто полужакрытого цикла с кислородным сжиганием топлива составляет 44,50%, а цикла Аллама, который имеет начальную температуру на 300°С меньше, 43,17%. Последний позволяет добиться большей степени регенерации теплоты внутри цикла из-за использования углекислотного компрессора с промежуточным

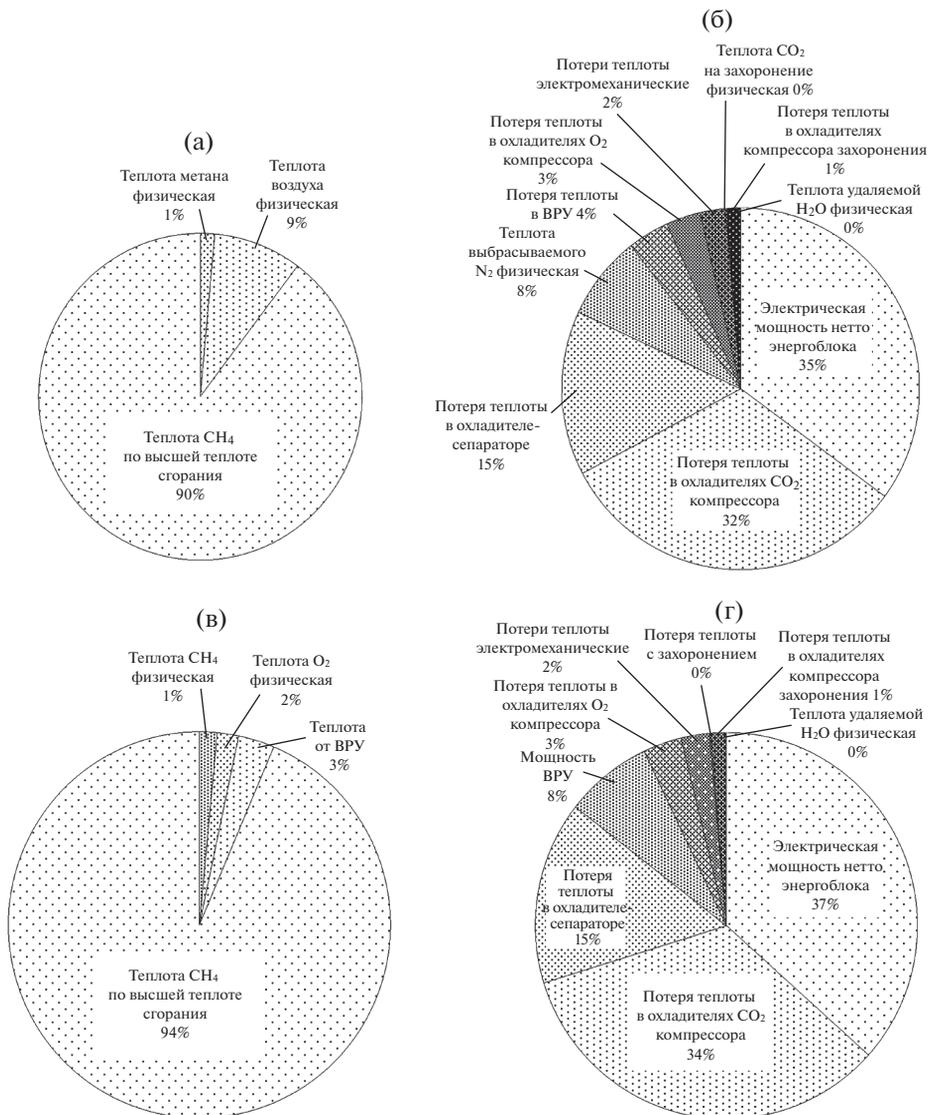


Рис. 9. Энергетические балансы энергоблока на основе цикла Аллама.

(а) – поступление теплоты в КТЭК; (б) – расход теплоты в КТЭК; (в) – поступление теплоты в ПЗТЦ; (г) – расход теплоты в ПЗТЦ и МКЗПО.

охлаждением и за счет интеграции ВРУ, однако использование большого количества регенераторов значительно снижает КПД нетто установки.

4. Полученный КПД нетто кислородно-топливных циклов выше эффективности парогазовых установок с улавливанием углекислого газа при схожем уровне температур на входе в газовую турбину (35–42%). При этом эффективность существующих систем улавливания диоксида углерода из уходящих газов парогазовых энергоблоков обычно не превышает 50%. Поэтому развитие кислородно-топливных энергетических комплексов является перспективным направлением снижения выбросов энергетического сектора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FSWF-2023-0014 (Соглашение № 075-03-2023-383 от 18 января 2023 г.) в сфере научной деятельности на 2023–2025 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pata U.K.* Linking renewable energy, globalization, agriculture, CO₂ emissions and ecological footprint in BRIC countries: A sustainability perspective // *Renewable Energy*. 2021. V. 173. P. 197–208.
2. Emissions from public electricity and heat production-explanatory indicators (ENER 009) – European Environment Agency [Electronic resource]: Indicator Specification. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/emissions-co2-so2-nox-from-1> (accessed: 17.06.2022).
3. US EPA OAR. Sources of Greenhouse Gas Emissions [Electronic resource]: Overviews and Factsheets. 2015. URL: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions> (accessed: 17.06.2022).
4. *Jacobson M.Z.* The health and climate impacts of carbon capture and direct air capture // *Energy Environ. Sci.* 2019. V. 12. № 12. P. 3567–3574.
5. *Rogalev A. et al.* Research and Development of the Oxy-Fuel Combustion Power Cycles with CO₂ Recirculation // *Energies*. 2021. V. 14. № 10. P. 2927.
6. *Allam R. et al.* 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. V. 114. P. 5948–5966.
7. *Allam R.J. et al.* High Efficiency and Low Cost of Electricity Generation from Fossil Fuels While Eliminating Atmospheric Emissions, Including Carbon Dioxide // *Energy Procedia*. 2013. V. 37. P. 1135–1149.
8. Aspen Technology Inc. Aspen Plus [Electronic resource]: USA. 2013. URL: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus> (accessed: 19.07.2021).
9. *Роголев А. и др.* Исследование экологически безопасных энергетических комплексов с кислородным сжиганием топлива // *Новое в российской электроэнергетике*. 2019. № 8. P. 6–25.
10. *Yang H. et al.* Evaluation of design performance of the semi-closed oxy-fuel combustion combined cycle // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2012. V. 134. № 11.
11. *Kindra V.O. et al.* Parametric optimization of the semi-closed oxy-fuel combustion combined cycle // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1683. № 5. P. 052028.
12. *Rogalev A. et al.* Thermodynamic optimization and equipment development for a high efficient fossil fuel power plant with zero emissions // *Journal of Cleaner Production*. 2019. V. 236. P. 117592.
13. *Трухний А.Д.* Парогазовые установки электростанций: учебник для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2017. P. 675.
14. *Choi B.S.* Influence of a recuperator on the performance of the semi-closed oxy-fuel combustion combined cycle // *Applied Thermal Engineering*. 2017. P. 11.
15. *Mitchell C. et al.* An initial assessment of the value of Allam Cycle power plants with liquid oxygen storage in future GB electricity system // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2019. V. 87. P. 1–18.
16. *Scaccabarozzi R., Gatti M., Martelli E.* Thermodynamic analysis and numerical optimization of the NET Power oxy-combustion cycle // *Applied Energy*. 2016. V. 178. P. 505–526.
17. *Zhao Y. et al.* Parametric study of a direct-fired supercritical carbon dioxide power cycle coupled to coal gasification process // *Energy Conversion and Management*. 2018. V. 156. P. 733–745.
18. *Lemmon E.W. et al.* NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology. 2018.
19. *Bertini M. et al.* Evaluation of the property methods for pure and mixture of CO₂ for power cycles analysis // *Energy Conversion and Management*. 2021. V. 245. P. 114568.
20. *White C.W., Weiland N.T.* Evaluation of Property Methods for Modeling Direct-Supercritical CO₂ Power Cycles // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2018. V. 140. № 1. P. 011701.
21. *Ануров С.А.* Криогенные технологии разделения газов. ООО “АР-Консалт”. М.: Общество с ограниченной ответственностью АР-Консалт, 2017. С. 233.
22. *Кортиков А., Тарасова Е., Агекян Г.* Современные типы воздухоразделительных установок ОАО Криогенмаш для получения технического кислорода // *Технические газы*. 2010. № 2. С. 31–38.
23. *Dokhaee E. et al.* Simulation of the Allam cycle with carbon dioxide working fluid and comparison with Brayton cycle // *Int J Energy Environ Eng.* 2021. V. 12. № 3. P. 543–550.

Thermodynamic Analysis of Semi-Closed Cycles with Oxy-Fuel Combustion and Carbon Dioxide-Steam Working Fluid**V. O. Kindra^a, *, I. I. Komarov^a, S. K. Osipov^a, O. V. Zlyvko^a, and V. Yu. Naumov^a**^a*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia***e-mail: kindra.vladimir@yandex.ru*

Reducing emissions of harmful substances during the production of electricity at thermal power plants is possible by the transition to semi-closed gas turbine cycles with oxy-fuel combustion and carbon dioxide-steam working fluid. Their main advantages compared with closed Rankine cycles with water vapor and open Brayton cycles with combustion products of the air-fuel mixture are the absence of the toxic substances formation danger and the effective separation of working fluid components based on the thermodynamic principle, which allows to subsequently dispose of high-purity carbon dioxide. This paper presents the results of the energy performance thermodynamic analysis of the most known oxy-fuel combustion power cycles with a carbon dioxide-steam working fluid. A technique for modeling thermal schemes of promising power units is described in detail, taking into account losses for cooling high-temperature carbon dioxide turbines, energy costs for the production and compression of oxygen, as well as compression of carbon dioxide before disposal. Based on the results of mathematical modeling, it was found that the net electrical efficiency for the semi-closed combined cycle with oxy-fuel combustion can reach 44.5% at a gas turbine inlet temperature of 1400°C, and 43.2% for the Allam cycle at 1100°C.

Keywords: emissions, carbon dioxide, efficiency, recirculation, air separation unit, energy balance, modeling