УДК 621.18–182.2

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ СЖИГАНИЯ ВЫСОКОВЛАЖНОГО НЕПРОЕКТНОГО ТОПЛИВА В КАМЕРНОЙ ТОПКЕ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Тайлашева Татьяна Сергеевна,
кандидат технических наук, доцент кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета,
Россия 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: taylasheva@tpu.ru

Гиль Андрей Владимирович,
кандидат технических наук, доцент кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета,
Россия 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: angil@tpu.ru

Воронцова Елена Сергеевна,
аспирант кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета,
Россия 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: ves@tpu.ru

Актуальность исследования *обусловлена рядом проблем топливно-энергетического комплекса, в первую очередь исчерпанием запасов проектного топлива для многих тепловых электрических станций, возрастанием затрат на привозное топливо, включая эксплуатационные издержки, а также задачами ориентирования региона на использование своих собственных возможностей.*
Цель исследования: *предпроектный подбор характеристик высоковлажного бурого угля Таловского месторождения Томской области, при которых возможно судить о реализации его эффективного сжигания в котлах большой мощности посредством проведения численного моделирования процессов в топке котла при нескольких вариантах влажности исходного топлива, а также о необходимости реконструкции системы пылеприготовления и сохранении существующей компоновки горелочных устройств. Сравнение полученных результатов при представлении физико-химических процессов, протекающих при сжигании проектного и непроектного топлива, способствует развитию базы для проведения исследований при существующих технологиях сжигания твердого топлива в энергетических котлах.*
Методы исследования: *численное моделирование в специализированном пакете прикладных программ FIRE 3D на основе эйлеро-лагранжева подхода, метод конечных разностей, «κ-ε» модель турбулентности, P1-приближение метода сферических гармоник, нормативный метод теплового расчета котлов.*
Результаты: *получены распределения температурных полей в топочном объеме, концентрации кислорода, твердых частиц, аэродинамическая структура потока. Создана основа для сравнительных исследований существующей технологии сжигания твердого топлива применительно к местному низкосортному углю.*
Выводы: *наиболее эффективное сжигание достигается при влажности рабочей массы таловского угля на уровне 30 %, что необходимо учитывать при исследовании различных технологий и продуктов сжигания.*

Ключевые слова:
Бурый уголь, непроектное топливо, паровой котел, численное моделирование, топочный объем, аэродинамика, сравнительные исследования.

Введение

Спрос на твердое органическое топливо для теплоэнергетики имеет тенденцию к устойчивому росту [1]. В основе надежной и эффективной эксплуатации любой тепловой электростанции (ТЭС) лежит качество поставляемого топлива и своевременность его поставки. Отклонение свойств топлива от проектно-заявленных приводит к нарушению режимов работы как основного, так и вспомогательного оборудования электростанции.

Наряду с общим ростом потребления ископаемых энергетических ресурсов [2] для отдельных ТЭС возникает проблема исчерпания запасов так называемых проектных топлив, т. е. топлив, на использование которых проектировались в свое время эти электростанции. В большинстве случаев такая ситуация приводит к выбору альтернативных месторождений, в особенности расположенных вблизи энергообъектов и обеспечивающих экономическую целесообразность перевода энергетического оборудования на организацию сжигания замещающего топлива [3]. Такое непроектное топливо не всегда является высококачественным и зачастую не способно заместить проектное в своем исходном виде, поэтому для его эффективного и экологичного использования [4] необходимы не только предварительные исследования теплотехнических свойств угля [5], но и сопровождающие на весь период поставки. С аналогичными задачами приходится сталкиваться при экспертной оценке

возможности сжигания топлива, поступающего на предприятия энергетики с нарушениями условий поставки (в частности, несоответствие топлива по качеству) [6]. Оценка возможности использования непроектного топлива требует особого внимания не только к предъявляемым характеристикам, но и к прогнозированию проявления свойств угля в условиях сжигания, что наиболее оперативно достигается средствами компьютерного моделирования [7–9].

Объект и методы исследования

На территории Томской области открыто несколько месторождений бурого угля, из них наиболее детально изученным является Таловское месторождение [10], расположенное вблизи г. Томска. Уголь этого месторождения можно рассматривать альтернативой проектному топливу для томских электростанций [11], которые с момента ввода в эксплуатацию работают на каменном угле кузнецких месторождений. В ближайшей перспективе [12] Кузнецкий угольный бассейн останется базовым для добычи твердого топлива, но при этом планируется освоение новых месторождений Сибири и Дальнего Востока в силу исчерпания запасов твердого топлива.

Бурый уголь Таловского месторождения в связи с геологическими особенностями залегания угольного пласта имеет теплотехнические характеристики, изменяющиеся в широком диапазоне из-за близости грунтовых вод, поэтому как энергетическое топливо значительно уступает широко известным и изученным углям. Особенности теплотехнических характеристик угля, а также отсутствие опыта сжигания в котельных установках ТЭС делают актуальным вопрос подготовки данного угля к сжиганию [13, 14], что формулирует цель исследования – выбор оптимальных характеристик рабочей массы, при которых можно судить как о возможности, так и об эффективности его использования в котлах большой мощности.

Объектом исследования является однобарабанный П-образный котел БКЗ–220–100 с топочной камерой открытого типа призматической формы, имеющей размеры по осям труб 6656×9536 мм. Для организации топочного процесса она оборудована шестью вихревыми горелками, расположенными на боковых стенах треугольником вершиной вниз.

В качестве расчетных топлив приняты таловский уголь с рабочей влажностью в нескольких вариантах в диапазоне до 50 % и кузнецкий уголь, характеристики которых представлены в таблице.

В последнее время исследования крупных физических объектов проводятся с помощью численного моделирования, являющегося одним из наиболее распространенных и экономичных способов оценки процессов, протекающих в тепломеханическом оборудовании [15–18]. Авторами проведены исследования с использованием специального пакета прикладных программ FIRE 3D, предназначенного для моделирования топочных устройств энергетических котлов [19, 20]. Пакет позволяет выполнять многовариантные исследования на основе математического моделирования и обрабатывать полученные результаты в графическом виде. Результаты можно представлять как в двухмерных, так и трехмерных отображениях с возможностью установки любого сечения по координатам и выводить результаты расчетов по исследуемым процессам.

Таблица. *Теплотехнические характеристики исследуемых углей*

Table. *Burning characteristics of investigated coal*

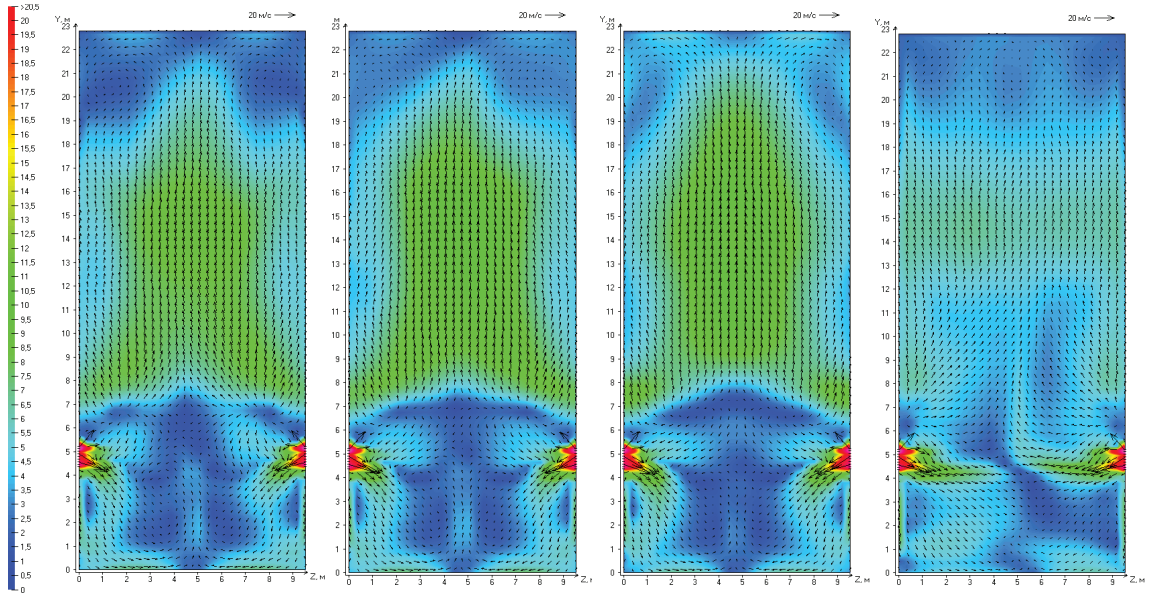
Характеристика Characteristic	Таловский уголь Talovsky coal			Кузнецкий уголь Kuznetsk coal
	1	2	3	
W_t^r, %	30,00	40,00	50,70	13,80
A_t^r, %	25,80	22,20	18,20	14,40
Q_t^r, ккал/кг kcal/kg	3096	2570	2007	5120
C^r, %	28,60	24,40	20,08	55,70
H^r, %	3,00	2,60	2,10	4,00
O^r, %	12,10	10,30	8,50	9,90
S^r, %	0,10	0,10	0,06	0,30
N^r, %	0,40	0,40	0,36	1,90

Численные исследования для сжигания таловского угля проведены с учетом изменений в системе пылеприготовления, но без изменения компоновки и типа горелочных устройств, т. е. при отсутствии какой-либо реконструкции собственно котла. Расход топлива выбирался по результатам поверочного теплового расчета котельного агрегата [21].

Обсуждение результатов

Визуализация расчетных результатов по характеристикам топочной среды в поперечном сечении топки, проходящем по оси горелок нижнего яруса, приведена для трех значений влажности таловского угля и для проектного топлива на рис. 1–3.

Аэродинамическая структура топочной среды, представленная на рис. 1, в целом соответствует схеме сжигания. При сжигании бурого таловского угля разной влажности картина имеет общие особенности – формирование скоростного потока в центральной части топочной камеры, который по мере восхождения расширяется вплоть до экранов. В зоне на уровне непосредственно над горелочным поясом средняя скорость основного потока не превышает 9 м/с. При этом наблюдается отклонение скоростного потока, образуемого нижним ярусом горелок, что вызвано созданием большего давления в области столкновения потоков от верхних горелок, вследствие чего поток от нижних горелок становится более концентрированным, но по мере удаления от амбразуры его структура восстанавливается и он устремляется вверх.



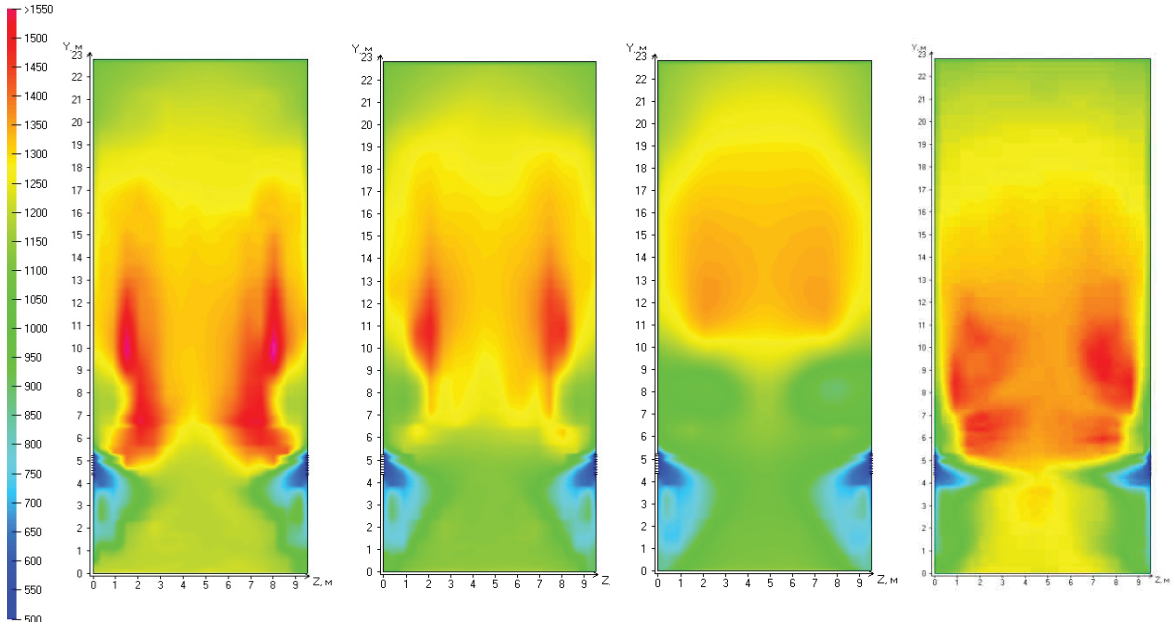
а/a *б/b* *в/c* *г/d*

Рис. 1. *Аэродинамическая структура потока в поперечном сечении топки по оси горелок нижнего яруса при сжигании: таловского угля с влажностью 30 % (а); 40 % (б); 50 % (в) и кузнецкого угля (г)*

Fig. 1. *Aerodynamic structure of the flow in cross-section of the furnace along the axis of the lower tier burners while burning: Talovsky coal with humidity – 30 % (a); 40 % (b); 50 % (c) and Kuznetsk coal (d)*

При сжигании кузнецкого угля наблюдается более равномерное распределение скорости потока по сечению топочной камеры. Несмотря на наличие аэродинамического выступа, который призван способствовать выравниванию расхода продуктов сгорания на выходе из топки, в этой области наблюдаются застойные и слабозавихренные локальные зоны, примыкающие к потолочному экрану.

Распределение температурных полей, представленное на рис. 2, зависит от теплотехнических характеристик топлива, которые определяют концентрацию окислителя в зоне горения. При влажности



а/a *б/b* *в/c* *г/d*

Рис. 2. *Распределение температур (К) в поперечном сечении топки по оси горелок нижнего яруса при сжигании: таловского угля с влажностью 30 % (а); 40 % (б); 50 % (в) и кузнецкого угля (г)*

Fig. 2. *Allocation of temperatures (K) in cross-section of furnace along the axis of the lower tier burners while burning: Talovsky coal with humidity – 30 % (a); 40 % (b); 50 % (c) and Kuznetsk coal (d)*

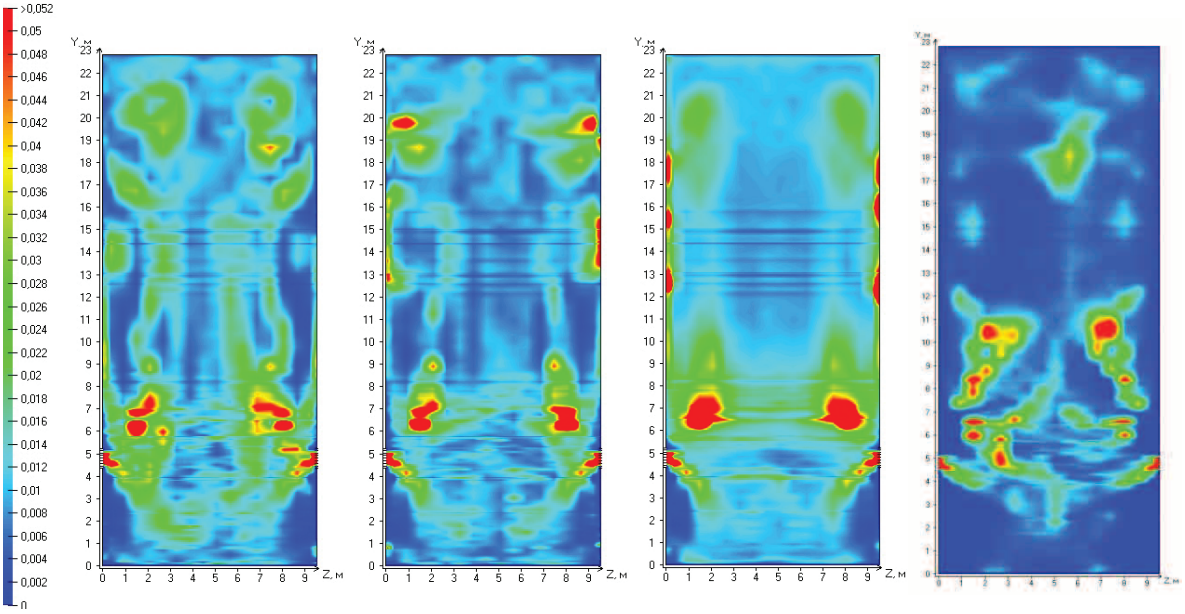


Рис. 3. *Концентрация частиц (кг/кг) в поперечном сечении топки по оси горелок нижнего яруса при сжигании: таловского угля с влажностью 30 % (а); 40 % (б); 50 % (в) и кузнецкого угля (г)*

Fig. 3. *Concentration of solids (kg/kg) in cross-section of furnace along the axis of the lower tier burners while burning: Talovsky coal with humidity – 30 % (a); 40 % (b); 50 % (c) and Kuznetsk coal (d)*

таловского угля 50 % (рис. 2, *в*) наблюдается задержка процессов воспламенения и горения топлива из-за заниженной концентрации окислителя. Топливо с такими параметрами требует более высоких затрат тепла на прогрев угольной пыли и испарения из нее влаги. В связи с этим область максимальной температуры смещается в верхнюю часть топочного объема и имеет значения 1250–1350 К, тогда как в холодной воронке и на уровне горелочного пояса – в пределах 900–1250 К.

Высокая реакционная способность таловского угля в более подсушенном состоянии обеспечивает интенсивное выгорание частиц, за счет чего создается благоприятная для надежной работы конвективных поверхностей нагрева температура на выходе из топки – не более 1300 К (рис. 2, *а, б*).

Распределение угольных частиц в объеме топочной камеры (рис. 3) дополняет информацию для оценки условий сжигания топлива.

На картине концентрационных полей явно прослеживается влияние аэродинамической структуры. Максимальные концентрации, естественно, имеют место в зоне горелок, как при сжигании таловского, так и кузнецкого угля. Выше уровня расположения горелок, при уже установившейся аэродинамике и достаточном температурном режиме, концентрация частиц снижается. При этом наблюдается скопление частиц в пристеночных областях боковых стен, где скоростной режим несколько ниже. Скопление частиц наблюдается также в застойной зоне и в области возникновения потолочно-фронтальных вихрей, а в зоне холодной воронки скопление частиц при сжигании таловского угля приходится на скаты фронтового и тыльного экранов (рис. 3, *а–в*).

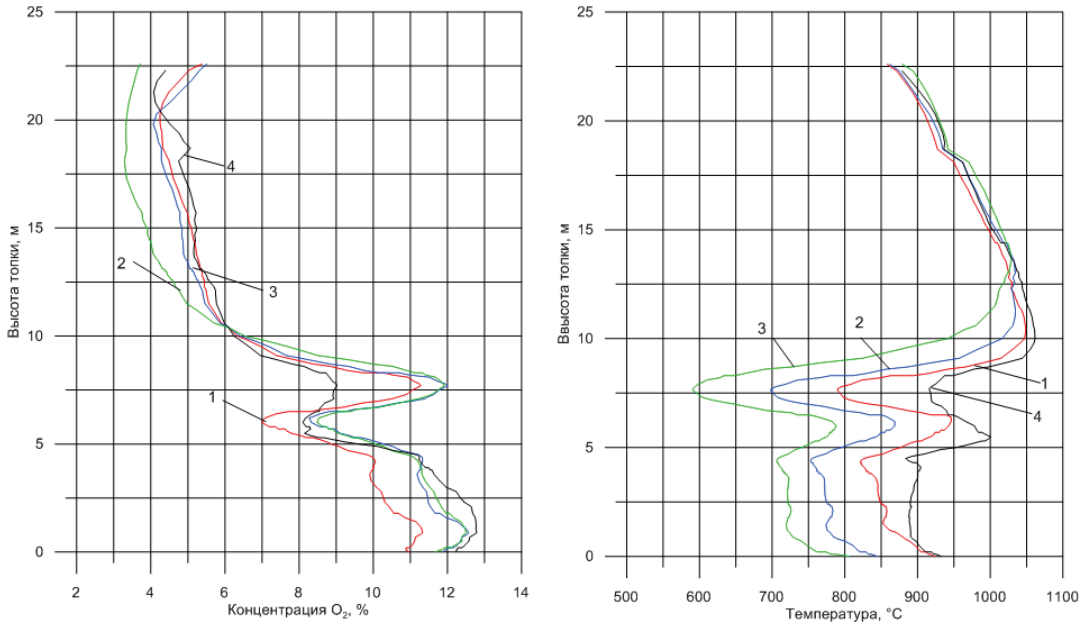
Среднеинтегральные значения концентрации кислорода и температур по горизонтальным сечениям в зависимости от вертикальной координаты – высоты топочной камеры – представлены на рис. 4.

Максимальное значение концентрации кислорода (рис. 4, *а*) имеет место на выходе из горелочных устройств. Далее, по мере продвижения потока по ширине и высоте топки, она уменьшается за счет того, что топливо воспламеняется и выгорает в нормальном режиме, разбавляя газовый поток продуктами сгорания. Физическая достоверность результатов подтверждается тем, что поля содержания кислорода в топке представляют собой противоположную картину температурным полям, как видно на рис. 4, *б*. Кроме того, значения температуры дымовых газов на выходе из топки соответствуют полученным при тепловом расчете. Также на приведенных графиках видно, что чем больше влажность топлива, тем меньше температура в зоне расположения горелок.

Выводы

Возможности прогнозирования теплофизических процессов в топках котлов большой мощности позволяют составить предварительную оценку влияния характеристик непроектного топлива на эффективность сжигания в условиях выбранного способа.

Полученные характерные для такого вида топлива и типа горелок аэродинамическая структу-



а/a *б/b*

Рис. 4. *Изменение концентрации кислорода (а) и температуры (б) по высоте топки при сжигании: таловского угля с влажностью 30 % (1); 40 % (2); 50 % (3) и кузнецкого угля (4)*

Fig. 4. *Concentration change of oxygen (a) and temperature (b) along the height of furnace while burning: Talovsky coal with humidity – 30 % (a); 40 % (b); 50 % (c) and Kuznetsk coal (d)*

ра, температурный режим и концентрация твердых частиц в топочном объеме являются сопоставительной базой для дальнейших вариативных исследований существующих технологий сжигания.

Как показало исследование при данной компоновке горелок, наиболее надежное ведение топочных процессов достигается при сжигании таловского угля влажностью рабочей массы на уровне 30 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В.Я., Линник Ю.Н., Линник В.Ю. Уголь России: состояние и перспективы. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 271 с.
2. Плакиткина Л.С. Развитие добычи и экспорта угля в основных странах мира и России в период 2000–2013 (2012) гг. Вызовы и угрозы развитию добычи и экспорта угля в России в перспективном периоде // Горная промышленность. – 2014. – № 2 (114). – С. 6–12.
3. Практика и перспективы применения различных способов сжигания твердого топлива в теплоэнергетических установках / М.Н. Башкова, С.А. Казимиров, М.В. Темлянцев, В.И. Багрянцев, А.А. Рыбушкин, К.С. Слажнева // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 2 (8). – С. 24–32.
4. Лобовников А.О., Базылева Я.В. Эколого-экономическая оценка эффективности технологии очистки выбросов тепловых электростанций // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2013. – № 5 (29). – С. 149–155.
5. РД 153-34.1-44.302-2001. Методические указания по организации изменения топливного режима в связи с недостатком проектных углей на электростанциях РАО «ЕЭС России». – М.: СПО ОРГРЭС, 2001. – 10 с.
6. Тайлашева Т.С., Воронцова Е.С. Претензионная работа по топливу для предприятий энергетики // Теплофизические основы энергетических технологий: сборник статей V Всероссийской научной конференции с международным участием. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 355–358.
7. Гиль А.В., Старченко А.В., Заворин А.С. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо: монография. – Томск: STT, 2011. – 181 с.
8. Numerical investigation of low NOx combustion strategies in tangentially-fired coal boilers / X. Zhang, J. Zhou, S. Sun, R. Sun, M. Qin // Fuel. – 2015. – № 142. – P. 215–221.
9. Numerical investigation of the nonlinear flow characteristics in an ultra-supercritical utility boiler furnace / M. Yang, Y.Y. Shen, H.T. Xu, M. Zhao, S.W. Shen, K. Huang // Applied Thermal Engineering. – 2015. – № 88. – P. 237–247.
10. Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Заворин А.С. Перспективность низкосортных топлив Томской области для теплотехнологического использования // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 41–46.
11. Казакова О.А., Заворин А.С., Казаков А.В. Исследование угля Таловского месторождения Томской области: монография. – Томск: STT, 2010. – 172 с.
12. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. Министерство энергетики Российской Федерации. Проект. URL: http://minenergo.gov.ru/upload/iblock/621/621d81f0fb5a11919f912bfafb3248d6.pdf (дата обращения: 22.10.2015).
13. Optimization of drying of low-grade coal with high moisture content using a disc dryer / S. Moon, I. Ryu, S. Lee, T. Ohm // Fuel Processing Technology. – 2014. – № 124. – P. 267–274.
14. Энергосберегающий метод подготовки твердого топлива к сжиганию / В.А. Кутовой, Ю.Г. Казаринов, А.С. Луценко, А.А. Николаенко, В.М. Кошельник // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 8 (114). – С. 61–66.
15. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Часть 2. Горение бурого угля КАБ в вихревой топке /

Д.В. Красинский, В.В. Саломатов, И.С. Ануфриев, О.В. Шарыпов, Е.Ю. Шадрин, Ю.А. Аникин // Теплоэнергетика. – 2015. – № 3. – С. 54–61.

16. Расчетное исследование процессов аэродинамики, тепломассообмена, горения и образования оксидов азота в двухвихревой топочной камере котла БКЗ-640 с холостым дутьем / Н.С. Чернецкая, А.В. Минаков, И.А. Брикман, М.Ю. Чернецкий // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 11–16.
17. A validation of computational fiuid dynamics temperature distribution prediction in a pulverized coal boiler with acoustic temperature measurement / N. Modlinski, P. Madejski, T. Janda, K. Szczepanek, W. Kordylewski // Energy. – 2015. – № 92. – P. 77–86.
18. Effects of detailed operating parameters on combustion in two 500-MWe coal-fired boilers of an identical design / J. Yang, J.A. Kim, J. Hong, M. Kim, Ch. Ryu, Y.J. Kim, H.Y. Park, S.H. Baek // Fuel. – 2015. – № 144. – P. 145–156.
19. 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.
20. Application of numerical analysis for physical and chemical combustion processes in design of boiler units / A.V. Gil, A.S. Zavorin, E.S. Vorontsova, G.A. Nizkodubov // Proceedings of the International Conference «Mechanical Engineering, Automation and Control Systems» (MEACS). – Tomsk, 2014. – P. 1–4.
21. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.

Поступила 22.12.2015 г.

UDC 621.18–182.2

EVALUATION OF BURNING CONDITIONS OF HIGH-HUMIDITY NON-PROJECT FUEL IN CHAMBER FURNACE BASED ON NUMERICAL SIMULATION

Tatyana S. Taylasheva,
National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: taylasheva@tpu.ru

Andrey V. Gil,
National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: angil@tpu.ru

Elena S. Vorontsova,
National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ves@tpu.ru

Relevance of this research *is due to the number of issues of the fuel and energy complex, first of all to depletion of project fuel for many thermal power plants, increase of the cost of imported fuel, including operating costs, and tasks of focusing the region on the use of its own capabilities.*

Goal of the research: *pre-project selection of characteristics of high-humidity lignite from Talovsky deposit on the basis of which we can assess the capabilities of its efficient burning in high power boilers by using numerical simulation of processes in the boiler furnace at several variations of moisture content in original fuel, and consider the necessity of reconstruction of the system of dust preparing, and the reduction of existing layout of burners. Comparison of chemical and physical processes flowing at the combustion of project and non-project fuel helps to develop the base for researches with current technologies of combustion of solid fuel.*

Research technique: *numerical simulation in specific application package FIRE 3D based on Euler-Lagrangian approach, finite-difference method, «κ-ε» turbulence model, P1-approximation spherical-harmonic method and on normative method of thermal design of boilers.*

The results: *allocation of temperature fields in furnace volume, oxygen and solids concentration, aerodynamic structure of flow were obtained. The basis for comparative research of existing technology of solid fuel burning, especially for local low-grade coal, was established.*

Findings*: peak maximum efficacy of burning is at humidity of the working mass of Talovsky coal about 30 %, this fact should be considered at research of different technologies and burning products.*

Key words:
Lignite, non-project fuel, boiler, numerical simulation, furnace volume, aerodynamics, comparative researches.

REFERENCES

1. Afanasev V.Ya., Linnik Yu.N., Linnik V.Yu. *Ugol Rossii: sostoyanie i perspektivy* [Coal of Russia: state and prospects]. Moscow, INFRA-M Publ., 2014. 271 p.
2. Plakitkina L.S. Razvitie dobychi i eksporta uglya v osnovnykh stranakh mira i Rossii v period 2000–2013 (2012) gg. Vyzovy i ugrozy razvitiyu dobychi i eksporta uglya v Rossii v perspektivnom periode [Coal output and export trends in main coal producing countries and Russia in 2000–2013 (2012). Challenges and risks of coal output and export development in Russia in the future period]. *Mining Industry Journal*, 2014, vol. 114, no. 2, pp. 6–12.
3. Bashkova M.N., Kazimirov S.A., Temlyantsev M.V., Bagryantsev V.I., Rybushkin A.A., Slazhneva K.S. Praktika i perspektivy primeneniya razlichnykh sposobov szhiganiya tverdogo topliva v teploenergeticheskikh ustanovkakh [Practice and opportunities of using different types of burning solid fuel in heat-and-power engineering plants]. *Vestnik SibGIU*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 24–32.
4. Lobovnikov A.O., Bazyleva Ya.V. Ekologo-ekonomicheskaya otsenka effektivnosti tekhnologii ochistki vybrosov teplovykh elektrostantsiy [Eco-economic evaluation of emission treatment technologies efficiency at thermal power stations]. *Economic and social changes: facts, trends, forecast*, 2013, vol. 29, no. 5, pp. 149–155.
5. *RD 153–34.1–44.302–2001. Metodicheskie ukazaniya po organizatsii izmeneniya toplivnogo rezhima v svyazi s nedostatkom proektnykh ugley na elektrostantsiyakh RAO «EES Rossii»* [RD 153–34.1–44.302–2001. Instruction notes on organizing changes of fuel regime due to the lack of project coal at electrical stations RAO «UEC of Russia»]. Moscow, SPO ORGRES Publ., 2001. 10 p.
6. Taylasheva T.S., Vorontsova E.S. Pretenzionnaya rabota po toplivu dlya predpriyatiy energetiki [Claims activities about fuel for energetic facilities]. *Teplofizicheskie osnovy energeticheskikh tekhnologiy: sbornik statey V Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proc. 5th Rus. Scien. Conf. Thermophysical properties of energy technologies]. Tomsk, TPU Publ. house, 2014. pp. 355–358.
7. Gil A.V., Starchenko A.V., Zavorin A.S. *Primenenie chislennogo modelirovaniya topochnykh protsessov dlya praktiki perevoda kotlov na neproektnoe toplivo* [Use of numerical simulation of burning process for practice of transfer boilers on non-project fuel]. Tomsk, STT Publ., 2011. 181 p.
8. Zhang X., Zhou J., Sun S., Sun R., Qin M. Numerical investigation of low NOx combustion strategies in tangentially-fired coal boilers. *Fuel*, 2015, no. 142, pp. 215–221.
9. Yang M., Shen Y.Y., Xu H.T., Zhao M., Shen S.W., Huang K. Numerical investigation of the nonlinear flow characteristics in an ultra-supercritical utility boiler furnace. *Applied Thermal Engineering*, 2015, no. 88, pp. 237–247.
10. Tabakaev R.B., Kazakov A.V., Zavorin A.S. Perspektivnost nizkosortnykh topliv Tomskoy oblasti dlya teplotekhnologicheskogo ispolzovaniya [Prospects of using low-grade fuels of Tomsk re-

gion for thermal technology use]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 41–46.
11. Kazakova O.A., Zavorin A.S., Kazakov A.V. *Issledovanie uglya Talovskogo mestorozhdeniya Tomskoy oblasti* [Research of coal from Talovsky field in Tomsk region]. Tomsk, STT Publ., 2010. 172 p.
12. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035 goda. Ministerstvo energetiki Rossiyskoy Federatsii. Proekt* [Energetic strategy of Russia for a period until 2035. The Ministry of Energy of the Russian Federation. Project]. Available at: http://minenergo.gov.ru/upload/iblock/621/621d81f0fb5a11919f912bfafb3248d6.pdf (accessed 22 October 2015).
13. Moon S., Ryu I., Lee S., Ohm T. Optimization of drying of low-grade coal with high moisture content using a disc dryer. *Fuel Processing Technology*, 2014, no. 124, pp. 267–274.
14. Kutovoy V.A., Kazarinov Yu.G., Lutsenko A.S., Nikolaenko A.A., Koshelnik V.M. Energosberegayushchiy metod podgotovki tverdogo topliva k szhiganiyu [Energy-saving method of preparing solid fuel for burning]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2013, vol. 114, no. 8, pp. 61–66.
15. Krasinskiy D.V., Salomatov V.V., Anufriev I.S., Sharypov O.V., Shadrin E.Yu., Anikin Yu.A. Modelirovanie topochnykh protsessov pri szhiganii raspylennogo uglya v vikhrevoy topke usovershenstvovannoy konstruktsii. Chast 2. Gorenie burogo uglya KAB v vikhrevoy topke [Modeling of pulverized coal combustion processes in a vortex furnace of improved design. Part 2. Combustion of brown coal from the Kansk-Achinsk basin in a vortex furnace]. *Thermal Engineering*, 2015, no. 3, pp. 54–61.
16. Chernetskaya N.S., Minakov A.V., Brikman I.A., Chernetskiy M.Yu. Raschetnoe issledovanie protsessov aerodinamiki, teplomassoobmena, goreniya i obrazovaniya oksidov azota v dvukhvikhrevoy topochnoy kamere kotla BKZ-640 s kholostym dutem [The design study of the processes of aerodynamics, heat-and-mass transfer, combustion and formation of nitrogen oxides in double-vortex furnace in the boiler BKZ2640 with blank blast]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 11–16.
17. Modlinski N., Madejski P., Janda T., Szczepanek K., Kordylewski W. A validation of computational fiuid dynamics temperature distribution prediction in a pulverized coal boiler with acoustic temperature measurement. *Energy*, 2015, no. 92, pp. 77–86.
18. Yang J., Kim J. A., Hong J., Kim M., Ryu Ch., Kim Y.J., Park H.Y., Baek S.H. Effects of detailed operating parameters on combustion in two 500-MWe coal-fired boilers of an identical design. *Fuel*, 2015, no. 144, pp. 145–156.
19. Gil A.V., Starchenko A.V. Matematicheskoe modelirovanie fiziko-khimicheskikh protsessov szhiganiya ugley v kamernykh topkakh kotelnykh agregatov na osnove paketa prikladnykh programm FIRE 3D [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. 5, pp. 655–671.
20. Gil A.V., Zavorin A.S., Vorontsova E.S., Nizkodubov G.A. Application of numerical analysis for physical and chemical combustion processes in design of boiler units. *Proceedings of the International Conference. Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. Tomsk, 2014. pp. 1–4.
21. *Teplovoy raschet kotlov (Normativnyy metod)* [Thermal design of boilers (Normative method)]. St. Petersburg, NPO TSKTI Publ., 1998. 256 p.

Received: 22 December 2015.