

Повышение энергоэффективности барботажного реактора пиролиза метана

А.А. Вахрушева, Е.А. Косарева

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Обоснование. Для промышленного производства водорода пиролизом метана (ПМ) можно использовать барботажный реактор с колонной, частично заполненной каталитическим расплавом металлов. Практика использования лабораторных прототипов этих устройств показывает их эффективность. Так, при работе на подобном реакторе была достигнута 90 % конверсия метана при температуре расплава Ni27 %-Bi73 % в 1065 °С [1]. Однако такой способ производства водорода эффективен лишь при высоких температурах, что делает его энергозатратным.

Цель — разработка и предварительная оценка системы, повышающей энергоэффективность барботажного реактора (СПЭБР) пиролиза метана.

Методы. Высокие температуры в реакторе ПМ достигаются за счет использования электроэнергии и теплоты, выделяющейся при сжигании ценного сырья: природного газа и получаемой метано-водородной смеси. Дополнительным источником энергии при производстве водорода ПМ может стать тепло отходящих продуктов реакции [2]. Этот принцип предлагается использовать в СПЭБР, схема которой приведена на рис. 1. Горячий углерод направляется в теплообменник (ТО) с подвижным слоем, где отдает теплоту воде, превращая ее в пар. Этот пар поступает в паровую турбину (ПТ), вырабатывающую электроэнергию, которая в дальнейшем используется для покрытия части энергетических расходов производства.

Показателем эффективности СПЭБР является производимая ею мощность (Q_c). Для нахождения Q_c :

1) составлено уравнение теплового баланса для ТО, учитывающее зависимость молярной теплоемкости углерода и водяного пара от температуры, откуда после нахождения соответствующих интегралов было получено выражение для расхода холодного теплоносителя G_2 :

$$G_2 = \frac{\left(G_1 \left(3 \cdot a_1 (T_{1K} - T_{1H}) + 1,5b_1 (T_{1K}^2 - T_{1H}^2) - d_1 (T_{1K}^{-3} - T_{1H}^{-3}) \right) \right)}{\left(C_2 (T_{2K} - T_{2H}) + L + \left(3 \cdot a_3 (T_{3K} - T_{3H}) + 1,5b_3 (T_{3K}^2 - T_{3H}^2) - d_3 (T_{3K}^{-3} - T_{3H}^{-3}) \right) \right)},$$

где $G_1 = 1427$ моль/с — расход углерода; $C_2 = 75,6$ Дж/(моль · К) — молярная теплоемкость воды; $L = 41,4$ кДж/моль — молярная теплота парообразования воды; $T_{2H} = 291$ К — температура воды в трубопроводе; $T_{2K} = T_{3H} = 373$ К — температура кипения воды. Величины с индексом 1 относятся к углероду, с индексом 3 — к водяному пару. Их значения взяты из [1–4, 6, 7] и приведены в таблице 1.

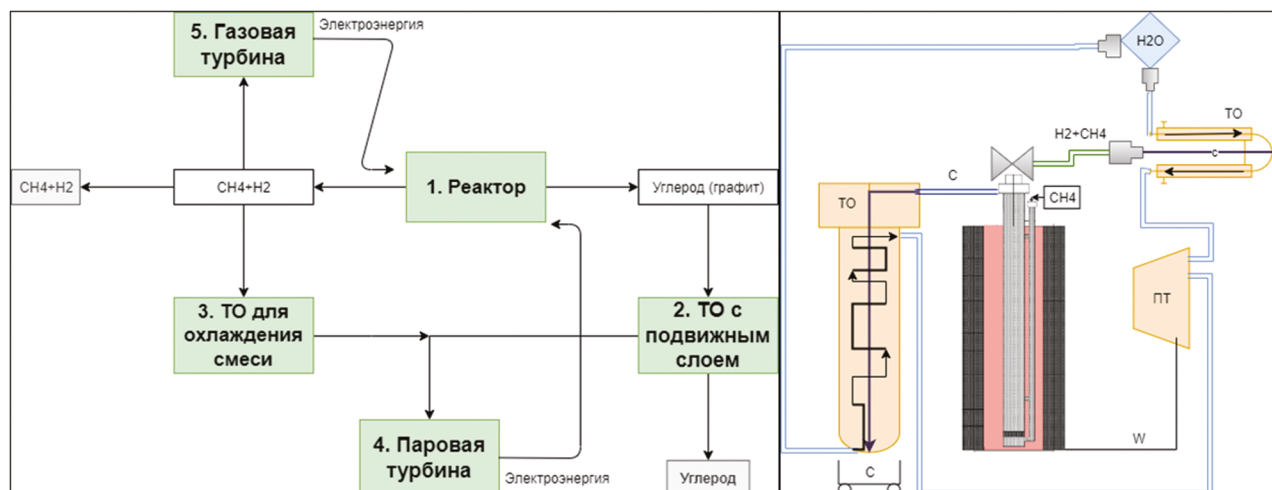


Рис. 1. Общая схема системы, повышающей энергоэффективность барботажного реактора

Таблица 1. Справочные данные

Теплоноситель	Начальная температура T_n , К	Конечная температура T_k , К	Значения коэффициентов в формуле для теплоемкости $c_p = a + bT + \frac{d}{T^2}$		
			a , Дж/(моль × К)	b , Дж/(моль × К ²)	d , Дж × К ³ /моль
Углерод	1238	313	17,15	0,00427	$-879,3 \times 10^3$
Водяной пар	373	833	30	$1,071 \times 10^{-6}$	330×10^3

После вычислений было получено:

$$G_2 \approx 388 \text{ моль/с,}$$

откуда найден массовый расход водяного пара:

$$G_{2m} \approx 6,98 \text{ кг/с;}$$

2) определен общий теплоперепад ΔH на ПТ:

$$\Delta H = i_2 - i_1 \approx 1,2 \times 10^6 \text{ Дж/кг,}$$

где $i_1 = 3,6$ МДж/кг — энтальпия перегретого пара на входе в турбину при $T_{3к}, p_{1п} = 3$ МПа; $i_2 = 2,4$ МДж/кг — энтальпия пара после расширения на выходе из турбины при $T_{2п}, p_{2п} = 0,12$ МПа;

3) используя найденные значения G_{2m} и ΔH , рассчитали полезную мощность ПТ $W_{пол}$:

$$W_{пол} = G_{2m} \times \Delta H \times h_{ПТ} \approx 3,77 \times 10^6 \text{ Вт,}$$

где $h_{ПТ} = 0,45$ — КПД паровой турбины;

3) мощность, потребляемая насосом W_n для перекачки воды по ТО, равная мощности, затрачиваемой на его функционирование [5], вычислена как:

$$W_n = \eta_n \cdot \Delta p \cdot G_{2m} \approx 2,23 \cdot 10^4 \text{ Вт,}$$

где $\Delta p = 3,8$ МПа — перепад давления на насосе, $\eta_n = 0,85$ — КПД насоса;

4) учитывая КПД печи реактора ($\eta_{ПР} = 0,75$) и найденные значения $W_{пол}$ и W_n , определили значение Q_c :

$$Q_c = (W_{пол} - W_n) \cdot h_{ПР} \approx 2,8 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Результаты. Сравним мощность Q_c , производимую СПЭБР, с энергозатратами производства (Q_3), значение которых было взято из [1, 3]. Получим:

$$Q_c/Q_3 \cdot 100 \% = 0,17 \%,$$

откуда следует, что СПЭБР не компенсирует основные энергозатраты на производство водорода методом ПМ, но является дополнительным источником энергии. Также она полностью обеспечивает свое функционирование.

Вывод. Использование теплоты углерода, полученного при ПМ, повышает энергоэффективность производства водорода.

Ключевые слова: водород; пиролиз метана; барботажный реактор; углерод; теплообменник с подвижным слоем; энергоэффективность промышленного производства.

Список литературы

1. Upham D.C., Agarwal V., Khechfe A., et al. Catalytic molten metals for the direct conversion of methane to hydrogen and separable carbon // Science. 2017. Vol. 358, No. 6365. P. 917–920. DOI: 10.1126/science.aao5023
2. Leal Perez B., Medrano Jiménez J.A., Bhardwaj R., et al. Methane pyrolysis in a molten gallium bubble column reactor for sustainable hydrogen production: Proof of concept and techno-economic assessment // Int J Hydrog Energy. 2021. Vol. 46, No. 7. P. 4917–4935. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.079
3. Timmerberg S., Kaltschmitt M., Finkbeiner M. Hydrogen and hydrogen-derived fuels through methane decomposition of natural gas – GHG emissions and costs // Energy Convers Manag. 2020. Vol. 7. ID 100043. DOI: 10.1016/j.ectmx.2020.100043
4. Морозов В.А., Морозов А.В. Паровые и газовые турбины: Методические рекомендации к курсовому проекту «Паровые и газовые турбины» для студентов направления подготовки 13.04.01. магистерской программы «Теплотехника и теплоэнергетика». Курск: Юго-Западный государственный университет, 2018. 39 с.

5. solexthermal.com [Электронный ресурс]. Science ST. Products and Solutions - Cooling 2019. Доступ по: <https://www.solexthermal.com/our-technology/cooling/>
6. ГОСТ 24278-2016 Установки турбинные паровые стационарные для привода электрических генераторов ТЭС.
7. Мищенко К.П., Равдель А.А. Краткий справочник физико-химических величин. 7-е изд. Ленинград: Химия, 1974. 200 с.

Сведения об авторах:

Александра Антоновна Вахрушева — студентка, группа 22-ФАиД-103, факультет архитектуры и дизайна; Самарский государственный технический университет, Самара, Россия. E-mail: organa.anderson@mail.ru

Евгения Александровна Косарева — научный руководитель, кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры «Физика», Самарский государственный технический университет; Самара, Россия. E-mail: evgkossareva@mail.ru