

## КОНЦЕПЦИЯ ФАКЕЛЬНОГО КОНТИНУУМА ДЛЯ ЗОНЫ ИНТЕНСИВНОГО ГОРЕНИЯ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

**Е.В. Торопов, К.В. Осинцев**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск*

Сформулирована задача декомпозиции зоны интенсивного горения котельного агрегата, предложена рациональная схема решения задачи в рамках концепции факельного континуума, что позволило рассмотреть основные закономерности процессов переноса тепла и аэромеханики в нижней части топки котельного агрегата. Определены основные особенности трех элементов схемы – топочной среды, факельного континуума и ограждения зоны интенсивного горения с определением границ между ними. Характеристики топочной среды и ограждения определяются с применением принятых методик расчета, свойства факельного континуума адаптируются к гетерогенному факелу при сжигании твердого и жидкого топлива, при этом задача по определению энтальпии решается в одномерной постановке. При сжигании газообразного топлива важным фактором становятся процессы аэромеханики, поэтому гомогенный факельный континуум рассмотрен в двухпараметрической постановке. Общей характеристикой при сжигании топлив трех агрегатных состояний является распределение температуры по длине факела, что дает возможность поперечного рассмотрения процессов теплообмена.

*Ключевые слова:* топка, факельный континуум, топочная среда, ограждение топки, энтальпия.

Поставленная в настоящей работе задача состоит в разработке и адаптации особенностей аэромеханики, кинетики и диффузии к условиям горения и теплообмена в зоне интенсивного горения (ЗИГ), что дает возможность сформулировать и решить задачу математического описания процессов теплообмена в ЗИГ. Для этого необходимо рассмотреть концептуальные особенности теплообмена и горения газовой и газодисперсной сред с участием твердой поверхности ограждения.

Рассматриваемая система состоит из трех подсистем или модулей: объем топочного газа, факельная среда и ограждение зоны; каждая из подсистем обладает индивидуальными теплофизическими свойствами, реализуемыми при взаимодействии этих подсистем в процессах теплообмена в ЗИГ. Две подсистемы считаются газообразными, ограждение ЗИГ имеет свойства твердого тела. Гомогенный факел при сжигании газообразного топлива, очевидно, имеет свойства газообразной среды, гетерогенные факела при сжигании твердого и жидкого топлива при строгой постановке описываются соотношениями механики взаимопроникающих континуумов; при рассмотрении основных зависимостей теплообмена в ЗИГ параметры гетерогенных факелов считаются заданными или известными.

Топочная среда считается однородной, имеющей одинаковую температуру  $T_T$  во всех точках ЗИГ. Состав топочной среды принимается по составу факельного континуума на выходе из ЗИГ, при необходимости уточнения состава возможен его расчет на основе либо поперечного, либо зональ-

ного методов. Кроме того, при уточнении конфигурации и ориентации факела можно применить расчет локальных циркуляционных потоков. По составу и температуре топочной среды определяются ее радиационные свойства, как будет показано ниже; при расчете свойств топочной среды вокруг гетерогенных факелов необходимо учитывать золотые частицы без учета механического недожога.

Свойства топочной среды, главным образом, степень черноты  $\epsilon_T$ , определяются в газообразной части содержанием  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , давлением и температурой  $T_T$  топочной среды, толщиной излучающего газового слоя  $l_{\text{зф}}$ . Степень черноты продуктов сгорания доменного, коксового, природного газов и их смесей при гомогенном горении относительно невелики  $\epsilon_T = 0,12 \dots 0,25$ .

Для повышения  $\epsilon_T$  в этом случае осуществляются карбюрация – в ЗИГ вместе с топливом, бедным углеводородами, или отдельными потоками подают в количестве 3...5 % по теплу топливо, богатое углеводородами, например, мазут или каменноугольную смолу (пек). При пиролизе углеводородов образуется большое количество, до  $10^9$  на  $\text{м}^3$ , мельчайших с диаметром 0,5...3,0 мкм частичек сажистого углерода, которые быстро прогреваются до  $T_T$  и сгорают, существенно повышая степень черноты газовой среды. Частицы сажи как твердые тела имеют сплошной спектр излучения в видимой и ближней инфракрасной частях спектра в отличие от полосчатого спектра газообразных излучателей, поэтому степень черноты газового потока возрастает в 3...4 раза. Эти особенности в большей степени относятся к факельной среде, при этом их

влияние на область топочного газа значительно меньше.

Факельная среда (факельный континуум) обменивается радиационными потоками с другими подсистемами в модели теплообмена как единое целое, но при этом температура и радиационные свойства факела переменны по его длине. Применяемые для синтеза математической модели теплообмена в ЗИГ характеристики факела должны усредняться по его длине. Так как факельный континуум является проницаемой средой для потоков излучения и обладает нулевым коэффициентом отражения, эффективным тепловым потоком следует считать не сумму отраженного и собственного излучения, как в случае с твердыми телами, а сумму пропущенного и собственного излучений. Эта характеристика пригодна только для системы, подобной ЗИГ котельных агрегатов, когда пропущенный поток попадает вновь в топочную среду, суммируясь с собственным излучением факельного континуума. Для разделения этих понятий рационально назвать эффективное излучение твердых тел рефлекторно-эффективным потоком, а эффективное излучение факельного континуума транспарентно-эффективным.

Особенности пылеугольного гетерогенного факела, относящегося к запыленным потокам или газодисперсным средам, – при прохождении радиационного потока часть излучения поглощается и рассеивается, то есть ослабляется не только газообразными компонентами, но и присутствующими в факеле твердыми и жидкими частицами. Закон Бугера в общепринятом изложении описывает изменение интенсивности лучистого теплового потока при прохождении им среды, характеризующейся коэффициентом ослабления  $k_{ос}$ , равном сумме коэффициентов поглощения  $k_{полг}$  и рассеяния  $k_{рас}$ :  $k_{ос} = k_{полг} + k_{рас}$ . Считая газообразную часть гетерогенного факела средой с нулевым рассеянием, можно записать  $k_{ос} = k_{полг} = A$ , и по закону Кирхгофа  $k_{ос} = \varepsilon_r$ . Тогда собственное излучение газообразной среды как серого тела по закону Стефана – Больцмана равно  $E = \varepsilon_r C_0 \theta_r^4$ , где  $C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ ,  $\theta_r = T_r/100$ , а внешнее излучение, падающее на границу газообразной среды, проходит через нее частично поглощенным  $E_{пр} = E_{пад}(1 - \varepsilon_r)$ .

Закон Бера устанавливает относительное ослабление потока излучения в дисперсной среде за счет изменения концентрации поглощающего вещества в этой среде  $\mu$ ,  $\text{г/м}^3$ , причем дисперсная часть представлена абсолютно черными сферическими частицами одинакового диаметра, подчиняющимися законам геометрической оптики. При этом оптическая толщина этого слоя оказывается равной  $Bu = 0,25 F_n \mu l_{эф}$ , где  $F_n$  – удельная свободная поверхность дисперсных частиц,  $\text{м}^2$ . Кроме того, эти соотношения строго справедливы для монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda$ ,  $\text{мкм}$ ;

с достаточной степенью достоверности допустимо применение закона Бера к модели серой среды, если полагать, что переход к серой среде с интегральными характеристиками совершен корректно.

В научной практике и при численных решениях обычно для газодисперсной среды применяется обобщенный закон Бугера – Бера, причем считается, что газовая и дисперсная части в отношении определения оптической толщины обладают свойством аддитивности, тогда

$$\varepsilon_{гд} = a_{гд} = 1 - \exp[-(Bu_r + Bu_d)]. \quad (1)$$

Оптические свойства газовой фазы, состоящей из  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , определяются по графикам Хоттеля – Тимофеева, эта же методика принята в Нормативном методе [1]; если топочные газы содержат  $\text{CO}$  и  $\text{SO}_2$ , то их доля учитывается в сумме с  $\text{CO}_2$ .

При сжигании различных топлив могут появиться значимые доли других газов, тогда при известных интегральных оптических свойствах этих газов  $\varepsilon_i$  их общая степень черноты определяется по формуле, также полученной на основе закона Бугера – Бера

$$\varepsilon_r = a_r = 1 - \prod_i (1 - \varepsilon_i). \quad (2)$$

В частности, для смесей  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  Гурвичем Л.Г. и Митром В.В. [2] рекомендуется аппроксимация, полученная на основе экспериментальных данных

$$Bu_r = (0,8 + 1,6 p_{\text{H}_2\text{O}})(1 - 0,00038T) \times (p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}})^{0,5} l_{эф}^{0,5}, \quad (3)$$

где учитываются парциальные давления  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

Оптические свойства дисперсной фазы в составе ЗИГ могут быть связаны с карбюрацией жидких или газообразных углеводородов, при этом рациональным значением, обеспечивающим максимальную степень черноты факела, является  $\mu l_{эф} = 0,8 \text{ г/м}^2$ , а при значении этой величины больше  $2,0 \text{ г/м}^2$  показатели эффективности использования топлива ухудшаются [2].

При сжигании пыли твердого топлива важно определить оптические свойства коксовых и золых частиц; здесь достаточно надежные данные дают аппроксимации Блоха А.Г. [3]:

$$\text{для частиц кокса при } \mu l_{эф} \leq 20 \text{ г/м}^2 \\ Bu_d = 0,04 T^{0,5} \mu \cdot l_{эф} / d_{cp}; \quad (4)$$

$$\text{для частиц золы при } \mu l_{эф} \approx 120 \text{ г/м}^2 \\ Bu_d = 0,015 \sqrt[3]{T/d_{cp}} \times \\ \times \left\{ 1 - 0,65 \sqrt[3]{1 + 10^3 / (\mu l_{эф})^2} \right\}. \quad (5)$$

В этих зависимостях  $d_{cp}$  – средний диаметр частиц,  $\text{мкм}$ ;  $T$  – температура той части среды, для которой ведется расчет,  $\text{К}$ . Для горящих частиц кокса существует возможность учесть изменение их концентрации в процесс выгорания через изменение  $\mu$ .

Факельный континуум имеет четко выраженные участки нагрева с возрастающей скоростью, связанной с вовлечением в процесс горения растущей массы топливно-воздушной смеси, и основного горения с постепенно снижающейся скоростью горения. Участки нагрева и основного горения разделены переходным участком, где скорость горения почти не меняется, оставаясь на достаточно высоком уровне. За изменением скорости горения следует температура факельного континуума  $T_{\text{ф}}$ , что в результате дает S-образную зависимость температуры от времени пребывания топливно-воздушной среды на соответствующем участке длины факела.

Гетерогенный факельный континуум представлен газодисперсным потоком, состоящим из статистического ансамбля дисперсных частиц, описываемого распределением Гаусса, и газообразной фазы. Пылеугольное топливо как статистический ансамбль дисперсных частиц характеризуется интегральной зерновой характеристикой  $R = \exp(-b_1 x^n)$ , где  $R$  – ситовой состав пыли в долях единицы,  $b_1$  – постоянный для данного типа оборудования коэффициент, характеризующий степень измельчения,  $n$  – показатель равномерности зернового состава топливной пыли. Аналогичные зависимости предложены для ансамбля капель жидкого топлива [4]. Применение методов математической статистики к характеристикам ансамбля частиц приводит к распределению стандартизованной нормальной величины (нормального отклонения)  $\varphi_n(u)$  от  $u = (x - \xi)/\sigma$  [5]:

$$\varphi_n(u) = (2\pi)^{-0.5} \exp(-0.5u^2), \quad (6)$$

где  $\xi$  – центр распределения Гаусса, а  $\sigma$  – его дисперсия. Сопоставив интегральную зерновую характеристику с (6), можно получить

$$\exp(-0.5u^2) = \exp(-b_1 x^n) = (2\pi)^{0.5} \varphi_n(u). \quad (7)$$

Таким образом, используя размытые характеристики для конкретного оборудования и топлива, можно с применением справочных данных определить интегральную функцию распределения тепловыделения при сгорании топлива в пылеугольном факеле

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{0.5}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-0.5(x - \xi)^2 / \sigma^2\right] dx. \quad (8)$$

Максимум содержания топливных частиц размера  $x$  дает максимум тепловыделения, а сам размер  $x_{\text{макс}}$  позволяет определить продольную координату этого максимума с учетом расширения струи. Эта схема позволяет учесть особенности каждого топлива по скорости прогрева частицы, выделения летучих и горения коксового остатка.

Аналогично частицам твердого топлива определяются характеристики распыленного жидкого топлива по распределению капель по размерам, их нагреву, испарению и выгоранию.

Гомогенный факельный континуум представлен совокупностью микрообъемов топливно-воздушной смеси, сформированной аэромеханическими процессами, с различной степенью стехиометричности. Структурно гомогенный факельный континуум включает параметры и факторы аэромеханического и теплообменного характера, которые формируют процесс горения топлива. Эти параметры ( $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$  и др.) и факторы ( $w$ ,  $Re$ ,  $T$  и др.) считаются аддитивными в отношении воздействия на аэромеханические, тепловые процессы и на горение топлива

Энтальпия по длине факела изменяется по причине вовлечения в процесс горения все большего количества пригодной для горения топливно-воздушной смеси в пределах нижнего и верхнего интервалов горения  $C_T^H \leftrightarrow C_T^B$ , расширения факела и выгорания топлива. Относительная избыточная концентрация топлива в объеме факела, выраженная в долях объема  $C_T$ , связана с унифицированной поперечной координатой  $Y_x = y/b_x$  зависимостью на основе теории Тейлора, дополненной отечественными исследованиями [5, 6],  $C_T = (1 - Y^{1.5})$ , где  $b_x$  – толщина пограничного слоя в начальном участке или полутолщина рассматриваемого сечения в основном участке факела. В сформированном процессами аэромеханики объеме топливо сгорает только в той части, которая соответствует пределам горения – нижнему  $C_T^H$  и верхнему  $C_T^B$ , причем энтальпия образовавшихся продуктов реакции определяется концентрацией топлива  $C_T$  и имеет максимум при стехиометрическом составе  $i_{\text{гор}}^{\text{макс}} \sim C_T^{\text{ст}}$ . Переход от начального участка факела к основному вызывает перемещение полюса струи вниз по потоку на  $\Delta l_x = 9,295R_0$ , что в сочетании с уравнением сплошности приводит к расширению основного участка, причем между начальным и основным участками находится переходный, где  $Y_{\text{НУ}} \approx Y_{\text{осн}}$ . Расширение зоны смешения в 2,753 раза увеличивает площадь, охваченную горением без изменения концентрационных пределов [6, 7].

Энтальпия горения  $i_{\text{гор}}$  по ходу потока суммируется как внешний источник к энтальпии горения в данном сечении, создавая интегральную продольную энтальпию для каждого конического сечения при рассмотрении осесимметричного факела с центральным углом раскрытия  $\varphi_i$ ; эти соотношения основаны на адаптации задачи Бурке – Шумана к зоне интенсивного горения КА, аналогично решается задача для плоского факела.

В соответствии с этими представлениями энтальпия горения в плоскости с координатой  $x$  рассчитывается по зависимости

$$i_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{н}}^p \left( C_{\text{в}}^{\text{отн}} \right)_{\text{нед}}}{V_{\text{пс}}^0 + \left[ \left( C_{\text{в}}^{\text{отн}} \right)_{\text{изб}} - 1 \right] V_{\text{в}}^0 + \left[ 1 - \left( C_{\text{в}}^{\text{отн}} \right)_{\text{нед}} \right] V_{\text{в}}^0}. \quad (9)$$

В зависимости (9) факторы изменения концентрации воздуха (окислителя) в смеси изменя-

ются в следующих пределах: для области недожога (недостатка воздуха)  $1,0 > (C_{\text{в}}^{\text{отн}})_{\text{нед}} > 0$ ,  $(C_{\text{в}}^{\text{отн}})_{\text{изб}} = 1,0$ ; для области (поверхности) стехиометрических соотношений  $(C_{\text{в}}^{\text{отн}})_{\text{нед}} = 1,0$ ,  $(C_{\text{в}}^{\text{отн}})_{\text{изб}} = 1,0$ ; для области избыточного воздуха  $(C_{\text{в}}^{\text{отн}})_{\text{нед}} = 1,0$ ,  $(C_{\text{в}}^{\text{отн}})_{\text{изб}} > 1,0$ . Относительные концентрации воздуха в смеси связаны с относительными концентрациями газообразного топлива  $(C_{\text{в}}^{\text{отн}}) = 1 - (C_{\text{т}}^{\text{отн}})$ ; поверхность стехиометрических соотношений, определяемая расчетом горения конкретного топлива, разделяет в пространстве факельного континуума области недостатка и избытка воздуха.

Существенная роль в теплообмене в ЗИГ принадлежит ограждению зоны, несмотря на то, что ограждение является посредником в переносе теплоты. Можно полагать, что в интегральной постановке задачи о теплообмене в ЗИГ роль ограждения можно оценить введением оптико-геометрического углового коэффициента  $\varphi_{\text{ог.ф}} = F_{\text{ф}}/F_{\text{ог}}$ . При более уточненной постановке задачи необходимо учитывать, что участки ограждения, примыкающие к высокотемпературному участку факельного континуума, будут иметь более высокую температуру, чем участки при начальных областях факела. Чтобы это определить, необходимо применить зональный метод расчета теплообмена в ЗИГ, что является более сложной задачей. Интегральная постановка позволяет производить оценку роли ограждения с применением известных и достаточно проверенных методов учета размеров и радиационных свойств ограждения [8]. При этом температура ограждения занимает промежуточное положение между температурами топочных газов и факела.

В системе ЗИГ необходимо определить границы подсистем или модулей – топочной среды, факельного континуума и ограждения, для них необходимо выделить геометрические размеры и ориентацию в пространстве и определить входные и выходные параметры-факторы. Относительно ограждения, которое как модуль обладает определенной автономностью, эта задача решается достаточно конкретно при задании типа КА, его конструкции, вида топлива и его характеристик, конструкции экранов в части ЗИГ, наличия зажигательного пояса и шлаковой пленки и других факторов. Входными факторами влияния ограждения на теплообмен в ЗИГ являются условия подвода конвективного и радиационного тепловых потоков к поверхности ограждения, выходными – рефлекторно-эффективный радиационный тепловой поток и конвективная теплоотдача в ЗИГ.

Граница между факельным континуумом и топочной средой в некоторой степени обладает пространственно-временной неоднозначностью, связанной с конструкцией и тепловым и аэромеханическим режимами работы горелок, асимптотическим характером процессов обмена теплотой и

массой. В этих условиях определяющим критерием становится цель научно-технической разработки, в данном случае целью является создание математической модели теплообмена в ЗИГ, поэтому на базе существующих принципов конструирования горелок и котельных агрегатов, экспериментальных данных о распределении температуры и состава газовой фазы в факеле выделяется с допустимой погрешностью граница между факельным континуумом и топочной средой. Форма факела и его границы зависят от компоновки и конструкции горелочных устройств: у прямоточных горелок одна внешняя граница, у вихревых – две границы, одна внешняя, другая внутренняя.

Развитие в топочном пространстве факелов вихревых горелок отличается большей интенсивностью процессов смешения компонентов горения и большим углом раскрытия при меньшей длине факела. Аэромеханические характеристики, в основном осевая и тангенциальная составляющие вектора скорости, определяются интегральным параметром крутки [9], а внешняя и внутренняя границы факела с применением унифицированной поперечной координаты  $Y^{1,5}$  позволяет применить теорию Тейлора для определения концентрационных и температурных полей. В работе Рослякова П.В. [10] достаточно подробно и аргументировано дается анализ влияния конструкции горелок и зоны интенсивного горения котельных агрегатов на эмиссию токсичных выбросов. Этот анализ позволяет определить размеры ЗИГ и роль газообразных сред в теплообмене без выделения факельного континуума.

### Выводы

1. Разработанная методика разделения системы ЗИГ на элементы позволяет решить задачи теплопереноса в рамках концепции факельного континуума.

2. Декомпозиция системы ЗИГ с выделением гетерогенного и гомогенного факельного континуума объясняет наблюдаемый на практике эффект S-образного изменения температуры по длине факела, связанный с объемной плотностью тепловыделения при горении топлива, что создает предпосылки для управления локальной температурой факела.

3. Совокупность сформулированных соотношений коррелируется с уравнениями сохранения субстанций в части подтвержденных практикой зависимостей аэромеханического, массообменного и теплового характера, что говорит о достоверности основных теоретических положений данной работы.

### Литература

1. *Тепловой расчет котлов. Нормативный метод / АООТ «НПО ЦКТИ»; АООТ «ВТИ». – Изд. 3-е. – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.*

2. Телегин, А.С. Теплообмен / А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.
3. Блох, А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов / А.Г. Блох. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 306 с.
4. Ахмедов, Р.Б. Технология сжигания газа и мазута в парогенераторах / Р.Б. Ахмедов, Л.М. Цирульников. – Л.: Недра, 1976. – 272 с.
5. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
6. Вулис, Л.А. Аэродинамика факела / Л.А. Вулис, Л.П. Ярин. – Л.: Энергия, 1978. – 216 с.

7. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
8. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов / АООТ «НПО ЦКТИ», ВТИ; под ред. Э.Х. Вербовецкого, Н.Г. Жмерика. – СПб., 1996. – 268 с.
9. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
10. Росляков, П.В. Методы защиты окружающей среды: учеб. для вузов / П.В. Росляков. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007. – 336 с.

**Торопов Евгений Васильевич**, профессор, д-р техн. наук, профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет; toropovev@susu.ac.ru.

**Осинцев Константин Владимирович**, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет; osintcevk@susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 29 июня 2015 г.

DOI: 10.14529/power150301

## THE CONCEPT OF THE FLAME CONTINUUM FOR ZONE OF INTENSE BURNING OF BOILER UNIT

*E.V. Toropov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, toropovev@susu.ac.ru, K.V. Osintsev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, osintcevk@susu.ac.ru*

The problem of the decomposition for zone of intense burning of boiler unit is formulated in this paper. The rational scheme for solving the problem within the concept of the continuum of flame is proposed in this article. That allowed us to consider basic laws of heat transfer and aerodynamics at the bottom of the firebox of the boiler unit. The main features of the three elements of the scheme (the furnace environment, flame continuum and the enclosure of intensive burning) are defined with taking into account the definition of the boundaries between them. Characteristics of the furnace medium and fencing determined using accepted methods for calculating. The properties of the flame continuum are adapted to a heterogeneous flame on burning solid and liquid fuel. Furthermore, the task of determining the enthalpy is solved in one-dimensional formulation. When burning gaseous fuel the processes of aerodynamics are an important factor. In this case, the homogenous flame continuum is considered in a two-parameter formulation. A common characteristic of the combustion of fuels in three states of aggregation is a temperature distribution along the length of the flame. That allows us to consider heat transfer processes in each zone.

*Keywords: furnace, flame continuum, furnace medium, fencing of the furnace, enthalpy.*

### References

1. *Teplovoy raschet kotlov. Normativnyy metod* [Thermal Design of the Boilers. Standard Method]. Saint-Petersburg, NPO TSKTI – VTI, 1998. 256 p.
2. Telegin A.V., Shvydkiy V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplo-massoperenos* [Heat and Mass Transfer]. Moscow, IKTS Akademykniga, 2002. 455 p.
3. Blokh A.G. *Teploobmen v topkakh parovykh kotlov* [Heat Transfer in the Furnaces of Steam Generators]. Leningrad, Energoatomizdat, 1984. 306 p.
4. Akhmedov R.B., Tsyurulnikov L.M. *Tekhnologiya szhiganiya gaza i mazuta v parogeneratorakh* [Combustion Technology of Natural Gas and Fuel Oil]. Leningrad, Nedra, 1976. 272 p.

5. Korn, G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka, 1968. 720 p.
6. Vulis L.A., Yarin L.P. *Aerodinamika fakela* [Aerodynamics of the Flame]. Leningrad, Energiya, 1978. 216 p.
7. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Liquid and Gas Mechanics]. Moscow, Nauka, 1978. 736 p.
8. Verbovetskiy E.Kh., Zhmerik N.G. *Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu topochnykh ustroystv energeticheskikh kotlov* [Guidelines for the Design of Furnaces of Industrial Boilers]. Saint-Petersburg, AOOT NPO TSKTI – VTI, 1996. 268 p.
9. Pomerantsev V.V., Aref'ev K.M., Akhmedov D.B. et al. *Osnovy prakticheskoy teorii goreniya* [Fundamentals of Practical Combustion Theory]. Leningrad, Energoatomizdat, 1986. 312 p.
10. Roslyakov P.V. *Metody zashchity okruzhayushchey sredy: uchebnik dlya vuzov* [Methods of Protection of the Environment: a Textbook for High Schools]. Moscow, MEI Publ., 2007. 336 p.

*Received 29 June 2015*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Торопов, Е.В. Концепция факельного континуума для зоны интенсивного горения котельного агрегата / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 5–10. DOI: 10.14529/power150301

### FOR CITATION

Toropov E.V., Osintsev K.V. The Concept of the Flame Continuum for Zone of Intense Burning of Boiler Unit. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 5–10. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150301

---