

УДК 62-61; 662.61

ГОРЕНИЕ СМЕСИ МЕТАН-КИСЛОРОД В СРЕДЕ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Прибатурин Николай Алексеевич,

доктор технических наук, главный научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1. E-mail: pribaturin@itp.nsc.ru

Мильман Олег Ошеревич,

доктор технических наук, директор по науке ЗАО «Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон»», Россия, 248010, г. Калуга, ул. Комсомольская Роща, 43. E-mail: turbocon@kaluga.ru

Богомолов Александр Романович,

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1. E-mail: barom@kuzstu.ru

Шевырев Сергей Александрович,

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теплоэнергетики Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. E-mail: ssa.pmahp@kuzstu.ru

Азиханов Сергей Сейфудинович,

кандидат технических наук, доцент кафедры энергоресурсосберегающих процессов в химической и нефтегазовой технологиях Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. E-mail: azihanov@rambler.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания высокоэффективных энергоблоков по одному из направлений, предусматривающему разработку конструкции пароперегревателя и технологии перегрева водяного пара до температур выше 800 °С сверхкритического давления перед непосредственным вводом пара в турбоустановку.

Цель работы. Исследование влияния соотношения расходных энтальпийных характеристик горючей смеси ($\text{CH}_4 + \text{O}_2$) по составу, близкому к стехиометрии, и слабо перегретого водяного пара атмосферного давления на температуру реагирующих сред (продуктов сгорания в среде водяного пара), а также на качественный и количественный состав парогазовой смеси в диапазоне расходных характеристик стабильного и устойчивого горения.

Методы исследования. В работе используются отработанные методики измерений всех параметров процесса в автоматизированном режиме сбора и обработки первичной информации: температуры, давления, расхода, состава газовой конденсированной фазы. Применяется проточный метод измерения концентрации продуктовых компонентов в режиме реального времени с погрешностью $\pm 5\%$.

Результаты. Выявлено, что с повышением численного значения отношения горючей смеси к спутно подаваемому водяному пару происходит постепенное повышение роли реакции неполного окисления метана. Также имеется область, где будет происходить доминирующее влияние реакции полного окисления метана при незначительной паровой конверсии метана. Это обстоятельство может свидетельствовать об уменьшении доли водорода в продуктах горения на выходе из пароперегревателя (камеры сгорания). Термодинамический анализ горения метана и кислорода в среде водяного пара необходимо проводить с учетом возможного влияния процесса паровой конверсии метана в широком интервале температур, но в большей степени при температуре более 700 °С. Паровая конверсия метана имеет место не только в непосредственной области смешения водяного пара на границе поверхности факела с продуктами сгорания, но и за фронтом пламени в объеме камеры сгорания.

Ключевые слова:

Метан-кислородная смесь, горение, водяной пар, паровая конверсия метана, теплоэлектростанция.

Введение

Современные теплоэлектростанции (ТЭС), работающие при сверхкритических и ультрасверхкритических параметрах пара, являются одним из наиболее перспективных направлений исследования, проектирования и строительства в области энерге-

тического оборудования [1]. Это связано с тем, что такие ТЭС позволят существенно повысить КПД выработки электроэнергии, а вместе с этим и существенно сократить загрязнение окружающей среды. В Евросоюзе планируется внедрить пылеугольные энергоблоки с КПД около 50 % [2, 3].

Повышение энергоэффективности и снижение экологической напряженности при выработке тепловой и электрической энергии можно обеспечить за счет водородного топлива [4–6], но высокая стоимость водорода и кислорода не позволяет достичь высоких экономических показателей при генерации электроэнергии с использованием не только паротурбинных, но и парогазовых установок на водородном топливе. Предложена технология производства электроэнергии [7, 8], когда сжигание дорогого водорода в среде водяного пара производят только для перегрева водяного пара после его генерации в традиционных котлах. Это позволяет повысить температуру пара на входе в турбину с 550 до 1700 °С. При этом образуется только водяной пар и сохраняются все преимущества конденсационного цикла. Анализ характеристик экологически чистого производства электроэнергии показал, что при использовании электроэнергии, производимой на гидроэлектростанции, с учетом затрат на получение жидкого водорода, его безопасного хранения и транспортировки до электростанции, электрический КПД последней не превысит 0,37, хотя благодаря совокупности технических решений обеспечивается высокоэффективное использование располагаемого теплоперепада [8].

Можно использовать дешевое газообразное топливо, при сжигании которого осуществляется высокотемпературный перегрев водяного пара, выходящего из котлов угольной генерации, при одновременном снижении вредных выбросов или подержании на прежнем уровне экологической обстановки. Поскольку природный газ в основном состоит из метана (более 98 %), то при его сжигании практически не образуются побочные продукты или их получается намного меньше, чем в случае с другими видами ископаемого топлива [9].

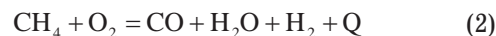
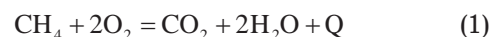
Технологии перегрева водяного пара при непосредственном использовании продуктов сгорания метан-кислородной смеси в последнее время развиваются достаточно активно [10].

В создании высокоэффективных энергоблоков можно выделить два направления:

- 1) разработка конструкционных материалов паровых котлов и турбин, выдерживающих давление до 37,5 МПа и температуру до 800 °С и выше [11];
- 2) технология перегрева пара до требуемых параметров вне паровых котлов.

Первое направление в настоящее время достаточно успешно развивается, при этом уже существуют материалы, позволяющие выдерживать требуемые параметры при высокой надежности работы энергоустановок. В настоящее время стоимость этих материалов высока.

Второе направление также развивается достаточно активно. Одним из перспективных направлений в технологиях перегрева водяного пара можно считать способ перегрева пара продуктами сгорания горючей смеси $\text{CH}_4 + \text{O}_2$:



Кроме перечисленных основных реакций в вышеуказанных условиях этого процесса H_2O может вступать во взаимодействие с образующимся CO (паровая конверсия CO) [12]. При анализе литературных данных было установлено, что в основном работы проводятся при использовании смеси метан-воздух в присутствии микрокапель воды и тумана [13]. В литературе представлены работы по исследованию пламен при сжигании метан-кислородной смеси в среде водяного пара [14], при этом отсутствуют работы по сжиганию метан-кислородной смеси в среде слабо перегретого водяного пара с исследованием компонентных и количественных характеристик продуктов недожога.

Экспериментальные и теоретические исследования, например [15–18], говорят о сложности протекающих при этом химических и диффузионных процессов, что не позволяет пока создать отчетливых представлений об истинном кинетическом механизме протекания реакций. Механизм вырожденного разветвления элементарных реакций окисления метана нельзя считать установленным однозначно, так как он не в состоянии объяснить все многообразие наблюдавшихся фактов высокотемпературного окисления метана [19].

Экспериментальные исследования

Задача исследования – отработка устойчивого режима горения метан-кислородной смеси в водяном паре атмосферного давления и температурой до 150 °С.

Экспериментальные исследования по горению горючей смеси были проведены в камере сгорания (пароперегревателе), конструкция которой представлена на рис. 1. Камера сгорания выполнена из нержавеющей стали, внутри которой в спутном потоке движутся перегретый водяной пар и продукты сгорания метан-кислородной смеси, состав которой близок к стехиометрическому.

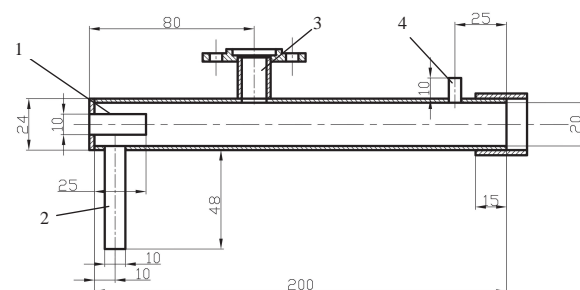


Рис. 1. Пароперегреватель: 1 – штуцер для ввода горючей смеси; 2 – штуцер для ввода низкоэнтальпийного перегретого водяного пара; 3 – смотровое окно; 4 – штуцер для ввода термопары

Fig. 1. Steam superheater: 1 – combustible mixture inlet fitting; 2 – low enthalpy superheated steam inlet fitting; 3 – observation window; 4 – thermocouple inlet fitting

Горючая смесь в пароперегревателе подавалась через штуцер 1 с помощью специального горелочного устройства, имеющего форсунку с диаметром выходного отверстия 1,5 мм. Водяной пар в пароперегревателе поступал перпендикулярно штуцеру для ввода горючей смеси через штуцер 2. Такая конструкция позволяет охлаждать форсунку и обеспечивать стабильное горение. В пароперегревателе было предусмотрено смотровое окно, позволяющее визуально контролировать наличие горения метан-кислородной смеси в потоке перегретого водяного пара атмосферного давления. Контроль температуры парогазовой смеси на выходе из пароперегревателя осуществлялся хромель-алюмелевой термопарой (диапазон измеряемых температур – до 1273 К, погрешность измерения – не более 3 К). Схема экспериментальной установки приведена в [20].

В ходе проведения экспериментальных исследований контролировались и регистрировались следующие параметры:

- 1) температура низкотемпературного водяного пара с помощью хромель-копелевой термопары (диапазон измерений до 433 К, погрешность измерений не более 2,5 К);
- 2) давление метана и кислорода с помощью манометров (класс точности 2,5, предел измерения 0,6 и 2,5 МПа соответственно). В экспериментальных исследованиях избыточное давление в газовых магистралях для метана и кислорода поддерживалось в пределах 0,15–0,25 МПа;
- 3) температура метана и кислорода с помощью хромель-копелевой термопары (диапазон измерений до 433 К, погрешность измерений не более 2,5 К);
- 4) расход метана и кислорода с помощью газовых ротаметров типа РМ-02 (погрешность измерения не более 2,5 %, диапазон измерения 3,5 л/мин);
- 5) расход газовой смеси, образованной неконденсирующимися продуктами недожога горючей смеси, с помощью газового барабанного счетчика ГСБ-400 (предел измерения 0,02–0,06 м³/ч, относительная погрешность ±1 %) и перистальтического насоса Zalimp PP 1–05, подающего часть продуктов недожога горючей смеси в газоанализатор;
- 6) концентрация газовых компонентов СО, СН₄, О₂, СО₂, Н₂ (диапазон измерения 50, 5, 21, 100, 100 % соответственно, погрешность измерения не более 5 %).

Приведенные выше параметры регистрировались с помощью аналогово-цифровой системы сбора и обработки результатов, реализованной на базе SCADA-системы SimpLight, специализированной программы для обработки измерений концентрации газов поточного газоанализатора ТЕСТ-1 и вторичных приборов компании «ОВЕН». Опыты проведены при значении коэффициента избытка окислителя (О₂), близком к 1.

В результате сжигания горючей смеси в водяном паре образуется парогазовая смесь, которая, прохо-

дя через конденсатор-сепаратор, поступала в поточный газоанализатор. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице.

Таблица. Параметры экспериментальных данных
Table. Experimental data parameters

Параметр / Характерный образ эксперимента Parameter / Description of the experiment	Опыт 1 / Experiment 1	Опыт 2 / Experiment 2	Опыт 3 / Experiment 3	Опыт 4 / Experiment 4
Температура парогазовой смеси на выходе из пароперегревателя, °С Temperature of the gas-steam mixture at the output from the steam superheater	555	500	485	480
Температура низкотемпературного перегретого водяного пара, °С Temperature of low enthalpy superheated steam, °С	142	142	142	142
Концентрация СО ₂ в газовой смеси на входе в газоанализатор, % об. CO ₂ concentration in gas mixture at the input in the gas analyzer, % vol.	47	60	75	54
Концентрация СО в газовой смеси на входе в газоанализатор, % об. CO concentration in gas mixture at the input in the gas analyzer, % vol.	10	6,7	2	8
Концентрация СН ₄ в газовой смеси на входе в газоанализатор, % об. CH ₄ concentration in gas mixture at the input in the gas analyzer, % vol.	0	0	0	0
Концентрация О ₂ в газовой смеси на входе в газоанализатор, % об. O ₂ concentration in gas mixture at the input in the gas analyzer, % vol.	0,7	0,3	1	0,2
Концентрация Н ₂ в газовой смеси на входе в газоанализатор, % об. H ₂ concentration in gas mixture at the input in the gas analyzer, % vol.	38	23	20	25
Коэффициент избытка окислителя (О ₂), α Excess oxidant ratio (O ₂), α	0,96	1,00	1,01	0,91

Зависимость состава газа от соотношения энтальпии газовой (горючей) смеси к энтальпии водяного пара представлена на рис. 2.

По результатам измерений установлено:

1. Полученные результаты свидетельствуют о постепенном повышении роли реакции (2) с повышением отношения $I_{g,s}/I_s$.
2. Существует область, где будет происходить доминирующее влияние реакции окисления метана (1) при незначительной паровой конверсии метана по реакции (3). Это уменьшит долю водорода в продуктах горения на выходе из пароперегревателя (камеры сгорания).
3. При термодинамическом анализе горения метан-кислородной смеси в среде водяного пара следует учитывать влияние процесса паровой конверсии метана, который протекает в широком интервале температур по реакции (3) [21].

Она происходит не только в непосредственной области смешения водяного пара на границе поверхности факела с продуктами сгорания метано-кислородной смеси, но и за фронтом пламени в объеме камеры сгорания. Необходимо исследовать условия горения горючей смеси в водяном паре с целью снижения содержания водорода.

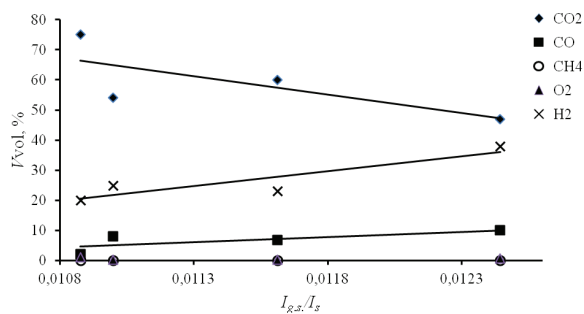


Рис. 2. Влияние отношения полного потока энthalпии газовой смеси ($I_{g,s}$) и полного потока энthalпии низкопотенциального водяного пара (I_s) на концентрации компонентов газовой смеси (V_{vol})

Fig. 2. Influence of the ratio of gas mixture enthalpy ($I_{g,s}$) and low-grade steam enthalpy (I_s) on the concentration of gas mixture components (V_{vol})

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Елисеев Ю.В., Ноздренко Г.В., Шепель В.С. Перспективные экологичные энергоблоки ТЭС на твердом топливе / VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива», Доклады // Институт теплофизики СО РАН, 12–16 ноября 2012. – Новосибирск, 2012. – С. 42.1–42.7.
- Разработка научно-технических решений по котлу для энергоблока на ультрасверхкритические параметры пара / Е.В. Сомова, А.Н. Тугов, А.Л. Шварц, Э.Х. Вербовецкий // Сборник материалов IX семинара вузов по теплофизике и энергетике. Т. II. – Казань, 2015. – С. 92–100.
- Zhang D. Introduction to advanced and ultra-supercritical fossil fuel power plants // Ultra-supercritical Coal Power Plants. – Oxford; Cambridge; Philadelphia; New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2013. – P. 1–20.
- Федоров А.В., Мильман О.О., Шифрин Б.А. Высокоэффективные технологии производства электроэнергии с использованием органического и водородного топлива. – М.: Из-во МГТУ, 2007. – 155 с.
- Расчетно-экспериментальное обоснование создания угольно-водородной электростанции с высокотемпературными (850...1500 °C) паровыми турбинами / О.Н. Фаворский, А.И. Леонтьев, В.А. Федоров, О.О. Мильман // Труды РНКТ-5. Т. 1 – М.: Изд-во МЭИ, 2010. – С. 63–68.
- Мильман О.О., Прибатурин Н.А., Федоров В.А. Теплофизические проблемы создания комбинированных электрогенерирующих установок с турбинными энергоблоками // Труды РНКТ-4. Т. 1. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – С. 258–262.
- Расчетно-экспериментальные исследования в области создания высокотемпературных паровых турбин / Б.А. Шифрин, Р.А. Токарь, О.О. Мильман, В.А. Федоров // Труды РНКТ-4. Т. 1. – М.: Изд-во МЭИ, 2014. – С. 266–269.
- Высокотемпературная паровая турбина: патент Рос. Федерация № 2311540; заявл. 31.01.2006; опубл. 27.11.2007, Бюл. № 33 – 5 с.

Выводы

- Результаты проведенных экспериментальных исследований показали возможность перегрева низкотемпературного водяного пара атмосферного давления продуктами сгорания метан-кислородной смеси.
- Наличие достаточно большого количества водорода в газовой смеси, поступающей в газоанализатор, позволяет рассматривать наряду с процессом горения также и паровую конверсию метана.
- Конструкция пароперегревателя, расходные характеристики горючей смеси и пара при значении коэффициента избытка окислителя, близком к единице (стехиометрическая смесь), не позволяют получить парогазовую смесь, состоящую только из водяного пара и CO₂. В связи с этим требуется оптимизировать режимы горения метан-кислородной смеси, а также оценить возможность изменения конструкции пароперегревателя, горелочного устройства и способа ввода метана и кислорода в пароперегреватель.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России; уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57614X0049.

- Шварц А.Л., Брук Л.Г. Конверсия метана в технологические газы. – М.: МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2012. – 32 с.
- Веткин А.В., Сурис А.Л., Литвинова О.А. Исследование характеристик процесса горения метано-водородных топлив // Теплоэнергетика. – 2015. – № 1. – С. 65–68.
- Wheeldon J.M., Shingledecker J.P. Materials for boilers operating under supercritical steam conditions // Ultra-supercritical coal power plants. – Oxford; Cambridge; Philadelphia; New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2013. – P. 81–103.
- Крылов О.В. Углекислотная конверсия метана в синтез-газ // Российский химический журнал. – 2000. – Т. XLIV. – № 1. – С. 19–33.
- Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane–air premixed flame: experimental and numerical analysis / T. Boushaki, Y. Dhue, L. Selle, B. Ferret, T. Poinsot // International Journal of Hydrogen Energy. – 2012. – V. 37. – № 11. – P. 9412–9422.
- Effects of water vapor addition on the laminar burning velocity of oxygen-enriched methane flames / A.N. Mazas, B. Fiorina, D.A. Lacoste, T. Schuller // Combustion and Flame. – 2011. – V. 158. – P. 2428–2440.
- Experimental and numerical study on the transient behavior of partial oxidation of methane in a catalytic monolith / R. Schwiedernoch, S. Tischer, C. Correa, O. Deutschmann // Chemical Engineering Science. – 2003. – V. 58. – P. 633–642.
- The chemical mechanism of steam's effect on the temperature in methane oxy-steam combustion / Z. Chun, S. Yu, L. Guoyuan, C. Shiyong, H. Yizhuo, Z. Chuguagn // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – V. 75. – P. 12–18.
- Gu X., Zang S.S., Ge B. Effect on flow field characteristics in methane–air non-premixed flame with steam addition // Exp. Fluids. – 2006. – V. 41. – P. 829–837.
- Cormier J.M., Rusu I. Syngas production via methane steam reforming with oxygen: plasma reactors versus chemical reactors // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2001. – V. 34. – P. 2798–2803.

19. Кнорре Г.Ф. Топочные процессы. – М.; Л.: Гос. энерг. изд-во, 1959. – 396 с.
20. Кирилов К.О., Азиханов С.С., Богомолов А.Р. Горение метан-кислородной смеси в среде водяного пара // Интеллектуальные энергосистемы: труды III Международного молодежного форума. Т. I. – Томск, 2015. – С. 290–293.
21. Термодинамика паровой конверсии метана / Р.А. Махмутов и др. // Башкирский химический журнал. – 2010. – Т. 17. – № 3. – С. 137–139.

Поступила 02.11.2015 г.

UDC 62–61; 662.61

BURNING OF METHANE-OXYGEN MIXTURE IN THE ENVIRONMENT OF OVERHEATED STEAM OF ATMOSPHERIC PRESSURE

Nikolay A. Pribaturin,

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Academician Lavrentiev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: pribaturin@itp.nsc.ru

Oleg O. Milman,

research-and-production enterprise on implantation Turbokon CJSC, 1, Komsomolskaya roshcha Street, Kaluga, 248010, Russia. E-mail: turbocon@kaluga.ru

Alexander R. Bogomolov,

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Academician Lavrentiev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: barom@kuzstu.ru

Sergey A. Shevyrev,

Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 28, Vesenniyaya Street, Kemerovo, 650000, Russia. E-mail: ssa.pmahp@kuzstu.ru

Sergey S. Azikhanov,

Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 28, Vesenniyaya Street, Kemerovo, 650000, Russia. E-mail: azihanov@rambler.ru

The relevance of the research is caused by necessity of making highly effective power-generating units on one of the directions, providing working out of a construction of the steam superheater and production engineering of steam overheat up to temperatures above 800 °C of the supercritical pressure before the immediate steam feeding into a turbine.

The operation purpose: examination of the influence of enthalpic metering characteristics of a gas mixture (CH_4+O_2) close to stoichiometric composition, and feebly overheated steam of atmospheric pressure on the temperature of the reacting medium (products of combustion in the environment of steam), and also on qualitative and quantitative composition of a steam-gaseous intermixture over the range of metering characteristics of stable and resistant to burning.

Research techniques. The authors used proved measurement techniques of all parameters of process in the automated mode of gathering and processing of the primary information: temperature, pressure, charge, composition of a gas condensed phase. The flowing method of concentration measuring of products in real time mode with a margin error $\pm 5\%$ was also used.

The results. The authors revealed that the raise of a numerical value of the relation of a gas mixture to directionally submitted steam leads to a gradual raise of the response of partial oxidation of methane. There is a field where there will be a dominating agency of response of full methane oxidizing at insignificant steam conversion of methane according to the reaction. This proves hydrogen share diminution in combustion gases out of the steam superheater (combustion chamber). The thermodynamic analysis of methane and oxygen burning in the environment of steam should be carried out taking into account possible agency of steam conversion of methane over a wide temperature range, but mostly at temperature more than 700 °C. Methane steam conversion happens not only in the field of steam mixture on surface boundary line of a torch with products of combustion, but also behind the flame front in combustion chamber volume.

Key words:

Methane-oxygen mixture, burning, steam, steam conversion of methane, thermal power station.

The research was conducted with financial support from the Ministry of Education and Science of Russia; unique research identifier RFMEF157614X0049.

REFERENCES

1. Eliseev Yu.V., Nozdrenko G.V., Shepel V.S. Perspektivnye ekologichnye energobloki TES na tverdom toplive [Perspective ecological TPP with solid fuel]. *Doklady VIII Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Gorenie tverdogo topliva»* [Proc. 8th Russian conference with international participation. Solid fuel combustion]. Novosibirsk, 2012. pp. 42.1–42.7.
2. Somova E.V., Tugov A.N., Shvarts A.L., Verbovetskiy E.Kh. Razrabotka nauchno-tehnicheskikh resheniy po kotlu dlya energobloka na ultrasverkhkriticheskie parametry para [Development of science and technical decisions for boiler at power station with ultrasupercritical steam]. *Sbornik materialov dokladov IX seminar vuzov po teplofizike i energetike* [Proc. 9th universities seminar in thermal physic and energy]. Kazan, 2015. pp. 92–100.
3. Zhang D. Introduction to advanced and ultra-supercritical fossil fuel power. *Ultra-Supercritical Coal Power Plants*. Oxford; Cambridge; Philadelphia; New Delhi, Woodhead Publishing Limited, 2013. pp. 1–20.
4. Fedorov A.V., Milman O.O., Shifrin B.A. *Vysokoeffektivnye tekhnologii proizvodstva elektroenergii s ispolzovaniem organicheskogo i vodorodnogo topliva* [Highly efficient technologies of electricity production with use of organic and hydrogen fuel]. Moscow, MGTU Press, 2007. 115 p.
5. Favorskiy O.N., Leontev A.I., Fedorov V.A., Milman O.O. Raschetno-eksperimentalnoe obosnovanie sozdaniya ugolno-vodorodnoy elektrostantsii s vysokotemperaturnymi (850–1500 °C) parovymi turbinami [Calculation-experimental substantiation of creation of coal-hydrogen electricity power station with high temperature steam turbine]. *Trudy RNKT-5* [Proc. 5th Russian national conference in heat transfer]. Moscow, MEI Press, 2010. pp. 63–68.
6. Milman O.O., Pribaturin N.A., Fedorov V.A. Teplofizicheskie problemy sozdaniya kombinirovannykh elektrogeneriruyushchikh ustanovok s turbinnymi energoblokami [Thermo physical problems of creation of combined electricity sets with turbine power unit]. *Trudy RNKT-4* [Proc. 4th Russian national conference in heat transfer]. Moscow, MEI Press, 2006. pp. 258–262.
7. Shifrin B.A., Tokar R.A., Milman O.O., Fedorov V.A. Raschetno-eksperimentalnye issledovaniya v oblasti sozdaniya vysokotemperaturnykh parovykh turbin [Calculation-experimental investigation in the field of creation of high temperature steam turbine]. *Trudy RNKT-4* [Proc. 4th Russian national conference in heat transfer]. Moscow, MEI Press, 2014. pp. 266–269.
8. Shifrin B.A., Milman O.O., Fedorov V.A. *Vysokotemperaturnaya parovaya turbina* [High temperature steam turbine]. Patent RF, no. 2006102804/06, 2007.
9. Shvarts A.L., Bruk L.G. *Konversiya metana v tekhnologicheskie gazy* [Conversion of methane into technological gases]. Moscow, MITKHT im. M.V. Lomonosova Press, 2012. 32 p.
10. Vetkin A.V., Suris A.L., Litvinova O.A. Issledovanie kharakteristik protsessa goreniya metano-vodorodnykh topliv [Investigation of combustion process of methane-hydrogen fuel]. *Teploenergetika*, 2015, no. 1, pp. 65–68.
11. Wheelodon J.M., Shingledecker J.M. *Materials for boilers operating under supercritical steam conditions. Ultra-supercritical coal power plants materials*. Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi, Woodhead Publishing Limited, 2013. pp. 81–103.
12. Krylov O.V. Uglekislotnaya konversiya metana v sintez-gas. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2000, vol. XLIV, no. 1, pp. 19–33.
13. Boushaki T., Dhué Y., Selle L., Ferret B., Poinot T. Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane–air premixed flame: experimental and numerical analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, vol. 37, no. 11, pp. 9412–9422.
14. Mazas A.N., Fiorina B., Lacoste D.A., Schuller T. Effects of water vapor addition on the laminar burning velocity of oxygen-enriched methane flames. *Combustion and Flame*, 2011, vol. 158, pp. 2428–2440.
15. Schwiedernoch R., Tischer S., Correa C., Deutschmann O. Experimental and numerical study on the transient behavior of partial oxidation of methane in a catalytic monolith. *Chemical Engineering Science*, 2003, vol. 58, pp. 633–642.
16. Chun Z., Yu S., Guoyuan L., Shiyang C., Yizhuo H., Chuguang Z. The chemical mechanism of steam's effect on the temperature in methane oxy-steam combustion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 75, pp. 12–18.
17. Gu X., Zang S.S., Ge B. Effect on flow field characteristics in methane–air non-premixed flame with steam addition. *Exp. Fluids*, 2006, vol. 41, pp. 829–837.
18. Cormier J.M., Rusu I. Syngas production via methane steam reforming with oxygen: plasma reactors versus chemical reactors. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, vol. 34, pp. 2798–2803.
19. Knorre G.F. *Topochnye protsessy* [Combustion processes]. Moscow, Leningrad, Gos. Energo. Publ., 1959. 396 p.
20. Kirilov K.O., Azikhanov S.S., Bogomolov A.R. Gorenie metan-kislorodnoy smesi v srede vodyanogo para [Combustion of methane-oxygen mixture in water steam atmosphere]. *Trudy III Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma «Intellektualnye energosistemy»* [Proc. 3rd World Youth Forum. Smart energy systems]. Tomsk, 2015. pp. 290–293.
21. Makhmutov R.A. Termodinamika parovoy konversii metana [Thermodynamics of methane steam reforming]. *Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 137–139.

Received: 2 November 2015.