

УДК 662.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАКТОРОВ ЧАСТИЧНОГО ОКИСЛЕНИЯ ЭНЕРГОХИМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Мракин Антон Николаевич¹,
anton1987.87@mail.ru

Николаев Юрий Евгеньевич¹,
niko00949@mail.ru

Сотников Дмитрий Геннадьевич¹,
sotnikovdg@gazprommash.ru

Табакаев Роман Борисович²,
TabakaevRB@tpu.ru

Селиванов Алексей Александрович¹,
selivanovaasstu@mail.ru

¹ Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обуславливается необходимостью повышения энергоэффективности в области использования углеводородов для комбинированной выработки химической продукции и энергоносителей с применением технологий газификации. Это даст возможность снижать издержки производства и расширять возможности газохимии.

Цель исследования: определение термодинамической эффективности реакторов частичного окисления топлива, входящих в состав энергохимических установок комбинированной выработкой энергоносителей и синтез-газа. Основное внимание уделено влиянию режимных параметров на численное значение эксергетического КПД.

Объект: реактор частичного окисления с набором вспомогательного оборудования, обеспечивающий получение синтез-газа. При этом учитывается системный фактор, т. е. параметры энергосистемы, в рамках которой планируется сооружение подобного типа энергохимической установки.

Методы: проведение численного эксперимента с привлечением традиционных подходов к составлению эксергетического баланса теплоэнергетических установок. Также использованы разработанные ранее авторами математические модели для расчета параметров синтез-газа, образующегося в процессе переработки углеводородного сырья в проточных автотермических некаталитических реакторах.

Результаты. Полученные результаты позволяют выбирать наиболее целесообразные режимные параметры работы реактора частичного окисления, входящего в состав энергохимических установок с газификацией нестабильного газового конденсата. Так, максимальные значения эксергетического КПД достигаются при использовании атмосферного воздуха без обогащения кислородом как для случая с подачей водяного пара ($\eta_{\text{ex}}=78-83\%$), так и для случая без подачи пара ($\eta_{\text{ex}}=82-88\%$). При этом некоторые варианты тепловых схем энергохимических установок с газификацией топлива в термодинамическом плане могут считаться равноэффективными, а решение по количеству подаваемого водяного пара в зону реакции должно соответствовать требованиям к синтез-газу. Выбор уровня рабочего давления в реакторе требует дополнительных исследований, поскольку очевидность применения реактора атмосферного типа на данном этапе исследований не выявлена.

Ключевые слова:

Газовый конденсат, эксергия, дутьевой пар, кислород, газификация, реактор, синтез-газ, электроэнергия.

Введение

Традиционные методы повышения энергоэффективности теплоэнергетических установок на сегодняшний день можно считать исчерпанными, и все чаще встречаются публикации о разработке новых технологий, в том числе базирующихся на энерготехнологическом использовании топлива [1] и применении новых принципов регенерации теплоты отходящих продуктов сгорания [2, 3].

Также остро вопросы энергоэффективности стоят и в нефтегазовом секторе национальной экономики. Например, установки по стабилизации газового конденсата отличаются довольно высокими

показателями потребления энергоресурсов: электроэнергии – до 2 кВт·ч/т конденсата, топливного газа – до 50 кг у.т./т конденсата; воды оборотной – до 1 м³/т конденсата [4]. К тому же эти установки отличаются высокими капиталовложениями, и их применение оправдано на месторождениях или предприятиях с большой производительностью. На малых и средних месторождениях стабилизация газового конденсата экономически нерентабельна и требуется разработка специальных высокоэффективных инновационных установок и методов их вовлечения в топливно-энергетический баланс страны.

Одним из возможных путей использования нестабильного газового конденсата является его газификация [5] с комбинированной выработкой энергоносителей (тепловой и электрической энергии) и технологического газа, содержащего СО и Н₂. При наличии спроса предлагаемая установка может обеспечивать потребителей инертным газом (защитной атмосферой) в виде СО₂ и N₂. Основным процесс газификации топлива в таких установках происходит в реакторе частичного окисления, в который подается топливо (в данном случае нестабильный газовый конденсат), окислитель и дутьевой пар для повышения содержания водорода в продуктах реакции. При этом качество синтез-газа (содержание СО и Н₂, его температура) будет находиться в определенной зависимости от режимных факторов.

Происходящие в реакторе частичного окисления термохимические и термодинамические процессы превращения одних видов энергии в другие заканчиваются при наступлении термодинамического равновесия рассматриваемой системы, определяемого вторым законом термодинамики [6].

В практике научных исследований все большую популярность приобретают методы термодинамического анализа, основанные на эксергетическом балансе, главным достоинством которого является наличие единого безразмерного относительного показателя совершенства, который учитывает не только количество энергии, но и ее качество на основе второго закона термодинамики [7–10]. Особенно такая методология актуальна для энерготехнологических или энергохимических установок с комплексным использованием топлива, предназначенных для комбинированной выработки электрической и тепловой энергии, а также

химических продуктов [11–14]. Так, в [12] проведен анализ эксергетической эффективности отдельных процессов и всей тепловой схемы малой электростанции с газификацией угля, которая производит электрическую и тепловую энергию, а также серу в качестве побочного продукта, а в работе [13] в качестве побочного продукта работы угольной электростанции рассматривается активированный уголь.

Методика исследования

Представляется целесообразным выполнить обоснование параметров дутья (концентрации кислорода, степени повышения давления, энтальпии и количества водяного пара) подаваемого в реактор частичного окисления энергохимических установок, поскольку они оказывают влияние на общую эффективность получения синтез-газа. Расчетная схема представлена на рис. 1.

В такой постановке задачи эксергетический КПД процесса частичного окисления топлива можно представить в виде

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{cr}}{G_t \cdot ex_t + G_{H_2O} \cdot ex_{H_2O} + G_{ок} \cdot ex_{ок} + Ex_a}, \quad (1)$$

где $Ex_{cr} = G_{cr} \cdot ex_{cr}$ – эксергия образовавшегося синтез-газа, кВт; G_{cr} – массовый расход синтез-газа, кг/с; ex_{cr} , ex_t , ex_{H_2O} , $ex_{ок}$ – удельная эксергия синтез-газа, потребленного топлива (газового конденсата), водяного пара и окислителя (воздуха), кДж/кг; G_t , G_{H_2O} , $G_{ок}$ – расход топлива, водяного пара и окислителя, кг/с; Ex_a – эксергия топлива, эквивалентная затраченной электроэнергии на привод компрессора окислителя, топливного насоса и обеспечение работы воздухоразделительной установки, кВт.

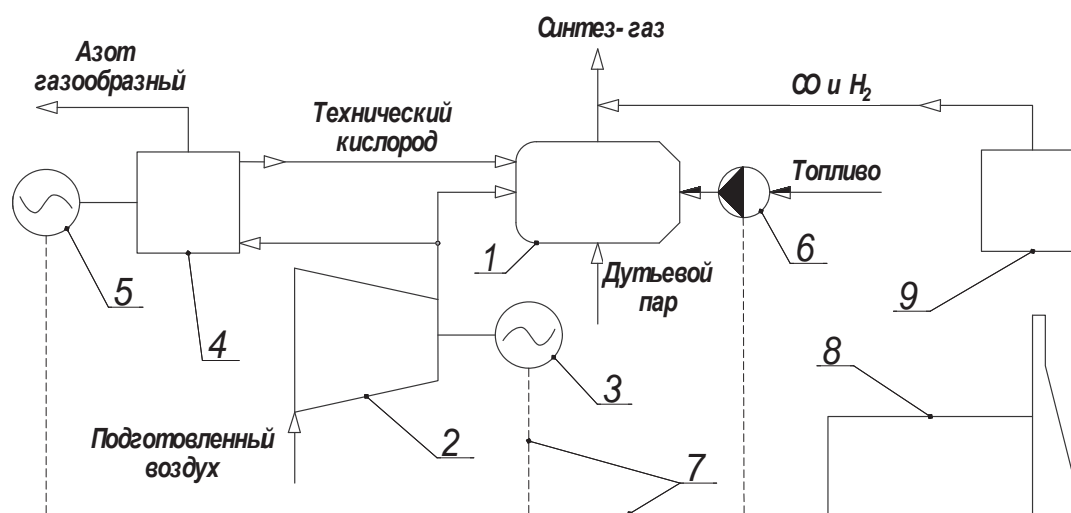


Рис. 1. Расчетная схема материально-энергетических потоков для определения эксергетического КПД: 1 – реактор частичного окисления (РЧО); 2 – компрессор воздуха; 3 – электродвигатель компрессора; 4 – воздуходелительная установка; 5 – электропривод воздуходелительной установки; 6 – топливный насос; 7 – транзитные сети электроснабжения; 8 – электростанция; 9 – замещающая установка

Fig. 1. Design scheme of material-energy flows for determining exergy efficiency: 1 is the partial oxidation reactor (POR); 2 is the air compressor; 3 is the compressor motor; 4 is the air separation unit; 5 is the electric drive of the air separation unit; 6 is the fuel pump; 7 are the transit power supply networks; 8 is the power station; 9 is the replacement installation

Удельную эксергию синтез-газа будем определять согласно [15] как сумму физической эксергии (являющейся результатом отличия температуры и давления рассматриваемого потока от температуры и давления окружающей среды) и химической (являющейся результатом отличия химического состава или концентрации вещества, находящегося при параметрах окружающей среды, от распространенных в природе веществ или от вещества, принятого за начало отсчета), кДж/кг:

$$ex_{cr} = ex_{cr}^{\Phi} + ex_{cr}^x = R \cdot T_0 \cdot \ln \frac{p}{p_0} + C_p \cdot \left(T - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T}{T_0} \right) + ex_{cr}^x, \quad (2)$$

где R – индивидуальная газовая постоянная, кДж/(кг·К); p , T – давление и температура, МПа, К; C_p – изобарная теплоемкость, кДж/(кг·К); p_0 , T_0 – давление и температура окружающей среды (начало отсчета), МПа, К; $ex_{cr}^x = Q_n^p$ – химическая эксергия синтез-газа, кДж/кг; Q_n^p – низшая теплота сгорания (синтез-газа), кДж/кг.

Эксергия топлива (газового конденсата) будет определяться только ее химической составляющей, поскольку подогрева топлива перед подачей в реактор частичного окисления не предусмотрено. В общем виде имеется связь между эксергией топлива, представляющей собой максимальную работу химической реакции системы «топливо–воздух» при стехиометрическом соотношении между ними, которая может быть представлена выражением

$$ex_t = \beta \cdot Q_b^p, \quad (3)$$

где β – корреляционный коэффициент, зависящий от вида и состава топлива; Q_b^p – высшая теплота сгорания топлива (в данном случае газового конденсата), кДж/кг.

Расчетные значения коэффициентов β для определения как эксергии газового конденсата, так и получаемого синтез-газа, можно выбрать по рекомендациям [15] или [16].

Эксергия дутьевого пара определяется исходя из его параметров по специальным диаграммам состояния, приведенным в [15], или аналитическим путем с учетом рекомендаций [16].

Для предложенной к рассмотрению тепловой схемы установки эксергия окислителя стремится к нулю, т. к. он представляет собой атмосферный воздух, изменяющий значение физической эксергии только под влиянием климатических факторов.

Исходя из концепции системного термодинамического анализа энерготехнологических производств, учет эксергии входящих потоков электроэнергии должен проводиться по эксергии первичного топлива, расходуемого в энергосистеме на ее получение. Таким образом, можно получить выражение для расчета эксергии топлива, затраченного на получение электроэнергии, кВт:

$$Ex_a = \frac{N}{Q_n^p \cdot \eta_{эл} \cdot \eta_{сн}} \cdot \frac{ex_t}{\eta_{тр}}, \quad (4)$$

где N – электрическая мощность, затрачиваемая на привод компрессора, работу воздухоразделительной установки и прочих электроприемников, обеспечивающих получение синтез-газа, кВт; Q_n^p – низшая теплота сгорания (используемого в энергосистеме топлива), кДж/кг; $\eta_{эл}$ – КПД теплового двигателя, используемого для получения электроэнергии; $\eta_{сн}$ – коэффициент собственных нужд электростанции; ex_t – удельная эксергия топлива, расходуемого для выработки электроэнергии и определяемая согласно [15], кДж/кг; $\eta_{тр}$ – коэффициент, учитывающий потери эксергии электроэнергии при транспортировке.

При расчете параметров образующегося синтез-газа использованы методические положения, изложенные в [17, 18]. Результаты расчета состава синтез-газа в зависимости от содержания кислорода в дутьевом воздухе и подачи водяного пара представлены на рис. 2, а массовый расход – на рис. 3.

Результаты исследования

Параметры начала отсчета приняты: для давления на уровне 0,1 МПа и 15 °С – для температуры, что продиктовано возможностью сопоставить расчеты с номинальным режимом работы газотурбинных установок по стандарту ISO.

В качестве исходных данных принято: газовый конденсат Коптевского месторождения с составом, представленным в [5]; расход перерабатываемого нестабильного газового конденсата 1,0 кг/с; коэффициент расхода воздуха в камере РЧО $\alpha=0,5$; параметры топлива, используемого в энергосистеме, $Q_n^p=31\,800$ кДж/кг и $Q_b^p=35\,290$ кДж/кг [19]; $\eta_{эл}=0,53$; $\eta_{сн}=0,95$ [20]; $\eta_{тр}=0,92$; давление сжатого воздуха в компрессоре холодильного цикла низкого давления (цикла Капицы), необходимое для получения технического кислорода, $p_{в-ха}=0,65$ МПа [21].

Параметры дутьевого насыщенного пара выбираются по уровню давления в реакторе частичного окисления, т. е. имеют индивидуальное значение для каждого варианта расчета и представлены в таблице.

Таблица. Параметры дутьевого пара

Table. Parameters of blowing steam

Параметр, ед. изм. Parameter, unit	Давление в РЧО, МПа/Pressure in the POR, MPa								
	0,1	0,3	0,5	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
Температура, °С Temperature, °C	100	134	152	168	180	190	198	200	212
Энтальпия, кДж/кг Enthalpy, kJ/kg	2675	2725	2748	2765	2777	2785	2790	2792	2798
Энтропия, кДж/(кг·°С) Entropy, kJ/(kg·°C)	7,36	6,99	6,82	6,68	6,58	6,51	6,44	6,43	6,33

Определение электрической мощности воздушного компрессора и топливного насоса осуществлялось расчетным путем в зависимости от уровня давления в РЧО, а также учитывался факт отключения воздухоразделительной установки при работе на атмосферном воздухе, без обогащения кислородом.

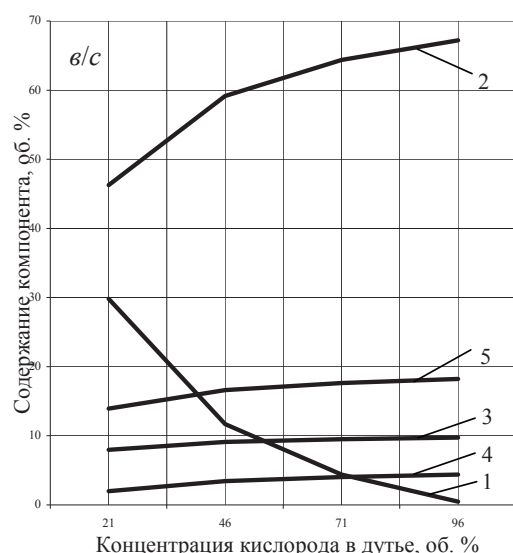
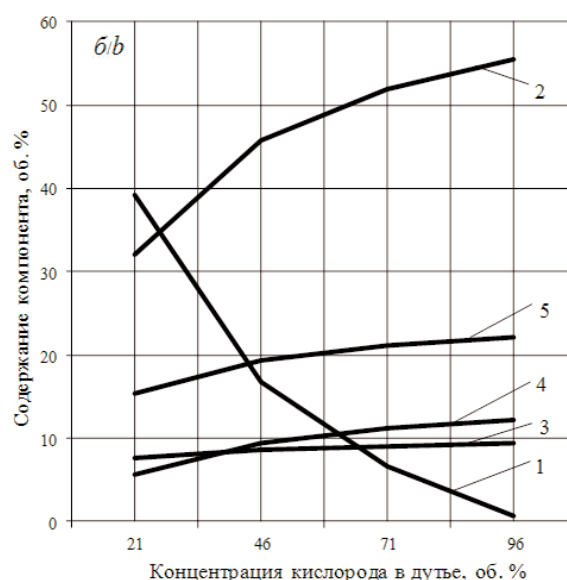
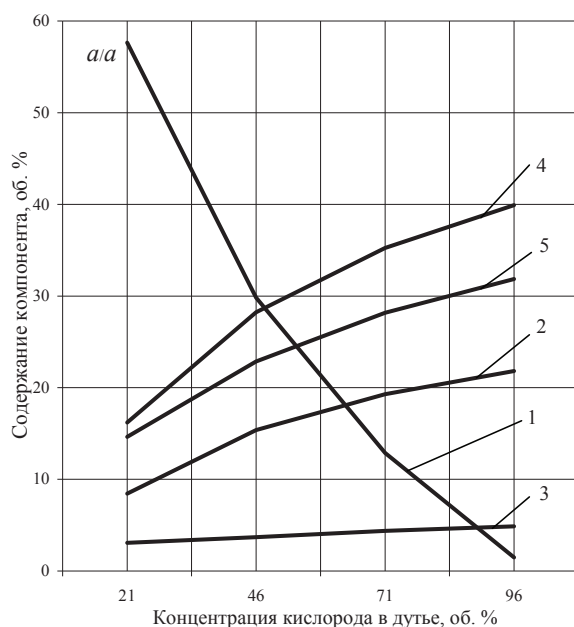


Рис. 2. Зависимость содержания компонентов синтез-газа при работе реактора с коэффициентом расхода воздуха 0,5 при атмосферном давлении и без подачи дутьевого пара (а), при подаче водяного пара в количестве 3 кг/кг конденсата (б) и 6 кг/кг конденсата (в) от концентрации кислорода в дутье: 1 – азот; 2 – водяные пары; 3 – диоксид углерода; 4 – оксид углерода; 5 – водород

Fig. 2. Dependence of content of the synthesis gas components when the reactor is operating with air flow rate factor of 0,5 at atmospheric pressure and without supply of blowing steam (a), when steam is supplied in the amount of 3 kg/kg of condensate (b) and 6 kg/kg of condensate (c) of oxygen concentration in the blast: 1 is the nitrogen; 2 is the water vapor; 3 is the carbon dioxide; 4 is the carbon monoxide; 5 is the hydrogen

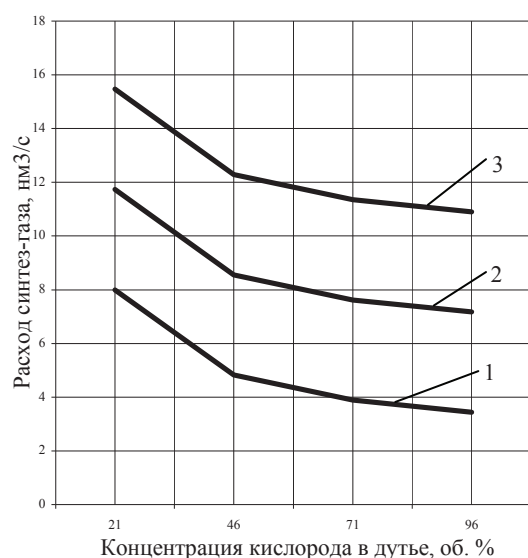


Рис. 3. Объемный выход синтез-газа в зависимости от концентрации кислорода в дутье при работе реактора с коэффициентом расхода воздуха 0,5 при атмосферном давлении и различном количестве дутьевого пара: 1 – g=0 кг пара/кг конденсата; 2 – g=3 кг пара/кг конденсата; 3 – g=6 кг пара/кг конденсата

Fig. 3. Volumetric yield of synthesis gas as a function of oxygen concentration in the blast when the reactor operates with air flow factor of 0,5 at atmospheric pressure with the amount of blowing steam: 1) g=0 kg of vapor/kg of condensate; 2) g=3 kg of vapor/kg of condensate; 3) g=6 kg of steam/kg of condensate

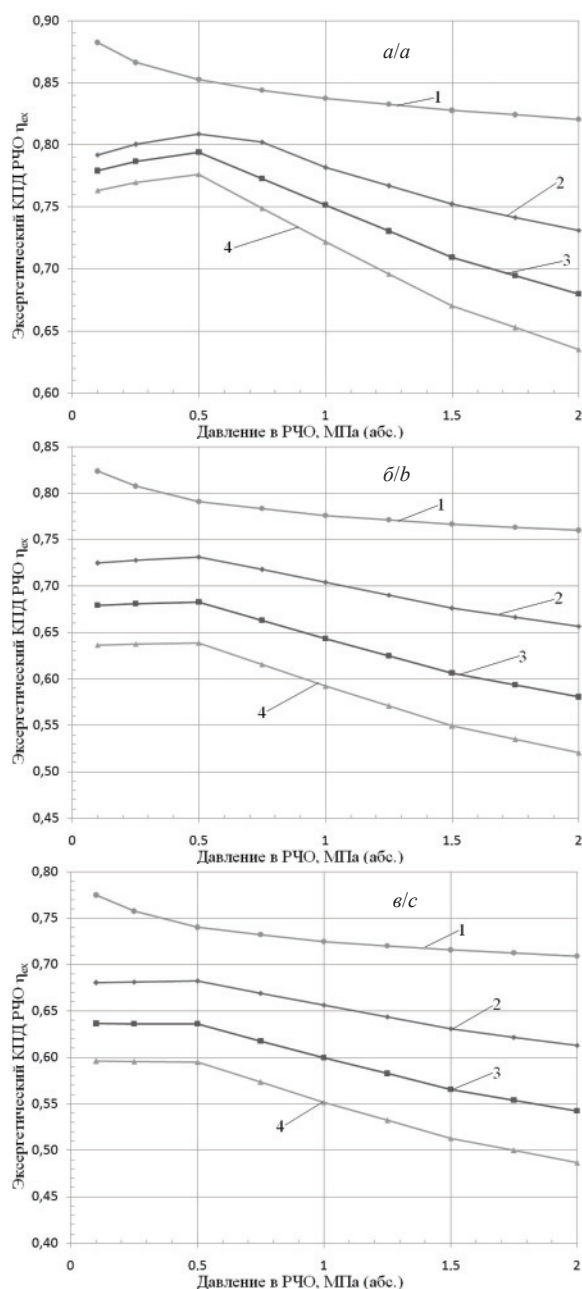


Рис. 4. Зависимость эксергетического КПД реактора частичного окисления при $g=0$ кг пара/кг конденсата (а), $g=3$ кг пара/кг конденсата (б) и $g=6$ кг пара/кг конденсата (в) от давления в реакторе частичного окисления: 1 – $C_{O_2}=21\%$; 2 – $C_{O_2}=46\%$; 3 – $C_{O_2}=71\%$; 4 – $C_{O_2}=96\%$

Fig. 4. Dependence of the exergy efficiency of the partial oxidation reactor at $g=0$ kg of vapor/kg of condensate (a), $g=3$ kg of vapor/kg of condensate (b), $g=6$ kg of vapor/kg of condensate (c) on pressure in the partial oxidation reactor: 1) $C_{O_2}=21\%$; 2) $C_{O_2}=46\%$; 3) $C_{O_2}=71\%$; 4) $C_{O_2}=96\%$

Из представленных результатов численного моделирования РЧО видно, что качественные характеристики (содержание целевых компонентов – водорода и оксида углерода) зависят как от концентрации кислорода в дутьевом воздухе, так и от по-

дачи дутьевого водяного пара, также подобная зависимость наблюдается и от коэффициента расхода воздуха в РЧО [5].

Результаты расчетов эксергетического КПД по выражению (1) с использованием (2)–(4) при различной удельной подаче водяного пара g , обеспечивающей достижение различного состава синтез-газа, представлены на рис. 4. Выбор интервала изменения давления в реакторе частичного окисления продиктован степенью повышения давления в компрессорах современных ГТУ, обеспечивающих повышения давления до 20 раз.

Наличие экстремумов на кривых 2–4 (рис. 4, а) объясняется тем, что по циклу Капицы для получения технологического кислорода необходимо повышать давление воздуха до 0,65 МПа, которое в последующем будет снижено до 0,1 и 0,5 МПа без получения полезной работы, что вызывает снижение эксергетического КПД. Также повышение давления в 2 раза с 0,5 до 1,0 МПа для случаев работы установки на атмосферном воздухе вызывает незначительное снижение эксергетического КПД на 1–2 абс. % для всех вариантов с различной подачей водяного пара. С переходом на использование обогащенного кислородом дутья эксергетический КПД снижается на 3–5 абс. % с последующей тенденцией к увеличению по мере роста содержания кислорода в дутьевом воздухе, что можно объяснить повышением доли затрат энергии на его получение. Применение дутьевого пара с термодинамической точки зрения также снижает эффективность процесса получения синтез-газа, что можно наблюдать на рис. 4, б, в, где экстремумы для кислородного дутья по мере увеличения подачи пара с $g=3$ кг пара/кг конденсата до $g=6$ кг пара/кг конденсата практически нивелируются за счет того, что абсолютные значения эксергии дутьевого пара начинает превалировать над соответствующим значением для окислителя. Подобные результаты получены и в работе [22], где КПД процесса кислородной конверсии попутного газа составил 85 %, а при использовании парокислородного дутья – 82 %.

Однако выбор и обоснование параметров процесса получения синтез-газа по результатам представленных расчетов не является однозначным, поскольку не обеспечивается равенство производственных эффектов по количеству и качеству образующегося синтез-газа. В таком случае необходимо вводить в рассмотрение системный (приведенный) эксергетический КПД, который по аналогии с [23] представлен в виде

$$\eta_{ex}^{np} = \frac{Ex_{cr}^{np}}{\left(G_{\tau} \cdot ex_{\tau} + G_{H_2O} \cdot ex_{H_2O} + \right.} \quad (5)$$

$$\left. + G_{ок} \cdot ex_{ок} + Ex_{\tau} \pm Ex_{H_2} \pm Ex_{CO} \right)$$

где $Ex_{cr}^{np} = Ex_{cr} \pm Ex_{H_2} \pm Ex_{CO}$ – приведённая эксергия синтез-газа базового варианта, соответствующего максимальной выработке водорода и оксида углерода, кВт; $Ex_{H_2} = \Delta V_{H_2} \cdot ex_{H_2}$ и $Ex_{CO} = \Delta V_{CO} \cdot ex_{CO}$ – эксер-

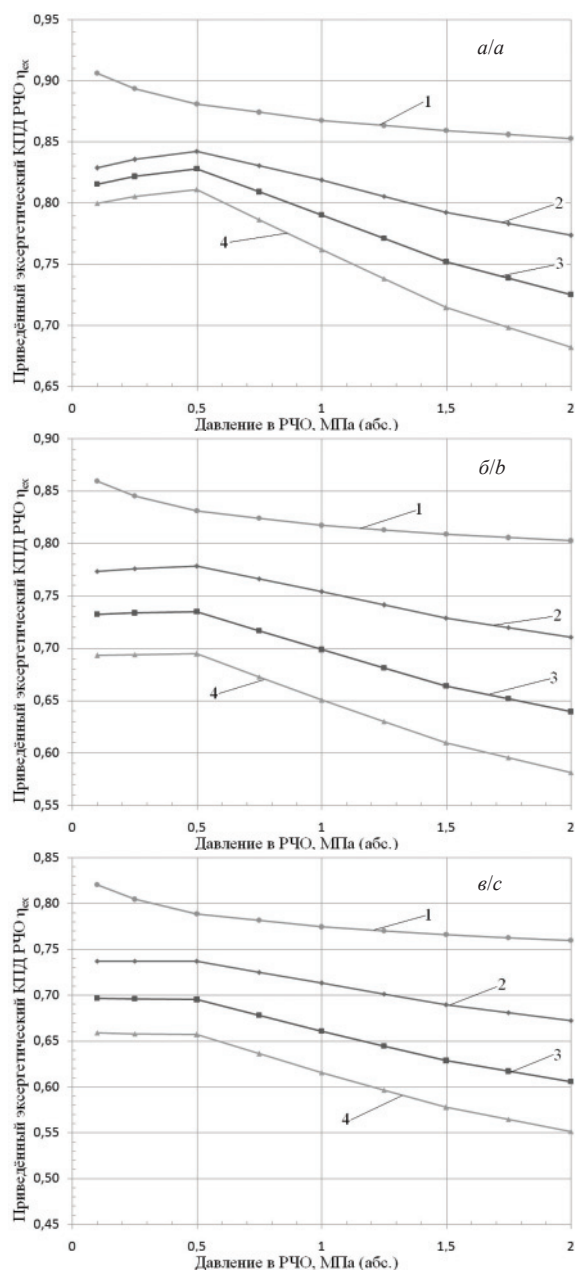


Рис. 5. Зависимость приведённого эксергетического КПД реактора частичного окисления при $g=0$ кг пара/кг конденсата (а), $g=3$ кг пара/кг конденсата (б) и $g=6$ кг пара/кг конденсата (в) от давления в реакторе частичного окисления: 1 – $C_{O_2}=21\%$; 2 – $C_{O_2}=46\%$; 3 – $C_{O_2}=71\%$; 4 – $C_{O_2}=96\%$

Fig. 5. Dependence of the reduced exergy efficiency of the partial oxidation reactor at $g=0$ kg of vapor/kg of condensate (a), $g=3$ kg of vapor/kg of condensate (b) and $g=6$ kg of vapor/kg of condensate (c) on pressure in the partial oxidation reactor: 1) $C_{O_2}=21\%$; 2) $C_{O_2}=46\%$; 3) $C_{O_2}=71\%$; 4) $C_{O_2}=96\%$

В качестве базового варианта примем в расчетах максимальную выработку водорода в рассматриваемом диапазоне изменения влияющих параметров на уровне $2,154 \text{ нм}^3/\text{с}$, а диоксида углерода – $1,372 \text{ нм}^3/\text{с}$. Результаты расчета приведенного системного эксергетического КПД по выражению (5) при $ex_{H_2}=118\,500 \text{ кДж/кг}$ и $ex_{CO}=9202,2 \text{ кДж/м}^3$ [24] представлены на рис. 5.

Таким образом, качественные результаты и выводы, полученные при анализе вариантов тепловых схем энергохимических установок с применением эксергетического КПД подтверждаются выполненными расчетами системного приведенного КПД (рис. 5).

Заключение

Состав синтез-газа и его расход зависят от концентрации кислорода в дутьевом воздухе, от подачи дутьевого водяного пара и коэффициента расхода воздуха в РЧО.

Установлено что максимальные значения термодинамической эффективности преобразования газового конденсата в синтез-газ с применением технологий парциального окисления достигаются при использовании атмосферного воздуха без обогащения кислородом, как для случая с подачей водяного пара, так и для случая без его подачи. При этом некоторые варианты тепловых схем энергохимических установок с газификацией топлива в термодинамическом плане могут считаться равноэффективными, а решение по количеству подаваемого водяного пара в зону реакции должно соответствовать требованиям к синтез-газу.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17–79–10036).

гия целевых компонентов синтез-газа, разница в выработке которых покрывается за счет замещающей альтернативной установки, кВт; ΔV_{H_2} и ΔV_{CO} – невязка материального баланса по целевым компонентам синтез-газа, $\text{нм}^3/\text{с}$; ex_{H_2} и ex_{CO} – затраты эксергии на получение единицы компонента синтез-газа на самом совершенном производстве (химическая эксергия вещества), кДж/м^3 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A converter for producing a hydrogen-containing synthesis gas / Y.P. Malkov, O.N. Molchanov, B.K. Britov, I.A. Fedorov // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2016. – V. 89. – № 6. – P. 1545–1553.
2. Pashchenko D. Thermodynamic equilibrium analysis of combined dry and steam reforming of propane for thermochemical waste-heat recuperation // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – V. 42. – № 22. – P. 14926–14935.
3. Моделирование энергосберегающих промышленных установок с термохимической регенерацией / А.Б. Гаряев, В.С. Глазов, С.В. Жубрин, С.К. Попов // *Вестник МЭИ*. – 2017. – № 4. – С. 15–22.
4. Долотовский И.В., Ларин Е.А., Долотовская Н.В. Системный анализ энергетического комплекса предприятий подготовки и переработки газа. – Саратов: Буква, 2014. – 326 с.
5. The chemical energy unit partial oxidation reactor operation simulation modeling / A.N. Mrakin, A.A. Selivanov, P.A. Batrakov, D.G. Sotnikov // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. – 2017. – № 944. – 012082. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012082.
6. Симонов В.Ф. Повышение эффективности энергоиспользования в нефтехимических производствах. – М.: Химия, 1985. – 240 с.
7. Badami M., Mura M. Exergetic analysis of an innovative small scale combined cycle cogeneration system // *Energy*. – 2010. – V. 35. – № 6. – P. 2535–2543.
8. Rosen M.A. Energy- and exergy-based comparison of coal-fired and nuclear steam power plants // *Exergy*. – 2001. – V. 1. – № 3. – P. 180–192.
9. Liao C., Ertesvåg I.S., Zhao J. Energetic and exergetic efficiencies of coal-fired CHP (combined heat and power) plants used in district heating systems in China // *Energy*. – 2013. – V. 57. – P. 671–681.
10. Ozkan D., Kiziler O., Bilge D. Exergy analysis of a cogeneration plant // *Engineering and Technology*. – 2012. – V. 61. – P. 774–778.
11. Shabbar S., Janajreh I. Thermodynamic equilibrium analysis of coal gasification using Gibbs energy minimization method // *Energy Conversion and Management*. – 2013. – V. 65. – P. 755–763.
12. Afanasyeva O.V., Mingaleeva G.R. Comprehensive exergy analysis of the efficiency of a low-capacity power plant with coal gasification and obtaining sulfur // *Energy Efficiency*. – 2014. – V. 8. – № 2. – P. 255–265.
13. Afanas'yeva O.V., Mingaleeva G.R. Exergy efficiency of small coal-fired power plants as a criterion of their wide applicability // *Solid Fuel Chemistry*. – 2009. – V. 43. – № 1. – P. 55–59.
14. Prins M.J. Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2005. – 160 p.
15. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие / под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского. – Киев: Наукова думка, 1991. – 360 с.
16. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
17. Мракин А.Н., Сотников Д.Г., Селиванов А.А. Построение расчетной модели определения геометрических размеров реактора частичного окисления топлива // *Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: сб. науч. тр. Вып. 8. Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов: материалы XIII Междунар. научно-техн. конф.* – Саратов: ИП Беглакова Е.С., 2016. – С. 318–322.
18. Имитационное моделирование работы реактора частичного окисления энергохимической установки / А.Н. Мракин, А.А. Селиванов, П.А. Батраков, Д.Г. Сотников // *Динамика систем, механизмов и машин*. – 2017. – Т. 5. – № 2. – С. 83–90.
19. СТО Газпром 089–2010. Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия. – М: ОАО «Газпром», 2010. – 15 с.
20. Хлебалин Ю.М. Эксергетический метод оценки эффективности бинарных ПГУ-ТЭЦ // *Вестник СГТУ*. – 2011. – № 1 (54). – Вып. 3. – С. 14–17.
21. Свит Т.Ф. Основы разделения воздуха методом глубокого охлаждения и ректификации. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2005. – 132 с.
22. Производство технологического газа для синтеза аммиака и метанола из углеводородных газов / А.Г. Лейбуш, В.П. Семенов, Я.С. Казарновский, Н.В. Кархов. – М.: Химия, 1971. – 288 с.
23. Mrakin A.N., Akimova G.A. Complex analysis of the efficiency of plants for the thermochemical conversion of solid fuel // *Solid Fuel Chemistry*. – 2015. – V. 49. – № 4. – P. 261–265.
24. Степанов В.С. Химическая энергия и эксергия веществ. – Новосибирск: Наука, 1990. – 163 с.

Поступила 01.02.2018 г.

Информация об авторах

Мракин А.Н., кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплотехники Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Николаев Ю.Е., доктор технических наук, профессор кафедры тепловой и атомной энергетики Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Сотников Д.Г., аспирант кафедры промышленной теплотехники Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Табакаев Р.Б., кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Селиванов А.А., кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплотехники Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

UDC 662.7

DETERMINATION OF THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF PARTIAL OXIDATION REACTORS OF ENERGY-CHEMICAL INSTALLATIONS

Anton N. Mrakin¹,
anton1987.87@mail.ru

Yury E. Nikolaev¹,
niko00949@mail.ru

Dmitry G. Sotnikov¹,
sotnikovdg@gazprommash.ru

Roman B. Tabakaev²,
TabakaevRB@tpu.ru

Alexey A. Selivanov¹,
selivanovaasstu@mail.ru

¹ Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.,
77, Polytechnic street, Saratov, 410054, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to increase energy efficiency when using hydrocarbons for combined production of chemical products and energy carriers applying gasification technologies. This will allow reducing production costs and expanding the possibilities of gas chemistry.

The main aim of the research is to determine the thermodynamic efficiency of partial fuel oxidation reactors, being the part of energy-chemical plants, by the combined production of energy carriers and synthesis gas. The main attention is paid to the influence of the regime parameters on numerical value of the exergy efficiency.

Object of the research is a partial oxidation reactor with a set of auxiliary equipment for providing synthesis gas production. This takes into account the system factor, i. e. parameters of the power system within the framework of which it is planned to build a similar type of power plant.

Method: numerical experiment involving traditional approaches to compiling exergy balance of heat and power plants. The authors have used as well the mathematical models developed earlier by them for calculating the parameters of synthesis gas formed at processing hydrocarbon raw materials in flow-through autothermal non-catalytic reactors.

Results. The obtained results enable us to choose the most expedient operating parameters of the partial oxidation reactor, which is a part of the energy-chemical plants with the gasification of unstable gas condensate. So the maximum values of exergy efficiency are achieved by using atmospheric air without enrichment with oxygen, both for the case of water vapor supply ($\eta_{ex}=78-83\%$), and for the case without steam supply ($\eta_{ex}=82-88\%$). At the same time, some variants of thermal schemes of energy-chemical plants with fuel gasification in thermodynamic terms can be considered equally effective, and the decision on the amount of water vapor supplied to the reaction zone must meet the requirements for synthesis gas. The choice of working pressure level in the reactor requires additional studies since the evidence of the use of the atmospheric-type reactor is not revealed at this stage of the study.

Key words: Gas condensate, exergy, blowing steam, oxygen, gasification, reactor, synthesis gas, electricity.

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 17-79-10036).

REFERENCES

1. Malkov Y.P., Molchanov O.N., Britov B.K., Fedorov I.A. A converter for producing a hydrogen-containing synthesis gas. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 6, pp. 1545–1553.
2. Pashchenko D. Thermodynamic equilibrium analysis of combined dry and steam reforming of propane for thermochemical waste-heat recuperation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, no. 22, pp. 14926–14935.
3. Garyaev A.B., Glazov V.S., Zhubrin S.V., Popov S.K. Modeling of energy-saving industrial plants with thermochemical regeneration. *Vestnik MEI*, 2017, no. 4, pp. 15–22. In Rus.
4. Dolotovskiy I.V., Larin E.A., Dolotovskaya N.V. *Sistemnyy analiz energeticheskogo kompleksa predpriyatiy podgotovki i pererabotki gaza* [System analysis of the energy complex of gas preparation and processing enterprises]. Saratov, Bukva Publ., 2014. 326 p.
5. Mrakin A.N., Selivanov A.A., Batrakov P.A., Sotnikov D.G. The chemical energy unit partial oxidation reactor operation simulation modeling. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2017, no. 944, 012082. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012082.
6. Simonov V.F. *Povyshenie effektivnosti energoispolzovaniya v neftekhimicheskikh proizvodstvakh* [Increasing the efficiency of energy use in petrochemical industries]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 240 p.
7. Badami M., Mura M. Exergetic analysis of an innovative small scale combined cycle cogeneration system. *Energy*, 2010, vol. 35, no. 6, pp. 2535–2543.
8. Rosen M.A. Energy- and exergy-based comparison of coal-fired and nuclear steam power plants. *Exergy*, 2001, vol. 1, no. 3, pp. 180–192.

9. Liao C., Ertesvag I.S., Zhao J. Energetic and exergetic efficiencies of coal-fired CHP (combined heat and power) plants used in district heating systems in China. *Energy*, 2013, vol. 57, pp. 671–681.
10. Ozkan D., Kiziler O., Bilge D. Exergy analysis of a cogeneration plant. *Engineering and Technology*, 2012, vol. 61, pp. 774–778.
11. Shabbar S., Janajreh I. Thermodynamic equilibrium analysis of coal gasification using Gibbs energy minimization method. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 65, pp. 755–763.
12. Afanasyeva O.V., Mingaleeva G.R. Comprehensive exergy analysis of the efficiency of a low-capacity power plant with coal gasification and obtaining sulfur. *Energy Efficiency*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 255–265.
13. Afanas'yeva O.V., Mingaleeva G.R. Exergy efficiency of small coal-fired power plants as a criterion of their wide applicability. *Solid Fuel Chemistry*, 2009, vol. 43, no. 1, pp. 55–59.
14. Prins M.J. *Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction*. Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, 2005. 160 p.
15. *Eksergeticheskiye raschety tekhnicheskikh sistem: spravochnoe posobiye* [Exergetic calculations of technical systems: reference book]. Ed. by A.A. Dolinsky, V.M. Brodyanskiy. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1991. 360 p.
16. Brodyanskii V.M., Fratsher V., Mikhalek K. *Eksergeticheskiy metod i ego prilozheniya* [The exergy method and its applications]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 288 p.
17. Mrakin A.N., Sotnikov D.G., Selivanov A.A. Postroeniye raschetnoy modeli opredeleniya geometricheskikh razmerov reaktora chastichnogo okisleniya topliva [Construction of a calculation model for determining the geometric dimensions of a partial fuel oxidation reactor]. *Problemy sovershenstvovaniya toplivno-energeticheskogo kompleksa: sbornik nauchnykh trudov. Vyp. 8. Sovershenstvovanie energeticheskikh sistem i teploenergeticheskikh kompleksov: materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Problems of improving the fuel and energy complex: coll. sci. tr. Iss. 8. Perfection of power systems and heat-and-power complexes: Materials of XIII Intern. scientific and technical. conf.]. Saratov, IP Beglakova E.S. Publ., 2016. pp. 318–322.
18. Mrakin A.N., Selivanov A.A., Batrakov P.A., Sotnikov D.G. Simulation modeling of the partial oxidation reactor of an energy-chemical installation. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*, 2017, vol. 5, no. 2, pp. 83–90. In Rus.
19. STO Gazprom 089–2010. *Gaz goryuchiy prirodny, postavlyayemy i transportiruyemy po magistralnym gazoprovodam. Tekhnicheskiye usloviya* [Natural gas, supplied and transported through main gas pipelines. Technical conditions]. Moscow, OAO Gazprom Publ., 2010. 15 p.
20. Khlebalin Yu.M. An exergetic method for estimating the efficiency of binary CCGT-TPPs. *Vestnik SGTU*, 2011, no. 1 (54), Iss. 3, pp. 14–17. In Rus.
21. Svit T.F. *Osnovy razdeleniya vozdukha metodom glubokogo okhlazhdeniya i rektifikatsii* [Fundamentals of air separation by deep cooling and rectification]. Barnaul, I.I. Polzunov Altay State Technical University Publ. house, 2005. 132 p.
22. Leybusch A.G., Semenov V.P., Kazarnovsky Ya.S., Karkhov N.V. *Proizvodstvo tekhnologicheskogo gaza dlya sinteza ammiaka i metanola iz uglevodorodnykh gazov* [Production of process gas for synthesis of ammonia and methanol from hydrocarbon gases]. Moscow, Khimiya Publ., 1971. 288 p.
23. Mrakin A.N., Akimova G.A. Complex analysis of the efficiency of plants for the thermochemical conversion of solid fuel. *Solid Fuel Chemistry*, 2015, vol. 49, no. 4, pp. 261–265.
24. Stepanov V.S. *Khimicheskaya energiya i eksergiya veshchestv* [Chemical energy and exergy of substances]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 163 p.

Received: 1 February 2018.

Information about the authors

Anton N. Mrakin, Cand. Sc., associate professor, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

Yury E. Nikolaev, Dr. Sc., professor, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

Dmitry G. Sotnikov, post-graduate student, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

Roman B. Tabakaev, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University

Alexey A. Selivanov, Cand. Sc., associate professor, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.