

КОГЕНЕРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА, РАБОТАЮЩАЯ НА ПРОДУКТАХ ДЕГИДРИРОВАНИЯ ЭТАНОЛА

Научная статья

Щеклеин С.Е.^{1*}, Дубинин А.М.²¹ ORCID : 0000-0003-2140-0321;^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (s.e.shcheklein[at]urfu.ru)

Аннотация

В описываемой энергетической установке отсутствует реактор для воздушной или паровой конверсии этанола с целью получения синтез-газа.

Этанол на медном катализаторе подвергается дегидрированию (отщепление водорода от этанола). Водород используется для производства электрической энергии, а образующаяся в этом процессе окись этилена направляется в водогрейный котёл для нагрева сетевой воды, используемой для отопления и горячего водоснабжения потребителей.

Электрическая мощность 5 кВт, тепловая, отпускаемая в тепловые сети 9,54 кВт. Коэффициент использования топлива 51,5%. Удельный расход условного топлива на производство электрической энергии 0,131 кг у.т./кВтч., а тепловой энергии 93 кг у.т./ГДж. Выработка электрической энергии на внешнем тепловом потреблении 145 кВтч/ГДж. По удельным показателем энергоустановка немного уступает современным теплоэлектроцентралям, за исключением удельного расхода условного топлива на производство электрической энергии.

Ключевые слова: этанол, окись этилена, катод, анод, водород, мембрана, электроэнергия, водогрейный котёл.

COGENERATION PLANT POWERED BY ETHANOL DEHYDROGENATION PRODUCTS

Research article

Shcheklein S.Y.^{1*}, Dubinin A.M.²¹ ORCID : 0000-0003-2140-0321;^{1,2} Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (s.e.shcheklein[at]urfu.ru)

Abstract

In the described power plant, there is no reactor for the air or steam conversion of ethanol to produce synthesis gas.

Ethanol in a copper catalyst undergoes dehydrogenation (separation of hydrogen from ethanol). The hydrogen is used to generate electricity and the ethylene oxide produced in this process is sent to the water heating boiler to heat the delivery water used for heating and hot water supply to consumers.

Electric power 5 kW, heat supplied to heating networks 9.54 kW. The fuel utilization factor is 51.5%. Specific reference fuel consumption for electricity production is 0.131 kg c.e./kWh, and for heat energy – 93 kg c.e./GJ. Electricity generation for external heat consumption is 145 kWh/GJ. By specific parameters, the power unit is slightly inferior to modern combined heat and power plants, except for specific fuel equivalent consumption for electric power production.

Keywords: ethanol, ethylene oxide, cathode, anode, hydrogen, membrane, electricity, hot water boiler.

Введение

Известны электрохимические генераторы, в которых синтез-газ получают в каталитических реакторах воздушной конверсией бородинского угля [1], природного газа [2], метана в реакторе с заторможенным псевдооживленным слоем [3], паровой конверсией природного газа [4], воздушной конверсией моторного дизельного топлива [5]. Топливные электрохимические генераторы производят прямое преобразование химической в электрическую энергию [6]. В зависимости от назначения электрохимического генератора в них применяют разные вспомогательные устройства: насосы, вентиляторы, теплообменники, инверторы [7], [8]. Известны метанольные электрохимические генераторы [9]. В топливном элементе применяют нерасходуемые анод и катод. Для анода важна каталитическая активность. В качестве катализаторов пригодны металлы первой и восьмой группы таблицы Д.И. Менделеева: золото, серебро, медь, железо, кобальт, никель [10]. Олово, рутений и рений, нанесённые на поверхность платины, ускоряют процесс дегидрирования метанола в несколько раз.

Целью данной работы является создание топливного элемента для когенерационной энергетической установки, работающего на продуктах дегидрирования этанола без высокотемпературных каталитических реакторов. Этанол на медном катализаторе в результате эндотермической реакции подвергается дегидрированию (отщепление водорода от этанола). Водород, используется для выработки электрической энергии, а окись этилена – для выработки тепловой энергии с целью снабжения потребителей.

Описание схемы энергетической установки

В камеру – 1 подаётся из бака этанол. Анод -2- пористая из графитовой керамики пластина, левая сторона которой покрыта медным, а правая – платиновым катализатором. Этанол, попадая на медный катализатор, подвергается дегидрированию с образованием окси этилена в газообразном состоянии и водорода по реакции [11]:

Cu, t



Реакция (1) эндотермическая. Теплота передается из камеры 6 теплопроводностью.

Теплота реакции:

$$\Delta H_1 = (\Delta H_{C_2H_4O} - \Delta H_{C_2H_5OH}) / \mu_{C_2H_4O} = [-93 - (+278)] \cdot 10^3 / 44 = 4204 \text{ кДж/кг окиси этилена,}$$

где $\Delta H_{C_2H_4O}$, $\Delta H_{C_2H_5OH}$ – теплоты образования веществ, кДж/кмоль [12].

$\mu_{C_2H_4O}$ – молекулярная масса окиси этилена, равна 44 кг/ кмоль.

Истинная удельная изобарная теплоёмкость продуктов реакции (1) $C_p = 2,235 \text{ кДж/(К·кг этанола)}$ [13].

Окись этилена из камеры-1 направляется в водогрейный котёл -9, а водород, благодаря разности концентраций слева и справа анода, фильтруется через платиновый катализатор, где молекула водорода расщепляется на два протона $2H^+$ с образованием двух электронов $2e^-$ по эндотермической реакции:



Теплота реакции:

$$\Delta H_2 = 2\Delta H_{H^+} / \mu_{H_2} = 2 \cdot 1538 \cdot 10^3 / 2 = 1538 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг водорода}$$

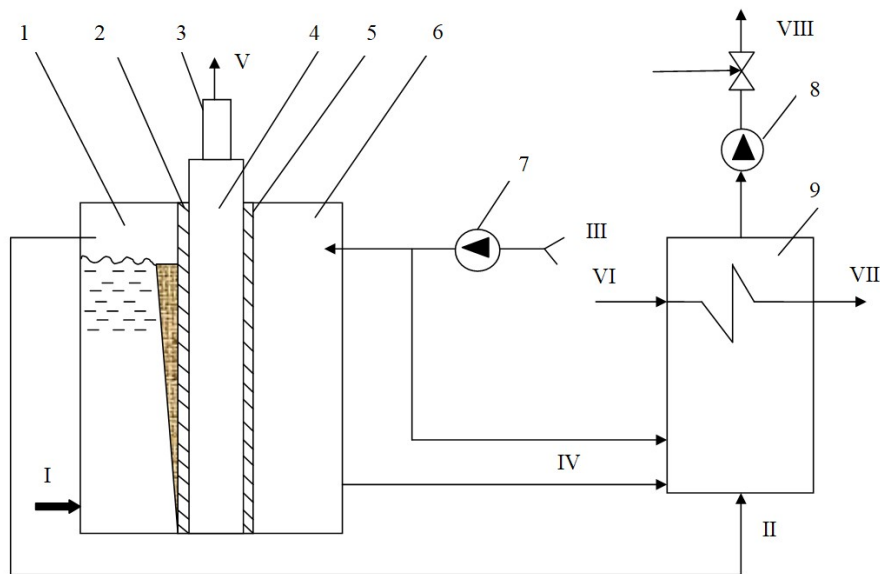


Рисунок 1 - Принципиальная схема энергетической установки:

1 – камера с этанолом; 2 – анод; 3 – инвертор; 4 – протонообменная мембрана; 5 – катод; 6 – камера окисления водорода; 7 – вентилятор; 8 – дымосос; 9 – водогрейный котел; I – ввод этанола; II – ввод окиси этилена; III – ввод воздуха; IV – вывод продуктов окисления водорода; V – вывод электрической энергии; VI – ввод сетевой воды; VII – вывод горячей сетевой воды; VIII – выход продуктов окисления

Два электрона из анода поступают во внешнюю цепь электрической нагрузки, откуда поступают в катод.

Катод – пористая из графитовой керамики пластина.

Между анодом 2 и катодом 5 расположена протонообменная мембрана 4 (см.рис), которая пропускает через себя только протоны водорода H^+ . Протоны водорода соединяются с электронами, пришедшими к катоду от внешней нагрузки и превращаются в молекулы водорода по экзотермической реакции

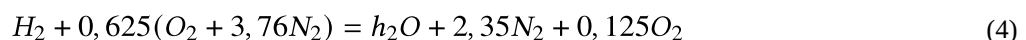


Теплота реакции:

$$\Delta H_3 = -2\Delta H_{H^+} / \mu_{CO_2} = -2 \cdot 1538 \cdot 10^3 / 2 = 1538 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг водорода}$$

Реакции (2) и (3) уравниваются по теплоте.

Молекулы водорода из катода попадают в камеру 6, где окисляются подаваемым туда воздухом с коэффициентом избытка $\alpha = 1,25$ по стехиометрическому уравнению экзотермической реакции.



Тепловой эффект реакции (4)

$$\Delta H_4 = \frac{\Delta H_{H_2O} \cdot 1}{\mu_{H_2O} + 0,125\mu_{O_2} + 2,35\mu_{N_2}} = \frac{-242 \cdot 10^3}{18 + 0,125 \cdot 32 + 2,35 \cdot 28} =$$

$$= \frac{-242 \cdot 10^3}{87,8} = -2756 \text{ кДж/кг продуктов реакции (4)}$$

$$\Delta H_4^* = \frac{\Delta H_{H_2O} \cdot 1}{\mu_{H_2}} = -242 \cdot 10^3 / 2 = 121 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг водорода}$$

Температура топливного элемента, состоящего из анода, протонообменной мембраны и катода, находится из уравнения теплового баланса. Учитываются тепловые потери $q_5=0,2$ в окружающую среду.

$$C_p^* \cdot t + \Delta H_1^* = \Delta H_4 (1 - q_5) \quad (5)$$

Члены в уравнении (5) приводятся к одной массе продуктов реакции (4).

$$C_p^* = \frac{C_p \cdot 44}{87,8} = 2,235 \cdot 44 / 87,8 = 1,123 \text{ К} \cdot \text{кг продуктов реакции (4)}$$

$$\Delta H_1^* = \frac{\Delta H_1 \cdot 44}{87,8} = 4204 \cdot 44 / 87,8 = 2106 \text{ кДж/кг продуктов реакции (4)}$$

Из последнего уравнения находится температура системы, состоящей из анода, мембраны и катода. Она равна 87 градусам С, (360К).

Расход водорода для обеспечения электрической мощности $Q_3=5\text{кВт}$ находится из литературы [14].

$$B_{H_2} = \frac{Q_3}{\Delta G_{360K}^*}, \text{ кг/с,} \quad (6)$$

где

$$\Delta G_{360K}^* = \frac{\Delta G_{360K} \cdot 1}{\mu_{H_2}} = 226 \cdot 10^3 \cdot 1/2 = 113 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг водорода,}$$

(где 1- один кмоль воды в уравнении [4]).

ΔG_{360K} - изменение энергии Гиббса при температуре (360К).

$$\Delta G_{360K} = 226 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг воды}$$

КПД топливного элемента ЭХГ по производству электроэнергии, о/е (%) [14].

$$\eta_{\text{э}} = \frac{\Delta G_{360K}^*}{\Delta H_4} \quad (7)$$

В соответствии с уравнением (1) для производства водорода

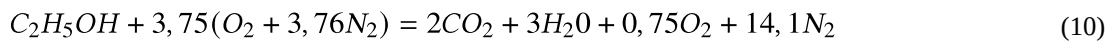
$B_{H_2} = 0,0442 \cdot 10^3$,кг/с потребуется ввести этанола, кг/с:

$$B_{C_2H_5OH} = B_{H_2} \cdot \frac{\mu_{C_2H_5OH}}{\mu_{H_2}} \quad (8)$$

а выход окси этилена, кг/с.

$$B_{C_2H_4O} = \Delta B_{H_2} \cdot \frac{C_2H_4O}{\mu_{H_2}} \quad (9)$$

Теплота окисления этанола определяется из стехиометрического уравнения (коэффициент избытка воздуха $\alpha=1,25$)



$$O_H^p = [2(\Delta H_{CO_2}) + 3(\Delta H_{H_2O}) - (\Delta H_{C_2H_5OH})] / \mu_{C_2H_5OH} =$$

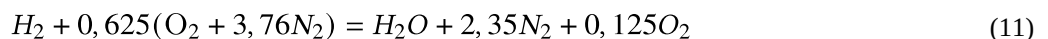
$$= [2(-393,8) + 3(-242,02) - (-235,46)] \cdot 10^3 / 46 =$$

$$= 27782 \text{ кДж/кг этанола,}$$

где ΔH_{CO_2} , ΔH_{H_2O} , $\Delta H_{C_2H_5OH}$ - теплоты образования этих веществ [12].

Определение расхода воздуха

Для окисления водорода при избытке расхода воздуха $\alpha=1,25$ определяется из уравнения, кг/с.



$$B_{B1} = B_{H_2} \cdot \frac{[0,625(\mu_{O_2} + 3,76\mu_{N_2})]}{\mu_{H_2}} \quad (12)$$

Для окисления окиси этилена при избытке расхода воздуха $\alpha=1,25$ определяется из уравнения, кг/с.

$$C_2H_4O + 3,125(O_2 + 3,76N_2) = 2CO_2 + 2H_2O + 11,75N_2 + 0,625O_2 \quad (13)$$

$$B_{B2} = B_{C_2H_4O} \cdot \frac{[3,125(\mu_{O_2} + 3,76\mu_{N_2})]}{\mu_{C_2H_4O}} \quad (14)$$

Определение расхода продуктов окисления

В реакции (4) от окисления водорода, кг/с.

$$G_1 = B_{H_2} \cdot \frac{2\mu_{CO_2} + 2\mu_{H_2O} + 11,75\mu_{N_2} + 0,625\mu_{O_2}}{\mu_{C_2H_4O}} \quad (16)$$

Мощность, приходящая в водогрейный котёл, кВт.

$$Q_{ВК} = B_{C_2H_5OH} \cdot Q_H^p - Q_{\text{Э}} - \Delta H_4 \cdot q_5 \cdot G_1 - I \cdot B_{C_2H_5OH} \quad (17)$$

где I кДж/кг – энтальпия насыщенного пара этанола, 1123 кДж/кг [15].

Расход уходящих газов из водогрейного котла, кг/с.

$$G_{УХ} = G_1 + G_2 \quad (18)$$

Удельная истинная теплоёмкость продуктов окисления окиси этилена в водогрейном котле $C_{УХ} = 1,39$ кДж/(К·кг продуктов окисления реакции (13)).

Температура продуктов окисления в водогрейном котле, °С.

$$t_{ПО} = \frac{Q_{ВК}}{C_{УХ} \cdot G_{УХ}} \quad (19)$$

Мощность сетевого подогревателя, кВт.

$$Q_{СП} = C_{УХ} \cdot G_{УХ} \cdot (t_{ПО} + t_{УХ}) \quad (20)$$

$t_{УХ} = 120^\circ\text{C}$ – температура уходящих газов из водогрейного котла.

Потери с уходящими газами, кВт:

$$Q_2 = C_{УХ} \cdot G_{УХ} \cdot t_{УХ} \quad (21)$$

Энергетические показатели установки.

Кэффициент использования топлива [16], о.е(%).

$$\eta_{исп} = Q_{\text{Э}} + Q_{СП} / B_{C_2H_5OH} Q_H^p \quad (22)$$

Удельный расход условного топлива на производство электрической энергии, кг у.т./кВт·ч.

$$b_{\text{э}} = B_{H_2} \cdot \Delta H_2^* / Q_{\text{Э}} \cdot Q_{У.т.} \quad (23)$$

Удельный расход условного топлива на производство тепловой энергии, кг у.т./ГДж.

$$b_{\text{т}} = B_{C_2H_4O} \cdot 10^6 \cdot \Delta H_{C_2H_4O} / Q_{СП} \cdot Q_{У.т.} \quad (24)$$

Выработка электрической энергии на внешнем тепловом потреблении, кВт·ч/ГДж.

$$\text{Э}_{\text{т}} = Q_{\text{Э}} \cdot 10^6 \cdot \Delta H_{C_2H_4O} / Q_{СП} \cdot 3600. \quad (25)$$

Удельные показатели сравниваются с данными [17].

Материальный баланс энергоустановки, кг/с

$$\Delta_1 = B_{C_2H_5OH} + B_1 + B_2 - (G_1 + G_2) \quad (26)$$

Материальный баланс сходится.

Баланс мощности энергоустановки, кВт.

$$\Delta_2 = B_{C_2H_5OH} Q_H^p - (Q_{\text{Э}} + \Delta H_4 \cdot q_5 \cdot G_1 + Q_2 + Q_{СП} + I \cdot B_{C_2H_5OH}) \quad (27)$$

Результаты расчётных исследований (см.таблицу).

Таблица 1 - Результаты расчётных исследований для номинального режима работы

Характеристика	Обозначение	Размерность	Формула	Значение
Температура топливного элемента	t	°С (К)	(5)	87°С (360К)
Расход водорода	B_{H_2}	кг/с (кг/ч)	(6)	$0,0442 \cdot 10^{-3}$ (0,159)
КПД топливного элемента	$\eta_{\text{э}}$	о.е. (%)	(7)	0,93 (93%)
Ввод этанола	$B_{C_2H_5OH}$	кг/с	(8)	$1,0166 \cdot 10^{-3}$
Выход окиси этилена	$B_{C_2H_4O}$	кг/с	(9)	$0,9724 \cdot 10^{-3}$

Расход воздуха для окисления водорода	V_{B1}	кг/с	(12)	$1,896 \cdot 10^{-3}$
Расход воздуха для окисления окиси этилена	V_{B2}	кг/с	(14)	$9,48 \cdot 10^{-3}$
Расход продуктов окисления водорода	G_1	кг/с	(15)	$1,94 \cdot 10^{-3}$
Расход продуктов окисления окиси этилена	G_2	кг/с	(16)	$10,453 \cdot 10^{-3}$
Мощность приходящая в водогрейный котел	Q_{BK}	кВт	(17)	11,41
Расход уходящих газов водогрейного котла	G_{yx}	кг/с	(18)	$12,393 \cdot 10^{-3}$
Температура продуктов окисления в котле	$t_{по}$	°С	(19)	736
Мощность сетевого подогревателя	$Q_{СП}$	кВт	(20)	9,54
Потери с уходящими газами водогрейного котла	Q_2	кВт	(21)	1,85
Коэффициент использования топлива	$\eta_{исп}$	о.е. (%)	(22)	0,515 (51,5%)
Удельный расход условного топлива на производство электрической энергии	$b_э$	кг у.т./кВтч	(23)	0,131
Удельный расход условного топлива на производство тепловой энергии	b_T	кг у.т./ГДж	(24)	93
Выработка электрической энергии на внешнем тепловом потреблении	\mathcal{E}_T	кВтч/ГДж	(25)	145
Материальный баланс энергоустановки	Δ_1	кг/с	(26)	0
Баланс мощности энергоустановки	Δ_2	кВт	(27)	0

Заключение

1. Благодаря эффекту дегидрирования этанола на медном катализаторе, удалось уйти от применения высокотемпературных каталитических реакторов, необходимых для производства синтез-газа, в этанольных ЭХГ.

2. Удельный расход условного топлива на выработку электрической энергии – 0,131 кг у.т./кВт·ч, тепловой энергии – 93 кг у.т./ГДж, выработка электрической энергии на внешнем тепловом потреблении – 145 кВт·ч/ГДж.

3. Удельные энергетические показатели этанольной когенерационной установки немного уступают аналогичным показателем когенерационных паросиловых установок – 0,158 кг у.т./кВт·ч; 41кг у.т./ГДж; 190 кВт·ч/ГДж соответственно, исключая удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии, где показатели существенно лучше.

4. Технология прямого использования этанола для энергетического производства позволяет расширить ресурсную базу энергетики путем вовлечения всех видов растительных биомасс (процессы брожения и ректификации) либо продуктов производства синтетического этанола из природного газа (процессы конверсии и ректификации).

Финансирование

Программа развития Уральского федерального университета в рамках Программы «Приоритет-2030»);
Номер гранта FEUZ-2022-0031.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

Ural Federal University Program of Development within the Priority-2030 Program) is gratefully acknowledged: Grant number FEUZ-2022-0031.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Dubinin A.M. Mini Coal-fired CHP Plant on the Basis of Synthesis Gas Generator(CO+H₂) and Electrochemical Current Generator / A.M. Dubinin, S.E. Shcheklein // International Journal of Hydrogen Energy. — 2017. — 42. — p. 26048-26058.

2. Дубинин А.М. Мини-теплоэлектроцентраль на основе реактора для воздушной конверсии метана и электрохимического генератора / А.М. Дубинин, С.Е. Щеклеин // Теоретические основы химической технологии. — 2019. — Т. 53. — 1. — с. 78-86.

3. Dubinin A.M. Mini CHP Based on the Electrochemical Generator and Impeded Fluidized Reactor for Methane Steam Reforming / A.M.Dubinin, S.E.Shcheklein, V.G.Tuponogov [et al.] // Alternative Energy and Ecology (ISJAE). — 2017. — 19-21. — p. 95-105

4. Munts V.A. Studying the Characteristics of 5 kW Power Installation on Solid – Oxide Fuel Cells with Steam Reforming of Natural Gas / V.A. Munts, Y.V. Volkova // Thermal Engineering. — Vol. 62. — Iss.1. — p. 779-784.

5. Shcheklein S.E. Thermodynamic Modeling of Cogeneration Mini CHP Using Air Conversion of Dieselfuel and Electrochemical Generation / S.E.Shcheklein, A.M. Dubinin // International Journal of Energy Production and Management. — 2019. — 4(4). — p. 273-286.

6. Коровин Н.В. Электрохимическая энергетика / Н.В. Коровин. — М: Энергоатомиздат, 1991. — 264 с.

7. Benjamin Th. The Fuel Cell: Key To practically Unlimited Energy / Th. Benjamin, E.N. Camara // Foot. print. — 1985. — Vol. 48. — 2. — p. 19-38.

8. Коровин Н.В. Жидко- газовый пористый электрод / Н.В. Коровин, Г.Н. Максимов, А.Ф. Феоктистов // Электрохимия(итоги науки и техники). — М.: ВИНТИ, 1981. — Т. 17. — с. 188-209.

9. Сухотин А.М. Справочник по электрохимии / А.М. Сухотин. — Л.: Химия, 1978. — 410 с.

10. Щеклеин С.Е. Электрохимические источники энергии / С.Е. Щеклеин, Р.В. Радченко. — Екатеринбург: УрФУ, 2011. — 151 с.

11. Варава Н.Э. Химия в схемах и таблицах / Н.Э. Варава. — Москва: Эксмо, 2016. — 208 с.

12. Карапетьянц М.Х. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ / М.Х. Карапетьянц, М.Л. Карапетьянц. — М.: Химия, 1968. — 470 с.

13. Королёв В.Н. Техническая термодинамика / В.Н. Королёв, Е.М.Толмачёв. —Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. — 180 с.

14. Баскаков А.П. Физико-химические основы тепловых процессов / А.П. Баскаков, Ю.В. Волкова. — Москва: Теплотехник, 2013. — 172 с.

15. Краткий справочник физико-химических величин. Изд.8-е перераб. / Под ред. А.А. Равеля и А.М. Пономорёвой. — Л.: Химия, 1983. — 232 с.

16. Баженов М.И. Промышленные тепловые электростанции / М.И. Баженов, А.С. Богородский, Б.В. Сазанов; под ред. Е.Я. Соколова. — М.: Энергия, 1979. — 296 с.

17. Яковлев Б.В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения / Б.В. Яковлев. — М.: Новости теплоснабжения, 2008. — 448 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Dubinin A.M. Mini Coal-fired CHP Plant on the Basis of Synthesis Gas Generator(CO+H₂) and Electrochemical Current Generator / A.M. Dubinin, S.E. Shcheklein // International Journal of Hydrogen Energy. — 2017. — 42. — p. 26048-26058.

2. Dubinin A.M. Mini-teplojelektrocentral' na osnove reaktora dlja vozdušnoj konversii metana i jelektrohimičeskogo generatora [Mini Combined Heat and Power Plant, Based on an Air-Based Methane Conversion Reactor and an Electrochemical Generator] / A.M. Dubinin, S.E. Shheklein // Teoreticheskie osnovy himičeskoj tehnologii [Theoretical Foundations of Chemical Technology]. — 2019. — Vol. 53. — 1. — p. 78-86. [in Russian]
3. Dubinin A.M. Mini CHP Based on the Electrochemical Generator and Impeded Fluidized Reactor for Methane Steam Reforming / A.M. Dubinin, S.E. Shheklein, V.G. Tuponogov [et al.] // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). — 2017. — 19-21. — p. 95-105
4. Munts V.A. Studying the Characteristics of 5 kW Power Installation on Solid – Oxide Fuel Cells with Steam Reforming of Natural Gas / V.A. Munts, Y.V. Volkova // Thermal Engineering. — Vol. 62. — Iss.1. — p. 779-784.
5. Shheklein S.E. Thermodynamic Modeling of Cogeneration Mini CHP Using Air Conversion of Diesel fuel and Electrochemical Generation / S.E. Shheklein, A.M. Dubinin // International Journal of Energy Production and Management. — 2019. — 4(4). — p. 273-286.
6. Korovin N.V. Jelektrohimičeskaja jenergetika [Electrochemical Energy] / N.V. Korovin. — M: Energoatomizdat, 1991. — 264 p. [in Russian]
7. Benjamin Th. The Fuel Cell: Key To Practically Unlimited Energy / Th. Benjamin, E.N. Camara // Foot. print. — 1985. — Vol. 48. — 2. — p. 19-38.
8. Korovin N.V. Zhidko- gazovyy poristyj jelektrod [Liquid Gas Porous Electrode] / N.V. Korovin, G.N. Maksimov, A.F. Feoktistov // Jelektrohimičeskaja (itogi nauki i tehniki) [Electrochemistry (Science and Technology Results)]. — M.: VINITI, 1981. — Vol. 17. — p. 188-209. [in Russian]
9. Suhotin A.M. Spravočnik po jelektrohimii [Handbook of electrochemistry] / A.M. Suhotin. — L.: Himija, 1978. — 410 p. [in Russian]
10. Shheklein S.E. Jelektrohimičeskije istočniki jenerгии [Electrochemical Energy Sources] / S.E. Shheklein, R.V. Radchenko. — Yekaterinburg: UrFU, 2011. — 151 p. [in Russian]
11. Varavva N.Je. Himija v shemah i tablicah [Chemistry in Charts and Tables] / N.Je. Varavva. — Moscow: Eksmo, 2016. — 208 p. [in Russian]
12. Karapet'janc M.H. Osnovnye termodinamičeskije konstanty neorganičeskikh i organičeskikh veshhestv [Basic Thermodynamic Constants of Inorganic and Organic Substances] / M.H. Karapet'janc, M.L. Karapet'janc. — M.: Himija, 1968. — 470 p. [in Russian]
13. Korol'jov V.N. Tehničeskaja termodinamika [Technical Thermodynamics] / V.N. Korol'jov, E.M. Tolmachjov. — Yekaterinburg: UGTU-UPI, 2001. — 180 p. [in Russian]
14. Baskakov A.P. Fiziko-himičeskije osnovy teplovyh processov [Physical and Chemical Bases of Thermal Processes] / A.P. Baskakov, Ju.V. Volkova. — Moscow: Teplotehnik, 2013. — 172 p. [in Russian]
15. Kratkij spravočnik fiziko-himičeskikh veličin [Quick Reference Guide to Physico-Chemical Quantities]. 8th revised edition / Ed. by A.A. Ravel i A.M. Ponomorjova. — L.: Himija, 1983. — 232 p. [in Russian]
16. Bazhenov M.I. Promyšlennye teplovyje jelektrostanicii [Industrial Thermal Power Plants] / M.I. Bazhenov, A.S. Bogorodskij, B.V. Sazanov; ed. by E.Ja. Sokolov. — M.: Energija, 1979. — 296 p. [in Russian]
17. Jakovlev B.V. Povyšenie jeffektivnosti sistem teplofikacii i teplosnabzhenija [Improving the Efficiency of Heating and Heat Supply Systems] / B.V. Jakovlev. — M.: Novosti teplosnabzhenija, 2008. — 448 p. [in Russian]