

УДК 621.181:519.876

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗБЫТКА ПЕРВИЧНОГО ВОЗДУХА НА ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА С МНОГОКАНАЛЬНЫМИ ВИХРЕВЫМИ ГОРЕЛКАМИ

Гиль Андрей Владимирович<sup>1</sup>,  
andgil@tpu.ru

Заворин Александр Сергеевич<sup>1</sup>,  
zavorin@tpu.ru

Кокшарев Олег Максимович<sup>1</sup>,  
omk2@tpu.ru

Воронцова Елена Сергеевна<sup>1</sup>,  
ves@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью поиска оптимальных решений по организации сжигания полифракционного пылеугольного топлива на действующих и новых тепловых электрических станциях с учетом снижения выбросов вредных веществ, в частности оксидов азота. За последнее десятилетие значительно выросли экологические требования, направленные на регулирование выбросов от угольных электростанций в атмосферу, которые были спроектированы в целях повышения тепловой эффективности. В настоящее время проблема совершенствования экологических параметров ТЭС в России обостряется тем, что большинство действующих станций не удовлетворяют современным экологическим нормам и требованиям.

**Цель:** установить влияние организации сжигания твердого топлива на топочные процессы при минимальной возможной модернизации действующего парового котла с использованием низкоэмиссионных горелочных устройств.

**Объекты:** топочная камера энергетического котла в проектной реализации и в варианте с заменой проектных горелочных устройств на низкоэмиссионные.

**Методы.** Численное исследование проведено с использованием пакета прикладных программ Ansys Fluent v.12.1. Математическое моделирование физико-химических процессов в топочной камере на основе Эйлера–Лагранжева подхода, который позволяет выявить главные взаимодействия процессов переноса частиц. Математические модели горения угольной пыли с кинетическими параметрами заданы и включены в код в качестве пользовательских функций.

**Результаты.** Разработана математическая модель на основе пакета прикладных программ с качественным представлением сложных физико-химических процессов в объеме топочной камеры. Дана оценка возможности организации сжигания каменного угля в низкоэмиссионных горелочных устройствах с учетом оптимального соотношения первичного и вторичного воздуха без изменения установочных углов лопаточных завертителей. В данном исследовании установлено снижение концентрации оксидов азота на 14 % при замене проектных двухканальных вихревых горелочных устройств на низкоэмиссионные.

### Ключевые слова:

Энергетический котел, вихревые горелочные устройства, уголь, математическое моделирование, метод Эйлера–Лагранжа.

### Введение

В котельных агрегатах в процессе сгорания ископаемого топлива образуются вредные загрязняющие вещества, которые выбрасываются в атмосферу, оказывая негативное влияние на биосферу и способствуя глобальному потеплению. Хотя при генерации энергии из ископаемых топлив суммарный объем выбросов парниковых газов составляет 25 % от общего объема их выбросов [1], развитые страны ставят задачи по снижению использования ископаемых топлив, в особенности углей, посредством развития и вовлечения возобновляемых источников энергии. Но поскольку уголь является наиболее распространенным энергетическим топливом и его запасы самые большие в мире, во многих странах высока доля выработки энергии с использованием пылеугольных котлов [2]. Доля тепловых электростанций, работающих на угле, в мире составляет 41 %, в Китае – 75 %, в США – 50 % [3, 4], а в России 24 % [5]. Несмотря на

то, что базовая технология организации факельного сжигания твердого топлива в котельных агрегатах разработана еще в прошлом веке, ряд проблем остаются нерешенными. К ним относятся неустойчивость горения, шлакование, высокотемпературная коррозия, неполнота сгорания топлива, выбросы золы,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  и др. Для успешного решения подобных проблем очень важно понимание газодинамических процессов, определяющих распределения температур, концентраций горючих веществ и продуктов сгорания в объеме топочной камеры энергетического котла. При этом названные процессы зависят от конструкции топочной камеры, типа горелочных устройств и схемы организации сжигания, что не позволяет в значительной мере транслировать результаты исследований, полученных на одном котельном агрегате из типового ряда, на аналогичные. Поэтому использование методов численного моделирования является важнейшим инструментом для изучения процессов, про-

исходящих в топочных камерах котельных агрегатов, в особенности при вариантных исследованиях.

С учетом ужесточения экологических требований также важно оптимизировать работу энергетических котлов на действующих ТЭС [5–7]. В частности, в мировой практике широко используются такие технологии, как сжигание твердого топлива в потоке кислорода [8, 9], низкотемпературном циркулирующем кипящем слое [10], ступенчатое и нестехиометрическое сжигание [11], а также использование малоэмиссионных горелочных устройств [12], мокрая и сухая десульфатизация дымовых газов, селективное каталитическое и некаталитическое восстановление. Чтобы уменьшить загрязнение окружающей среды, разрешенные выбросы  $\text{NO}_x$  от электростанций были директивно снижены во многих странах. Например, в Европейском Союзе допустимая концентрация выбросов для электростанций мощностью более 500 МВт составляет 200 мг  $\text{NO}_x/\text{нм}^3$  при 6 %  $\text{O}_2$  [13]. В Китае установлены аналогичные строгие экологические требования [14]. В России количественные значения удельных выбросов загрязняющих веществ более высокие, но тенденция направлена на достижение уровня выбросов, как в развитых странах [6]. Так, наименьшая массовая концентрация  $\text{NO}_x$  в дымовых газах при нормальных условиях и концентрации  $\text{O}_2$  6 % для котельных установок на твердом топливе, введенных в эксплуатацию до 31 декабря 2000 г., составляет 320 мг/м<sup>3</sup>, а для введенных в эксплуатацию после 31 декабря 2000 г. – 300 мг/м<sup>3</sup> при паропроизводительности до 420 т/ч. С увеличением паропроизводительности значение массовой концентрации  $\text{NO}_x$  также возрастает. К сожалению, большинство ТЭС на твердом топливе, действующих в России, не удовлетворяют требованиям, предъявляемым ГОСТ Р 55173-2012 [5].

В связи с вышеизложенным актуальны работы, связанные со снижением вредных выбросов от ТЭС в окружающую среду при организации сжигания пылеугольного топлива с учетом обеспечения полноты выгорания топлива, стабильности горения, равномерности распределения тепловых потоков и отсутствия шлакования.

При организации сжигания топлив невысокого качества или с низким выходом летучих веществ в вихревых горелочных устройствах сложно соответствовать предъявляемым требованиям по массовой концентрации оксидов азота в связи с направленностью данной технологии сжигания на формирование высокотемпературного ядра горения. Одним из простых и относительно недорогих методов снижения генерации  $\text{NO}_x$  является применение малоэмиссионных горелочных устройств, которые также можно сочетать и с другими технологиями снижения выбросов  $\text{NO}_x$  [15]. В малоэмиссионных вихревых горелках реализуется ступенчатое сжигание топлива в пределах факела горелки посредством многоканальности, что приводит к снижению генерации  $\text{NO}_x$  [16]. Но при этом возможно увеличение недожога топлива, увеличение длины факела, а также изменение протекания физико-химических процессов в топочном объеме, что может

негативно отразиться на эффективности и надежности работы котельного агрегата в целом.

Для проведения подобных исследований в настоящее время наиболее целесообразно применять методы численного моделирования. Вычислительная гидродинамика позволяет обеспечить всестороннее рассмотрение информации в широком спектре для оптимизации и улучшения процессов горения, эффективности эксплуатации котла при сокращении стоимости затрат и времени в отличие от экспериментального исследования [17–19]. Наиболее распространенными подходами к моделированию с точки зрения экономичности и достаточной точности для подобного рода исследований является применение  $k-\varepsilon$  модели турбулентности [20–22], Эйлера–Лагранжева подхода для моделирования газовых потоков с наличием твердых частиц [23, 24] и P1-модели для расчета радиационного теплообмена [25].

В данной работе проведены вариантные численные исследования топочных процессов при сжигании экибастузского угля в топочной камере котельного агрегата паропроизводительностью 420 т/ч применительно к замене двухканальных вихревых горелок на низкоэмиссионные четырехканальные. Необходимость проведения вариантных исследований связана с оптимизацией отношения доли первичного и вторичного воздуха к теоретически необходимому, которая достигается посредством варьирования соотношения скоростей топливно-воздушной смеси и вторичного воздуха, выходящего через каналы низкоэмиссионной горелки. С целью анализа оптимальных соотношений приняты два варианта с разной долей первичного воздуха (0,18 и 0,25) при общем коэффициенте избытка воздуха 1,2. Кроме того, представлены результаты при организации сжигания топлива по варианту с проектным исполнением горелочных устройств (с долей первичного воздуха 0,2).

#### Объект исследования и эксплуатационные параметры

Объект исследования представлен в виде котла с Т-образной компоновкой (рис. 1). Топка открытого типа с твердым шлакоудалением. Экраны камеры выполнены из жаропрочных труб диаметром 60 мм и шагом 64 мм [26]. Геометрические размеры верхней части топки составляют 15744×3776 мм, нижней – 15744×9024 мм.

Двенадцать пылеугольных горелок расположены на боковых стенках в один ряд по шесть штук друг напротив друга с поочередной левой и правой круткой (рис. 2, а). В конструкцию горелок входят мазутные форсунки для обеспечения растопки котла.

С целью снижения генерации оксидов азота предложено установить в те же амбразуры низкоэмиссионные вихревые горелочные устройства (рис. 2, б). Центральный канал – мазутная форсунка. Концентрично к нему канал подачи топливно-воздушной смеси и последующие три канала для ввода вторичного воздуха. Диаметры соответственно 209, 490, 670, 833, 1015 мм. При этом оси горелок соответствуют расположению горелочных устройств в базовом варианте – на отметке 6564 мм от устья холодной воронки.

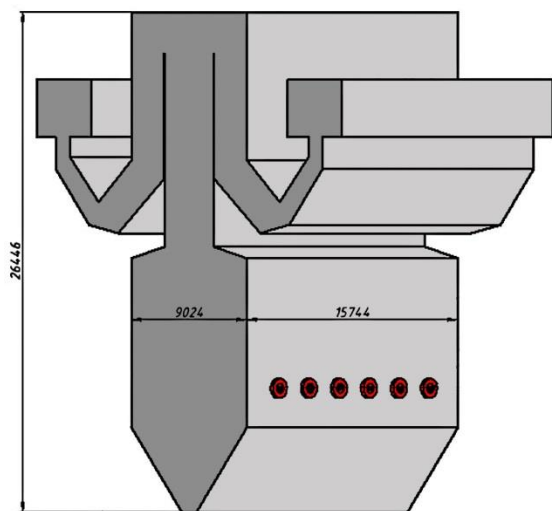


Рис. 1. Геометрическая модель топочной камеры

Fig. 1. Geometrical model of the boiler furnace chamber

Рассматриваемый экибастузский уголь обладает специфическими теплотехническими свойствами. В сочетании с низкой взрывоопасностью, малой сернистостью, хорошей сыпучестью и низкой влажностью имеет высокую зольность, которая находится в диапазоне  $A^r=32,9...41,9$  % и может даже превышать 50 %. При этом большое содержание оксида кремния ( $SiO_2=59...64$  %). Вследствие высокой абразивности золы принимается Т-образная компоновка топочной камеры.

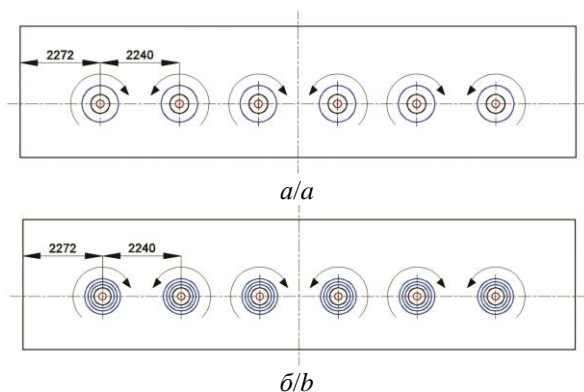


Рис. 2. Схема размещения горелок с направлением вращения: а) проектных горелок; б) малоэмиссионных горелок

Fig. 2. Scheme of burners with a marked swirl direction: a) design burners; b) low emission burners

#### Математическая модель

При моделировании топочных процессов в пылеугольных котельных агрегатах дополнительную сложность вносит двухфазный характер потока. Поэтому принят Эйлерово–Лагранжев подход, позволяющий детально просчитывать траектории движения отдельных частиц во всем топочном объеме. Соответственно траектория движения частиц угля описывается моделью дискретных фаз. Силы, действующие на топливную частицу при ее движении в газовом потоке, являются силами сопротивления и силами тяжести. Предполагается, что все частицы являются сферическими.

Уравнение движения частиц записывается в виде:

$$\frac{\partial \bar{u}_p}{\partial t} = F_D \cdot (\bar{u} - \bar{u}_p) + \frac{\bar{g} \cdot (\rho_p - \rho)}{\rho_p},$$

где  $\bar{u}_p$  – вектор скорости частиц угля;  $\bar{u}$  – вектор скорости газового потока;  $F_D$  – сила сопротивления на единицу массы частицы;  $\rho_p$  – плотность частиц угля;  $\rho$  – плотность газового потока.

Трехмерное течение потока газа описывается системой уравнений Навье–Стокса, усредненных по Рейнольдсу, которая состоит из уравнений сохранения массы, импульса, энергии.

Параметры турбулентности определяются с использованием  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности [27, 28]. Данная модель основана на решении уравнений переноса для турбулентной кинетической энергии ( $k$ ) и скорости турбулентной диссипации ( $\varepsilon$ ).

Для турбулентной кинетической энергии:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \cdot \varepsilon - Y_M + S_k.$$

Для рассеивания:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon.$$

Здесь  $u_i$  – компонент скорости в соответствующем направлении;  $\mu$  – вязкость газового потока;  $\mu_t$  – турбулентная (вихревая) вязкость;  $G_k$  – генерация кинетической энергии турбулентности за счет градиентов средней скорости;  $G_b$  – генерация кинетической энергии турбулентности за счет плавучести;  $Y_M$  – флуктуационная дилатация в сжимаемой турбулентности в общую скорость рассеивания;  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$  – константы модели турбулентности;  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  – турбулентные числа Прандтля для кинетической энергии и скорости диссипации;  $S_k$ ,  $S_\varepsilon$  – энthalпии.

Для правильного прогнозирования формы и температуры пламени принята точная и эффективная в вычислительном отношении P1 модель переноса теплового излучения. Качественное прогнозирование загрязняющих веществ, таких как оксиды азота, также зависит от правильности расчета теплового излучения. В данной модели газ принимался как серое тело. Поток излучения описывается уравнением:

$$q_f = -\frac{1}{3 \cdot (a + \sigma_s) - C \sigma_s} + \nabla G,$$

где  $a$  – коэффициент поглощения;  $\sigma_s$  – коэффициент рассеивания;  $C$  – линейно-анизотропный коэффициент фазовой функции;  $G$  – падающее излучение.

Уравнение переноса для падающего излучения выглядит следующим образом:

$$\nabla \cdot (I \nabla G) - aG + an^2 \sigma T^4 = S_G,$$

где  $n$  – показатель преломления среды;  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана;  $S_G$  – определяемый источник излучения.

При расчете согласованных полей скорости и давления применялась процедура SIMPLE. Численное моделирование выполнено с использованием коммерческого пакета прикладных программ ANSYS FLUENT.

### Результаты исследования

Для получения качественной картины результатов исследования топочный объем разбит на 2167745 ячеек, со сгущением на уровне горелочных устройств.

При натурном исследовании температура по вертикали топки была измерена с использованием оптического и акустического пирометров через специально подготовленные отверстия в стенках топки. Измерения оптическим пирометром проводились на четырех уровнях: 6,841, 10,291, 13,591 и 20,191 м от устья холодной воронки, а на уровне 23,491 м температура измерялась с использованием акустического пирометра. Численные значения температуры представлены по центральной оси топочной камеры, отстоящей на 2,272 м от фронтальной стены. Как представлено на рис. 3, измеренные и рассчитанные значения температуры имеют небольшое рассогласование в нижней части топки, но в целом хорошо согласуются количественно и качественно. Таким образом, принятая модель позволяет получить достаточно точные представления о фактических характеристиках процессов горения угля в топке исследуемого котла.

Результаты исследования аэродинамической структуры потока представлены на рис. 4, 5. Согласно используемой технологии организации сжигания топливно-воздушная смесь поступает в центральную часть горелок, а вторичный воздух – в периферийные каналы. Несмотря на увеличение количества каналов для подачи вторичного воздуха в вариантах с низкоэмиссионными горелками (рис. 4, б, в; рис. 5, б, в) и обусловленные этим перераспределения объемов воздуха по каналам, в отличие от проектного варианта (рис. 4, а; рис. 5, а), распространение соосназакру-

ченных горелочных струй не имеет существенных отличий. На выходе из горелочных устройств закрученные соосные потоки топлива и воздуха движутся со скоростью примерно 22 м/с.

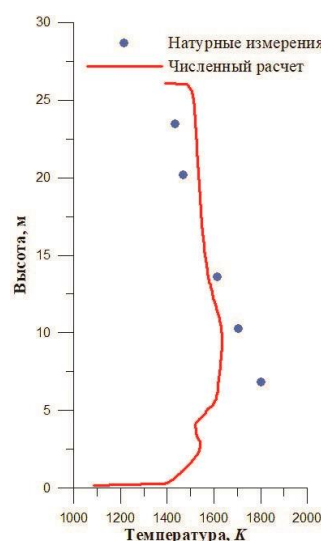


Рис. 3. Сравнение результатов численного моделирования и натурных измерений температуры по высоте топочной камеры

Fig. 3. Comparison of the simulated and measured temperature profiles along the furnace height

В верхней части топочного объема, в области его сужения (рис. 4), скорости возрастают и в среднем составляют 12 м/с во всех вариантах. В нижней части топочного объема имеются отличия, связанные с изменениями начальных значений скоростей ввода первичного и вторичного воздуха. Это наиболее отчетливо видно на рис. 5. Средние значения скоростей по объему топки составляют 7–8 м/с. Сравнивая результаты вариантных численных расчетов аэродинамической структуры потока, можно отметить более низкие значения скоростей (на 2–3 м/с) при увеличении доли первичного воздуха до 0,25.

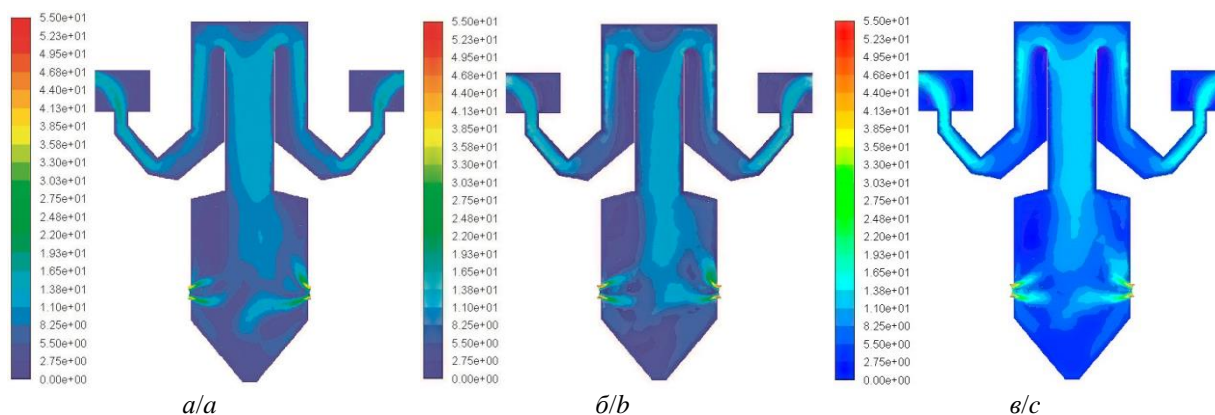
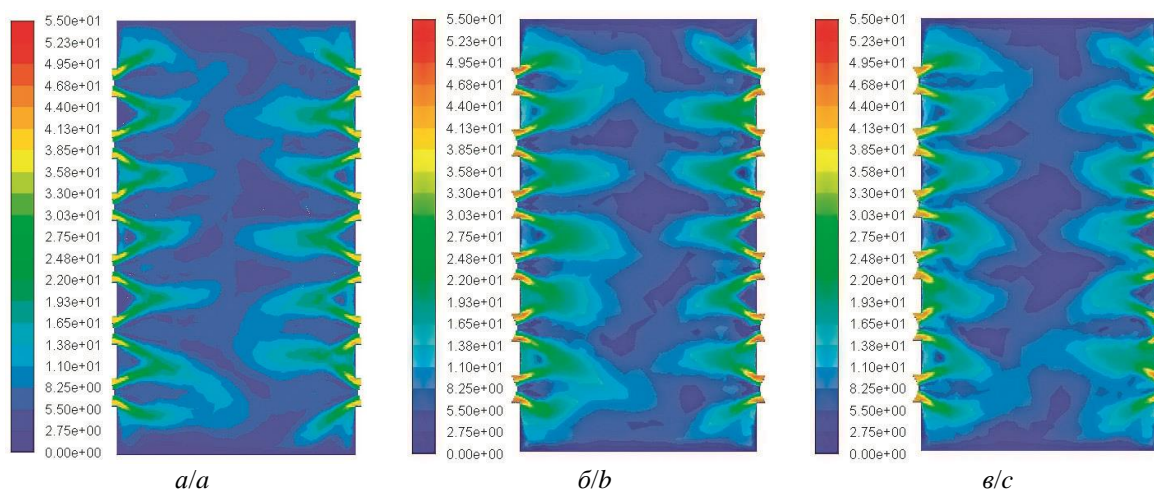


Рис. 4. Распределение скоростей (м/с) по высоте топочной камеры ( $z=2,272$  м): а) проектный вариант; б) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,18; в) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,25

Fig. 4. Velocity distribution (m/s) in the height of the furnace section ( $z=2,272$  m): а) design variant; б) low emission burners with a share of primary air of 0,18; в) low emission burners with a share of primary air of 0,25





**Рис. 5.** Распределение скоростей (м/с) в горизонтальном сечении топочной камеры ( $y=6,564$  м): а) проектный вариант; б) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,18; в) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,25

**Fig. 5.** Velocity distribution (m/s) in the horizontal of the furnace section ( $y=6,564$  m): а) design variant; б) low emission burners with a share of primary air of 0,18; в) low emission burners with a share of primary air of 0,25

Распределение температур в вертикальном сечении по оси горелочных устройств представлено на рис. 6. Области с максимальными значениями температур располагаются на уровне горелочных устройств, а ядро горения занимает пространство от 4 до 13 м по высоте топочной камеры. Наиболее теплонпряженным представляется сечение при проектной компоновке горелочных устройств (рис. 6, а), при которой максимальное значение температур составляет 1700 К, а на выходе из топочной камеры 1500 К. При установке низкоэмиссионных горелочных устройств тепловое напряжение топочного объема снижается, в частности, на выходе из топки значения составляют 1300 и 1290 К (рис. 6, б, в).

При рассмотрении горизонтальных сечений на уровне расположения вихревых горелочных устройств высокотемпературная зона равномерно заполняет все сечение относительно центральной оси (рис. 7). На рис. 7, а, б отчетливо наблюдаются эжекционные зоны в центральных частях пригорелочного пространства, что способствует интенсификации прогрева топливно-воздушной смеси и увеличению скорости воспламенения. При увеличении доли первичного воздуха до 0,25 эжекционные центральные зоны с подводом высокотемпературных продуктов сгорания в соосназакрученных горелочных струях наблюдаются в горелках, расположенных вблизи боковых стен. При этом в приосевой части топочного объема эжекция высокотемпературных продуктов сгорания существенно ниже (рис. 7, в). Таким образом, во внутренней зоне раскрытия вихревого факела процесс воспламенения и выгорания топлива имеет более низкую интенсивность.

Если аксиальные значения скоростей на расстоянии 250 мм от амбразуры горелочных устройств имеют схожий профиль и близкие абсолютные значения по всем горелочным устройствам (рис. 8, а), то аналогичные значения температур наблюдаются в струях крайних горелочных устройств, а в остальных

они существенно различаются в приосевых зонах топки (рис. 8, б). Уровень температур в проектном (базовом) варианте в зоне эжекции достигает 1400 К, а в вариантах с низкоэмиссионными горелками с долей первичного воздуха 0,18 составляет 1200 К, и 450 К с долей первичного воздуха 0,25. Можно видеть, что в последнем варианте на удалении 250 мм от устья горелок значение температур в эжекционной области соответствует температуре первичного воздуха. Таким образом, с увеличением доли первичного воздуха ухудшается воспламенение и выгорание частиц, распространяющихся в пространственном слое с максимальной скоростью и концентрацией. Это обусловлено слабым воздействием высокотемпературных эжекционных потоков. В связи с тем, что в данной области распространяется основная масса пылеугольных частиц, прогревом именно этих слоев определяется скорость развития пламени по всему поперечному сечению топливно-воздушной смеси.

Изменение температуры, концентрации  $O_2$  и  $NO_x$  по высоте поперечной оси топочной камеры ( $z=2,272$  м), представлено на рис. 9. Во всех вариантах в данной траектории градиент изменения температур незначителен (рис. 9, а). Температурный уровень с максимальными значениями температур наблюдается при горении экибастузского угля с применением двухканальных вихревых горелочных устройств (базовый вариант), чему соответствует более высокая концентрация  $NO_x$  (рис. 9, в). Использование четырехканальных низкоэмиссионных горелочных устройств приводит к снижению уровня температур (примерно на 200 К), что соответствующим образом отражается на снижении генерации  $NO_x$ . Вместе с тем при организации сжигания экибастузского угля в низкоэмиссионных горелках наблюдается повышение содержания  $O_2$ , что свидетельствует о неполноте выгорания топлива и соответствующем влиянии на уровень температур и концентрацию  $NO_x$ .

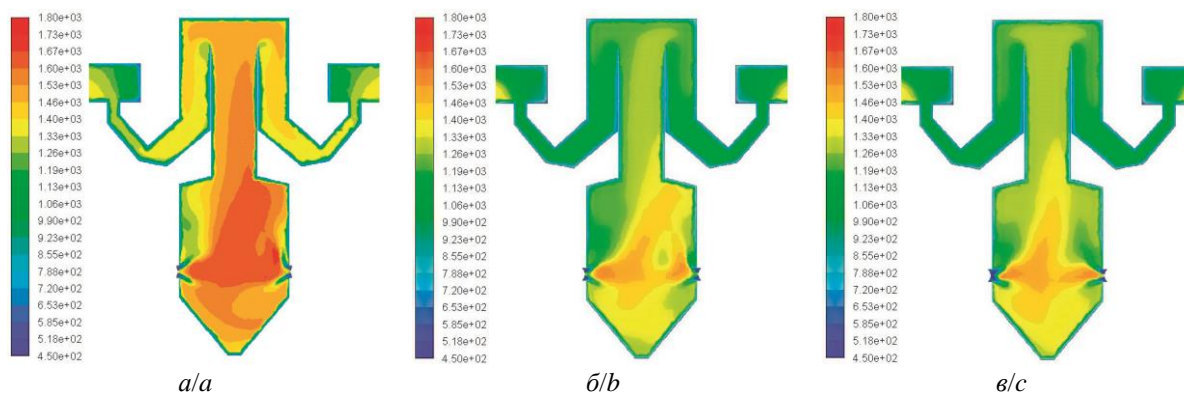


Рис. 6. Распределение температур (K) по высоте топочной камеры ( $z=2,272$  м): а) проектный вариант; б) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,18; в) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,25

Fig. 6. Temperature distribution (K) in the height of the furnace section ( $z=2,272$  m): design variant; b) low emission burners with a share of primary air of 0,18; c) low emission burners with a share of primary air of 0,25

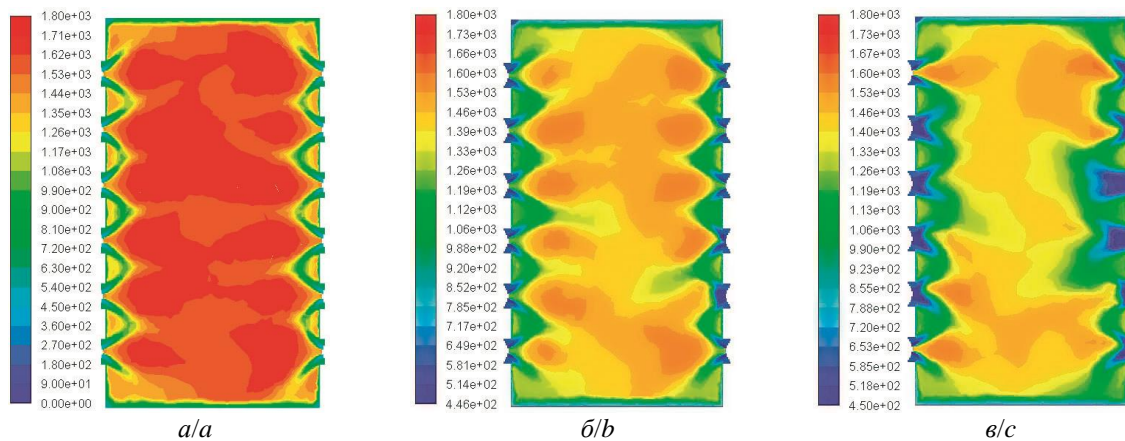


Рис. 7. Распределение температур (K) в горизонтальном сечении топочной камеры ( $y=6,564$  м): а) проектный вариант; б) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,18; в) низкоэмиссионные горелки с долей первичного воздуха 0,25

Fig. 7. Temperature distribution (K) in the horizontal section of the furnace section ( $y=6,564$  m): design variant; b) low emission burners with a share of primary air of 0,18; c) low emission burners with a share of primary air of 0,25

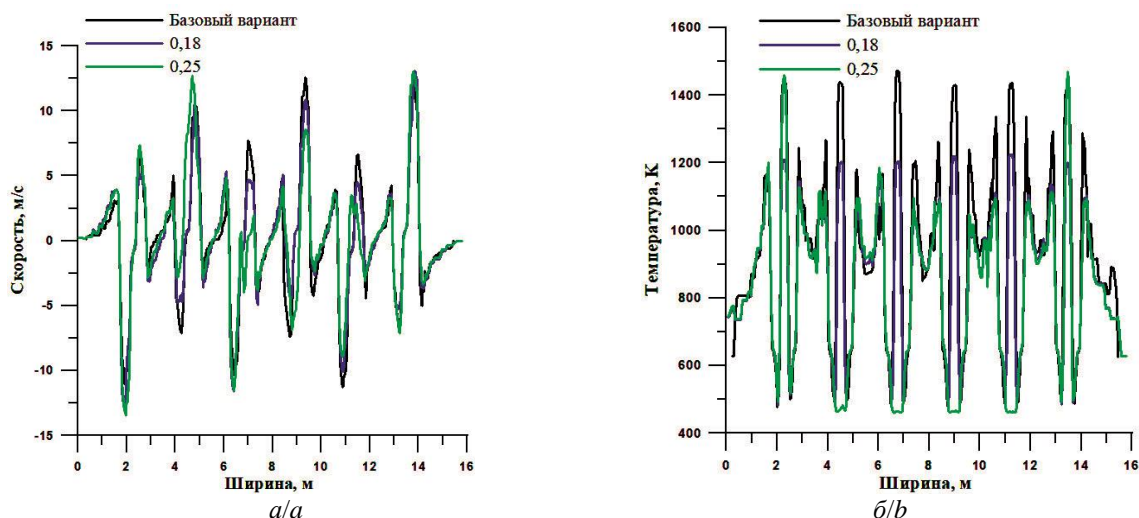


Рис. 8. Характеристики топочной среды вдоль боковой стены на расстоянии 250 мм от амбразуры горелок: а) аксиальная скорость (м/с); б) температура (K)

Fig. 8. Characteristics of the combustion medium along the side wall at a distance of 250 mm from the burners: a) axial velocity (m/s); б) temperature (K)

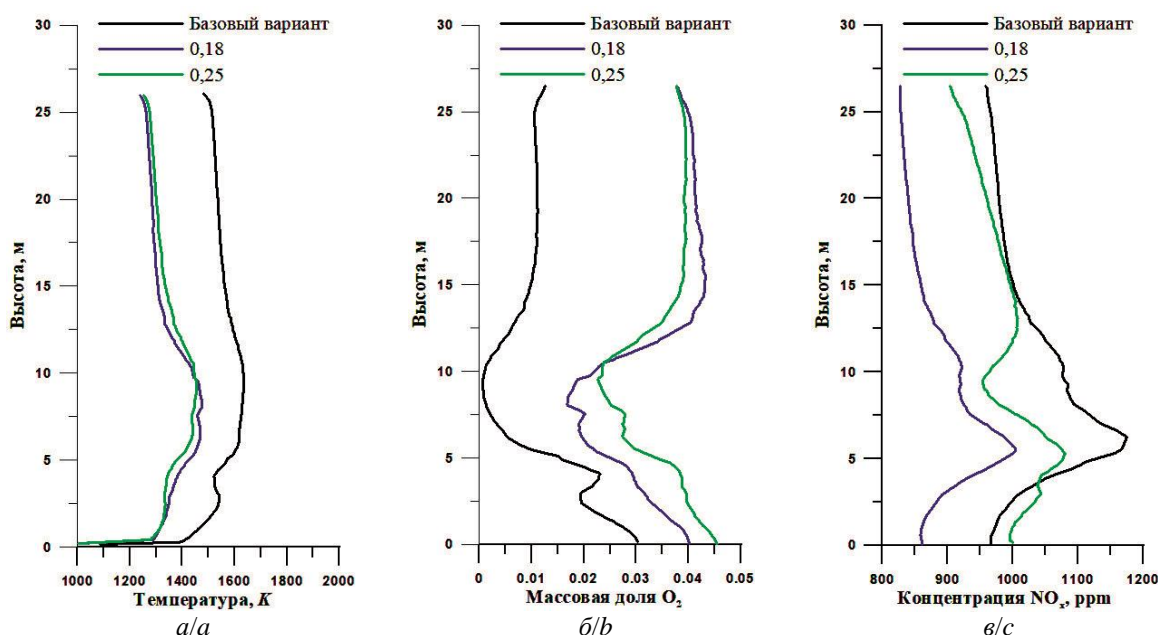


Рис. 9. Температура (а), массовая доля  $O_2$  (б); концентрация  $NO_x$  (в) по высоте топочной камеры

Fig. 9. Temperature (a), mass fraction of  $O_2$  (b);  $NO_x$  concentration (c) along the height of the combustion chamber

### Заключение

Результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с натурными измерениями температур по высоте топочной камеры, соответственно принятые численные алгоритмы и математические модели имеют высокую степень достоверности и позволят в дальнейшем проводить качественные предпроектные варианты исследования.

При увеличении доли первичного воздуха и соответствующем снижении вторичного, без изменения установочных углов лопаточных завихрителей происходит снижение параметра крутки по каналам вторичного воздуха и соответственно угла раскрытия одиночного факела. Взаимное влияние соседних горелок с противокруткой приводит к снижению тангенциальных скоростей и эжекционных областей в

приосевых зонах низкоэмиссионных вихревых горелочных устройств. Данный факт негативно отражается на скорости воспламенения полифракционного пылеугольного топлива в сооснозакрученных горелочных струях, что может негативно отразиться на стабильности горения и полноте выгорания топлива.

В целом замена двухканальных горелочных устройств на низкоэмиссионные позволяет добиться сокращения генерации оксидов азота, которое в данном исследовании составило 14 %. При этом установлено, что наиболее оптимальная доля первичного воздуха составляет 0,18–0,21 без изменений параметра крутки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект no. 18-38-00775\_мол\_а).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC AR5 WGII Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability // IPCC. 2014. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> (дата обращения 15.01.2020).
2. Sonia Y., Edward R.S. A centurial history of technological change and learning curves for pulverized coal-fired utility boilers // Energy. – 2007. – V. 32. – P. 1996–2005.
3. Numerical investigation of oxy-coal combustion to evaluate burner and combustor design concepts / E.H. Chui, A.J. Majeski, M.A. Douglas, Y. Tan // Energy. – 2004. – V. 29. – P. 1285–1296.
4. World Energy Resources 2016 // World Energy Council. 2016. URL: <https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf> (дата обращения 15.01.2020).
5. ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках с целью производства энергии. – М.: Бюро НДТ, 2017. – 271 с.
6. ГОСТ Р 55173-2012. Установки котельные. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2014. – 32 с.
7. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) // EUR-lex. 2010. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=20CELEX%3A32010L0075> (дата обращения 15.01.2020).
8. Barzegar R., Yozgatligil A., Atimtay A.T. Combustion characteristics of Turkish lignites at oxygen-enriched and oxy-fuel combustion conditions // Journal of the Energy Institute. – 2019. – V. 92. – P. 1440–1450.
9. Al-Abbas A.H., Naser J., Dodds D. CFD modelling of air-fired and oxy-fuel combustion in a large-scale furnace at Loy Yang A brown coal power station // Fuel. – 2012. – V. 102. – P. 646–665.
10. NO emissions under pulverized char combustion in  $O_2/CO_2/H_2O$  preheated by a circulating fluidized bed / Z. Shujun, Z. Jianguo, L. Qinggang, P. Fei, Z. Yi, L. Wen // Fuel. – 2019. – V. 252. – P. 512–521.
11. Hernik B., Latacz G., Znamirski D. A numerical study on the combustion process for various configurations of burners in the novel ultra-supercritical BP-680 boiler furnace chamber // Fuel Processing Technology. – 2016. – V. 152. – P. 381–389.
12. Zhou H., Meng S. Numerical prediction of swirl burner geometry effects on  $NO_x$  emission and combustion instability in heavy oil-fired boiler // Applied Thermal Engineering. – 2019. – V. 159. – P. 1–10.
13. Large combustion plant directive emission limit values // European Commission. 2020 URL: [https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/final\\_report\\_05app.pdf](https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/final_report_05app.pdf) (дата обращения 19.01.2020).
14. National Standard of the People's Republic of China // Ministry of ecology and environment the People's Republic of China. 2012.



- URL: [http://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air\\_Environment/Emission\\_standard/201201/20120106\\_222242.shtml](http://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air_Environment/Emission_standard/201201/20120106_222242.shtml) (дата обращения 19.01.2020).
15. Алгоритм оптимального выбора наилучших доступных технологий для российских ТЭС / П.В. Росляков, О.Е. Кондратьева, А.Н. Головтеева, А.М. Сиваковский // Теплоэнергетика. – 2019. – № 4. – С. 60–72.
  16. Алехнович А.Н., Богомолов В.В. Конструкции топочно-горелочных устройств для снижения оксидов азота и шлакования, сжигания низкоресурсных углей (обзор) // Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы: V науч.-практ. конф. – Челябинск: УралВТИ ОАО «Инженерный центр энергетики Урала», 2011. – С. 72–89.
  17. Gil A.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V. Numerical investigation of the combustion process for design and non-design coal in T-shaped boilers with swirl burners // Energy. – 2019. – V. 186. – 14 p.
  18. Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants / S. Belošević, I. Tomanović, V. Beljanski, D. Tucaković, T. Živanović // Applied Thermal Engineering – 2015. – V. 74. – P. 102–110.
  19. Simulation studies on direct ash recycling and reburning technology in a tangentially fired 500 MW pulverized coal boiler / M. Hwang, S. Kim, G. Kim, B. Lee, J. Song, M. Park, C. Jeon // Fuel. – 2013. – V. 114. – P. 78–87.
  20. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in mathematical models of turbulence. – London: Academic Press, 1972. – 169 p.
  21. Al-Abbasa A.H., Naser J., Hussein E.K. Numerical simulation of brown coal combustion in a 550 MW tangentially-fired furnace under different operating conditions // Fuel. – 2013. – V. 107. – P. 688–698.
  22. Dugum A., Hanjalic K. Numerical simulation of coal-air mixture-flow in a real double-swirlburner and implications on combustion anomalies in a utility boiler // Energy. – 2019. – V. 170. – P. 942–953.
  23. Numerical investigation on the flow, combustion, and NOx emission characteristics in a 660 MWe tangential firing ultra-supercritical boiler / W. Sun, W. Zhong, A. Yu, L. Liu, Y. Qian // Advances in Mechanical Engineering – 2016. – V. 8. – P. 1–13.
  24. Hernik B., Latacz G., Znamirowski D. A numerical study on the combustion process for various configurations of burners in the novel ultra-supercritical BP-680 boiler furnace chamber // Fuel Processing Technology. – 2016. – V. 152. – P. 381–389.
  25. Siegel R., Howell J. Thermal radiation heat transfer. – New York: Taylor & Francis, 2002. – 864 p.
  26. Численное исследование влияния параметра крутки горелочных устройств на термогазодинамические процессы в топке котла БКЗ-420-140 / А.В. Гиль, А.С. Заворин, А.В. Старченко, С.В. Обухов // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 26–32.
  27. 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.
  28. The processes of formation of nitrogen oxides in the boiler furnace BKZ 320-140 / N.V. Vizgavljust, A.V. Starchenko, A.V. Gil, T.S. Taylasheva // The European Physical Journal Conferences. – 2015. – V. 82 (2). – 3 p.

Поступила 24.03.2020 г.

#### Информация об авторах

**Гиль А.В.**, кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Заворин А.С.**, доктор технических наук, профессор, руководитель научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Кокшарев О.М.**, аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Воронцова Е.С.**, ассистент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.



UDC 621.181.519.876

## NUMERICAL STUDY OF EFFECT OF PRIMARY AIR EXCESS ON COMBUSTION IN A FURNACE CHAMBER OF A UTILITY BOILER WITH MULTI-CHANNEL SWIRL BURNERS

Andrey V. Gil<sup>1</sup>,  
andgil@tpu.ru

Alexander S. Zavorin<sup>1</sup>,  
zavorin@tpu.ru

Oleg M. Koksharev<sup>1</sup>,  
omk2@tpu.ru

Elena S. Vorontsova<sup>1</sup>,  
ves@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance.** It is necessary to find optimal solutions for organizing the combustion of polyfractional pulverized coal fuel, taking into account the reduction of emissions of harmful substances, in particular nitrogen oxides, at existing and new thermal power plants. Currently, the problem of increasing the environmental parameters of thermal power plants in Russia is very acute, since most of the existing plants do not meet modern environmental standards and requirements.

**The aim** of the research is to determine the impact of the organization of solid fuel combustion using low-emission burners with possible modernization on combustion and to assess the possibility of efficient combustion by increasing the rate of primary air.

**Object:** furnace chamber of the power boiler in the design version and with the replacement of the design burners with low-emission ones.

**Method.** The numerical study was performed using the Ansys Fluent V.12.1 software package, mathematical modeling of physical and chemical processes – in a furnace chamber based on Euler-Lagrangian approaches.

**Result.** A mathematical model is developed based on a package of application programs with a qualitative representation of complex physical and chemical processes in the volume of the furnace chamber. The estimation of the possibility of organizing the burning of Eki-bastuz coal in low-emission burners with the optimal ratio of primary and secondary air without changing the installation angles of the blade swirlers is given.

### Keyword:

Power boiler, vortex burners, coal, mathematical modeling, Euler–Lagrange method.

The research was financially supported by the RFBR (project no. 18-38-00775\_мол\_а).

### REFERENCES

- IPCC AR5 WGII Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. *IPCC*. 2014. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> (accessed 15 January 2020).
- Sonia Y., Edward R.S. A centennial history of technological change and learning curves for pulverized coal-fired utility boilers. *Energy*, 2007, vol. 32, pp. 1996–2005.
- Chui E.H., Majeski A.J., Douglas M.A., Tan Y. Numerical investigation of oxy-coal combustion to evaluate burner and combustor design concepts. *Energy*, 2004, vol. 29, pp. 1285–1296.
- World Energy Resources 2016. *World Energy Council*. 2016. Available at: <https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf> (accessed 15 January 2020).
- ITS 38-2017. *Szhiganiye topliva na krupnykh ustanovkakh s tselyu proizvodstva energii* [Combustion of fuel in large installations for energy production]. Moscow, Byuro Standartinform Publ., 2017. 271 p.
- GOST R 55173-2012. *Ustanovki kotelnye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [The boiler installations. General technical requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 32 p.
- Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). *EUR-lex*. 2010. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075> (accessed 15 January 2020).
- Barzegar R., Yozgatligil A., Atimtay A.T. Combustion characteristics of Turkish lignites at oxygen-enriched and oxy-fuel combustion conditions. *Journal of the Energy Institute*, 2019, vol. 92, pp. 1440–1450.
- Al-Abbas A.H., Naser J., Dodds D. CFD modelling of air-fired and oxy-fuel combustion in a large-scale furnace at Loy Yang A brown coal power station. *Fuel*, 2012, vol. 102, pp. 646–665.
- Shujun Z., Jianguo Z., Qinggang L., Fei P., Yi Z., Wen L. NO emissions under pulverized char combustion in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O preheated by a circulating fluidized bed. *Fuel*, 2019, vol. 252, pp. 512–521.
- Hernik B., Latacz G., Znamirski D. A numerical study on the combustion process for various configurations of burners in the novel ultra-supercritical BP-680 boiler furnace chamber. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 152, pp. 381–389.
- Zhou H., Meng S. Numerical prediction of swirl burner geometry effects on NO<sub>x</sub> emission and combustion instability in heavy oil-fired boiler. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 159, pp. 1–10.
- Large combustion plant directive emission limit values. *European Commission*. 2020. Available at: [https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/final\\_report\\_05app.pdf](https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/final_report_05app.pdf) (accessed 19 January 2020).
- National Standard of the People's Republic of China*. Ministry of ecology and environment the People's Republic of China. 2012. Available at: [http://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air\\_Environment/Emission\\_standard1/201201/20120106\\_222242.shtml](http://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air_Environment/Emission_standard1/201201/20120106_222242.shtml) (accessed 19 January 2020).
- Roslyakov P.V., Kondrateva O.E., Golovteeva A.N., Sivakovskii A.M. Optimal Choice of the Best Available Technologies for Russian Thermal Power Plants. *Thermal Engineering*, 2019, vol. 66, no. 4, pp. 268–278.
- Alekhovich A.N., Bogomolov V.V. Konstruktsii topochnogorelochnykh ustroystv dlya snizheniya oksidov azota i shlakovaniya, szhiganiya nizkoreaktsionnykh uglei (obzor) [Designs of combustion devices for reducing nitrogen oxides and slagging,

- burning low-reaction coals (review)]. *Mineralnaya chast topliva, shlakovanie, ochistka kotlov, ulavlivanie i ispolzovanie zoly. V nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Fuel mineral part, slagging, boiler cleaning, ash catching and using. V scientific conference]. Chelyabinsk, UralVTI OAO «Inzhenerny tsentr energetiki Urala», 2011. pp. 72–89.
17. Gil A.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V. Numerical investigation of the combustion process for design and non-design coal in T-shaped boilers with swirl burners. *Energy*, 2019, vol. 186, 14 p.
  18. Belošević S., Tomanović I., Beljanski V., Tucaković D., Živanović T. Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 74, pp. 102–110.
  19. Hwang M., Kim S., Kim G., Lee B., Song J., Park M., Jeon C. Simulation studies on direct ash recycling and reburning technology in a tangentially fired 500 MW pulverized coal boiler. *Fuel*, 2013, vol. 114, pp. 78–87.
  20. Launder B.E., Spalding D.B. *Lectures in mathematical models of turbulence*. London, Academic Press, 1972. 169 p.
  21. Al-Abbasa A.H., Naser J., Hussein E.K. Numerical simulation of brown coal combustion in a 550 MW tangentially-fired furnace under different operating conditions. *Fuel*, 2013, vol. 107, pp. 688–698.
  22. Dugum A., Hanjalic K. Numerical simulation of coal-air mixture-flow in a real double-swirlburner and implications on combustion anomalies in a utility boiler. *Energy*, 2019, vol. 170, pp. 942–953.
  23. Sun W., Zhong W., Yu A., Liu L., Qian Y. Numerical investigation on the flow, combustion, and NOx emission characteristics in a 660 MWe tangential firing ultra-supercritical boiler. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 8, pp. 1–13.
  24. Hernik B., Latacz G., Znamirski D. A numerical study on the combustion process for various configurations of burners in the novel ultra-supercritical BP-680 boiler furnace chamber. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 152, pp. 381–389.
  25. Siegel R., Howell J. *Thermal radiation heat transfer*. New York, Taylor & Francis, 2002. 864 p.
  26. Gil A.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V., Obuhov S.V. Numerical investigation of a burner twist parameter effect on thermogas dynamic processes in boilers BKZ-420-140. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 26–32. In Rus.
  27. Gil A.V., Starchenko A.V. Mathematical modelling 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.
  28. Vizgavljush N.V., Starchenko A.V., Gil A.V., Taylasheva T.S. The processes of formation of nitrogen oxides in the boiler furnace BKZ 320-140. *The European Physical Journal Conferences*, 2015, vol. 82 (2), 3 p.

Received: 24 March 2020.

#### Information about the authors

**Andrey V. Gil**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander S. Zavorin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Oleg M. Koksharev**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Elena S. Vorontsova**, assistant National Research Tomsk Polytechnic University.