

Табл. 1. Скорость 50-процентной конверсии метана при 500 °С и прочность образцов на истирание

Образец	$W_{50\%}^*$ , мл(г·с)·10 <sup>-3</sup>	Потери массы при истирании, % (ASTM D 4058 96)
N1	28,0	< 1
N2	26,2	< 1
N3	17,7	< 1
N4	18,2	< 1
N5	19,0	< 1

Из таблицы 2 видно, что образцы N1 и N2 проявляют наибольшие значения скорости, незначительно отличающиеся друг от друга. Значения скорости 50-процентной конверсии метана для образцов N3-N5 также незначительно отличаются друг от друга, однако существенно ниже, чем соответствующие показатели первых двух образцов. Стандартная методика определения прочности недостаточно чувствительна для сравнения данных образцов, поскольку значения потери массы всех образцов при истирании незначительны.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Исследование катализаторов глубокого окисления СО и органических веществ для кипящего слоя / Ю.В. Дубинин, Н.А. Языков, А.Д. Симонов, В.А. Яковлев и др. // Катализ в промышленности. - 2013. - N 4. С. 68-76.
2. Поповский В.В. Закономерности глубокого окисления веществ на твердых окисных катализаторах: дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.04 / Институт катализа СО АН СССР. - Новосибирск, 1973. - 324 с.
3. Корябкина Н.А. Научные основы приготовления и разработка способа получения высокопрочных магнийсодержащих алюмооксидных носителей: Автореф. Дис... канд. хим. наук: 02.00.15 / Корябкина, Н.А. Ин-т катализа им. Г. К. Борескова СО РАН - Новосибирск. 1992. - 19 с.

Научный руководитель: Ю.В. Дубинин, кхн, нс, Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН.

### **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДУТЬЯ ЭНЕРГОХИМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ГАЗИФИКАЦИЕЙ ТОПЛИВА**

А.Н. Мракин<sup>1</sup>, Д.Г. Сотников<sup>1</sup>, Р.Б. Табакаев<sup>2</sup>

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. <sup>1</sup>

Томский политехнический университет<sup>2</sup>

На сегодняшний день в практике научных исследований все большую популярность приобретают методы термодинамического анализа, основанные на

эксергетическом балансе [1-2], главным достоинством которых является наличие единого безразмерного относительного показателя совершенства, который учитывает не только количество энергии на основе второго закона термодинамики, но и ее качество. 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. Такие установки могут использовать в качестве исходного топлива не только уголь, горючие сланцы, биомассу, но и нестабильный газовый конденсат, и отходы нефтепереработки [3]. Основной процесс газификации топлива в таких установках происходит в реакторе частичного окисления, в который подается топливо, окислитель и дутьевой пар для повышения содержания водорода в продуктах реакции. При этом качество синтез-газа (содержание CO и H<sub>2</sub>, его температура) будут 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 [4].

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

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{c2}}{G \cdot ex_m + G_{H_2O} \cdot ex_{H_2O} + G_{OK} \cdot ex_{OK} + Ex_3}, \quad (1)$$

где  $Ex_{c2} = ex_{c2} \cdot G_{c2}$  – эксергия образовавшегося синтез-газа, кВт;  $G_{c2}$  – массовый расход синтез-газа, кг/с;  $ex_m$ ,  $ex_{OK}$ ,  $ex_{H_2O}$  – удельная эксергия потребленного топлива (газового конденсата), окислителя (воздуха) и водяного пара, кДж/кг;  $G$ ,  $G_{OK}$ ,  $G_{H_2O}$  – расход топлива, окислителя и водяного пара, кг/с;  $Ex_3$  – эксергия топлива, эквивалентная затраченной электроэнергии на привод компрессора окислителя и обеспечение работы воздухоразделительной установки, кВт.

Удельную эксергию синтез-газа будем определять согласно [5] 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:

$$ex_{c2} = ex_{c2}^{\phi} + ex_{c2}^x = R \cdot T_0 \cdot \ln \frac{p}{p_0} + c_p \cdot \left( T - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T}{T_0} \right) + ex_{c2}^x, \quad (2)$$

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;  $ex_{c_2}^x$  – химическая эксергия синтез-газа, кДж/кг.

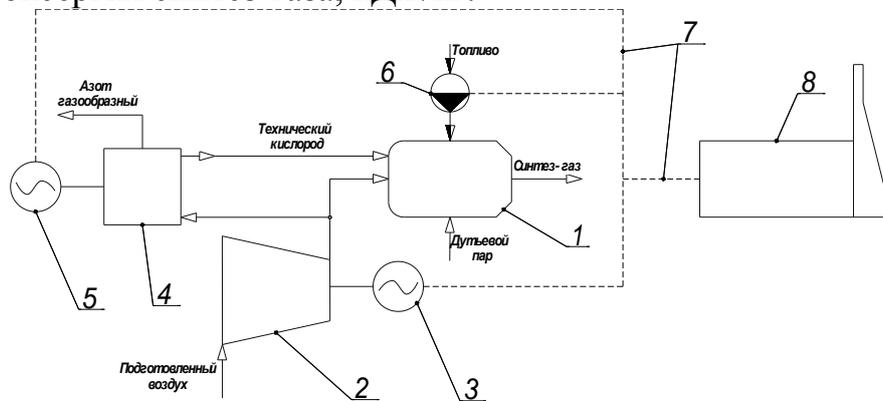


Рис. 1. Расчетная схема материально-энергетических потоков для определения эксергетического КПД: 1 - реактор частичного окисления; 2 - компрессор воздуха; 3 - электродвигатель компрессора; 4 - воздухоразделительная установка; 5 - электропривод воздухоразделительной установки; 6 - топливный насос; 7 - транзитные сети электроснабжения; 8 - электростанция.

Эксергия топлива (газового конденсата) будет определяться только ее химической составляющей, поскольку подогрева топлива перед подачей в реактор частичного окисления не предусмотрено. Расчетную формулу можно выбрать по рекомендациям [5] или [6].

Эксергия пара определяется исходя из его параметров по специальным диаграммам состояния приведенным в [5] или аналитическим путем с учетом рекомендаций [6], кДж/кг:

$$ex_{H_2O} = h - h_0 - T_0 \cdot (s - s_0), \quad (3)$$

где  $h$ ,  $s$  – энтальпия и энтропия пара при его температуре насыщения и соответствующем давлении, кДж/кг, кДж/(кг·К);  $h_0$ ,  $s_0$  – энтальпия и энтропия пара при параметрах окружающей среды, кДж/кг, кДж/(кг·К).

Учитывая концепцию 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:

$$Ex_{\text{э}} = B \cdot \frac{ex_m^{\text{эс}}}{\eta_{\text{ex}}^{\text{эс}} \cdot \eta_{\text{тр}}} = \frac{N}{Q_n^p \cdot \eta_{\text{эл}} \cdot \eta_{\text{сн}}} \cdot \frac{ex_m^{\text{эс}}}{\eta_{\text{ex}}^{\text{эс}} \cdot \eta_{\text{тр}}}, \quad (4)$$

где  $B$  – расход топлива, кг/с;  $ex_m^{\text{эс}} = \beta \cdot Q_6^p$  – удельная эксергия топлива, определяемая согласно [5], кДж/кг;  $N$  – электрическая мощность, затрачиваемая на привод компрессора и работу воздухоразделительной установки, кВт;  $Q_n^p$  и  $Q_6^p$  – низшая и высшая теплота сгорания используемого в энергосистеме топлива, кДж/кг;  $\beta$  – коэффициент пересчета эксергии топлива;  $\eta_{\text{эл}}$  – КПД теп-

лового двигателя, используемого для получения электроэнергии;  $\eta_{сн}$  – коэффициент собственных нужд электростанции;  $\eta_{ex}^{эс}$  – эксергетический КПД по выработке электроэнергии в рассматриваемой энергосистеме;  $\eta_{mp}$  – КПД, учитывающий потери эксергии электроэнергии при транспортировке.

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 [3];  $G=1,0$  кг/с;  $\alpha=0,5$ ;  $Q_n^P=31800$  кДж/кг и  $Q_6^P=35290$  кДж/кг [7];  $\eta_{эл}=0,53$ ;  $\eta_{сн}=0,95$ ;  $\eta_{ex}^{эс}=0,59$  [8];  $\eta_{mp}=0,98$ ;  $\beta=0,95$  [5];  $p_{в-ха}=0,65$  МПа – давление сжатия воздуха в компрессоре холодильного цикла низкого давления (цикла Капицы), необходимое для получения технического кислорода [9]. Результаты расчетов эксергетического КПД по выражению (1) с использованием (2)-(4) представлены на рис. 2.

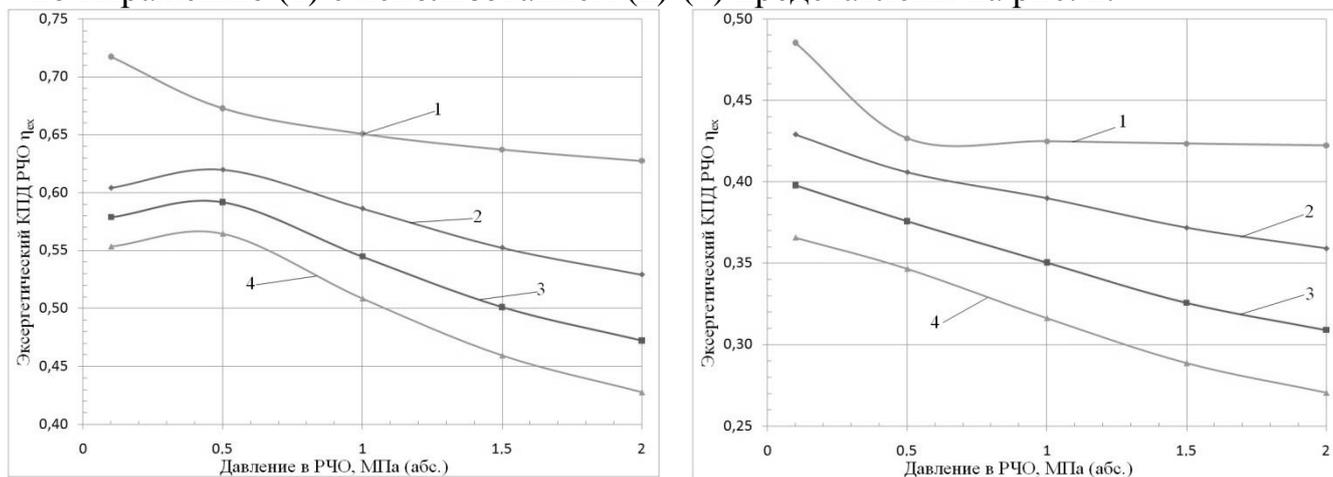


Рис. 2. Зависимость эксергетического КПД реактора частичного окисления а)  $g=0$  кг пара/кг конденсата б)  $g=3$  кг пара/кг конденсата от давления в реакторе частичного окисления: 1 –  $C_{O_2}=21\%$ ; 2 –  $C_{O_2}=46\%$ ; 3 –  $C_{O_2}=71\%$ ; 4 –  $C_{O_2}=96\%$ .

Наличие экстремумов на кривых 2-4 (рис. 2 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 давление в 2 раза с 0,5 до 1,0 МПа как для случая с подачей пара, так и при его отсутствии, вызывает снижение эксергетического КПД на 1,5-2,5 абс. % для всех вариантов содержания кислорода в дутьевом воздухе, что можно объяснить повышением доли затрат энергии на сжатие окислителя. Применение дутьевого пара с термодинамической точки зрения также снижает эффективность процесса получения синтез-газа, что можно наблюдать на рис. 2 б, где отсутствуют экстремумы для кислородного дутья, поскольку абсолютные значения эксергии дутьевого пара превалирует над соответствующим значением для окислителя. При выборе оптимального варианта аппаратурно-технологического и параметрического оформления энерготехно-

логической установки окончательное решение делается на основе технико-экономических расчетов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. 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. №2. p. 255-265.
2. Badami M., Mura M. Exergetic analysis of an innovative small scale combined cycle cogeneration system //Energy. 2010. Vol. 35. №6. p. 2535-2543.
3. Мракин А.Н. Построение расчетной модели определения геометрических размеров реактора частичного окисления топлива / А.Н. Мракин, Д.Г. Сотников, А.А. Селиванов // 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.
4. Симонов В.Ф. Повышение эффективности энергоиспользования в нефтехимических производствах. - М.: Химия, 1985. - 240 с.
5. Эксергетические расчеты технических систем: Справ. пособие / Под ред. Долинского А.А., Бродянского В.М. - Киев: Наукова думка, 1991. - 360 с.
6. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 288 с.
7. СТО Газпром 089-2010 «Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия».
8. Хлебалин Ю.М. Эксергетический метод оценки эффективности бинарных ПГУ-ТЭЦ / Ю.М. Хлебалин // Вестник СГТУ. 2011. №1 (54). Выпуск 3. С. 14-17.
9. Свит Т.Ф. Основы разделения воздуха методом глубокого охлаждения и ректификации: учеб. пособие / Т.Ф. Свит. - Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2005. - 132 с.

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