

УДК 621.181:519.876

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИГАНИЯ РЕЗЕРВНОГО ТОПЛИВА В ТОПКЕ КОТЛА БКЗ-210-140

Гиль Андрей Владимирович,

канд. техн. наук, доцент каф. парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: andgil@tpu.ru

Заворин Александр Сергеевич,

д-р техн. наук, профессор каф. парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: zavorin@tpu.ru

Лебедь Дмитрий Викторович,

директор филиала «Приморская генерация» ОАО «Дальневосточная генерирующая компания», Россия, 690034, г. Владивосток, ул. Фадеева, д. 47А. E-mail: lebed-dv@dvgk.rao-esv.ru

Старченко Александр Васильевич,

д-р физ.-мат. наук, профессор каф. вычислительной математики и компьютерного моделирования механико-математического факультета ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: starch@math.tsu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью оценки эффективности и надежности работы котельных агрегатов на резервном топливе после реконструкции связанной с изменением базового топлива и применяемых подходов численного анализа.

Цель работы: анализ физико-химических процессов в топочном объеме котла БКЗ-210-140 при работе на резервном топливе и номинальной нагрузке при использовании Эйлера и совмещенного Эйлера и Лагранжева подходов к моделированию. Построение математических моделей объекта исследования с учетом рационального количества расчетных областей и применения современных численных алгоритмов и подходов. Сравнение численных результатов, полученных с использованием различных программных комплексов и различного представления горения жидкого топлива в камерной топке энергетического котла. Оценка температурных полей в объеме топочной камеры, концентраций химических элементов продуктов сгорания, формирования аэродинамической структуры потоков и эффективности выгорания резервного топлива.

Методы исследования: численное моделирование на основе Эйлера и Лагранжева подходов, метод конечного объема, пристеночных функций, двухпараметрическая $k-\varepsilon$ модель турбулентности, модель протекания химической реакции в турбулентном потоке Eddy-Break-Up – EBU, P1-приближение метода сферических гармоник, теоретический расчет на основе нормативного метода теплового расчета котлов.

Результаты: численное представление физико-химических процессов в топке котла БКЗ-210-140 при организации сжигания резервного топлива; сравнение результатов, полученных по различным численным моделям; оценка надежности работы испарительных поверхностей и эффективности эксплуатации котельного агрегата на резервном виде топлива; рекомендации по совершенствованию топочного режима с целью повышения эффективности эксплуатации котла БКЗ-210-140 при сжигании мазута.

Ключевые слова:

Топочная камера, горелочное устройство, параметр крутки, газодинамика, температура, мазут.

Введение

На тепловых электрических станциях, работающих как на твердом топливе, так и на природном газе, в качестве резервного топлива обычно используется мазут. Поскольку при эксплуатации котельных агрегатов запас резервного топлива должен обеспечивать бесперебойную работу в течение 3,5 суток, в ходе выполнения пуско-наладочных работ основное внимание уделяется работоспособности на основном топливе, а эффективность работы котельного агрегата на резервном топливе из-за краткосрочности рассматриваемого периода оценивается в меньшей степени.

Помимо того, что жидкие органические топлива являются самыми дорогими среди энергетических топлив, при нарушении режимов их сжигания кроме повышения расхода топлива могут наблюдаться и другие негативные последствия в виде снижения экономичности, надежности работы котла, повышения выбросов вредных веществ в атмосферу [1, 2].

Известно, что оптимальная для каждого вида топлива организация топочной аэродинамики обеспечивает устойчивость горения, позволяет поддерживать требуемые скорости и температуры

в топочном объеме, снизить уровень выбросов токсичных веществ в окружающую среду. Неравномерное и неустойчивое движение газов в топке, напротив, ведет к противоположным результатам и может наряду с этим вызвать превышение допустимых локальных тепловых нагрузок, что отразится на эффективности работы котельного агрегата [3, 4].

Реконструкция котельных агрегатов БКЗ-210-140, предназначенных по проекту для факельного сжигания хихезского бурого угля, проведена с целью перевода на сжигание природного газа в качестве базового топлива. Резервным топливом по-прежнему остался мазут, поэтому для оценки эффективности работы новой схемы сжигания на резервном топливе необходимо проанализировать физико-химические процессы в объеме топочной камеры.

Поскольку натурные многофакторные исследования процесса горения в топках котельных агрегатов, базирующиеся на экспериментальном изучении трехмерной аэродинамики горящего факела, в том числе с вихревыми течениями, являются очень дорогостоящими и трудозатратными, в настоящее время для исследования и анализа газодинамики и теплофизических процессов в котлах эффективным инструментом является численное моделирование с использованием как разработанных за рубежом (ANSYS CFD (Fluent & CFX), STAR-CD, FLOW3D, Open-FOAM и др.), так и отечественных (Flow Vision, VP2/3, SigmaFlow, FIRE 3D и т. п.), но в разной мере апробированных для этих целей пакетов прикладных программ. Обилие физических моделей в перечисленных пакетах позволяет с хорошей схожимостью предсказывать ламинарные и турбулентные течения, различные режимы теплопереноса, химические реакции, многофазные потоки и другие явления на основе гибкого построения сеток и их адаптации к полученному решению [5].

Процесс горения мазута представляется последовательным протеканием следующих фаз: мелкодисперсное распыление, испарение и термическое расщепление, концентрирование газозооной смеси, воспламенение и ее горение [6, 7]. Хотя при этом в факеле образуются и твердые соединения сажи и кокса, в большинстве работ исследуются процессы испарения, воспламенения и горения газовой фазы и не учитывается наличие твердой фазы, горение которой происходит аналогично гетерогенному горению частиц твердого топлива [3, 4]. Поэтому из анализа литературных источников сложно отдать предпочтение тому или иному численному подходу к решению задачи по горению жидкого топлива в факеле.

В связи с изложенным в данной работе были использованы ресурсы пакета прикладных программ FIRE 3D и универсального программного комплекса ANSYS. При этом расчет в программном комплексе ANSYS проведен с учетом только газовой фазы, а в пакете прикладных программ FIRE 3D – с учетом твердой фазы.

Объект моделирования

Объектом исследования является котельный агрегат БКЗ-210-140 – вертикально-водотрубный, однорабанный, с естественной циркуляцией, П-образной компоновки, с твердым шлакоудалением. Номинальная паропроизводительность 210 т/ч, давление перегретого пара 14 МПа, расчетная температура перегретого пара 560 °С. Из-за состояния паропроводов высокого давления и необходимости продления паркового ресурса металла парового тракта котел переведен на пониженную температуру перегретого пара 545 °С. Топочная камера объемом 1093 м³ до реконструкции была оборудована четырьмя блоками тангенциально установленных прямоточных пылеугольных горелок и четырьмя мельницами-вентиляторами.

В результате выполненной реконструкции топочное устройство котла оснащено шестью низкоэмиссионными вихревыми комбинированными газомазутными горелками ГМВИ (III) – 30 производства ОАО «ТКЗ – Красный котельщик» тепловой мощностью 30 МВт каждая с центральной и периферийной раздачей природного газа и двумя потоками воздуха. Горелки расположены на боковых стенах топки по схеме треугольника с вершиной вниз (рис. 1). Воздух в газомазутные горелки подается из воздушного тракта после воздухоподогревателя и распределяется на центральный и периферийный каналы посредством регулирующей арматуры.

В качестве расчетного топлива принят малосернистый мазут марки М100 [8].

Для подавления образования оксидов азота предусмотрена система двухступенчатого сжигания, суть которой состоит в том, что основная часть топлива сжигается при недостатке воздуха, а дожигание происходит за счет подачи дополнительного воздуха (около 20 %) в сопла третичного дутья в области более низких температур факела. Сопла сечением 608×208 мм установлены по два на боковых стенах топки выше верхнего яруса горелок на отметке 11,5 м.

Для сжигания мазута в центральную часть газомазутных горелок установлены паромеханические форсунки типа «Вулкан» (рис. 2). Перед форсунками обеспечивается давление топлива не менее 2,0 кгс/см², давление пара не менее 3,0 кгс/см², температура распыливающей среды (перегретый пар) 200...250 °С, удельный расход пара не более 0,02 кг/кг, вязкость топлива не более 6 °ВУ согласно ГОСТ 6258-85 [9].

Паромеханические форсунки довольно экономичны в работе в широком диапазоне регулирования, позволяющем достигать глубины регулирования до 10 % номинальной производительности без ухудшения распыления. Они имеют такую конструкцию, что при нагрузке выше 80 % работают как механические, при более низкой – как паровые форсунки. В паромеханическом режиме задействованы два канала – для подачи мазута и пара в топочное пространство. При работе котла на низ-

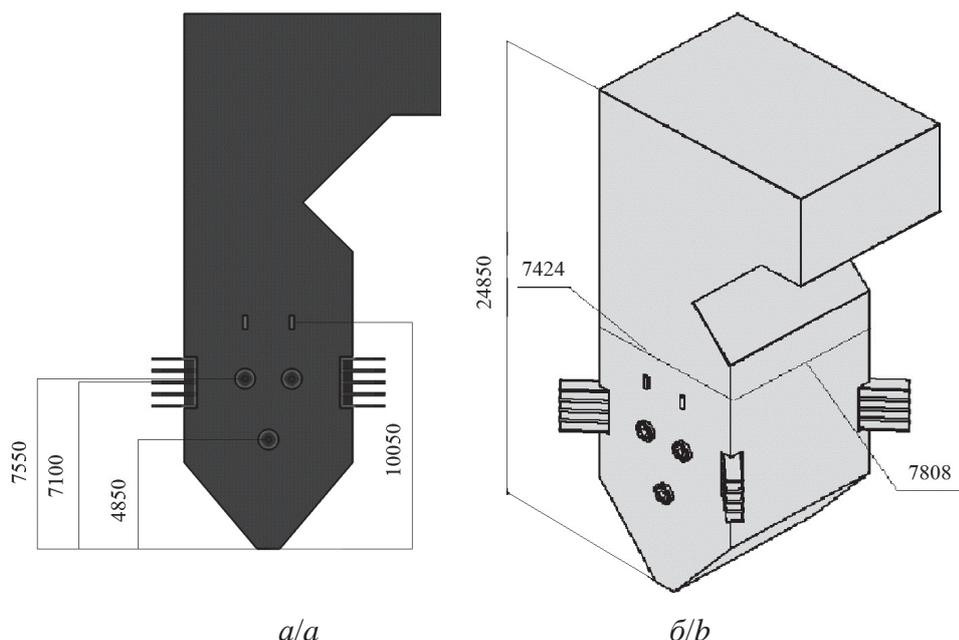


Рис. 1. Эскиз топочной камеры котла БКЗ-210–140: а) боковая стена; б) трехмерная модель

Fig. 1. Rough drawing of combustion chamber of boiler BKZ-210–140: a) side wall; b) three-dimensional model

кой нагрузке используется пар, который, пройдя паровой канал, систему отверстий в корпусе форсунки и паровой завихритель-кавитатор, встречается с мазутом, распыляя его.

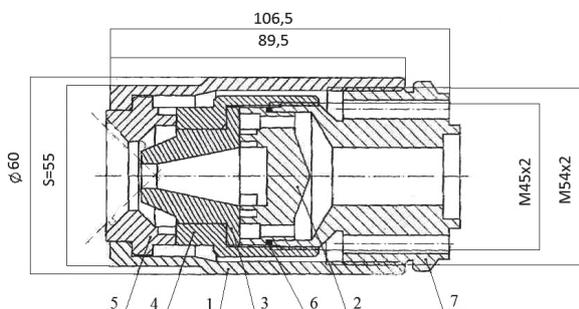


Рис. 2. Форсунка паромеханическая «Вулкан»: 1) корпус; 2) кавитатор мазутный; 3) сопло; 4) гайка поджимная; 5) излучатель паровой; 6) прокладка; 7) основание

Fig. 2. Steam-assisted burner «Vulkan»: 1) body; 2) fuel oil cavitator; 3) nozzle; 4) press screw nut; 5) steam radiator; 6) shim plate; 7) base

Расчетная сетка и параметры моделирования

При работе в программном комплексе ANSYS построенная геометрическая модель топочной камеры посредством Ansys Workbench v. 12.1.4 преобразована в расчетную структурированную тетрагональную сетку (рис. 3, а) с размерами стороны ячеек в диапазоне от $1,407 \cdot 10^{-4}$ до $1,4072 \cdot 10^{-1}$ м, что позволяет производить численное моделирование с достаточно высокой производительностью и приемлемой точностью. Полученная сетка содержит 133777 контрольных объемов и 26336 расчетных узлов [10].

После импортирования в расчетный модуль универсального пакета прикладных программ Ansys Fluent v. 12.1.4 было произведено преобразование тетрагональной структуры сетки в полиэдральную (рис. 3, б). В результате оптимизации количество контрольных объемов снизилось до 44291, что благоприятно отразилось на производительности расчета и на количестве «плохих» ячеек. Количество расчетных узлов полиэдральной сетки увеличилось до 183649, что, в свою очередь, повысило сходимость и точность численного моделирования.

При работе с программным комплексом FIRE 3D с использованием препроцессора была построена декартовая сеточная модель топочной камеры котла БКЗ-210–140 с количеством ячеек 169200.

Граничные и начальные условия математической модели задавались в соответствии с результатами предварительно проведенного теплового расчета котла, в качестве исходных данных для которого принимались: топливо – пары мазута ($C_{19}H_{30}$) при расчете в программном комплексе Ansys Fluent v. 12.1.4 и малосернистый мазут (с элементарным составом (%)) на рабочую массу: влажность 0,2, зольность 0,03, содержание серы 0,85, углерода 86,58, водорода 12,04, кислорода 0,3) при расчете с использованием пакета прикладных программ FIRE 3D; массовый расход топлива на номинальной нагрузке 4,057 кг/с; окислителем является атмосферный воздух, теоретически необходимый объем которого составляет $10,9059 \text{ м}^3/\text{кг}$; коэффициент избытка воздуха на выходе из топки 1,2 (вследствие повышенных присосов воздуха); доля первичного воздуха по отношению к общему количеству 0,175, вторичного воздуха, подаваемого в вихревые горелки 0,525, вторичного воздуха через тангенциальные

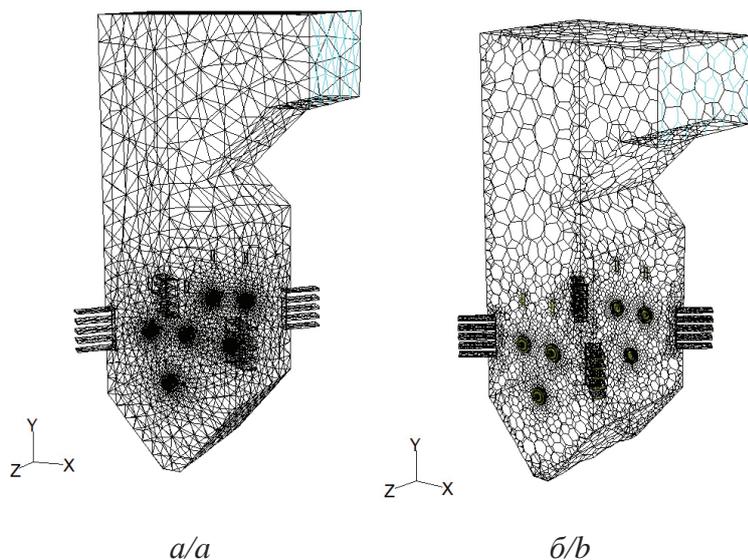


Рис. 3. Структурированная расчетная сетка для математического моделирования: а) тетрагональная; б) полиэдральная
Fig. 3. Structured computational mesh for mathematical simulation: a) tetragonal; b) polyhedral

горелки 0,10, третичного дутья через сбросные сопла 0,20; температура горячего воздуха 189 °С. Для повышения производительности расчетов воздух условно представлен в виде смеси кислорода с азотом в объемных долях 21 и 79 % соответственно.

Математическая модель

Методом конечных элементов моделировались следующие физико-химические процессы: горение паров мазута в кислороде воздуха, турбулентность в реагирующей среде, конвективный и лучистый теплообмен и т. д. В расчете принято упрощение процесса окисления горючего – уравнение брутто реакции горения паров мазута протекает необратимо в одну стадию: $C_{19}H_{30} + 26,5O_2 = 19CO_2 + 15H_2O$. Моделирование газовой фазы проводилось в приближении Эйлера. В соответствии с этим математическая модель включает в себя уравнения (запись для краткости приведена только для одной координаты) [11]:

- неразрывности

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0;$$

- движения

$$\frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] + \rho g_i, \quad j = 1, 2, 3;$$

- энергии

$$\frac{\partial U_i \rho c_p T}{\partial x_j} = -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij} U_i}{\partial x_j} + S, \quad q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i};$$

- состояния

$$\rho = \frac{p}{R_0 T \left[\frac{C_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{C_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{C_{C_{19}H_{30}}}{M_{C_{19}H_{30}}} + \frac{C_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{C_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right]}.$$

Здесь x_i – декартовы координаты; U_i – компоненты вектора скорости; ρ, p, T, c, μ, g – плотность, давление, температура, удельная теплоемкость, динамическая вязкость смеси, ускорение свободного падения; δ_{ij} – символ Кронекера; τ_{ij} – компоненты тензора реинольдсовых напряжений; S – число Шмидта; λ – коэффициент теплопроводности; C_j – концентрация компонентов; M_j – молекулярный вес компонентов смеси.

Использовалась к-ε модель турбулентности, которая хорошо зарекомендовала себя в задачах с сильной кривизной линий тока и справедлива для полностью развитого турбулентного течения, т. е. для высоких чисел Рейнольдса, когда прямое влияние вязкости на структуру турбулентности пренебрежимо мало [12, 13].

Для описания турбулентных характеристик газа используется двухпараметрическая к-ε модель турбулентности Лаундера и Сполдинга

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right],$$

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = 1,44 \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - 1,92 \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{1,3} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right],$$

$$\mu_t = 0,09 \rho \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

В данных уравнениях k, ε – кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации; μ_t – турбулентная вязкость.

В общем балансе энергии перенос тепла излучением в камерах сгорания играет важную роль. При численном исследовании радиационного теплопереноса в излучающих, поглощающих и рассеивающих средах, таких как топочные камеры, используется сложное интегро-дифференциальное уравнение для интенсивности термического излучения. Для приближенного решения этого уравнения в данной работе применяется метод сферических гармоник (его P1-приближение). Использование такого подхода для моделирования термического излучения в топочной камере обусловлено его хорошей совместимостью с конечноразностными методами.

Для математического моделирования протекающей химической реакции в турбулентном потоке одной из часто используемых моделей является модель Сполдинга (Eddy-Break-Up – EBU), отраженная в работах [13–15]. Согласно данной модели скорость химической реакции пропорциональна интенсивности турбулентного перемешивания. Однако влияние температуры потока на скорость протекающих химических реакций EBU-модель не учитывает, что не позволяет моделировать течения с переходными режимами горения, определяющими условия существования пламени.

Модифицированная модель, основанная на совместном использовании модели Сполдинга и кинетической модели, расширяет возможности моделирования и позволяет учесть различные режимы течения.

Кинетическая скорость реакции определяется следующей формулой [16]

$$\bar{w}_{kin} = A_k \bar{\rho}^2 \tilde{c}_f \tilde{c}_{ox} [-E / (R\tilde{T})],$$

где A_k – постоянный коэффициент, $\text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$; E – энергия активации химической реакции, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная; \tilde{c}_f – массовая концентрация горючего; \tilde{c}_{ox} – массовая концентрация окислителя; \tilde{T} – температура газа.

Скорость турбулентного горения, согласно EBU-модели, вычисляется по формуле

$$\bar{w}_t = A_{EBU} \bar{\rho} (\varepsilon / k) \min\{\tilde{c}_f, \tilde{c}_{ox} / \nu\},$$

где ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; k – удельная кинетическая энергия турбулентности; A_{EBU} – коэффициент модели; ν – стехиометрический коэффициент.

При использовании модели EBU совместно с методом крупных вихрей отношение вычисляется [17, 18] по зависимости:

$$\varepsilon / k = \sqrt{2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij}},$$

где \tilde{S}_{ij} – тензор скоростей деформации.

Тогда формула скорости турбулентного горения, соответственно, принимает вид

$$\bar{w}_t = A_{EBU} \bar{\rho} |\tilde{S}| \min\{\tilde{c}_f, \tilde{c}_{ox} / \nu\}.$$

Для учета зависимости скорости реакции от температуры потока формула модифицируется следующим образом

$$\bar{w}_t = A_{EBU} B_{EBU} \bar{\rho} |\tilde{S}| \min\{\tilde{c}_f, \tilde{c}_{ox} / \nu\},$$

$$B_{EBU} = 6,386 \times 10^3 \exp\left(-\frac{E}{R\tilde{T}}\right).$$

Вид связи B_{EBU} и температуры выбран по аналогии с законом Аррениуса. Коэффициент B_{EBU} изменяется в диапазоне от 0 до 1. Своё максимальное значение ($B_{EBU}^{\max}=1$) он принимает при $\tilde{T}_{\max}=2100$ К (то есть при наибольшей температуре горения). Следовательно, при температуре, близкой к наибольшей, значения, полученные по двум последним формулам, становятся фактически одинаковыми. При уменьшении температуры коэффициент B_{EBU} также начинает уменьшаться, обуславливая тем самым зависимость скорости реакции от температуры [19].

После вычисления кинетической и турбулентной скоростей горения скорость реакции окончательно определяется выражением, аналогичным формуле Щёлкина [20]

$$\bar{w} = \sqrt{\bar{w}_{kin}^2 + \bar{w}_t^2}.$$

Использование этой формулы дает возможность моделировать переход как от турбулентного к ламинарному режиму горения при уменьшении интенсивности турбулентного перемешивания, так и, наоборот, от ламинарного режима к турбулентному, соответственно, при увеличении интенсивности.

Таким образом, предложенная модель является универсальной для расчета течений реагирующего газа в широком диапазоне чисел Рейнольдса [21].

В программном продукте FIRE 3D теплообмен и горение в газовой фазе представляются на основе Эйлерова способа описания, т. е. используются стационарные пространственные уравнения баланса массы, импульса, концентраций газовых компонентов и энергии для газовой смеси. Для описания движения и тепломассообмена одиночных частиц топлива и золы вдоль их траекторий с учетом обратного влияния дисперсной фазы на несущую среду применяется Лагранжев подход. Турбулентные характеристики газа рассчитываются с использованием двухпараметрической k - ε модели турбулентности, также учитывающей влияние движущихся частиц. Радиационный теплообмен в двухфазном потоке представляется в рамках P1-приближения метода сферических гармоник [5].

Соответственно основные уравнения запишутся в следующей форме:

- уравнение изменения массы газовой смеси вследствие испарения влаги, газификации и горения углеродных частиц

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = J_{evap} + J_{vap} + J_{char},$$

где ρ – плотность газовой смеси; U_i ($i=1,2,3$) – компоненты скорости газа; x_i ($i=1,2,3$) – декартовы координаты; J_{evap} , J_{vap} , J_{char} – массовые скорости испарения влаги, топлива и догорания частиц;

- уравнение количества движения для газовой фазы

$$\frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho g_j + F_j + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left[\rho k + (\mu + \mu_T) \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right] \right]; \quad j = 1, 2, 3,$$

где p – давление; μ_T – турбулентная вязкость; μ – молекулярная вязкость; k – энергия турбулентности; δ_{ij} – символы Кронеккера ($\delta_{ii}=1$; $\delta_{ij}=0$ ($i \neq j$)); g_j – проекции ускорения свободного падения на декартовы оси; F_j – компоненты силы межфазного взаимодействия между частицами и несущей средой;

- уравнение движения частицы-маркера i -й группы ($i=1, \dots, N$),

$$\frac{dU_j^i}{dt} = \frac{(U_j - U_j^i)}{\tau_i} + g_j; \quad j = 1, 2, 3.$$

Здесь

$$\tau_i = \frac{4 \rho_p d_{pi}}{3 c_{D_i} \rho |\tilde{U}^i - \tilde{U}|};$$

$$c_{D_i} = \begin{cases} \frac{24}{Re_i} (1 + 0,15 Re_i^{0,687}); & Re_i \leq 1000; \\ 0,44; & Re_i > 1000; \end{cases}$$

$$Re_i = \frac{\rho \sqrt{\sum_{j=1}^3 (U_j^i - U_j)^2} d_{pi}}{\mu},$$

где U_j^i – компоненты скорости частиц; U_j – компоненты скорости газа; g_j – проекции ускорения свободного падения на декартовы оси; ρ_p – плотность частиц; d_{pi} – размер частиц i -й группы; c_{D_i} – коэффициент сопротивления частиц;

- уравнение энергии для газа

$$\frac{\partial \rho U_i c T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left[\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right] c \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_{vol} J_{vol} + Q_{CO} J_{CO} - \frac{\partial q_i^{rad}}{\partial x_i} + \Theta,$$

где c – теплоемкость смеси газов; Pr, Pr_T – молекулярное и турбулентное ($Pr_T=0,9$) числа Прандтля; T – температура газа; Q_{vol}, Q_{CO} – тепловые эффекты реакций горения углеводородов и угарного газа; q_i^{rad} – компоненты вектора радиационного теплового потока; Θ – интенсивность теплообмена между несущей средой и частицами.

- уравнение состояния

$$\rho = \frac{p}{R_0 T \left[\frac{C_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{C_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{C_{vol}}{M_{vol}} + \frac{C_{CO}}{M_{CO}} + \frac{C_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{C_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right]},$$

где M_j – молекулярные веса компонентов газовой смеси; R_0 – универсальная газовая постоянная, p – давление.

Результаты численного моделирования

На рис. 4 представлены результаты визуализации численных расчетов температурного уровня в горизонтальном сечении по оси верхнего яруса горелочных устройств.

В обоих вариантах расчета наблюдается аналогичное расположение температурных полей с незначи-

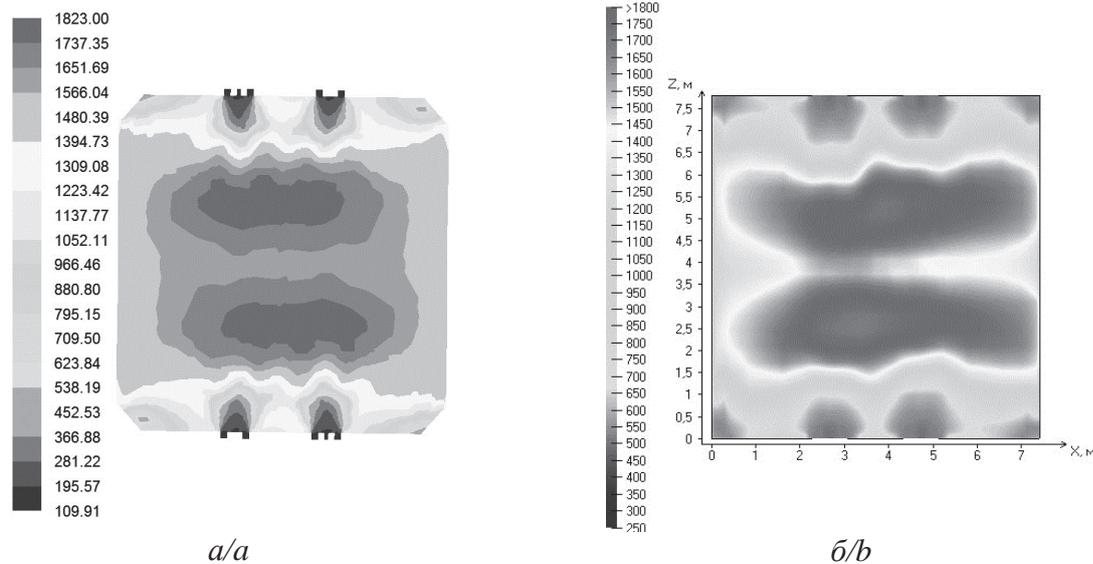


Рис. 4. Температурные поля в горизонтальном сечении топочной камеры по оси верхнего яруса горелочных устройств при использовании вычислительных пакетов: а) ANSYS Fluent; б) FIRE 3D

Fig. 4. Temperature fields in horizontal section of a combustion chamber along the axis of upper layer of a burner device while using computational packages: а) ANSYS Fluent; б) FIRE 3D

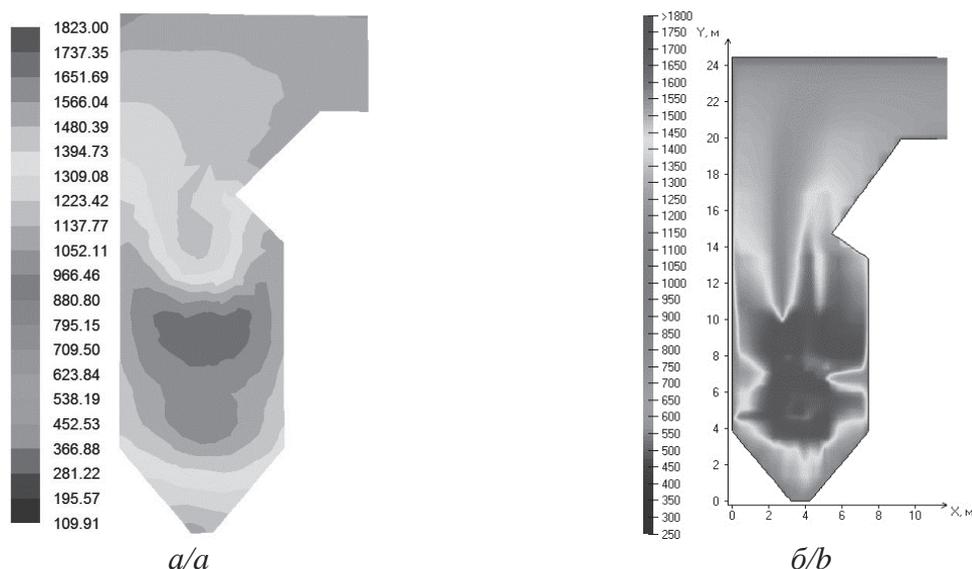


Рис. 5. Температурные поля в вертикальном сечении топочной камеры по продольной оси топочной камеры при использовании вычислительных пакетов: а) ANSYS Fluent; б) FIRE 3D

Fig. 5. Temperature fields in vertical section of a combustion chamber along the longitudinal axis of upper layer of a burner device while using computational packages: a) ANSYS Fluent; b) FIRE 3D

тельными отклонениями по температурным значениям, свидетельствующее об отсутствии единого, симметричного относительно центральной оси топочной камеры, ядра горения. Это может негативно отразиться на гидродинамических режимах работы экранных элементов в отдельных контурах циркуляции.

Визуальные картины распределения температурных полей в вертикальном сечении по продольной оси топочной камеры имеют отличия (рис. 5). При расчете в программе ANSYS Fluent максимальный уровень температур наблюдается в области расположения верхнего яруса горелочных устройств, а результирующая картина температурного уровня при расчете в программном комплексе FIRE 3D имеет максимум в области между ярусами горелок. При этом также можно отметить, что именно в данном сечении уровень температур до аэродинамического выступа при расчете в программном комплексе ANSYS Fluent выше ($\sim 100\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$), чем при расчете программой FIRE 3D.

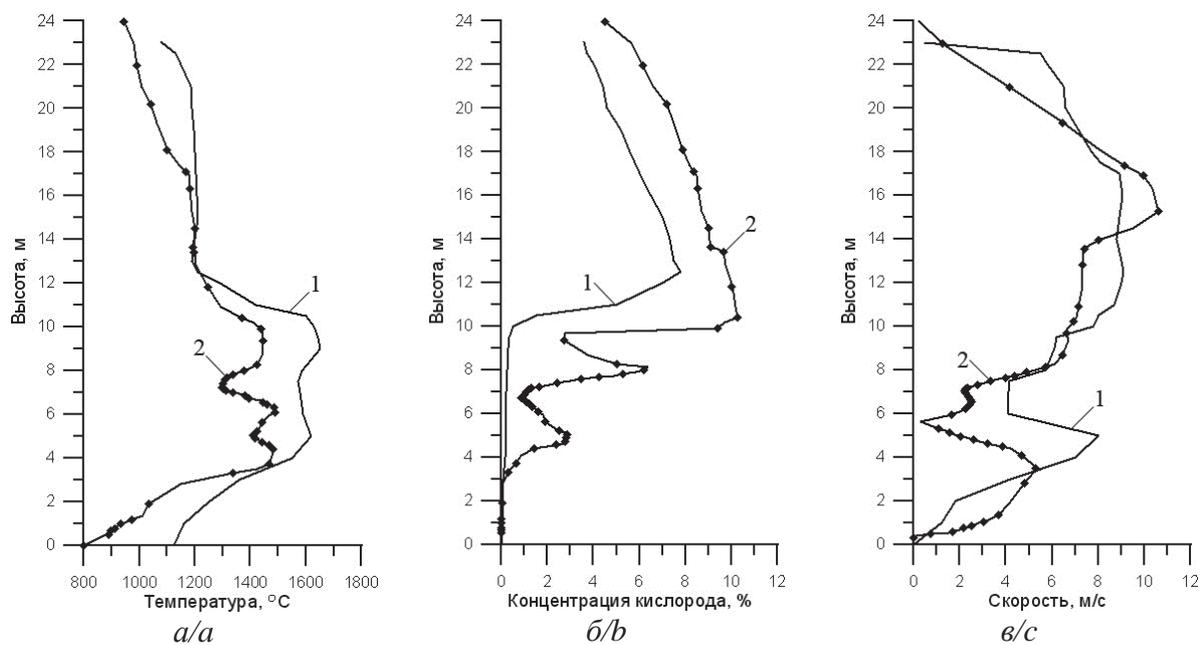
Дальнейшие графические результаты представлены относительно пересечения продольной и поперечной оси топочной камеры, т. е. по центральной оси топки.

Анализируя изменение температуры по центральной оси топочной камеры, можно отметить в целом аналогичность профилей кривых (рис. 6, а). Но при этом значения температур на уровне середины холодной воронки и в области активного выгорания топливно-воздушной смеси существенно отличаются ($\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$). Данное различие в большей степени связано с локальными значениями в конкретных сечениях, поскольку применены различные численные модели расчета процессов горения, которые влияют на итерационный расчет аэродинамической структуры потока в топке, что вносит несоот-

ветствия при рассмотрении в конкретных точках. Температура на выходе из топки составляет $1093\text{ }^\circ\text{C}$ при расчете с гомогенными реакциями горения и $992\text{ }^\circ\text{C}$ при расчете гетерогенного процесса горения.

На рис. 6, б изображены два графика зависимости изменения концентрации кислорода по высоте топки, полученные из математического моделирования в Ansys Fluent и FIRE 3D. При сравнении кривых можно отметить аналогичность профилей, но при этом на уровне расположения горелочных устройств и третичного дутья при расчете гетерогенного горения мазута с использованием программного продукта FIRE 3D наблюдаются пики повышенной концентрации, из этого следует, что воспламенение топливовоздушной смеси при расчете в программе Ansys происходит быстрее и интенсивнее, что и соответствует гомогенному горению. В целом наблюдается более высокая концентрация кислорода при использовании программного комплекса FIRE 3D примерно на 2 %.

Скоростной режим восходящего газо-воздушного потока имеет близкие значения в обоих исследованных вариантах за исключением зоны на уровне расположения нижнего яруса горелочных устройств (рис. 6, в). При расчете с использованием программы FIRE 3D закрученные потоки, истекающие из горелочных устройств, сталкиваются, образуя зону с пониженным давлением, что приводит к падению движения топочной среды. Максимальные значения скоростей наблюдаются на уровне аэродинамического выступа и соответственно сужения топочной камеры, а также вследствие дополнительного ввода объема воздуха через сопла третичного дутья. В данном сечении скорость достигает 9 м/с при расчете в программе Ansys Fluent и $10,5\text{ м/с}$ при использовании FIRE 3D.



1) ANSYS Fluent; 2) FIRE 3D

Рис. 6. Результаты численного расчета топочной среды по высоте топочной камеры: а) изменение температуры; б) изменение концентрации кислорода; в) изменение скорости газо-воздушного потока

Fig. 6. Results of numerical computation of furnace atmosphere by a combustion chamber height: a) temperature change; b) oxygen concentration change; c) change in gas-air flow speed

Заключение

Какая из рассмотренных моделей более адекватна, заключить достаточно сложно, поскольку картины визуализации и профили кривых на представленных графиках по всем рассмотренным параметрам достаточно близки. Отличия в абсолютных значениях можно отнести к тому, что они снимались по центральной оси топки, и незначительное смещение температурных, концентрационных полей рассматриваемых параметров приводит к отличию результатов в одной и той же точке при расчете по разным моделям. При сравнении значений температур на выходе из топки при расчете в принятых расчетных комплексах и значения температуры, рассчитанного по нормативному методу теплового расчета, разница не превышает 100 °C, что является допустимым при расчетных исследованиях процессов в котельных агрегатах.

Анализ совокупности данных, полученных по двум принятым к расчету моделям, показывает, что работа котельного агрегата на резервном топливе представляется надежной, поскольку темпе-

ратурный уровень и его распределение в пределах топочного объема соответствуют допустимому тепловому напряжению и достаточно равномерен в сечениях по высоте топочной камеры. Соответственно, как процесс циркуляции пароводяной смеси, так и экраны циркуляционных контуров, судя по этим косвенным данным, в процессе эксплуатации имеют надежные параметры работы. Наличие высокоскоростных локальных зон не должно негативно отразиться на надежности работы поверхностей испарения за счет воздействия твердых частиц, поскольку наличие их в газовом потоке при сжигании мазута минимально.

Поскольку сжигание мазута по большей части является гомогенным горением в турбулентном потоке, то согласно рис. 6, б процесс выгорания топлива будет проходить полностью. Имеющий место после реконструкции котла повышенный коэффициент избытка воздуха, несомненно, при работе на мазуте влияет на снижение температуры на выходе из топки.

Работа выполнена в рамках ГЗ НИР № 2069 (2.1322.2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ghorbani A., Bazooyar B. Optimization of the combustion of SOME (soybean oil methyl ester), B5, B10, B20 and petrodiesel in a semi industrial boiler // *Energy*. – 2012 August. – V. 44. – Iss. 1. – P. 217–227.
- Daho T., Vaitilingom G., Sanogo O. Optimization of the combustion of blends of domestic fuel oil and cottonseed oil in a non-modified domestic boiler // *Fuel*. – 2009 July. – V. 88. – Iss. 7. – P. 1261–1268.
- Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнов О.С. Топливо и теория горения. Ч. II. Теория горения. – СПб.: СПбГТУРП, 2011. – 142 с.
- Лебедев Б.В., Карякин С.К. Технология сжигания органических топлив. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 148 с.
- Гиль А.В., Старченко А.В. Математическое моделирование физико-химических процессов сжигания углей в камерных топках котельных агрегатов на основе пакета прикладных программ FIRE 3D // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2012. – Т. 19. – № 5. – С. 655–671.
- Аскарова А.С., Рыспаева М.Ж., Волошина И.Э. Численное моделирование горения и самовоспламенения двухфазных химических реагирующих течений с впрысками // *Известия Томского политехнического университета*. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 5–9.
- González-Espinosa A., Lozano A., García J.A., Barreras F., Lincheta E. Design modification of the air diffuser in the burners of a fuel oil power plant. P. II: Interaction with the liquid spray // *Fuel*. – 2014 May. – V. 124. – P. 141–150.
- Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
- ГОСТ 6258–85 Нефтепродукты. Метод определения условной вязкости. – М.: Изд-во ФГУП «Стандартинформ», 2006. – 7 с.
- Гиль А.В., Старченко А.В., Загорин А.С. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо: монография. – Томск: СТТ, 2011. – 184 с.
- Бубенчиков А.М., Старченко А.В. Численный анализ аэродинамики и горения турбулентной пылеугольной горелочной струи // *Физика горения и взрыва*. – 1997. – Т. 33. – № 1. – С. 51–59.
- Бубенчиков А.М., Старченко А.В. Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. – 236 с.
- Spalding D.B. Mathematical models of turbulent flames: a review // *Combustion Science and Technology*. – 1976. – V. 13. – № 1–6. – P. 3–22.
- Yaxin Su, Cuiwu Chen, Along Su. Simulation of High Temperature Air Combustion with modified Eddy-Break-Up combustion model // *Energy Procedia*. – 2012. – V. 14. – P. 127–132.
- Abolfazl Irannejad, Farhad Jaberli. Large eddy simulation of turbulent spray breakup and evaporation // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2014 May. – V. 61. – P. 108–128.
- Westbrook C.K., Dryer F.L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames // *Combust. Sci. Technol.* – 1981. – V. 27. – № 1–2. – P. 31–34.
- Zhou L.X., Hu L.Y., Wang F. Large eddy simulation of turbulent combustion using different combustion models // *Fuel*. – 2008. – V. 87. – № 13–14. – P. 3123–3131.
- Murrone A., Scherrer D. Large eddy simulation of turbulent premixed flame stabilized by a backward facing step // *1st INCA Workshop*. – Villaroche, France, 2005. – P. 1–9.
- Шумихин А.А., Карпов А.И. Численное моделирование турбулентного диффузионного пламени на основе метода крупных вихрей // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2012. – Т. 5. – № 2. – С. 199–207.
- Седов Л.И. Механика в СССР за 50 лет. М.: Наука, 1970. – Т. 2. – 880 с.
- Бояршинов М.Г., Балабанов Д.С. Вычислительное моделирование движения сжимаемой среды, генерируемой точечным источником // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2010. – Т. 3. – № 3. – С. 18–31.

Поступила 14.07.2014 г.

UDC 621.181:519.876

NUMERICAL INVESTIGATION OF BURNING RESERVE FUEL IN COMBUSTION CHAMBER OF BOILER BKZ-420-140

Andrey V. Gil,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: andgil@tpu.ru

Aleksandr S. Zavorin,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: zavorin@tpu.ru

Dmitry V. Lebed,

Primorskaya Generatsiya, Far East Generating Company, 47A, Fadeev street,
Vladivostok, 690034, Russia. E-mail: lebed-dv@dvkg.rao-esv.ru

Aleksandr V. Starchenko,

Dr. Sc., Tomsk State University, 36, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: starch@math.tsu.ru

Relevance of the work is caused by the need to assess the effectiveness and reliability of the boiler units on reserve fuel after reconstruction associated with a change in the base fuel and approaches of numerical analysis.

The main aim of the research is to analyze physical and chemical processes in the furnace volume of boiler BKZ-210-140 operating on reserve fuel and rated load when using the Euler and Euler combined and Lagrangian modeling approaches; to construct the mathematical models of the object of study, taking into account the number of rational settlement areas and application of modern numerical algorithms and approaches; to compare numerical results obtained by using different software packages and different representations of the combustion of liquid fuel in the power boiler furnace; to evaluate temperature fields in the volume of the combustion chamber, the concentration of chemical elements of the combustion products, formation of a wind flow patterns and efficiency of backup fuel burn.

Methods: numerical simulation based on the Euler and Lagrangian approaches, the finite volume method, wall functions, the two-parameter $k-\varepsilon$ turbulence model, the model of the chemical reaction in a turbulent flow Eddy-Break-Up – EBU, P1 approximation of spherical harmonics method, the theoretical calculation based on the standard method of thermal calculation of boilers.

Results: numerical representation of physical and chemical processes in the furnace of the boiler BKZ-210-140 at reserve fuel combustion; comparison of the results obtained by different numerical models; assessment of the reliability of evaporator surface functioning and efficient of operation of the reserve fuel boiler unit; recommendations for improving the combustion mode in order to increase the operational efficiency of the boiler BKZ-210-140 when combusting fuel oil.

Key words:

Combustion chamber, burner device, twist parameter, gas dynamics, temperature, fuel oil.

The paper was carried out within the R&D State Task no. 2069 (2.1322.2014).

REFERENCES

1. Ghorbani A., Bazooyar B. Optimization of the combustion of SOME (soybean oil methyl ester), B5, B10, B20 and petrodiesel in a semi industrial boiler. *Energy*, 2012 August, vol. 44, Iss. 1, pp. 217–227.
2. Daho T., Vaitilingom G., Sanogo O. Optimization of the combustion of blends of domestic fuel oil and cottonseed oil in a non-modified domestic boiler. *Fuel*, 2009 July, vol. 88, Iss. 7, pp. 1261–1268.
3. Belousov V.N., Smorodin S.N., Smirnov O.S. *Toplivo i teoriya goreniya* [Fuel and combustion theory]. V. 2. *Teoriya goreniya* [Combustion theory]. St. Petersburg, SPbGTURP Publ., 2011. 142 p.
4. Lebedev B.V., Karyakin S.K. *Tekhnologiya szhiganiya organicheskikh topliv* [Technology of burning fossil fuels]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2012. 148 p.
5. Gil A.V., Starchenko A.V. Mathematical modeling of physical and chemical processes of coal combustion in chamber furnaces of boiler aggregates based on the package of applied programs FIRE 3D. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 503–519.
6. Askarova A.S., Ryspaeva M.Zh., Voloshina I.E. Chislennoe modelirovanie goreniya i samovosplamneniya dvukhfaznykh khimicheskikh reagiruyushchikh techeniy s vpryskami [Numerical simulation of combustion and self-ignition of two-phase reacting chemical flows]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009. vol. 315, no. 4, pp. 5–9.
7. González-Espinosa A., Lozano A., García J.A., Barreras F., Lincheta E. Design modification of the air diffuser in the burners of a fuel oil power plant. P. II: Interaction with the liquid spray. *Fuel*, 2014 May, vol. 124, pp. 141–150.
8. *Teplovoy raschet kotlov* [Thermal computation of boilers] (Normative method). St. Peterburg, 3rd ed., NPO TsKTI publisher, 1998. 256 p.
9. GOST 6258–85. *Nefteprodukty. Metod opredeleniya uslovnoy vyazkosti* [State Standard 6258–85. Petroleum products. The method of determining the relative viscosity]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.
10. Gil A.V., Starchenko A.V., Zavorin A.S. *Primenenie chislenogo modelirovaniya topochnykh protsessov dlya praktiki perevoda kotlov na neproektnoe toplivo* [Application of numerical simulation of furnace processes for the practice of transferring fuel boilers non-project]. Tomsk, STT, 2011. 184 p.

11. Bubenchikov A.M., Starchenko A.V. Chislennyy analiz aerodinamiki i goreniya turbulentnoy pyleugolnoy gorelochnoy strui [Numerical analysis of the aerodynamics and combustion of pulverized coal burner turbulent flow]. *Fizika goreniya i vzryva*, 1997, vol. 33, no. 1, pp. 51–59.
12. Bubenchikov A.M., Starchenko A.V. *Chislennyye modeli dinamiki i goreniya aerodispersnykh smesey v kanalakh* [Numerical models of the dynamics and combustion of aerodisperse mixtures in channels]. Tomsk, Tomsk University Press, 1998. 236 p.
13. Spalding D.B. Mathematical models of turbulent flames: a review. *Combustion Science and Technology*, 1976, vol. 13, no. 1–6, pp. 3–22.
14. Yaxin Su, Cuiwu Chen, Along Su. Simulation of High Temperature Air Combustion with modified Eddy-Break-Up combustion model. *Energy Procedia*, 2012, vol. 14, pp. 127–132.
15. Irannejad A., Jaber F. Large eddy simulation of turbulent spray breakup and evaporation. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014 May, vol. 61, pp. 108–128.
16. Westbrook C.K., Dryer F.L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. *Combust. Sci. Technol.*, 1981, vol. 27, no. 1–2, pp. 31–34.
17. Zhou L.X., Hu L.Y., Wang F. Large eddy simulation of turbulent combustion using different combustion models. *Fuel*, 2008, vol. 87, Iss. 13–14, pp. 3123–3131.
18. Murrone A., Scherrer D. Large eddy simulation of turbulent premixed flame stabilized by a backward facing step. *1st INCA Workshop*. Villaroche, France, 2005. pp. 1–9.
19. Shumikhin A.A., Karpov A.I. Chislennoe modelirovanie turbulentnogo diffuzionnogo plameni na osnove metoda krupnykh vikhrey [Numerical modeling of turbulent diffusion flame on the basis of large-eddy]. *Computational continuum mechanics*, 2012, vol. 5, no. 2, pp. 199–207.
20. Sedov L.I. *Mekhanika v SSSR za 50 let* [Mechanics in the USSR for 50 years]. Moscow, Nauka Publ., 1970, vol. 2, 880 p.
21. Boyarshinov M.G., Balabanov D.S. Vychislitelnoe modelirovanie dvizheniya szhimaemoy sredy, generiruemy tochechnym istochnikom [Computational modeling of motion of a compressible medium, generated by a point source]. *Computational continuum mechanics*, 2010, vol. 3, no. 3, pp. 18–31.

Received: 14 July 2014.