



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УДЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ, РАБОТАЮЩЕЙ НА ПРОДУКТАХ ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЯ И БОРА*

С.Е. Щеклеин, А.М. Дубинин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
д. 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Россия
тел.: +7(343)375-95-08; e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.28-33.073-085

Заключение совета рецензентов: 08.11.19 Заключение совета экспертов: 14.11.19 Принято к публикации: 20.11.19

Представлена когенерационная энергетическая установка на базе газотурбинного двигателя с внешним подводом теплоты к рабочему телу-воздуху. В качестве топлива использовались мелкодисперсные порошки алюминия или бора, в качестве окислителя – воздух. На основании уравнений химической термодинамики рассчитаны теплота окисления алюминия алюминиевой пудры 31 005 кДж на 1кг алюминия и 26 283 кДж на 1кг бора. Определено, что коэффициент использования топлива энергетической установкой, работающей на алюминии, составляет 0,578, а на боре – 0,501; удельный расход условного топлива при производстве электрической энергии – 163,6 гр у.т./ (кВт·ч), на боре – 185 гр у.т./ (кВт·ч), а тепловой энергии – 67,6 кг у.т./ГДж и 76,49 кг у.т./ГДж соответственно. Удельная выработка электрической энергии на внешнем тепловом потреблении при работе на алюминии и боре равняется 136,5 кВт·ч/ГДж и 136,5 кВт·ч/ГДж соответственно. Приведены удельные затраты топлива на энергетической установке без использования теплоты выхлопа после газовой турбины для подогрева сетевой воды. Полученные данные сравнивались с аналогичными для действующих энергетических установок, работающих на органическом топливе. Сведены материальные и тепловые балансы. Установлено, что в ГТУ предпочтительнее использовать в качестве топлива алюминий, так как бор показал худшие удельные параметры.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; алюминий; бор; воздух; удельный расход топлива; коэффициент полезного действия; тепловые потери; теплота окисления; теплоемкость; баланс; электролиз; когенерация.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SPECIFIC INDICATORS OF COGENERATION GAS TURBINE UNIT WORKING ON ALUMINUM AND BORON OXIDATION PRODUCTS

S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin

Ural Federal University Named after the First President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mir Str., Ekaterinburg, 620002, Russia
tel.: +7(343)375 95 08, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

*Щеклеин С.Е., Дубинин А.М. Сравнительный анализ удельных показателей когенерационной газотурбинной установки, работающей на продуктах окисления алюминия и бора // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;28-33:73-85.



The paper presents a cogeneration power unit based on a gas turbine engine with an external heat supply to the working fluid-air. Aluminum powder or boron are used as fuel, and air is used as an oxidizing agent. On the basis of the chemical thermodynamics equations, we have calculated the heat of aluminum powder oxidation at 31,005 kJ per 1kg of aluminum and 26,283 kJ per 1kg of boron. The fuel utilization factor by a power plant operating on the aluminum is 0.578 and on the boron is 0.501. Specific consumption of conventional fuel at the operation of the power unit on aluminium in the production of electric energy is 163.6 gOE/(kWh), and on the boron is 185 gOE/ (kWh), and thermal energy – 67.6 and 76.49 kgOE/GJ respectively. Specific production of the electrical energy by external heat consumption when working on aluminum and boron are 136.5 and 136.5 kWh/(GJ), respectively. The paper gives specific fuel costs for a power plant without using the exhaust heat after the gas turbine for heating network water. The data obtained are compared with those power plants working on organic fuels. Material and thermal balances are summarized. In gas turbines, it is preferable to use aluminum as a fuel. Boron shows the worst specific parameters.

Keywords: gas turbine engine; aluminum; boron; air; specific fuel consumption; efficiency factor; heat loss; heat of oxidation; heat capacity; balance; electrolysis; cogeneration.



Сергей Евгеньевич
Щеклеин
Sergey Shcheklein

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; действительный член Международной энергетической академии; член редколлегии журнала «Известия вузов. Ядерная энергетика»; Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE); сборника трудов УГТУ-УПИ «Теплофизика ядерных энергетических установок»; Трудов Одесского национального политехнического университета; Научно-технического журнала «Энергоэффективность и анализ».

Награды: Заслуженный энергетик России; Национальная экологическая премия им. В.И. Вернадского; медаль «Ветеран атомной энергетики и промышленности».

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1972 г.).

Область научных интересов: термодинамика ядерных энергетических установок; проблемы атомной энергетики и теплофизики двухфазных потоков; продление ресурса и повышение надежности оборудования АЭС; солнечная энергетика; ветроэнергетика; биоэнергетика.

Публикации: более 350, включая 2 монографии, 20 изобретений.
h-index 11

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Награды: медаль ордена «За заслуги перед Отечеством» второй степени.

Образование: Ивановский энергетический институт (1965 г.).

Область научных интересов: аппараты для производства технологических атмосфер из природного газа и твердого топлива.

Публикации: более 250, включая 2 монографии, 6 изобретений.
h-index 4.



Алексей Михайлович
Дубинин
Alexey Dubinin

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor, the Head of Atomic Stations and Renewable Energy Sources Department, Urals Federal University; a member of International Energy Academy; a member of the editorial board of “Institute of Higher Education News. Nuclear Power”; International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE); “Nuclear Power Units Heat Engineering” USTU; Odessa National Polytechnic University article collection; Scientific Journal of “Energy Effectiveness and Analysis”.

Awards: Honored Power Engineer of the Russian Federation; V.I. Vernadsky National Environmental Award; Medal “Veteran of Nuclear Energy and Industry”.

Education: Urals Polytechnic Institute, 1972.

Research interests: nuclear power units thermodynamics; questions of nuclear energy and thermophysics of the two-phase flows; NPP equipment lifetime enduring and reliability increasing; solar, wind and bioenergetics.

Publications: more than 350, including 2 monographs, 20 inventions.

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor of Power Engineering and Thermal Engineering Department, UrFU.

Awards: medal “For Merits to the Fatherland” the second degree.

Education: Ivanovo Power Institute, 1965.

Research interests: apparatuses for production of the technological atmospheres from natural gas and solid fuel.

Publications: more than 250, including 2 monographs, 6 inventions.



1. Введение

Использование гидроэнергетических, солнечных и ветровых электростанций характеризуется значительной неравномерностью во времени мощности и производимой энергии вследствие сезонного, суточного и стохастического характера изменения потен-

циала соответствующих природных источников энергии [1]. Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) данных источников, как правило, находится в диапазоне 10÷40 %. На рис. 1 приведены данные по итогам эксплуатации Сакмарской СЭС в 2016 г. Годовой КИУМ данной СЭС составил 12,5 % [2].

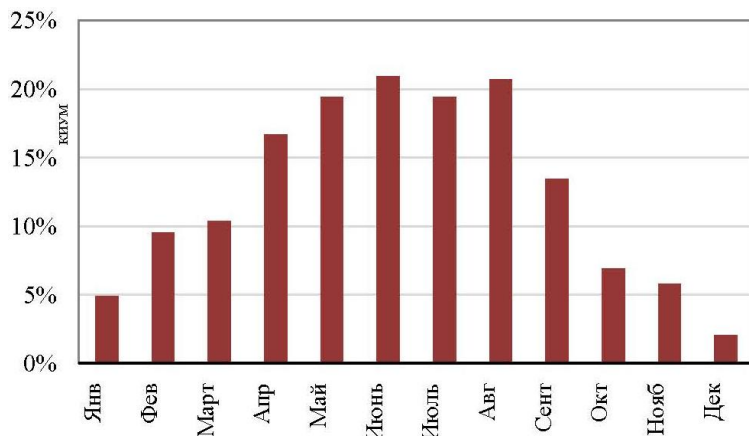


Рис. 1 – Коэффициент использования установленной мощности Сакмарской СЭС в 2016 г

Fig. 1 – Factor for installed capacity of Sakmar solar power plant in 2016

Для сравнения КИУМ фотоэлектрических солнечных станций (ФЭС), расположенных в Массачусетсе, США, составляет 13÷15 % и, расположенных в Аризоне, 19 % (по данным US Energy Information Administration за 2009 г.). По данным Государственного управления по делам энергетики КНР за 2014 г., КИУМ ФЭС Китая составил 18 %. По данным института Fraunhofer ISE, КИУМ ФЭС Германии за 2014 г. составил 10,7 % (данные для 2017 г. не изменились).

Другим фактором, снижающим эффективность использования ГЭС, СЭС и ВЭС при работе на заданную нагрузку, является суточный и сезонный характер изменения потребляемой мощности (ночной провал и дневной пик потребления).

В настоящее время для решения указанных проблем в основном применяется совместная работа ГЭС, СЭС и ВЭС с традиционными источниками энергии на органическом топливе (ТЭС, ДЭС и пр.). Все более широкое использование возобновляемых

источников энергии стимулировало широкомасштабные исследования аккумуляции энергии в электрической (АКБ), механической (маховичные и накопители), потенциальной (энергия сжиженного или сжатого газа, сила тяжести и пр.) форме или в энергоносителях (водород, этанол и др.) для последующего преобразования в тепловую и электрическую энергию [3]. Одним из перспективных способов аккумуляции является окисление алюминия паром или водой с получением водорода для дальнейшего хранения и использования в требуемый период времени [4–9]. Выполнены исследования по прямому сжиганию наноразмерных металлических порошков в двигателях как способ радикального снижения эмиссии в атмосферу парникового газа – диоксида углерода [10–11].

В настоящей работе на теоретическом уровне рассматривалась эффективность энергетической топливо-накапливающей системы на основе замкнутого цикла окисления – восстановления металлов.

Список обозначений

Буквы греческого алфавита

α	Коэффициент (расхода) избытка воздуха
η	Коэффициент полезного действия
$\eta_{\text{исп}}$	Коэффициент использования топлива на ТЭЦ
μ	Молекулярная масса вещества, кг/кмоль

Буквы латинского алфавита

B	Относительный расход, кг/кг
b	Удельный расход, кг/кВт·ч, кг/ГДж
C	Теплоемкость, кДж/К кг
G	Расход, кг/с
g	Массовая доля
H	Внутренняя энергия, кДж/кг
k	Показатель адиабаты

Продолжение списка обозначений

l	Удельная работа, кДж/кг
Q	Мощность, кВт
q	Удельная энергия, кДж/кг
T	Температура, К
t	Температура, °С
<u>Буквы русского алфавита</u>	
Э	Энергия, кВт · ч/кг
<u>Индексы верхние</u>	
0	При стандартных условиях
*	На 1 кг алюминия
**	На 1 кг продуктов окисления
***	На 1 кг топлива
к	Компрессор
т	Турбина
<u>Индексы нижние</u>	
0	Стандартные параметры
0_i	Внутренний относительный
t	Термический
в	Воздух
и	Использование
КС	Камера сгорания
к	Компрессор
р	При постоянном давлении
сп	Сетевой подогреватель
т	Теплота
ух	Уходящие продукты
э	Электрическая энергия
эм	Электромеханический
<u>Аббревиатуры</u>	
АКБ	Аккумуляторная батарея
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ВЭС	Ветроэлектростанция
ГТУ	Газотурбинная установка
ГЭС	Гидроэлектростанция
ДЭС	Дизельная электростанция
КИУМ	Коэффициент использования установленной мощности
КПД	Коэффициент полезного действия
СЭС	Солнечная электростанция
ТЭЦ	Теплоэлектроцентраль
у.т.	Условное топливо

2. Теоретический анализ

На рис. 2 проведено сравнение ряда распространенных видов топлива и металлов по их энергетической ценности [12].

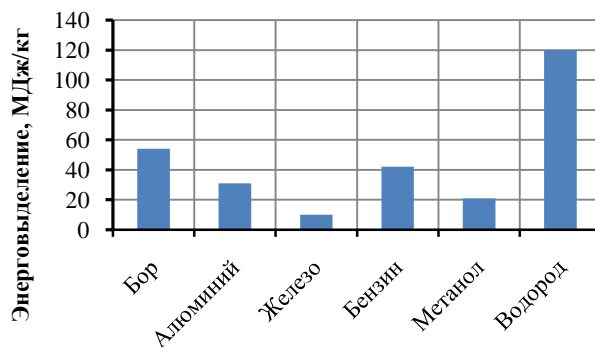


Рис. 2 – Удельное энерговыделение при окислении в кислороде [12]
 Fig. 2 – Specific energy output in oxygen oxidation [12]

Рассмотрены наиболее энергоемкие металлы (бор и алюминий), которые используются в качестве топлива с окислением кислородом воздуха в двухконтурной энергетической установке с замкнутым по топливу и продуктам его окисления 1-м контуром и

разомкнутым на атмосферу 2-м контуром воздушной ГТУ с косвенным нагревом воздуха в теплообменнике камеры сгорания топлива. Принципиальная схема энергетической системы показана на рис. 3.

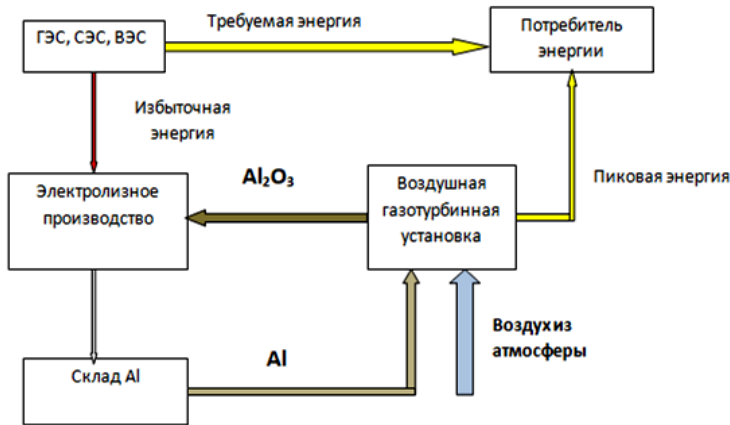


Рис. 3 – Принципиальная схема энергетической системы на металлическом топливе
Fig. 3 – The concept of the energy system on metal fuel

Принцип действия установки заключается в использовании металла (алюминий, бор и пр.) в качестве топлива и последующем восстановлении продуктов его окисления за счет энергии ГЭС, СЭС и ВЭС в период генерации ими избыточной энергии. Металл хранится без ограничений по времени и используется в требуемый период.

В работах [13–16] изучались воспламенение, окисление алюминия, бора и диборида алюминия. Исследовались порошки с размером гранул до 100 мкм, а также микроразмерный порошок алюминия АСД-4, полученный методом электроплазменной переконденсации в керосине с размером гранул $0,01 \div 1$ мкм, ультрадисперсный порошок, полученный методом электрического взрыва $0,01 \div 0,35$ мкм и пневматическим методом $0,3 \div 0,5$ мкм. Определено значение температуры начала окисления – $1\ 000$ °С. Температура воспламенения определена на уровне $760 \div 820$ °С. Зажигание порошков осуществлялось вольфрамовой проволокой, разогретой электроэнергией. Полученные результаты позволяют рассмотреть возможность создания технологии применения указанных металлов для использования в энергетике.

2.1. Описание технологической схемы энергетической установки

Технологическая схема когенерационной газотурбинной энергетической установки, работающей на продуктах окисления алюминия или бора, приведена на рис. 4.

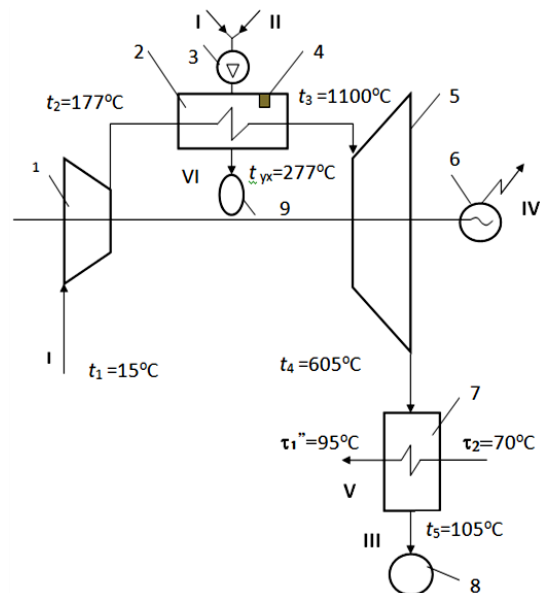


Рис. 4 – Когенерационная газотурбинная энергетическая установка, работающая на продуктах окисления алюминия или бора, с внешним подводом теплоты к воздуху для покрытия пиковых электрических нагрузок в энергосистемах: 1 – компрессор; 2 – камера сгорания (противоточный рекуператор); 3 – вентилятор; 4 – запальник; 5 – газовая турбина; 6 – электрогенератор с возбудителем; 7 – сетевой подогреватель; 8 – дымовая труба; 9 – накопитель продуктов окисления топлива; I – ввод воздуха; II – ввод топлива; III – вывод воздуха; IV – вывод электроэнергии; V – вывод тепловой энергии; VI – вывод продуктов окисления

Fig. 4 – Cogeneration gas turbine unit working on aluminium oxidation products or boron with external heat to air supply to cover peak electrical loads in power grids: 1 – compressor; 2 – camera combustion (counter-recuperer); 3 – fan; 4 – barrel; 5 – gas turbine; 6 – electric generator with pathogen; 7 – network heater; 8 – smoke pipe; 9 – storage of fuel oxidation products; I – air input; II – fuel input; III – air withdrawal; IV – power output; V – withdrawal of thermal energy; VI – withdrawal of oxidation products



Воздух при 15 °С заходит в компрессор 1, где при политропном сжатии нагревается до 177 °С и поступает в камеру сгорания 2, затем через стенку нагревается от продуктов окисления топлива (алюминия или бора) до 1 100 °С и направляется в газовую турбину 5. В камеру сгорания подается топливо с воздухом посредством вентилятора 3. Запальником 4 топливо воспламеняется. Продукты окисления топлива удаляются в накопитель 9 и далее отправляются на электролиз. Воздух из газовой турбины направляется в сетевой подогреватель 7 для подогрева сетевой воды для отопления и горячего водоснабжения. После сетевого подогревателя воздух поступает в атмосферу через трубу 8. С электрогенератора 6 выводится электрическая энергия. Регенерация теплоты не предусматривается, поскольку она повышает температуру воздуха за компрессором и, как следствие, температуру продуктов окисления топлива на выходе из камеры сгорания, что понижает КПД камеры сгорания и ГТУ в целом.

2.2. Определение теплоты окисления топлива и удельного расхода воздуха

2.2.1. Топливо – алюминиевая пудра, окислитель – воздух

Реакция окисления алюминия воздухом с образованием α -модификации Al_2O_3 в кристаллическом состоянии



Зажигание порошков алюминия или бора осуществляется электрической дугой, плазмой или раскаленной до 2 100 °С электричеством вольфрамовой спиралью. Крупноразмерные партии порошка алюминия, такие как «999», АСД-4 имеют одну стадию интенсивного окисления [14].

Процесс воспламенения порошков металлов проходит в 4 стадии.

Нагрев алюминия от 0 °С до температуры плавления $t_{пл} = 660$ °С:

$$1. \Delta H_H = C_{Al} \cdot t_{пл} = 0,903 \cdot 660 = 596 \text{ кДж/кг Al.}$$

Плавление алюминия:

$$2. \Delta H_{пл} = \Delta H_{пл}^0 / \mu_{Al} = 10 \cdot 10^3 / 27 = 370 \text{ кДж/кг Al.}$$

Испарение алюминия:

$$3. \Delta H_{исп} = \Delta H_{исп}^0 / \mu_{Al} = 313 \cdot 10^3 / 27 = 11 595 \text{ кДж/кг Al.}$$

Окисление алюминия в парообразном состоянии с образованием Al_2O_3 в кристаллическом состоянии по реакции (1)

$$4. \Delta H_{ок} = (-\Delta H_{Al_2O_3}^0 \cdot 2 - \Delta H_{Al}^0 \cdot 4) / (4 \cdot \mu_{Al}) = \\ = (-16 84,4 \cdot 10^3 \cdot 2 - 326,8 \cdot 10^3 \cdot 4) / (4 \cdot 27) = \\ = -43 297 \text{ кДж/кг Al,}$$

где C_{Al} – удельная теплоемкость алюминия, кДж/(К·кг); ΔH^0 теплота образования компонентов, кДж/кмоль [17].

Воспламенение и окисление алюминиевого порошка в воздухе сопровождается самораспространяющейся устойчивой волной горения.

Теплота реакции окисления затрачивается на нагрев, плавление и испарение алюминиевого порошка, и остается избыточная теплота на увеличение температуры продуктов реакции:

$$\Delta H_{изб} = \Delta H_{ок} - (\Delta H_H + \Delta H_{пл} + \Delta H_{исп}) = \\ = 43 297 - (596 + 370 + 11 595) = 30 740 \text{ кДж/кг Al.}$$

Полученное значение равно теплоте образования α -модификации Al_2O_3 в кристаллическом состоянии при окислении алюминия воздухом в кристаллическом состоянии по реакции (1).

Теплота образования Al_2O_3 α в кристаллическом состоянии [17] $\Delta H_{Al_2O_3}^0 = -1 674,32 \cdot 10^3 = -1 674,32 \cdot 10^3$ кДж/кмоль.

Теплота окисления алюминия по реакции (1) в расчете на 1 кг Al [18]

$$\Delta H^* = 2\Delta H^0 / (4\mu_{Al}) = -2 \cdot 1 674,32 \cdot 10^3 / (4 \cdot 27) = \\ = -31 005 \text{ кДж/кг.}$$

На 1 кг продуктов окисления $\Delta H_{Al_2O_3}^{**} = -2\Delta H_{Al_2O_3}^0 / (4\mu_{Al} + 11,28\mu_{N_2}) = -6 441,6$ кДж/кг.

Удельный расход воздуха для окисления 1 кг алюминия при $\alpha = 1$:

$$G_b^* = 3(\mu_{O_2} + 3,76\mu_{N_2}) / (4\mu_{Al}) = 3(32 + 3,76 \cdot 28) / (4 \cdot 27) = 3,81 \text{ кг/кг.}$$

Температура продуктов реакции

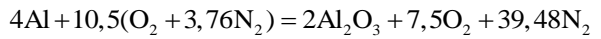
$$t = \Delta H_{Al_2O_3}^{**} / (g_{Al_2O_3} - C_{Al_2O_3} + g_{N_2} C_{N_2}) = \\ = 6 441,6 / (0,392 \cdot 0,775 + 0,608 \cdot 1,26) = 5 550 \text{ °С.}$$

Для уменьшения температуры до 1 800 °С следует увеличить коэффициент избытка воздуха до следующего значения:

$$\alpha = 1 + (\Delta H_{Al_2O_3}^* - C_{пр} t) / (C_b t) = \\ = 1 + (31 005 - 5,2 \cdot 1 800) / (4,78 \cdot 1 800) = 3,5.$$

Реакция окисления алюминия при коэффициенте избытка воздуха, равном 3,5,





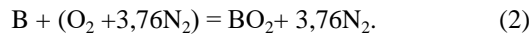
где $C_{пр}$, C_B – истинные удельные теплоемкости продуктов окисления и воздуха при температуре t , кДж/(К · кг алюминия); $g_{Al_2O_3}$, g_{N_2} – массовые доли Al_2O_3 , N_2 в продуктах окисления.

Удельный расход воздуха для окисления 1 кг алюминия при коэффициенте избытка воздуха, равном 3,5,

$$G_B^* = 10,5(\mu_{O_2} + 3,76\mu_{N_2}) / (4\mu_{Al}) = 10,5(32 + 3,76 \cdot 28) / (4 \cdot 27) = 13,34 \text{ кг/кг.}$$

2.2.2. Топливо – бор, окислитель – воздух

Реакция окисления бора в кристаллическом состоянии с образованием BO_2 в газообразном состоянии (BO_2 в кристаллическом состоянии не существует [17]):



Зажигание порошка бора осуществляется электрической дугой, плазмой или раскаленной электричеством вольфрамовой спиралью до температуры, достаточной для нагрева, плавления, испарения и воспламенения паров бора. Далее процесс окисления самораспространяется.

Процесс воспламенения происходит также в 4 стадии.

1. Нагрев бора от 0 °С до температуры плавления $t_{пл} = 2074$ °С:

$$\Delta H_H = C_B t_{пл} = 1 \cdot 2074 = 2074 \text{ кДж/кг В.}$$

2. Плавление бора:

$$\Delta H_{пл} = \Delta H_{пл}^0 / \mu_B = 22039 / 11 = 2003 \text{ кДж/кг В.}$$

3. Испарение бора:

$$\Delta H_{исп} = \Delta H_{исп}^0 / \mu_B = 565650 / 11 = 51422 \text{ кДж/кг В.}$$

4. Окисление бора в парообразном состоянии воздухом с образованием BO_2 в газообразном состоянии по реакции (2) [18]:

$$\Delta H_{ок} = (-\Delta H_B^0 / 4 \cdot \mu_B = (-315381 - 565650) / 11 = -80094 \text{ кДж/кг В.}$$

$$l_T = C_p T_3 \left[1 - (1/\beta)^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_{oi}^T = 1,197(1100 + 273) \left[1 - (1/4,8)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right] 0,85 = 505 \text{ кДж/кг воздуха.}$$

Удельная работа компрессора [11]

$$l_k = C_p T_1 \left[\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] / \eta_{oi}^k = 1,044(15 + 273) \left[4,8^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] / 0,83 = 205 \text{ кДж/кг воздуха.}$$

Теплота реакции окисления затрачивается на нагрев, плавление и испарение пудры бора. Остается избыточная теплота на увеличение температуры продуктов реакции:

$$\Delta H_{изб} = \Delta H_{ок} - (\Delta H_H + \Delta H_{пл} + \Delta H_{исп}) = 80094 - (2074 + 2003 + 51422) = 24595 \text{ кДж/кг В.}$$

Полученное значение равно теплоте образования BO_2 в газообразном состоянии при окислении бора в кристаллическом состоянии воздухом.

Теплота образования BO_2 в газообразном состоянии [17] при окислении бора в кристаллическом состоянии воздухом

$$\Delta H_{BO_2}^0 = -289,11 \cdot 10^3 \text{ кДж/кмоль.}$$

Теплота окисления бора по реакции (2) в расчете на 1 кг бора [18]

$$\Delta H_{BO_2}^* = \Delta H_{BO_2}^0 / \mu_B = -289,11 \cdot 10^3 / 11 = -26283 \text{ кДж/кг.}$$

На 1 кг продуктов окисления

$$\Delta H_{BO_2}^{**} = \Delta H_{BO_2}^0 / (\mu_{BO_2} + 3,76\mu_{N_2}) = -1950 \text{ кДж/кг.}$$

Удельный расход воздуха для окисления 1 кг бора

$$G_B^* = (\mu_{O_2} + 3,76\mu_{N_2}) / (\mu_B) = (32 + 3,76 \cdot 28) / (11) = 12,48 \text{ кг/кг.}$$

Здесь μ_{Al} , μ_B , μ_{O_2} , μ_{N_2} , μ_{BO_2} – молекулярные массы алюминия, бора, кислорода, азота, диоксида бора, равные 27; 11; 32; 28; 43 кг/кмоль соответственно.

Теоретическая температура продуктов реакции

$$t = \Delta H_{BO_2}^{**} / (g_{BO_2} C_{BO_2} + g_{N_2} C_{N_2}) = 1950 / (0,29 \cdot 0,68 + 0,71 \cdot 1,2) = 1858 \text{ °С.}$$

где C_{BO_2} , C_{N_2} – истинные удельные изобарные теплоемкости BO_2 и N_2 в продуктах окисления, кДж/(К · кг); g_{BO_2} , g_{N_2} – массовые доли BO_2 , N_2 в продуктах окисления при коэффициенте избытка воздуха, равном 1.

Температура находится в допустимых пределах.

2.3. Определение удельной полезной работы и термического КПД ГТУ на тепловом потреблении

Удельная работа газовой турбины [19]

Полезная работа ГТУ

$$l_0 = (l_T - l_k) \cdot \eta_{ЭМ} = (505 - 205) \cdot 0,96 = 288 \text{ кДж/кг воздуха.}$$

Температура воздуха за компрессором [19]

$$T_2 = T_1 \beta^{\frac{k-1}{k}} = (15 + 273)(4,8)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 450 \text{ К (177 } ^\circ\text{C).}$$

Температура воздуха за турбиной [11]

$$T_4 = T_3 (1/\beta)^{\frac{k-1}{k}} = (1\ 100 + 273)(1/4,8)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 878 \text{ К (605 } ^\circ\text{C).}$$

Здесь β – степень сжатия воздуха в компрессоре (расширения в турбине), принята равной 4,8.

Температура воздуха перед турбиной $t_3 = 1\ 100$ °С. Температура воздуха на входе в компрессор $t_1 = 15$ °С; C_p – истинная удельная теплоемкость воздуха при заданной температуре; k – показатель адиабаты, равный 1,4; $\eta_{ЭМ}$ – коэффициент потерь в электрогенераторе и подшипниках, принят равным 0,96; η_{0i}^T , η_{0i}^K – внутренние относительные КПД турбины и компрессора, приняты равными 0,85 и 0,83 соответственно [14].

Удельная теплота, подведенная к воздуху в камере сгорания,

$$q_1 = C_p t_3 - C_p^* t_2 = 1,197 \cdot 1100 - 1,024 \cdot 177 = 1\ 135 \text{ кДж/кг воздуха.}$$

Термический КПД ГТУ

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1} = \frac{288}{1135} = 0,254.$$

Удельная теплота сетевых подогревателей

$$q_{СП} = C_p t_4 - C_p^* t_5 = 1,115 \cdot 605 - 1,01 \cdot 105 = 568 \text{ кДж/кг воздуха.}$$

2.4. Определение КПД камеры сгорания

2.4.1. Относительные тепловые потери с уходящими продуктами окисления из камеры сгорания

При окислении А1:

$$q_2 = (C_{Al_2O_3} g_{Al_2O_3} + C_{O_2} g_{O_2} + C_{N_2} g_{N_2})(t_{yx} - t_1) / \Delta H_{Al_2O_3}^{**} \quad (3)$$

При окислении В:

$$q_2^* = (C_{BO_2} g_{BO_2} + C_{N_2} g_{N_2})(t_{yx} - t_1) / \Delta H_{BO_2}^{**} \quad (4)$$

Принимаем относительные потери в окружающую среду $q_5 = 0,208$, химический недожег $q_3 = 0$ и механический недожег $q_4 = 0$.

КПД камеры сгорания на А1

$$\eta_{КС} = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5) \quad (5)$$

КПД камеры сгорания на В

$$\eta_{КС}^* = 1 - (q_2^* + q_3 + q_4 + q_5) \quad (6)$$

Здесь $g_{Al_2O_3}$, g_{BO_2} , g_{N_2} , g_{O_2} – массовые доли Al_2O_3 , BO_2 , N_2 , O_2 в продуктах окисления А1, В; $C_{Al_2O_3}$, C_{BO_2} , C_{N_2} , C_{O_2} – удельные теплоемкости Al_2O_3 , BO_2 , N_2 , O_2 , кДж/(Ккг); t_{yx} – температура уходящих продуктов окисления на выходе из камеры сгорания, принимается на 100 °С выше температуры воздуха на входе в камеру сгорания из компрессора, то есть $t_{yx} = t_2 + 100 = 177 + 100 = 277$ °С.

Относительный расход топлива в камеру сгорания

$$B_{КС} = q_1 / (\eta_{КС} \cdot \Delta H^*) \text{ кг/кг воздуха на выходе из компрессора.} \quad (7)$$

Относительный расход топлива на выработку электроэнергии

$$B_3 = B_{КС} \cdot \eta_t \text{ кг/кг воздуха на выходе из компрессора.} \quad (8)$$

Относительный расход топлива на выработку теплоты для тепловых сетей

$$B_T = B_{КС} (1 - \eta_t) \text{ кг/кг воздуха на выходе из компрессора.} \quad (9)$$

Удельный расход топлива на выработку электроэнергии

$$b_3 = B_3 \cdot 3\ 600 / l_0 \text{ кг/кВт·ч.} \quad (10)$$

Удельный расход топлива на выработку теплоты

$$b_T = B_T \cdot 10^6 / q_{СП} \text{ кг/ГДж.} \quad (11)$$

Коэффициент использования топлива

$$K_{И} = (l_0 + q_{СП}) / (B_{КС} \cdot \Delta H^*) \quad (12)$$

Удельная выработка электроэнергии на внешнем тепловом потреблении

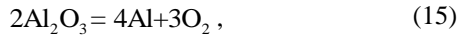
$$\Xi = l_0 \cdot 10^6 / q_{СП} \cdot 3\ 600 \quad (13)$$



Выработка электроэнергии на 1 кг топлива

$$\mathcal{E}^* = 1/b_3 \text{ кВт}\cdot\text{ч} / \text{кг}. \quad (14)$$

Затраты электроэнергии на получение Al и В электролизом Al_2O_3 и VO_2 по реакциям:



без учета тепловых потерь

$$\mathcal{E}^{**} = \Delta H^* / 3600 \text{ кВт}\cdot\text{ч} / \text{кг топлива}. \quad (17)$$

Если не использовать теплоту выхлопного воздуха после газовой турбины, то удельный расход топлива на выработку электроэнергии составит:

$$b_3^* = B_{\text{KC}} \cdot 3600 / l_0 \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}. \quad (18)$$

Выработка электроэнергии на 1 кг топлива составит:

$$\mathcal{E}^{***} = 1/b_3^*, \text{ кВт}\cdot\text{ч} / \text{кг}. \quad (19)$$

Для ГТУ мощностью $Q_3 = 100 \cdot 10^3$ кВт расход воздуха на входе в компрессор

$$G_B = Q_3 / l_0, \text{ кг/с}. \quad (20)$$

Расход топлива в камеру сгорания

$$G_{\text{KC}} = B_{\text{KC}} \cdot G_B, \text{ кг/с}. \quad (21)$$

Расход топлива на выработку электроэнергии

$$G_3 = B_3 \cdot G_B. \quad (22)$$

Расход топлива на выработку теплоты, отпущенной в тепловые сети,

$$G_T = B_T \cdot G_B, \text{ кг/с}. \quad (23)$$

Мощность, отпущенная в тепловые сети,

$$Q_{\text{СП}} = q_{\text{СП}} \cdot G_B, \text{ кВт}. \quad (24)$$

Расход воздуха на окисление топлива

$$G_B^{**} = G_B^* \cdot G_{\text{KC}}, \text{ кг/с}. \quad (25)$$

2.5. Материальный баланс энергоустановки

2.5.1. Поступление топлива в камеру сгорания

B_{KC} , кг/кг воздуха

Расход топлива на выработку электроэнергии

$$B_3^* = b_3 \cdot l_0 / 3600 \text{ кг/кг воздуха}. \quad (26)$$

Расход топлива на выработку теплоты, отпущенной в тепловые сети,

$$B_T^* = b_T \cdot q_{\text{СП}} \cdot 10^{-6} \text{ кг/кг воздуха}. \quad (27)$$

Итого:

$$\Delta B_{\text{KC}} = B_{\text{KC}} - (B_3^* + B_T^*). \quad (28)$$

2.5.2. Тепловой баланс энергоустановки

Поступление теплоты в камеру сгорания

$$q_1 = 1135 \text{ кДж/кг воздуха}. \quad (29)$$

Расход теплоты на выработку электроэнергии

$$l_0 = 288 \text{ кДж/кг воздуха}. \quad (30)$$

Расход теплоты в сетевые подогреватели

$$q_{\text{СП}} = 568 \text{ кДж/кг воздуха}. \quad (31)$$

Потери теплоты с уходящим воздухом из сетевого подогревателя

$$q_{\text{УХ}} = C_p (t_s - t_1) \text{ кДж/кг воздуха}. \quad (32)$$

Потери теплоты в газовой турбине

$$\Delta q_T = l_T (1/\eta^{T-1}) \text{ кДж/кг воздуха}. \quad (33)$$

Потери теплоты в компрессоре

$$\Delta q_K = l_K (1/\eta_{0i}^K) \text{ кДж/кг воздуха}. \quad (34)$$

Потери теплоты в электрогенераторе и подшипниках

$$\Delta q_{\text{ЭМ}} = l_0 (1 - \eta_{\text{ЭМ}}) \text{ кДж/кг воздуха}. \quad (35)$$

Небаланс прихода и расхода энергии

$$\Delta q_1 = q_1 - (l_0 + q_{\text{СП}} + q_{\text{УХ}} + \Delta q_T + \Delta q_K + \Delta q_{\text{ЭМ}}) \text{ кДж/кг воздуха}. \quad (36)$$

Расчеты сведены в таблицу.



Таблица

Расчет параметров ГТУ, работающей на алюминии и боре

Table

Parameter calculation of gas turbine working on aluminum and boron

Параметр	Обозначение	Единица измерения	№ формулы	Алюминий	Бор
Тепловые потери с уходящими продуктами окисления	$q_2, (q_2^*)$	о.е.	(3,4)	0,0414	0,128
КПД камеры сгорания	$\eta_{КС} (\eta_{КС}^*)$	о.е.	(5,6)	0,75	0,664
Поступление топлива в камеру сгорания	$B_{КС} (B_{КС}^*)$	кг/кг	(7)	$48,8 \cdot 10^{-3}$	$65 \cdot 10^{-3}$
Расход топлива на выработку электроэнергии	$B_{Э} (B_{Э}^*)$	кг/кг	(8)	$12,39 \cdot 10^{-3}$	$16,51 \cdot 10^{-3}$
Расход топлива на выработку теплоты	$B_T (B_T^*)$	кг/кг	(9)	$36,4 \cdot 10^{-3}$	$48,49 \cdot 10^{-3}$
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии	$b_{Э} (b_{Э}^*)$	кг/кВт·ч	(10)	0,1548	0,206
Удельный расход топлива на выработку 1 ГДж теплоты	$b_T (b_T^*)$	кг/ГДж	(11)	64	85,36
Коэффициент использования топлива	$K_{И} (K_{И}^*)$	кДж / кДж	(12)	0,578	0,501
Выработка электроэнергии на тепловом потреблении	\mathcal{E}	кВтч / ГДж	(13)	136,5	136,5
Выработка электроэнергии на 1 кг топлива	\mathcal{E}^*	кВтч / кг	(14)	6,46	4,85
Затраты электроэнергии на получение Al и В электролизом	\mathcal{E}^{**}	кВтч / кг	(17)	8,6	7,3
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии без когенерации	$b_{Э}^*$	кг/кВт·ч	(18)	0,61	0,81
Выработка электроэнергии на 1кг топлива без когенерации	\mathcal{E}^{***}	кВтч / кг	(19)	1,639	1,23
Расход воздуха на входе в компрессор ГТУ мощностью 10^5 кВт	G_B	кг/с	(20)	347,2	347,2
Расход топлива на ГТУ мощностью 10^5 кВт	$G_{КС} (G_{КС}^*)$	кг/с	(21)	16,94	22,56
Расход топлива на выработку электроэнергии	$G_{Э} (G_{Э}^*)$	кг/с	(22)	4,3	5,72
Расход топлива на выработку теплоты	$G_T (G_T^*)$	кг/с	(23)	12,63	16,83
Мощность сетевого подогревателя	$Q_{СП}$	кВт	(24)	$99,3 \cdot 10^3$	$99,3 \cdot 10^3$
Расход воздуха на окисление топлива	G_B^{**}	кг/с	(25)	225	281,5
Расход топлива на выработку электроэнергии	$B_{Э}^*$	кг/кг	(26)	$12,3 \cdot 10^{-3}$	$16,48 \cdot 10^{-3}$
Расход топлива на выработку теплоты	B_T^*	кг/кг	(27)	$36,35 \cdot 10^{-3}$	$48,48 \cdot 10^{-3}$
Небаланс по расходу топлива	$\Delta B_{КС}$	кг/с	(28)	0	0
Потери теплоты с уходящим воздухом из сетевого подогревателя	$q_{УХ}$	кДж / кг	(29)	91	91
Потери теплоты в газовой турбине	Δq_T	кДж / кг	(30)	89	89
Потери теплоты в компрессоре	Δq_K	кДж / кг	(31)	35	35
Потери теплоты в электрогенераторе и подшипниках	$\Delta q_{ЭМ}$	кДж / кг	(32)	12	12
Небаланс прихода и расхода энергии	Δq_1	кДж / кг (%)	(33)	52 (4,5 %)	52 (4,5 %)



Сравнительный анализ работы ГТУ на алюминиевом топливе с современными когенерационными электростанциями, работающими на органическом топливе [20], дал следующие результаты:

– удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии 163,7 г/кВт·ч и 163г/кВт·ч соответственно;

– удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии 67,6 кг/ГДж и 41,3 кг/ГДж соответственно;

– удельная выработка электрической энергии на тепловом потреблении 136,5 кВт·ч/ГДж и 119 кВт·ч/ГДж соответственно.

Для сравнения удельные величины приводятся к условному топливу.

Следует отметить, что данное исследование выполнено для достигнутого уровня предельных температур конструкционных материалов и установок ГТУ (1 800÷1 900 °С), однако исследования ГТУ из керамических и композитных материалов [21, 22] показывают возможность повышения температур и термодинамической эффективности ГТУ на металлических видах топлива. Использование новых, не электролизных, методов получения металлов позволяет значительно снизить энергоемкость их производства и способствует повышению эффективности всего цикла аккумулирования энергии в металлическом топливе [23].

3. Результаты

Сравнение самых важных параметров при работе современных ГТУ на алюминии и боре показало:

Теплота окисления алюминия больше, чем у бора в $31\,005/26\,283 = 1,18$ раза.

Расход воздуха на полное окисление бора в $281,5/225 = 1,25$ раз больше, чем для окисления алюминия.

Повышенный расход воздуха увеличивает потери теплоты из камеры сгорания с уходящими газами в $0,128/0,0414 = 3,1$ раза, а КПД камеры сгорания уменьшается в $0,75/0,664 = 1,13$ раза при одной и той же электрической мощности ГТУ.

Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии для ГТУ, работающей на боре, больше, чем при работе на алюминии в $0,185/0,1636 = 1,13$ раза, по выработке тепловой энергии в $76,49/67,6 = 1,13$ раза.

Коэффициент использования топлива на ГТУ, работающей на алюминии, выше, чем при работе на боре в $0,578/0,501 = 1,15$ раза.

Выработка электроэнергии на 1 кг алюминия больше, чем на 1 кг бора в $6,46/4,85 = 1,33$ раза.

Отключение когенерации на ГТУ приводит к увеличению расхода условного топлива на выработку электроэнергии в $0,61/0,1548 = 3,94$ раза при использовании в качестве топлива алюминия и в $0,81/0,206 = 3,93$ при использовании бора.

4. Заключение

Результаты сравнения работы ГТУ на алюминиевом топливе с современными когенерационными электростанциями на органическом топливе показали незначительное снижение эффективности, не превышающее потери вследствие суточной и сезонной неравномерности энергопотребления, а также возможность применения данной технологии для аккумулирования нерегулярных приходов энергии от возобновляемых источников энергии.

Высокие значения температуры сгорания металлических топлив потенциально позволяют значительно повысить эффективность их использования при создании конструкций ГТУ, способных длительно работать при температуре газа выше $2\,500 \div 3\,000$ °С, а также создавать схемы электрических станций с такими прямыми методами получения электрической энергии, как термоэмиссионные и магнетогидродинамические и создавать эффективные гибридные когенерационные электростанции.

Сравнение энергетических показателей при работе ГТУ на алюминии и боре показало, что коэффициент использования топлива при выработке электрической и тепловой энергии на алюминии существенно выше, чем на боре вследствие повышения у последнего расхода воздуха и увеличения потерь теплоты из камеры сгорания с уходящими газами

Список литературы

- [1] Щеклеин, С.Е. Моделирование нестационарных случайных процессов в задачах обоснования возобновляемых источников энергии / С.Е. Щеклеин, В.В. Власов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2012. – № 3 (107). – С. 67–71.
- [2] Обухова, Н.В. О возможности совместной работы СЭС с энергосистемой по параметрам качества энергии / Н.В. Обухова, А.О. Егоров, С.Е. Щеклеин // Труды второй научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург, 2017. – С. 236–238.
- [3] Елистратов, В.В. Аккумуляция электроэнергии от ВИЭ для централизованного энергоснабжения / В.В. Елистратов // В сборнике: Природоохранные и гидротехнические сооружения: проблемы строительства, эксплуатации, экологии и подготовки специалистов. Материалы Международной научно-технической конференции. Самарский государственный архитектурно-строительный университет. – 2014. – С. 289–294.
- [4] Franzoni, F. Combined hydrogen production and power generation from aluminum combustion with water: Analysis of the concept / F. Franzoni [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – Vol. 35. – Iss. 4. – P.1548–1559.
- [5] Shkolnikov, E.I. Aluminum as energy carrier: Feasibility analysis and current technologies overview /



E.I. Shkolnikov, A.Z. Zhuk, M.S. Vlaskin // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – Vol. 15. – Iss. 9. – P. 4611–4623.

[6] Дудолодов, А.О. Экспериментальное исследование процессов низкотемпературного окисления алюминия с выделением водорода / А.О. Дудолодов [и др.] // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. – 2015. – № 21 (185). – С. 112–120.

[7] Амбарян, Г.Н. Генерация водорода путем окисления алюминия в низкоконцентрированном водном растворе калиевой щелочи при интенсивном перемешивании / Г.Н. Амбарян [и др.] // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. – 2015. – № 23 (187). – С. 95–104.

[8] Ларичев, М.Н. Реакция алюминиевых частиц с жидкой водой и водяным паром – перспективный источник водорода для нужд водородной энергетики / М.Н. Ларичев [и др.] // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. – 2007. – № 5. – С. 125–139.

[9] Ларичев, М.Н. Окисление алюминиевого порошка АСД-4 водой. Возможности химической и физической активации процесса. Получение наноразмерных продуктов окисления / М.Н. Ларичев [и др.] // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. – 2010. – № 2. – С. 85–104.

[10] Bergthorson, J.M. Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power / J.M. Bergthorson [et al.] // *Applied Energy*. – 2015. – Vol. 160. – P. 368–382.

[11] Bergthorson, J.M. Recyclable metal fuels for clean and compact zero-carbon power / J.M. Bergthorson // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2018. – Vol. 68. – P. 169–196.

[12] Kleiner, K. Powdered Metal: The Fuel of the Future / K. Kleiner // *New Scientist*. – 2005. – Vol. 185. – Iss. 2522. – P. 34–37.

[13] Korotkikh, A. Ignition study of high-energy materials containing Al, B, AlB₂ and TiB₂ powders / A. Korotkikh [et al.] // В сборнике: MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 33. – «33rd Siberian Thermo-physical Seminar, STS 2017». – P. 03016.

[14] Коротких, А.Г. Исследование кинетики окисления и горения порошков алюминия / А.Г. Коротких, И.А. Ионова, М.К. Карпович // *Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии»*. – Томск, 2012. – С. 359–360.

[15] Коротких, А.Г. Зажигание и горение высокоэнергетических материалов, содержащих алюминий, бор и диборид алюминия / А.Г. Коротких [и др.] // *Химическая физика и мезоскопия*. – 2018. – Т. 20. – № 1. – С. 5–14.

[16] Малинин В.И., Серебренников С.Ю., Бербек А.М. Анализ особенностей горения порошков металлов в смесях с воздухом, водой, диоксидом углерода / В.И. Малинин, С.Ю. Серебренников, А.М. Бербек // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2010. – Т. 19. – № 4. – С. 12–17.

[17] Карапетьянц, М.Х. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ / М.Х. Карапетьянц, М.Л. Карапетьянц. – М.: «Химия». 1968. – 470 с.

[18] Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика / М.Х. Карапетьянц. – М.: Химия. 1975. – 504с.

[19] Промышленные тепловые электростанции: Учебник для вузов / Баженов М.И., Богородский А.С., Сазанов Б.В., Юренёв В.Н.; под ред. Соколова А.С. 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1979. – 296 с.

[20] Яковлев, Б.В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения / Б.В. Яковлев // М.: Новости теплоснабжения. – 2008. – 448с.

[21] Cernuschi, F. Thermo-physical properties of as deposited and aged thermal barrier coatings (TBC) for gas turbines: State-of-the art and advanced TBCs / F. Cernuschi [et al.] // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2018. – Vol. 38. – Iss. 11. – P. 3945–3961.

[22] Gorunov, A.I. Complex refurbishment of titanium turbine blades by applying heat-resistant coatings by direct metal deposition / A.I. Gorunov // *Engineering Failure Analysis*. – 2018. – Vol. 86. – P. 115–130.

[23] Кустов А.Д., Парфенов О.Г. Высокоскоростная металлургия алюминия / А.Д. Кустов, О.Г. Парфенов // *Доклады академии наук. Химия*. – 2015. – Т. 462. – № 5. – С. 555–557.

References

[1] Shcheklein S.E., Vlasov V.V. Nonstationary random processes modeling in renewable energy problems (Modelirovanie nestacionarnykh sluchajnykh processov v zadachah obosnovaniya vozobnovlyaemykh istochnikov energii). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2012;3(107):67–71 (in Russ.).

[2] Obuhova N.V., Egorov A.O., Shcheklein S.E. On the possibility of PV ES working together with the power grid on energy quality parameters (O vozmozhnosti sovmestnoj raboty SES s energosistemoj po parametram kachestva energii). *Trudy vtoroj nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh uchenyh Ural'skogo energeticheskogo instituta*, Ekaterinburg, 2017; pp. 236–238 (in Russ.).

[3] Elistratov V.V. Accumulation of electricity from renewable energy for centralized energy supply (Akkumulirovanie elektroenergii ot VIE dlya centralizovannogo energosnabzheniya. V sbornike: Prirodohrannye i gidrotehnicheskie sooruzheniya: problemy stroitel'stva, ekspluatatsii, ekologii i podgotovki specialistov). *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii*. Samarskii gosudarstvennyi arhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2014; pp. 289–294 (in Russ.).

[4] Franzoni F., Milani M., Montorsi L., Golovitchev V. Combined hydrogen production and power generation from aluminum combustion with water: Analysis of the concept. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010;35(4):1548–1559 (in Eng.).

[5] Shkolnikov E.I., Zhuk A.Z., Vlaskin M.S. Aluminum as energy carrier: Feasibility analysis and current



technologies overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011;15(9):4611–4623 (in Eng.).

[6] Dudoladov A.O., Buryakovskaya O.A., Vlaskin M.S., Zhuk A.Z., Shkol'nikov E.I. Experimental study of low-temperature aluminium oxidation processes with hydrogen release (Eksperimental'noe issledovanie processov nizkotemperaturnogo okisleniya alyuminiya s vydeleniem vodoroda). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*; 2015;21(185):112–120 (in Russ.).

[7] Ambaryan G.N., Dudoladov A.O., Meshkov E.A., Vlaskin M.S., Zhuk A.Z., Shkol'nikov E.I. Hydrogen generation by oxidation of aluminium in a low-concentrated water solution of potassium lye with intensive mixing (Generatsiya vodoroda putem okisleniya alyuminiya v nizkokoncentrirovannom vodnom rastvore kalievoi shchelochi pri intensivnom peremeshivani). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2015;23(187):95–104 (in Russ.).

[8] Larichev M.N., Laricheva O.O., Lejpunskij I.O., Pshechenkov P.A. The reaction of aluminium particles with liquid water and water vapor is a promising source of hydrogen for hydrogen energy needs (Reaktsiya alyuminievykh chastic s zhidkoi vodoi i vodyanym parom – perspektivnyi istochnik vodoroda dlya nuzhd vodorodnoi energetiki). *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika*, 2007;(5):125–139 (in Russ.).

[9] Larichev M.N., Shajtura N.S., Laricheva O.O., Kolokol'nikov V.N., Shkol'nikov E.I. The oxidation of ASD-4 aluminium powder with water. The possibilities of chemical and physical activation of the process. Getting nanoscale oxidation products (Okislenie alyuminievogo poroshka ASD-4 vodoi. Vozmozhnosti himicheskoi i fizicheskoi aktivatsii protsessa. Poluchenie nanorazmernykh produktov okisleniya). *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika*, 2010;(2):85–104 (in Russ.).

[10] Bergthorson J.M., Goroshin S., Soo M.J., Julien P., Jarvis D.J. Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power. *Applied Energy*, 2015;160:368–382 (in Eng.).

[11] Bergthorson J.M. Recyclable metal fuels for clean and compact zero-carbon power. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018;68:169–196 (in Eng.).

[12] Kleiner K. Powdered Metal: The Fuel of the Future. *New Scientist*, 2005;185(2522):34–37 (in Eng.).

[13] Korotkikh A., Slyusarskiy K., Sorokin I., Arkhipov V. Ignition study of high-energy materials containing Al, B, AlB₂ and TiB₂ powders. V sbornike: MATEC Web of Conferences, 33rd Siberian Thermophysical Seminar, STS 2017, 2017; pp. 03016 (in Eng.).

[14] Korotkikh A.G., Ionova I.A., Karpovich M.K. Study of kinetics of oxidation and burning aluminum powders (Issledovanie kinetiki okisleniya i gorenija poroshkov alyuminiya). Sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sovremennye tekhnika i tekhnologii". Tomsk, 2012; pp. 359–360 (in Russ.).

[15] Korotkikh A.G., Arhipov V.A., Sorokin I.V., Selihova E.A. Ignition and combustion of high-energy materials containing aluminium, boron and aluminium diboride (Zazhiganie i gorenije vysokoenergeticheskikh materialov, sodержashchih alyumini, bor i diborid alyuminiya). *Himicheskaya fizika i mezoskopija*, 2018;20(1):5–14 (in Russ.).

[16] Malinin V.I., Serebrennikov S.Yu., Berbek A.M. Analysis of the burning features of metal powders in mixtures with air, water, carbon dioxide (Analiz osobennostei gorenija poroshkov metallov v smesyah s vozduhom, vodoi, dioksidom ugljeroda). *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2010;19(4):12–17 (In Russ.).

[17] Karapet'yanc M.H., Karapet'yanc M.L. Basic thermodynamic constants of inorganic and organic substances (Osnovnye termodinamicheskie konstanty neorganicheskikh i organicheskikh veshchestv). Moscow: Himiya Publ., 1968; 470 p. (in Russ.).

[18] Karapet'yanc M.H.. Himicheskaya termodinamika. Moscow: HimiyaPubl., 1975; 504 p. (in Russ.).

[19] Bazhenov M.I., Bogorodskij A. S., Sazanov B.V., Yurenyov V.N. Industrial thermal power plants: A textbook for universities (Promyshlennye teplovye elektrostantsii: Uchebnik dlya vuzov); Ed. Sokolov A.S.. 2-e izd., pererab. Moscow: Energiya Publ., 1979; 296 p. (in Russ.).

[20] Yakovlev B.V. Improving the efficiency of heating and heating systems (Povyshenie effektivnosti sistem teplofikatsii i teplosnabzheniya). Moscow: Novosti teplosnabzheniya Publ., 2008; 448 p. (in Russ.).

[21] Cernuschi F., Bison P., Mack D.E., Merlini M., Stamm W. Thermo-physical properties of as deposited and aged thermal barrier coatings (TBC) for gas turbines: State-of-the art and advanced TBCs. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018;38(11):3945–3961 (in Eng.).

[22] Gorunov A.I. Complex refurbishment of titanium turbine blades by applying heat-resistant coatings by direct metal deposition. *Engineering Failure Analysis*, 2018;86:115–130 (in Eng.).

[23] Kustov A.D., Parfenov O.G. High-speed aluminium metallurgy (Vysokoskorostnaya metallurgiya alyuminiya). *Doklady akademii nauk. Himiya*, 2015;462(5):555–557 (in Russ.).

Транслитерация по BSI

