

УДК 620.93:621.354

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НА АЛЮМИНИЕВОМ ТОПЛИВЕ

Клер Александр Матвеевич¹,
kler@isem.irk.ru

Тюрина Элина Александровна¹,
tyurina@isem.irk.ru

Потанина Юлия Михайловна¹,
julia@isem.irk.ru

Медников Александр Станиславович¹,
mednikov@isem.irk.ru

¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Актуальность работы обусловлена использованием алюминия в качестве промежуточного энергоносителя для получения водорода, поскольку алюминий безопасен в обращении, затраты на транспорт и хранение алюминия относительно не велики, а дальнейшее использование полученного водорода характеризуется экологической чистотой продуктов сгорания.

Цель работы: определение энергетической эффективности, конструктивных характеристик основных элементов, капиталовложений в установки в зависимости от их термодинамических параметров и расходов рабочих тел.

Методы исследования. Поскольку исследования теплоэнергетических установок, использующих алюминий в качестве топлива, характеризуются многообразием физико-химических процессов, неопределенностью экономической информации и т. д., в качестве метода исследования авторы предлагают математическое моделирование данных установок с использованием программного пакета СМПП-ПК и проведение оптимизационных технико-экономических исследований на моделях. Оптимизация параметров проводилась в два этапа: на первом этапе максимизировался КПД установки, на втором минимизировались удельные капиталовложения в установку при полученном максимальном КПД.

Результаты. Разработаны технологические схемы газотурбинной установки с топливным элементом на алюминии, парогазовой установки с топливным элементом на водороде, газотурбинной установки на водороде с котлом-утилизатором. На основе технологических схем построены математические модели элементов и установок в целом. Проведены оптимизационные технико-экономические исследования на данных моделях. Энергоустановка с алюминиевыми топливными элементами может обеспечить весьма высокий КПД нетто – 65 %. КПД парогазовой установки с водородно-воздушными топливными элементами меньше КПД газотурбинной установки с топливными элементами на алюминии почти на 12 %, но в то же время удельные капиталовложения ниже. Газотурбинная установка на водороде с котлом-утилизатором имеет относительно низкие капиталовложения, но недостаточно высокий КПД нетто.

Ключевые слова:

Алюминий, водород, газотурбинная установка, парогазовая установка, топливный элемент.

Введение

На протяжении нескольких десятилетий учёные-энергетики занимаются исследованием водородной энергетики – глобальной энергетической системы, основным энергоносителем в которой является водород. Особую актуальность эти исследования приобретают в настоящее время в связи с обострившимися проблемами с выбросами парниковых газов и ожидаемым дефицитом углеводородного топлива [1–10].

Наряду с несомненными достоинствами, основным из которых является экологическая чистота продуктов сгорания, водород как энергоноситель имеет и существенные недостатки. Главные из них – дороговизна транспортировки и хранения [11–13]. В связи с этим несомненный научный интерес имеет поиск других возможных энергоносителей, обладающих достоинствами водорода, но лишённых его недостатков. Одним из таких энергоносителей является алюминий [14–18]. Продукт его окисления – твёрдое, нетоксичное вещество

Al_2O_3 . Алюминий имеет высокую теплотворную способность, легко и с малыми затратами хранится и транспортируется. Причём при его хранении и транспортировке не возникает таких опасностей (пожаров и взрывов), как при хранении и транспортировке водорода.

В общем виде технология использования алюминия как энергоносителя включает следующие стадии: а) производство алюминия с использованием «первичной» электроэнергии; б) транспортировка алюминия в район конечного потребления; в) складирование алюминия (для обеспечения неравномерного в годовом разрезе графика электрической нагрузки при равномерном производстве алюминия и его равномерном транспорте); г) производство «вторичной» электроэнергии из алюминия; д) обратный транспорт Al_2O_3 . Настоящая работа посвящена технико-экономическим исследованиям энергетических установок по получению электроэнергии на базе алюминиевого топлива как наименее изученному элементу указанной системы.

Состав вариантов исследуемых установок на «алюминиевом» топливе принимался, исходя из следующих соображений. Наиболее высокую энергетическую эффективность может обеспечить *комбинированная энергетическая установка*, в состав которой входят высокотемпературные топливные элементы на алюминии, в которых значительная часть химической энергии алюминия непосредственно переходит в электрическую энергию. Комбинация таких высокотемпературных топливных элементов с газотурбинной (ГТУ) или парогазовой установкой (ПГУ) может обеспечить коэффициент полезного действия установки более 65 %. Однако высокотемпературные топливные элементы на алюминии в настоящее время не являются в необходимой степени отработанными на практике источниками электроэнергии. В связи с этим рассматриваются две другие схемы производства электроэнергии из алюминия. Обе они включают промежуточную стадию получения из алюминия водорода на основе реакции алюминия с водяным паром: $2Al + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2$. Отметим, что данная реакция протекает с выделением значительного количества тепла.

В *первой схеме (ПГУ-ВТЭ)* в реактор подаётся стехиометрически необходимое для окисления поступающего в реактор алюминия количество водяного пара. В результате образуется практически чистый (за счёт образования Al_2O_3 в конденсированной фазе) водород, который поступает в высокотемпературные водородно-воздушные топливные элементы (ВТЭ). Выходящая из этих элементов смесь водяных паров, кислорода и азота направляется в газовую турбину. Тепло, выделяющееся в реакторе, идёт на производство острого пара и нагрев пара промперегрева паротурбинного цикла. Эта схема имеет достаточно высокий КПД, но требует расположения в реакторе с расплавленным алюминием дорогостоящих трубных поверхностей нагрева для передачи тепла рабочему телу паротурбинного цикла.

Вторая схема со сжиганием водорода в камере сгорания газовой турбины и получением пара, необходимого для производства водорода и отвода тепла в котле-утилизаторе (ГТУ-КУ), имеет более низкий КПД, но не требует расположения в реакторе трубных поверхностей нагрева и не предусматривает использование топливных элементов. В этой схеме в реактор пара подаётся больше, чем нужно для полного окисления поступающего алюминия. В результате из реактора выходит пароводородная смесь, которая «уносит» всё выделяющееся тепло. Это позволяет отказаться от размещения теплообменных поверхностей внутри реактора и существенно упрощает его конструкцию. Пароводородная смесь из реактора направляется в камеру сгорания газотурбинной установки, откуда продукты сгорания поступают в газовую турбину, а затем в котёл-утилизатор, где получается пар, направляемый в реактор.

Для каждой из исследуемых схем разработана математическая модель, позволяющая определить энергетическую эффективность, конструктивные характеристики основных элементов, капиталовложения в установку в зависимости от её термодинамических параметров и расходов рабочих тел. Математические модели были разработаны с помощью программно-вычислительного комплекса «Система машинного построения программ» (СМПП-ПК), который разработан в Институте систем энергетики им Л.А. Мелентьева СО РАН [19, 20]. Структура СМПП-ПК выбрана таким образом, чтобы охватить автоматизацией все наиболее важные этапы процесса математического моделирования сложных технологических систем. Данный комплекс позволяет автоматически генерировать программу расчета (на языке Fortran) сложной энергетической установки на основе графического изображения технологической схемы (построенного с помощью графического редактора СМПП-ПК) и архивов математических моделей ее элементов, а также формировать задачи оптимизации. Следует отметить, что математические модели установок состоят из сотен подсистем алгебраических, трансцендентных, дифференциальных уравнений и содержат тысячи переменных. С использованием этих моделей решались задачи оптимизации параметров установок. Причём оптимизация проводилась по критериям максимума КПД нетто и минимума удельных капиталовложений при максимальном КПД.

Технологические схемы установок

Технологическая схема ГТУ с АлТЭ. Технологическая схема теплоэнергетической установки, включающей высокотемпературные топливные элементы на алюминии, газотурбинную установку, регенеративный воздухоподогреватель и подсистему получения жидкого алюминия, представлена на рис. 1. Жидкий алюминий направляется на вход анода топливного элемента, на входе катода которого поступает воздух. С анода выходит твёрдый Al_2O_3 , а с катода – азотно-кислородная смесь. Часть газовой смеси поступает в систему нагрева и плавления алюминия, а затем на газовую турбину ГТ1. Остальная смесь сразу направляется на газовую турбину ГТ2. Отработавшая в газовых турбинах кислородно-водородная смесь поступает на воздухоподогреватель.

Технологическая схема ПГУ-ВТЭ. Упрощенная технологическая схема установки представлена на рис. 2. Установка включает реактор, в котором в результате реакции водяного пара с алюминием образуется газообразный водород и твёрдый Al_2O_3 . Кроме того, в реакторе выделяется значительное количество тепла (4187 ккал/кг на 1 кг алюминия). Процесс в реакторе протекает при температуре около 700 °С. Образующийся в реакторе водород направляется в высокотемпературный топливный элемент. Выделяющееся в реакторе тепло исполь-

зуется для нагрева и расплавления алюминия, получения острого пара в паровой турбине и нагрева пара промежуточного перегрева паровой турбины. В топливном элементе водород вступает в электрохимическую реакцию с кислородом воздуха. Образующаяся смесь водяных паров, поступающих с анода и азотно-кислородной смеси, поступающей с катода, направляется в газовую турбину, а затем нагревает воздух, предварительно сжатый в двух ступенях компрессора с промежуточным охлаждением. Воздух после регенеративного подогревателя поступает на катод топливного элемента.

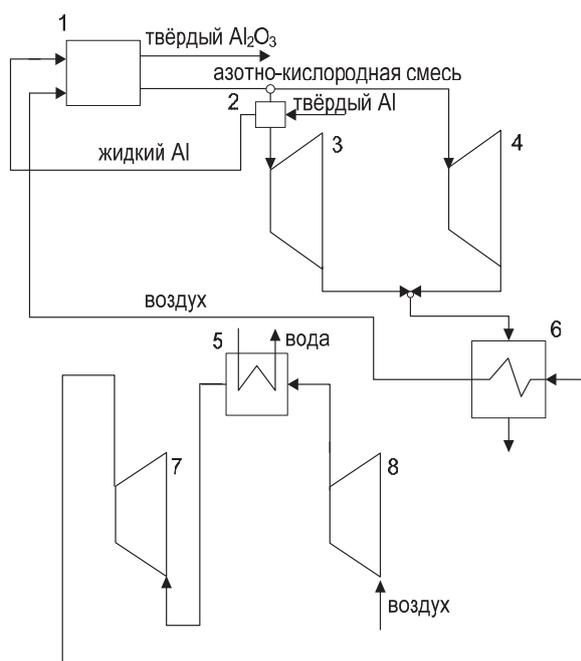


Рис. 1. Схема ГТУ с топливным элементом на алюминии: 1 – топливные элементы; 2 – теплообменник для нагрева и плавления алюминия; 3, 4 – газовые турбины; 5 – водовоздушный охладитель; 6 – воздухоподогреватель; 7, 8 – воздушные компрессоры

Fig. 1. Scheme of a gas-turbine installation (GTI) with aluminum fuel cell: 1 are the fuel cells; 2 is the heat exchanger for aluminum heating and melting; 3, 4 are the gas turbines; 5 is the water-air cooler; 6 is the air heater; 7, 8 are the air compressors

Паровая турбина имеет «стандартную» технологическую схему и включает три регенеративных подогревателя высокого давления (с выделенными зонами охлаждения пара и охлаждения конденсата), термический деаэратор 6 кг/см², четыре регенеративных подогревателя низкого давления и конденсатор.

Технологическая схема ГТУ-КУ. Схема ГТУ на водороде с котлом-утилизатором представлена на рис. 3. Смесь водяного пара и водорода из реактора 4 направляется в камеру сгорания газовой турбины. Туда же поступает воздух, сжимаемый компрессором 1. Смесь азота, кислорода и водяных паров из газовой турбины 3 поступает в котёл-утилизатор 5. Вода в котёл-утилизатор подаётся насосом

6. Пар из котла-утилизатора направляется в реактор, где в результате его взаимодействия с расплавленным алюминием получается пароводородная смесь.

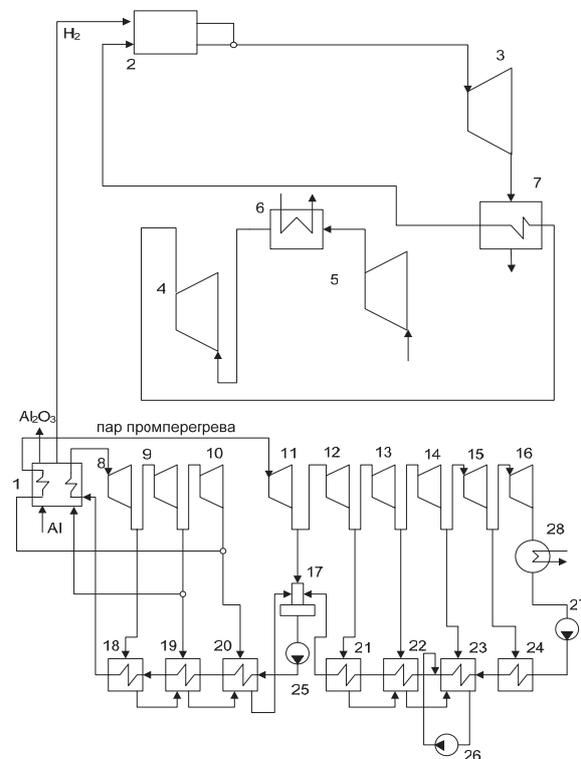


Рис. 2. Схема ПГУ с топливным элементом на водороде: 1 – реактор получения водорода; 2 – топливный элемент; 3 – газовая турбина; 4, 5 – воздушные компрессоры; 6 – водовоздушный охладитель; 7 – газозо-воздушный теплообменник; 8–16 – отсеки паровой турбины; 17 – деаэратор; 18–20 – подогреватели высокого давления; 21–24 – подогреватели низкого давления; 25–27 – насосы; 28 – конденсатор паровой турбины

Fig. 2. Scheme of combined-cycle plant (CCP) with hydrogen fuel cell: 1 is the reactor for hydrogen production; 2 is the fuel cell; 3 is the gas turbine; 4 and 5 are the air compressors; 6 is the water-air cooler; 7 is the gas-air heat exchanger; 8–16 are the steam turbine compartments; 17 is the deaerator; 18–20 are the high pressure heaters; 21–24 are the low pressure heaters; 25–27 are the pumps; 28 is the steam turbine condenser

Математические модели основных элементов установок

Математическая модель алюминиевого высокотемпературного топливного элемента. Топливный элемент состоит из двух электродов, между которыми расположен твёрдый электролит. К электродам подводится топливо (к аноду) и окислитель (к катоду). В рассматриваемом элементе в качестве топлива используется жидкий алюминий, а в качестве окислителя – кислород воздуха. На аноде протекает реакция окисления восстановителя, на катоде – восстановления окислителя. Ионным проводником служит твердое вещество.

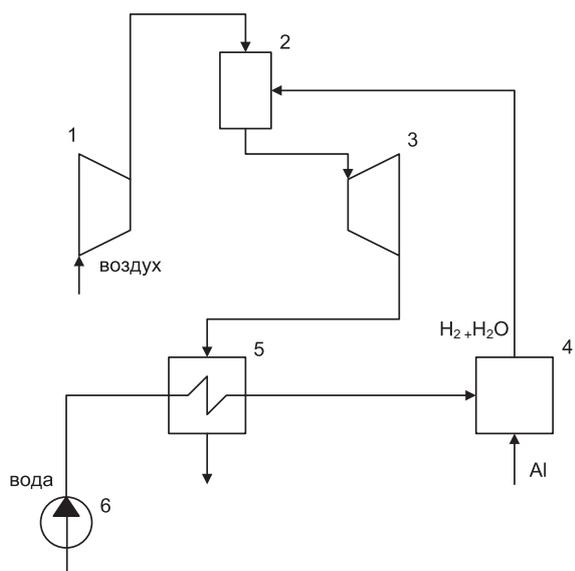


Рис. 3. Схема газотурбинной установки на водороде, полученном из алюминия (ГТУ-КУ): 1 – воздушный компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – газовая турбина; 4 – реактор получения водорода из алюминия; 5 – котел-утилизатор; 6 – насос

Fig. 3. Scheme of GTI on hydrogen produced from aluminum (GTI with waste heat boiler – WHB): 1 is the air compressor; 2 is the combustion chamber; 3 is the gas turbine; 4 is the reactor for hydrogen production from aluminum; 5 is the waste heat boiler; 6 is the pump

С анода выходит Al_2O_3 , а с катода – азотно-кислородная смесь с меньшей по сравнению с воздухом долей кислорода. Количество воздуха, поступающего на катод АлТЭ, должно быть подобрано таким образом, чтобы отвод тепла от АлТЭ с выходящей с катода азотно-кислородной смесью обеспечил поддержание теплового баланса элемента на допустимом температурном уровне. Принято, что топливный элемент работает при изобарно-изотермических условиях. Для этих условий максимальная работа, которая может быть получена в системе при обратимом протекании химической реакции A_{\max} , равна изменению энергии Гиббса с обратным знаком:

$$A_{\max} = -\Delta G.$$

Полезная работа ТЭ определяется как

$$A_{\text{ТЭ}} = A_{\max} \eta_{oi},$$

где η_{oi} – внутренний относительный КПД ТЭ.

ΔG определяется из выражения

$$\Delta G = G_{\text{вх}}^a + G_{\text{вх}}^k - G_{\text{вых}}^a - G_{\text{вых}}^k,$$

где $G_{\text{вх}}^a, G_{\text{вх}}^k$ – энергия Гиббса потоков на входе анода и катода; $G_{\text{вых}}^a, G_{\text{вых}}^k$ – энергия Гиббса потоков на выходе анода и катода.

В процессах, протекающих в топливных элементах, выделяется тепло, которое находится из уравнения теплового баланса:

$$Q_{\text{ТЭ}} = H_{\text{вх}}^a + H_{\text{вх}}^k - A_{\text{ТЭ}} - H_{\text{вых}}^a - H_{\text{вых}}^k,$$

где $H_{\text{вх}}^a, H_{\text{вх}}^k, H_{\text{вых}}^a, H_{\text{вых}}^k$ – полные энтальпии вещества на входе и выходе анода и катода.

С учётом того, что всё выделившееся в ТЭ тепло отводится с потоками веществ с катода и анода, то условием теплового баланса ТЭ при температуре реакции T^p является

$$Q_{\text{ТЭ}} = 0.$$

Это условие в модели используется для определения температуры реакции, при которой Al_2O_3 выходит с анода, а газовая смесь – с катода.

Расход Al_2O_3 на выходе анода

$$G_{\text{вых.а}}^{\text{Al}_2\text{O}_3} = G^{\text{Al}} \mu_{\text{Al}_2\text{O}_3} / (2\mu_{\text{Al}}),$$

где G^{Al} – расход алюминия на входе анода; $\mu_{\text{Al}}, \mu_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – молекулярные веса Al и Al_2O_3 .

Количество кислорода, поступающего с катода через электролит на анод, определяется из стехиометрического соотношения:

$$G_{\text{к-а}}^{\text{O}_2} = G^{\text{Al}} (3/2) \mu_{\text{O}_2} / (2\mu_{\text{Al}}),$$

где μ_{O_2} – молекулярный вес O_2 .

Расход кислорода на выходе катода Al_2O_3

$$G_{\text{вых.к}}^{\text{O}_2} = G_{\text{вх.к}}^{\text{O}_2} - G_{\text{к-а}}^{\text{O}_2},$$

где $G_{\text{вх.к}}^{\text{O}_2}$ – расход кислорода на входе катода.

Расход азота на выходе катода равен его расходу на входе:

$$G_{\text{вх.к}}^{\text{N}_2} = G_{\text{вых.к}}^{\text{N}_2}.$$

Математическая модель подсистемы получения жидкого алюминия. Модель предназначена для определения количества тепла, которое должно быть отведено от азотно-кислородной смеси, выходящей с катода ТЭ для нагрева твёрдого алюминия до температуры плавления и последующего его расплавления. Находится температура газовой смеси после отвода от нее тепла и расход смеси, необходимый для нагрева и расплавления алюминия.

Тепло, необходимое для нагрева и расплавления алюминия, определяется из выражения

$$Q_{\text{НП}} = G^{\text{Al}} (r_{\text{Al}}^{\text{пл}} + c_{\text{Al}} (t_{\text{Al}}^{\text{пл}} - t_{\text{Al}}^{\text{вх}})),$$

где $r_{\text{Al}}^{\text{пл}}$ – теплота плавления алюминия; c_{Al} – весовая теплоемкость твёрдого алюминия; $t_{\text{Al}}^{\text{пл}}$ – температура плавления алюминия; $t_{\text{Al}}^{\text{вх}}$ – температура, с которой твёрдый алюминий поступает в установку.

Расход газовой смеси определяется из условия, чтобы температура газа на выходе из зоны плавления алюминия была на заданную величину (принятую равной 30°C) выше температуры плавления алюминия:

$$G_{\text{акс}} = \frac{G^{\text{Al}} r_{\text{Al}}^{\text{пл}}}{c_{\text{акс}} [t_{\text{ак}}^{\text{выхТЭ}} - (t_{\text{Al}}^{\text{пл}} + 30)]},$$

где $c_{\text{акс}}$ – удельная весовая теплоёмкость азотно-кислородной смеси.

Температура азотно-кислородной смеси после подсистемы получения жидкого алюминия

$$t_{\text{ак}}^{\text{вых}} = t_{\text{ак}}^{\text{выхТЭ}} - \frac{Q_{\text{НП}}}{G_{\text{акс}} C_{\text{акс}}},$$

где $t_{\text{ак}}^{\text{выхТЭ}}$ – температура азотно-кислородной смеси на входе в подсистему получения жидкого алюминия или на выходе топливных элементов.

Математическая модель реактора для получения водорода из алюминия. Расчёты термодинамического равновесия для реакции получения водорода из алюминия



показали, что данная реакция идёт в сторону получения H_2 и Al_2O_3 практически вплоть до исчерпания одного из исходных веществ этой реакции. Это позволяет построить математическую модель реактора на основе стехиометрических балансовых соотношений, а также уравнений энергетического баланса. Исходя из этого, в модель были включены нижеследующие зависимости.

Тепловая энергия, требующаяся на расплавление алюминия и нагрев его до температуры реакции

$$Q_{\text{Al}} = [(t_{\text{пл}} - t_{\text{вх}})N_T + (t_R - t_{\text{пл}})N_{\text{ж}} + Q_{\text{пл}}]G_{\text{Al}},$$

где $t_{\text{пл}}$ – температура плавления алюминия; $t_{\text{вх}}$ – температура твёрдого алюминия на входе в установку; t_R – температура реакции; C_T , $C_{\text{ж}}$ – весовая теплоёмкость твёрдого и жидкого алюминия; $Q_{\text{пл}}$ – теплота плавления алюминия; G_{Al} – расход алюминия.

Стехиометрически необходимый расход воды:

$$G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{S}} = G_{\text{Al}} \left(\frac{\mu_{\text{O}_3}^{\text{Al}_2\text{O}_3}}{\mu_{\text{Al}_2}^{\text{Al}_2\text{O}_3}} \right) \left(\frac{\mu_{\text{H}_2\text{O}}}{\mu_{\text{O}_2}^{\text{H}_2\text{O}}} \right) = G_{\text{Al}} \left(\frac{48}{54} \right) \left(\frac{18}{16} \right) = G_{\text{Al}},$$

где $\mu_{\text{O}_3}^{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – суммарный атомарный вес атомов кислорода, входящих в молекулу; $\mu_{\text{Al}_2}^{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – суммарный атомарный вес атомов алюминия, входящих в молекулу; $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ – молекулярный вес воды; $\mu_{\text{O}_2}^{\text{H}_2\text{O}}$ – суммарный атомарный вес атомов кислорода, входящих в молекулу воды.

Тепловая энергия, идущая на нагрев водяного пара до температуры в реакторе

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{S}} (H_R - H_{\text{вх}}),$$

где H_R – энтальпия водяных паров при температуре реакции; $H_{\text{вх}}$ – энтальпия водяных паров на входе в реактор.

Расход водорода из реактора определяется как

$$G_{\text{H}_2} = G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{S}} \frac{\mu_{\text{H}_2}^{\text{H}_2\text{O}}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} = G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{S}} \left(\frac{2}{18} \right) = G_{\text{Al}} \left(\frac{2}{18} \right),$$

где $\mu_{\text{H}_2}^{\text{H}_2\text{O}}$ – суммарный атомарный вес водорода в молекуле воды.

Образование Al_2O_3 в реакторе

$$G_{\text{Al}_2\text{O}_3} = G_{\text{Al}} \left(\frac{\mu_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{\mu_{\text{Al}_2}^{\text{Al}_2\text{O}_3}} \right),$$

где $\mu_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – молекулярный вес Al_2O_3 .

Энергетический баланс реактора имеет вид

$$H_{\text{вых}}^{\text{n}} - H_{\text{вх}}^{\text{n}} = Q_{\text{Al}} + Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_W,$$

где Q_W – тепло, отводимое от реактора острым паром и паром промперегрева паротурбинного цикла; $H_{\text{вых}}^{\text{n}}$, $H_{\text{вх}}^{\text{n}}$ – полные энтальпии выходных продуктов реактора (H_2 и Al_2O_3) и входных продуктов (Al и H_2O) при температуре реакции.

Тепло, отводимое паром паротурбинного цикла, определяется из выражения

$$Q_W = G^{\circ} (i^{\circ} - i^{\text{пв}}) + G^{\text{пв}} (i_{\text{вых}}^{\text{пв}} - i_{\text{вх}}^{\text{пв}}),$$

где G° – расход острого пара; $G^{\text{пв}}$ – расход пара промежуточного перегрева; i° – энтальпия острого пара; $i^{\text{пв}}$ – энтальпия питательной воды; $i_{\text{вых}}^{\text{пв}}$, $i_{\text{вх}}^{\text{пв}}$ – выходная (из реактора) и входная (в реактор) энтальпии пара промперегрева.

Площади теплообменных поверхностей внутри реактора определяются на основе уравнений теплопередачи. Причём расчёты проводятся по отдельности для экономайзерной, испарительной и перегревательной зон (для острого пара) и перегревательной зоны для пара промперегрева.

Для реактора, не имеющего встроенных поверхностей нагрева, из выражения энергетического баланса исключается Q_W , а при определении $H_{\text{вых}}^{\text{n}}$, $H_{\text{вх}}^{\text{n}}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}}$ учитывается дополнительный (сверхстехиометрически необходимый) расход воды.

Математические модели газовой турбины, воздушного компрессора, камеры сгорания газовой турбины, отсеков паровой турбины, котла утилизатора, водовоздушного охладителя, деаэрата, газовоздушного теплообменника и т. д. представлены в [20].

Результаты оптимизационных исследований энергетических установок, использующих алюминий в качестве топлива

Оптимизация проводилась в два этапа, в соответствии с изложенной в [21] методикой. На первом этапе максимизировался КПД установки, на втором – минимизировались удельные капиталовложения в установку при полученном максимальном КПД. Целесообразность такого подхода обусловлена тем, что цена алюминиевого топлива вторичных ТЭС весьма высока и в этих условиях технические решения, обеспечивающие максимальную энергетическую эффективность, будут обеспечивать и максимальную экономическую эффективность.

В состав оптимизируемых параметров входили: для ГТУ с АлТЭ – расход воздуха на входе катода, концевой температурный напор на входе газа в регенеративный воздухоподогреватель, массовая скорость воды в воздухоохладителе, температурный напор в теплообменнике для нагрева и плавления алюминия; для ПГУ с ВТЭ – расход газа на входе катода, температура газа на входе анода, концевой температурный напор и давление газа на входе в

воздухоподогреватель, давление воздуха на выходе из компрессоров, расход, энтальпия и давление перегретого пара, давление и энтальпия пара промпрегрева, давление пара на выходе из отсеков паровой турбины; для ГТУ-КУ – температура и давление в реакторе и температура газовой смеси на входе в газовую турбину, энтальпия пара на выходе из КУ, расход воды на входе в КУ. Учитывались ограничения на механическое напряжение и температуру металла труб теплообменников, температуру газа на выходе из топливного элемента и др.

Таблица 1. Исходная технико-экономическая информация

Table 1. The initial technical and economic data

Показатель, размерность Index and units	Значение Value
Температура твёрдого алюминия на входе в установку, °С Temperature of solid aluminum at installation inlet, °C	30
Внутренний относительный КПД топливного элемента, % Internal relative efficiency of fuel cell (FC), %	75
Стоимость алюминия, долл./т Cost of aluminum, dol./t	1500
Удельная стоимость металла труб теплообменников из перлитной стали, тыс. долл./т Specific cost of tube metal for heat exchangers made of perlitic steel, thous. dol./t	31
Удельная стоимость металла труб теплообменников из аустенитной стали, тыс. долл./т Specific cost of tube metal for heat exchangers made of austenitic steel, thous. dol./t	54
Удельная стоимость воздушных компрессоров, долл./кВт Specific cost of air compressors, dol./kW	45
Удельная стоимость газовой турбины, долл./кВт Specific cost of gas turbine, dol./kW	60
Удельная стоимость систем технического водоснабжения, тыс. долл./МВт Specific cost of systems for service water supply, thous. dol./MW	35
Доля затрат на монтаж оборудования от его изготовления, % Share of costs for equipment installation in its manufacturing, %	15
Доля стоимости неучтенного оборудования, % Share of cost of unaccounted equipment, %	20
Удельная стоимость электрооборудования собственных нужд, долл./кВт Specific cost of equipment for auxiliary power supply, dol./kW	20
Стоимость строительной части ГТУ мощностью 400 МВт, тыс. долл. Cost of construction of 400 MW GTI, thous. dol.	69400
Удельная стоимость систем, зависящих от расхода топлива, тыс. долл./ (т/ч) Specific cost of systems depending on fuel consumption, thous. dol./ (t/h)	100
Удельная стоимость систем, зависящих от электрической мощности, тыс. долл./МВт Specific cost of systems depending on electric power, thous. dol./MW	192

Оптимизационные технико-экономические исследования трёх указанных типов установок на алюминии проводились при его одинаковом расходе, равном 25 кг/с. Исходная технико-экономическая информация, использованная при оптимизационных расчётах, представлена в табл. 1. Основные результаты исследований представлены в табл. 2–4.

Таблица 2. Основные результаты оптимизационных расчётов ГТУ с АлТЭ

Table 2. Main results of optimization calculations of GTI with aluminum fuel cell (AIFC)

Показатель, размерность Index and units	Значение Value
Температура газа на выходе с катода ТЭ, °С Gas temperature at the outlet of FC cathode, °C	969,1
Температура газа на входе, °С Gas temperature at the inlet, °C	
в ГТ1/to GT1	697,7
в ГТ2/to GT2	969,1
в воздухоподогреватель/to air heater	404,6
Температура газа на выходе из воздухоподогревателя, °С Gas temperature at the air heater outlet, °C	279,0
Расход воздуха на входе в ТЭ, кг/с Air flow rate at the FC inlet, kg/s	724,0
Давление воздуха на входе в ТЭ, МПа Air pressure at the FC inlet, MPa	0,71
Температура воздуха, °С Air temperature, °C	
на выходе из компрессора первой ступени (KB1) at the outlet of compressor of stage 1 (AC1)	154,2
на выходе из воздухоохладителя at the air cooler outlet	30,0
выходе из компрессора второй ступени (KB2) at the outlet of compressor of stage 2 (AC2)	130,0
Расход газа через ГТ1, кг/с Gas flow rate through GT1, kg/s	669,7
Расход газа через ГТ2, кг/с Gas flow rate through GT2, kg/s	34,2
Мощность, МВт: Capacity, MW:	
ТЭ/FC	392,5
ГТ1/GT1	221,0
ГТ2/GT2	14,5
KB1/AC1	75,5
KB2/AC2	94,2
Площадь поверхности нагрева, м ² : Heating surface area, m ² :	
воздухоподогревателя/air heater	15390,0
воздухоохладителя/air cooler	1790,0
Полезная мощность установки, МВт Useful capacity of installation, MW	457,5
Удельные капиталовложения в установку, долл./кВт, при удельной стоимости изготовления топливных элементов: Specific investments in installation, dol./kW at the specific cost of fuel cell production:	
500 долл./кВт (dol./kW)	1225,0
1000 долл./кВт (dol./kW)	1810,0
КПД нетто установки, % Net efficiency of installation, %	65,0

Таблица 3. Основные результаты оптимизационных расчётов схемы ПГУ с ВТЭ

Table 3. Main results of optimization calculations of CCI with HFC

Показатель, размерность Index and units	Значение Value
Расход водорода на входе в ТЭ, кг/с Hydrogen flow rate at the FC inlet, kg/s	2,75
Расход острого пара на входе в реактор, кг/с Live steam flow rate at the reactor inlet, kg/s	160,5
Расход пара промперегрева на входе в реактор, кг/с Steam flow rate of reheat at the reactor inlet, kg/s	96,8
Расход водяного пара на входе в реактор, кг/с Flow rate of water steam at the reactor inlet, kg/s	24,75
Давление газа перед газовой турбиной, МПа Gas pressure before the gas turbine, MPa	1,54
Температура воздуха на входе в ТЭ, °С Air temperature at the FC inlet, °C	689,0
Температура острого пара, °С Live steam temperature, °C	575,0
Температура пара промперегрева, °С Reheat steam temperature, °C	540,0
Давление острого пара, МПа Live steam pressure, MPa	18,5
Давление пара промперегрева, МПа Reheat steam pressure, MPa	2,02
Расход воздуха на входе в ТЭ, кг/с Air flow rate at the FC inlet, kg/s	207,0
Вес труб воздухоподогревателя, т Weight of air heater tubes, t	296,0
Температура газа на входе в газовую турбину, °С Gas temperature at the gas turbine inlet, °C	1300,0
Температура газа на выходе из воздухоподогревателя, °С Gas temperature at the air heater outlet, °C	273,2
Мощность топливного элемента, МВт Fuel cell capacity, MW	158,8
Мощность паровой турбины, МВт Steam turbine capacity, MW	183,1
Мощность газовой турбины, МВт Gas turbine capacity, MW	157,0
Мощность воздушных компрессоров, МВт Air compressor capacity, MW	72,3
Мощность насосов паротурбинной установки, МВт Capacity of steam-turbine installation pumps, MW	3,8
Полезная мощность установки, МВт Useful capacity of installation, MW	422,7
Удельные капиталовложения в установку, долл./кВт, при удельной стоимости изготовления топливных элементов: Specific investments in installation, dol./kW at the specific cost of fuel cell production:	
500 долл./кВт (dol./kW)	924,4
1000 долл./кВт (dol./kW)	1271,5
КПД нетто установки, % Net efficiency of installation, %	53,1

Заключение

Как отмечалось, основной целью настоящей работы являлись технико-экономические исследования энергетических установок по получению элект

Таблица 4. Основные результаты оптимизационных расчётов схемы ГТУ с КУ

Table 4. Main results of optimization calculations of gas turbine installation on hydrogen with the waste heat boiler

Показатель, размерность Index and units	Значение Value
Температура газа на входе в газовую турбину, °С Gas temperature at the gas turbine inlet, °C	1500,0
Температура водорода на входе в камеру сгорания, °С Hydrogen temperature at the combustion chamber inlet, °C	1226,0
Давление газа на входе в газовую турбину, МПа Gas pressure at the gas turbine inlet, MPa	3,92
Давление водорода на входе в камеру сгорания, МПа Hydrogen pressure at the combustion chamber inlet, MPa	3,99
Давление пара на входе в реактор, МПа Steam pressure at the reactor inlet, MPa	3,99
Температура пара на входе в реактор, °С Steam temperature at the reactor inlet, °C	249,1
Температура уходящих газов, °С Temperature of exhaust gases, °C	100,0
Расход пара на входе в реактор, кг/с Steam flow rate at the reactor inlet, kg/s	151,2
Температура воздуха на входе в камеру сгорания, °С Air temperature at the combustion chamber inlet, °C	621,0
Расход воздуха на входе в камеру сгорания, кг/с Air flow rate at the combustion chamber inlet, kg/s	227,4
Мощность газовой турбины, МВт Gas turbine capacity, MW	460,0
Полезная мощность установки, МВт Useful capacity of installation, MW	311,8
Удельные капиталовложения в установку, долл./кВт Specific investments in installation, dol./kW	670,0
КПД установки, % Installation efficiency, %	39,2

троэнергии на базе алюминиевого топлива как наименее изученных элементов включающих их энергетических систем. В соответствии с этим разработаны технологические схемы ГТУ с АлТЭ, ПГУ с ВТЭ и ГТУ с КУ. Построены математические модели алюминиевого высокотемпературного топливного элемента, подсистемы получения жидкого алюминия, реактора для получения водорода из алюминия, установок в целом. Проведены оптимизационные технико-экономические исследования ГТУ с АлТЭ, ПГУ с ВТЭ и ГТУ с КУ с использованием разработанных математических моделей. В результате получены основные технико-экономические показатели рассматриваемых энергоустановок на основе алюминиевого топлива.

Как видно из представленных результатов расчётов (табл. 2), энергоустановка с алюминиевыми топливными элементами может обеспечить весьма высокий КПД нетто (65 %) при простой технологической схеме. В то же время получение приемлемого уровня удельных капиталовложений возможно лишь в случае достаточно низкой удельной стоимости собственно топливных элементов, работающих на алюминии (500 долл./кВт).

КПД ПГУ с ВТЭ (табл. 3) меньше КПД ГТУ с АлТЭ почти на 12 %, но в то же время удельные капиталовложения ниже в среднем на

300–600 долл./кВт в зависимости от стоимости топливного элемента. В схеме ГТУ с ВТЭ (табл. 4) обеспечиваются относительно низкие капиталовложения, но недостаточно высокий КПД нетто.

Таким образом, разработаны технико-экономические основы для дальнейших исследований энергетических систем, использующих в качестве энергоносителя алюминий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rifkin J. The Hydrogen Economy: the Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth. – New York: Penguin Group, 2003. – 285 p.
2. Kundu P.P., Dutta K. Hydrogen fuel cells for portable applications // Compendium of Hydrogen Energy. – 2016. – № 4. – P. 111–131.
3. Hydrogen production from catalytic steam reforming of benzene as tar model compound of biomass gasification / Ningbo Gao, Xiaowang Wang, Aimin Li, Chunfei Wu, Zhifan Yin // Fuel Processing Technology. – 2016. – № 148. – P. 380–387.
4. Hydrogen: the future energy carrier / A. Zuttel, A. Remhof, A. Borgschulte, O. Friedrichs // Philosophical Transaction of the Royal Society A. – 2010. – V. 368 (1923). – P. 3329–3342.
5. LeValley T.L., Richard A.R., Maohong Fan. Development of catalysts for hydrogen production through the integration of steam reforming of methane and high temperature water gas shift // Energy. – 2015. – № 90. – P. 748–758.
6. Stiegel G.J., Ramezan M. Hydrogen from coal gasification: an economical pathway to a sustainable energy future // International Journal of Coal Geology. – 2011. – № 65. – P. 173–190.
7. Godula-Jopek A., Westenberger A. Hydrogen-fueled aeroplanes // Compendium of Hydrogen Energy. – 2016. – № 4. – P. 67–85.
8. Hill P., Penev M. Hydrogen Fueling Station in Honolulu, Hawaii Feasibility Analysis // Idaho National Laboratory Idaho Falls, Idaho 83415. – 2014. URL: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/08/f18/fcto_h2_fueling_station_honolulu_feasibility_analysis.pdf (дата обращения: 10.09.2015).
9. Decourt B., Debarre R., Soupa O. Making the Case for Hydrogen-Based Energy Storage // Energy Perspectives. – 2013. – V. 3. – P. 18–25.
10. Hydrogen storage in rippled graphene: perspectives from multi-scale simulations / V. Camiola, R. Farchioni, T. Cavallucci, A. Rossi, V. Pellegrini, V. Tozzini // Front. Mater. – 2015. DOI: 10.3389/fmats.2015.00003.
11. Applied hydrogen storage research and development: a perspective from the U.S. Department of Energy / K. OrMalley, G. Ordaz, J. Adams, K. Randolph, Ch.C. Ahn, N.T. Stetson // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – № 645. – P. S419–S422.
12. Marino C., Nucara A., Pietrafesa M. Electrolytic Hydrogen Production from Renewable Source, Storage and Reconversion in Fuel Cells: the System of the «Mediterranea» University of Reggio Calabria // Energy Procedia. – 2015. – № 78. – P. 818–823.
13. Yang S., Knickle H. Design and Analysis of Aluminum/Air battery system for electrical vehicles // Journal of power sources. – 2002. – V. 112. – P. 162–173.
14. Экспериментальная когенерационная энергетическая установка на основе гидротермального окисления алюминия / М.С. Влашкин, Е.И. Школьников, А.В. Берш, А.З. Жук, А.В. Лисицын, А.И. Сороковиков, Ю.В. Панкина // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2011. – № 6. – С. 31–45.
15. О возможности практического использования реакции окисления дисперсного алюминия жидкой водой / М.Н. Ларичев, О.О. Ларичева, Н.С. Шайтура, Е.И. Школьников // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2012. – № 3. – С. 66–79.
16. Qingfeng Li, Niels J. Bjerrum. Aluminum as anode for energy storage and conversion: a review // Journal of Power Sources. – 2002. – V. 110. – P. 1–10.
17. Hydrogen Generation by Treatment of Aluminium Metal with Aqueous Solutions: Procedures and Uses / J. Olivares-Ramirez, A. Marroquin de Jesús, O. Jiménez-Sandoval, R. Pless // Hydrogen Energy – Challenges and Perspectives / Ed. by prof. Dragica Minic. InTech, 2012. – P. 56–76. URL: <http://www.intechopen.com/books/hydrogen-energy-challenges-and-perspectives/hydrogen-generation-by-treatment-of-aluminium-metal-with-aqueous-solutions-procedures-and-uses> (дата обращения: 01.06.2016).
18. Micro-fuel cells – current development and applications / A. Kundu, J.H. Jang, J.H. Gil, C.R. Jung, H.R. Lee, S.H. Kim, Y.S. Oh // Journal of Power Sources. – 2007. – № 170 (1). – P. 67–78.
19. Математическое моделирование и оптимизация в задачах оперативного управления тепловыми электростанциями / А.М. Клер, Н.П. Деканова, С.К. Скрипкин и др. – Новосибирск: Наука, Сиб. предприятие РАН, 1997. – 120 с.
20. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. Mathematical modeling and optimization of large thermal power installations // Proceedings of the ASME-ATI-UIT 2010 Conference Thermal and Environmental Issues in Energy Systems. – Sorrento, Italy: Hilton Sorrento Palace, 2010. – P. 391–394.
21. Клер А.М., Потанина Ю.М. Технико-экономические оптимизационные исследования перспективных теплоэнергетических установок // Перспективы энергетики. – 2002. – № 4. – С. 385–398.

Поступила 06.06.2016 г.

Информация об авторах

Клер А.М., доктор технических наук, профессор, заведующий отделом теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Тюрин Э.А., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Потанина Ю.М., кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Медников А.С., кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 620.93:621.354

PERSPECTIVE POWER PLANTS ON ALUMINIUM FUEL

Aleksandr M. Kler¹,
kler@isem.irk.ru

Elina A. Tyurina¹,
tyurina@isem.irk.ru

Yulia M. Potanina¹,
julia@isem.irk.ru

Aleksandr S. Mednikov¹,
mednikov@isem.irk.ru

¹ Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russia.

The relevance of the discussed problem is caused by use of aluminum as an intermediate source of energy to produce hydrogen, because aluminum is safe to use, transport and storage cost of aluminum is relatively low, and further use of the produced hydrogen is characterized by ecologically clean products of combustion.

The main aim of the study is to determine energy efficiency characteristics of the main constructional elements, investment in installations depending on their thermodynamic parameters and working medium flows.

The methods used in the study. The studies of thermal power plants using aluminum as fuel are characterized by a variety of physical and chemical processes, the uncertainty of economic information, etc., therefore, the authors propose the mathematical modeling of these systems using the software package SMPP PC as a method of study and optimization feasibility researches by models. The parameters were optimized in two stages: the first stage is maximization of the plant efficiency, and the second stage is minimization of specific capital investment in the installation when the efficiency is maximum.

The results. The authors developed the technological schemes of gas-turbine installation with an aluminum fuel element, steam-gas installation with a hydrogen fuel element, hydrogen gas-turbine installation with exhaust heat boiler. The mathematical models of elements and installations in general based on technological schemes were constructed. Optimizing technical and economic researches on these models were carried out. Energy installations with aluminum fuel cells can provide very high net efficiency – 65 %. Energy efficiency of the combined-cycle installation with the hydrogen-air fuel cell is about 12 % less than the efficiency of a gas turbine installation with aluminum fuel cells, but at the same time in this case the capital investments are lower. Gas turbine installation on hydrogen with the waste heat boiler has relatively low capital investments, but not high enough level of net efficiency.

Key words:

Aluminum, hydrogen, gas turbine installation, combined-cycle installation, fuel cell.

REFERENCES

- Rifkin, J. *The Hydrogen Economy: the Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth*. New York, Penguin Group, 2003. 285 p.
- Kundu P.P., Dutta K. Hydrogen fuel cells for portable applications. *Compendium of Hydrogen Energy*, 2016, no. 4, pp. 111–131.
- Ningbo Gao, Xiao Wang, Aimin Li, Chunfei Wu, Zhifan Yin. Hydrogen production from catalytic steam reforming of benzene as tar model compound of biomass gasification. *Fuel Processing Technology*, 2016, no. 148, pp. 380–387.
- Zuttel A., Remhof A., Borgschulte A., Friedrichs O. Hydrogen: the future energy carrier. *Philosophical Transaction of the Royal Society A*, 2010, no. 368 (1923), pp. 3329–3342.
- LeValley T.L., Richard A.R., Maohong Fan. Development of catalysts for hydrogen production through the integration of steam reforming of methane and high temperature water gas shift. *Energy*, 2015, no. 90, pp. 748–758.
- Stiegel G.J., Ramezan M. Hydrogen from coal gasification: an economical pathway to a sustainable energy future. *International Journal of Coal Geology*, 2011, no. 65, pp. 173–190.
- Godula-Jopek A., Westenberger A. Hydrogen-fueled aeroplanes. *Compendium of Hydrogen Energy*, 2016, no. 4, pp. 67–85.
- Hill P., Penev M. *Hydrogen Fueling Station in Honolulu, Hawaii Feasibility Analysis*. Idaho National Laboratory Idaho Falls, Idaho 83415. 2014. Available at: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/08/f18/fcto_h2_fueling_station_honolulu_feasibility_analysis.pdf (accessed 10 September 2015).
- Decourt B., Debarre R., Soupa O. Making the Case for Hydrogen-Based Energy Storage. *Energy Perspectives*, 2013, vol. 3, pp. 18–25.
- Camiola V., Farchioni R., Cavallucci T., Rossi A., Pellegrini V., Tozzini V. Hydrogen storage in rippled graphene: perspectives from multi-scale simulations. *Front. Mater.*, 2015. DOI: 10.3389/fmats.2015.00003.
- OrMalley K., Ordaz G., Adams J., Randolph K., Ahn Ch.C., Stetson N.T. Applied hydrogen storage research and development: a perspective from the U.S. Department of Energy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, no. 645, pp. S419–S422.
- Marino C., Nucara A., Pietrafesa M. Electrolytic Hydrogen Production from Renewable Source, Storage and Reconversion in Fuel Cells: the System of the «Mediterranea» University of Reggio Calabria. *Energy Procedia*, 2015, no. 78, pp. 818–823.
- Yang S., Knickle H. Design and Analysis of Aluminum/Air battery system for electrical vehicles. *Journal of power sources*, 2002, vol. 112, pp. 162–173.

14. Vlaskin M.S., Shkolnikov E.I., Bersh A.V., Zhuk A.Z., Lisitsyn A.V., Sorokovikov A.I., Pankina Yu.V. Experimental cogeneration power plant based on hydrothermal oxidation of aluminum. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2011, no. 6, pp. 31–45. In Rus.
15. Larichev M.N., Laricheva O.O., Shaytura N.S., Shkolnikova E.I. On opportunity of practical use of particulate aluminum liquid water oxidation. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2012, no. 3, pp. 66–79. In Rus.
16. Qingfeng Li, Niels J. Bjerrum. Aluminum as anode for energy storage and conversion: a review. *Journal of Power Sources*, 2002, vol. 110, pp. 1–10.
17. *Hydrogen Generation by Treatment of Aluminium Metal with Aqueous Solutions: Procedures and Uses* / J. Olivares-Ramirez, A. Marroquín de Jesús, O. Jiménez-Sandoval, R. Pless // *Hydrogen Energy – Challenges and Perspectives* / Ed. by prof. Dragica Minic. InTech, 2012. – P. 56–76. Available at: <http://www.intechopen.com/books/hydrogen-energy-challenges-and-perspectives/hydrogen-generation-by-treatment-of-aluminium-metal-with-aqueous-solutions-procedures-and-uses> (accessed 01 June 2016).
18. Kundu A., Jang, J.H., Gil J.H., Jung C.R., Lee H.R., Kim S.H., Oh Y.S. Micro-fuel cells-current development and applications. *Journal of Power Sources*, 2007, no. 170 (1), pp. 67–78.
19. Kler A.M., Dekanova N.P., Skripkin S.K. *Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya v zadachakh operativnogo upravleniya teplovymi elektrostantsiyami* [Mathematical simulation and optimization in problems of real-time control of thermal power plants]. Novosibirsk, Nauka, Sib. predpriyatiye RAN, 1997. 120 p.
20. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. Mathematical modeling and optimization of large thermal power installations. *Proc. of the ASME-ATI-UIT 2010 Conference Thermal and Environmental Issues in Energy Systems*. Sorrento, Italy, Hilton Sorrento Palace, 2010. pp. 391–394.
21. Kler A.M., Potanina Yu.M. Tekhniko-ekonomicheskiye optimizatsionnyye issledovaniya perspektivnykh teploenergeticheskikh ustanovok [Technical and economic studies on optimization of perspective fossil thermal power plants]. *Perspektivy energetiki*, 2002, no. 4, pp. 385–398.

Received: 6 June 2016.

Information about the authors

Aleksandr M. Kler, Dr. Sc., professor, head of the department, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Elina A. Tyurina, Dr. Sc., leading researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Yulia M. Potanina, Cand. Sc., senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Aleksandr S. Mednikov, Cand. Sc., senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.