

2. Программа автоматизированного расчета кластера ВИЭ «АРК-ВИЭ» : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610600, 29.01.2013 / Велькин В. И., Логинов М. И., Чернобай Е. В. ; свидетельство РФ 2013613097 25.03.2013.

3. Программа визуализации поиска оптимального кластера ВИЭ «VIZPO-RES» : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611503, 25.02.2014 / Велькин В. И., Денисов К. С., Чернобай Е. В. ; свидетельство РФ 2014614024 14.04.2014.

УДК 620.93

Ершов М. И., Волкова Ю. В., Плотников Н. С., Мунц В. А., Мунц Ю. Г.  
Уральский федеральный университет,  
ООО «Уральская производственная компания»  
gibridsofc@gmail.com

## **ПОВЫШЕНИЕ КПД ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ С ВОЗДУШНЫМ РИФОРМЕРОМ ПУТЕМ РЕЦИРКУЛЯЦИИ УХОДЯЩИХ АНОДНЫХ ГАЗОВ**

**Аннотация.** В работе описана методика расчета минимальной степени рециркуляции анодных газов и границы сажеобразования в энергоустановке на твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ). Приведены результаты расчета  $\alpha_{c\_rec}$  от  $\alpha_{f,out}$  для степени рециркуляции  $z = 0,6$  для температурного диапазона от 600 до 900 °С. Расчеты показали, что при работе при более низких температурах (600-700 °С), кислорода в связанном виде ( $CO_2$  и  $H_2O$ ) в уходящих анодных газах не хватит для осуществления риформинга, но путем добавления небольшого количества воздуха, можно обеспечить устойчивую работу риформера природного газа в автотермическом режиме.

Энергетические установки на ТОТЭ доказали свою экологичность и эффективность, именно поэтому во всем мире сегодня активно занимаются разработками в области оптимизации схем установок для различных отраслей [1]. Одним из основных недостатков установок у применяемых сегодня воздушных риформеров является несколько меньший КПД при сравнении с паровым. С другой стороны, уходящие из анодного канала газы состоят в основном из  $CO_2$  и  $H_2O$  и путем их возвращения в риформер, можно повысить КПД всей установки [2]. На рис. 1 изображена схема ТОТЭ с рециркуляцией анодных газов.

При использовании для риформинга никелевого катализатора главное избегать осаждения свободного углерода. Поэтому необходимо знать границы сажеобразования и минимальные степени рециркуляции для рабочего диапазона температур электрохимического генератора на ТОТЭ и риформера в случае возвращения уходящих анодных газов, которые будет исключать сажеобразование.

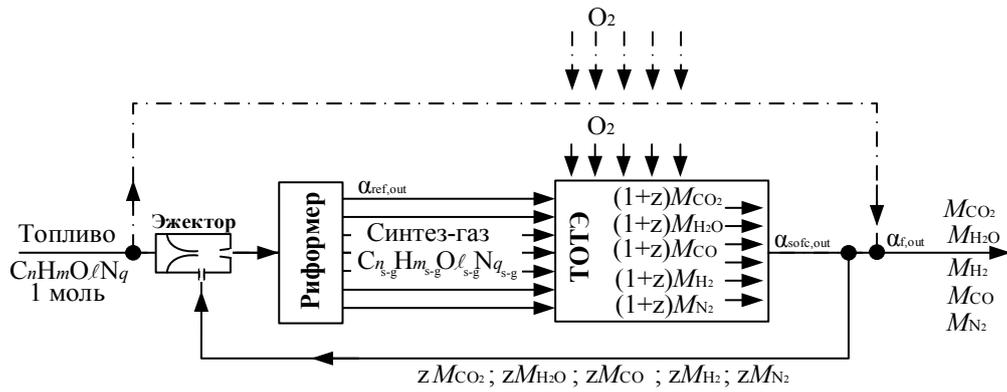


Рис. 1. Схема ТОТЭ с рециркуляцией анодных газов

Для нахождения минимального значения степени рециркуляции  $z_{min}$ , обеспечивающую отсутствие сажеобразования при заданной температуре в риформере, можно составить следующую систему нелинейных уравнений:

$$M_{CO_2} + M_{CO} + M_{CH_4} = n(1 + z) \quad (1)$$

$$2M_{H_2O} + 2M_{H_2} + 4M_{CH_4} = m(1 + z) \quad (2)$$

$$2M_{CO_2} + M_{CO} + M_{H_2O} = l(1 + z) + z\alpha_{f,out}(2n + 0,5m - l) \quad (3)$$

$$2M_{N_2} = q(1 + z) \quad (4)$$

$$\frac{M_{CO_2} \cdot M_{H_2}}{M_{CO} \cdot M_{H_2O}} = K \quad (5)$$

$$\frac{M_{CO} \cdot M_{H_2} \cdot p}{M_{H_2O} \cdot M_g \cdot a_c} = K_2 \quad (6)$$

$$M_{CO_2} + M_{H_2O} + M_{CO} + M_{H_2} + M_{CH_4} + M_{N_2} = M_g \quad (7)$$

Если в исходном топливе азот отсутствует, то переменная  $M_{N_2}=0$ , следовательно, для решения системы в этом случае можно ввести еще одно уравнение для константы равновесия реакции диссоциации метана

$$\frac{M_{H_2}^2 \cdot p \cdot a_c}{M_{CH_4} \cdot M_g} = K_3 \quad (8)$$

На рис. 2 изображена зависимость  $z_{min}$  и  $\alpha_{f,out}$ , рассчитанная для случая, когда в риформер для протекания реакции конверсии подаются только уходящие из анодного канала газы.

Из графика на рис. 2 видно, что чем ниже температура в риформере, тем граница начала рециркуляции  $\alpha_{f,out}^0$  смещается ближе к 1.  $\alpha_{f,out}^0$  – это такое значение степени поглощения кислорода топливом в ТОТЭ, при котором возврат 100 % уходящих газов является достаточным, чтобы обеспечить протекание риформинга поступающего топлива с отсутствием сажеобразования. Если фактическое  $\alpha_{f,out} < \alpha_{f,out}^0$ , то уходящие газы не смогут обеспечить работу устойчивую работу риформера, т. к. в них будет содержаться достаточно много горючих компонентов CO и H<sub>2</sub>, и недостаточно CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O.

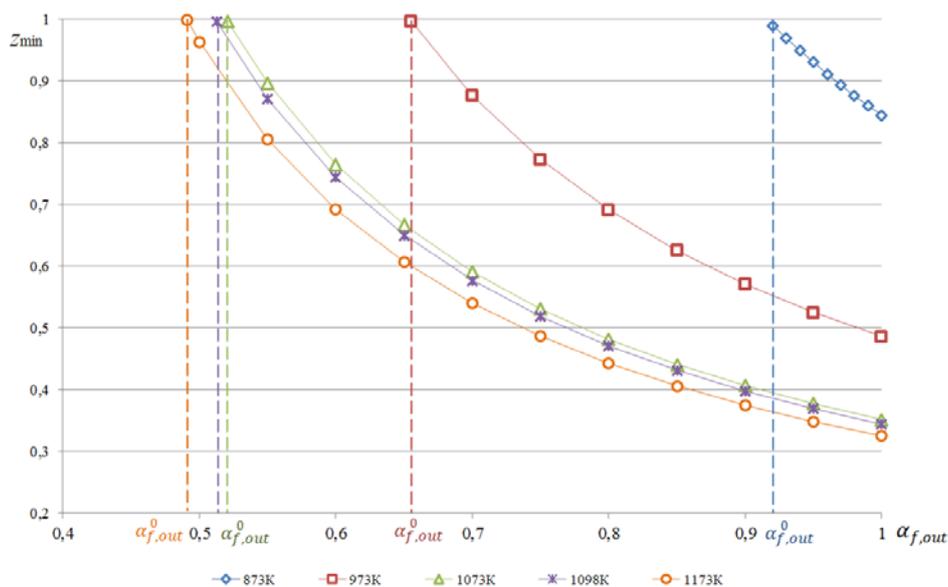


Рис. 2. Зависимость  $z_{min}$  и  $\alpha_{f,out}$  при температурах 873, 973, 1073, 1098 и 1173 К (сплошные линии); граница начала рециркуляции  $\alpha_{f,out}^0$  (пунктирные)

Для устойчивой работы эжектора можно установить степень рециркуляции постоянной, а в риформер подводить требуемое количество воздуха в зависимости от температуры,  $\alpha_{f,out}$  и выбранной степени рециркуляции. На рис. 3 построена зависимость  $\alpha_{c,rec}$  от  $\alpha_{f,out}$  для степени рециркуляции  $z = 0,6$ . Количество подаваемого добавочного воздуха можно регулировать в зависимости от температуры на выходе из риформера при помощи PID регулятора.

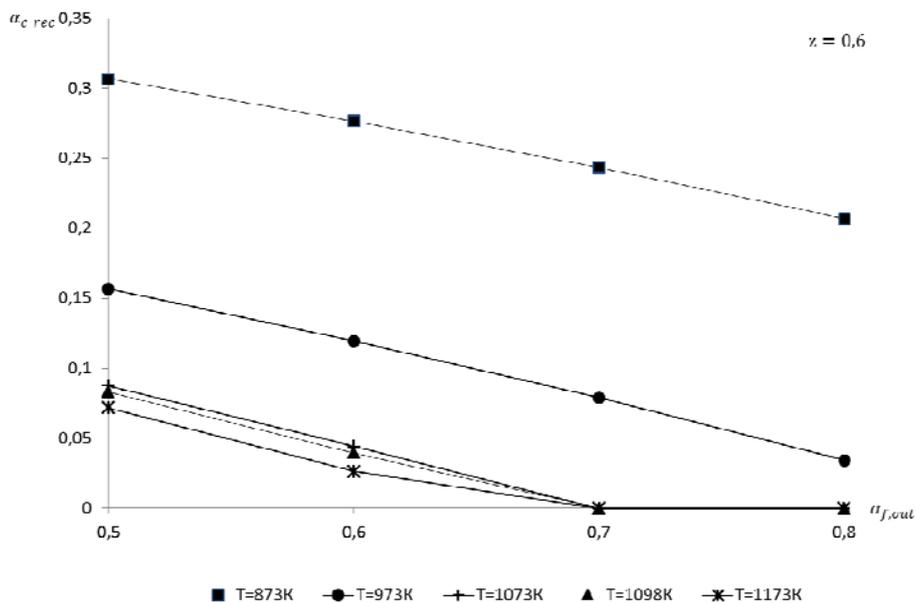


Рис. 3. Зависимость  $\alpha_{c,rec}$  от  $\alpha_{f,out}$  для степени рециркуляции  $z = 0,6$

Из рис. 3 видно, что в случае, когда степень использования топлива в ТОТЭ  $\alpha_{f,out} > 0,7$ , то при температуре в риформере выше 800 °С воздух можно не подавать, продуктов реакции из ТОТЭ будет достаточно, чтобы осуществить риформинг природного газа, а при температуре 700 °С количество подаваемого воздуха можно снизить до  $\alpha_{rec} = 0,15$ , что меньше в 2,5 раза, чем при только воздушном

риформинге, при этом обеспечивается автотермичность режима и значительный ресурсосберегающий эффект, в таком режиме срок службы катализатора на 35 % больше, чем при воздушном риформинге [3].

#### Список использованных источников

1. Баскаков А. П., Волкова Ю. В. Физико-химические основы тепловых процессов: учебное пособие для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника». М.: Теплотехник, 2013. 172 с.
2. Halinen M., Thomann O., Kiviaho J. Experimental study of SOFC system heat-up without safety gases // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. V. 39. P. 552-561.
3. Marsano F., Magistri L., Massardo A.F. Ejector performance influence on a solid oxide fuel cell anodic recirculation system // Journal of Power Sources. 2004. V. 129. P. 216-228.

УДК 620.97

Зорин М. О., Мельникова У. О., Петров Е. А., Михайлишин Е. В.  
Уральский федеральный университет  
kafedratgiv@yandex.ru

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В КОТТЕДЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**Аннотация.** В работе рассматривается сравнение экономической эффективности применения тепловых насосов и солнечных установок для теплоснабжения коттеджа. Критерии экономической эффективности определялись с учётом дисконтирования и роста стоимости энергии в течение срока эксплуатации. Получено, что наиболее выгодным вариантом теплоснабжения является использование теплового насоса «вода-вода».

В Екатеринбурге и его окрестностях достаточное количество коттеджей, в которых отсутствует газоснабжение. Привлекательным с точки зрения и обслуживания, и стоимости является использование в качестве источника тепловой энергии электрического котла. Электричество в стране будет всегда. Стоимость 1 кВт·ч тепловой энергии при применении электрического котла самая высокая по сравнению с другими источниками тепловой энергии и в будущем будет расти. Значительно снизить потребление электрической энергии позволяет применение возобновляемых источников энергии с помощью тепловых насосов и солнечных установок. Тепловые насосы и установки солнечного теплоснабжения обладают рядом достоинств, к которым относятся экономия энергетических ресурсов, экологическая чистота, простота конструкции и надёжность в работе, незначительные эксплуатационные расходы, долговечность, безопасность.

Коттедж представляет собой двухэтажное здание площадью 148 м<sup>2</sup>. Теплотехнические характеристики ограждающих конструкций соответствуют нормативным требованиям [1]. Расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию