

Гулей Александр Богданович, канд. тех. наук, доцент, тел: +38 (050) 4 02 62 12; e-mail: sm261245@gmail.com
Українська інженерно-педагогічна академія, ул. Університетська 16, г. Харків, Україна, 61003

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУР ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ГАЗОВОГО УГЛЯ В ТОПКЕ КОТЛА ТПП-312А ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СОСТАВА УГЛЯ ОТ ОБОГАЩЕННОГО ДО НИЗКОСОРТНОГО

В статье рассмотрены вопросы перехода к использованию на тепловых электростанциях непроектных углей вместо дефицитного проектного топлива. Уголь является сегодня основным топливом для ТЭС в Украине, а его доминирование в сырьевом энергетическом балансе Украины соответствует общемировому тренду. В подавляющем большинстве котлы, эксплуатируемые на ТЭС Украины, были спроектированы для сжигания углей с зольностью от 18 % до 25 %. За время эксплуатации парка котлов теплота сгорания угля по сравнению с проектными характеристиками уменьшилась в 1,5 раза, а КПД котлов на ТЭС снизились до уровня от 80 % до 82%. Для компенсации потерь КПД (в частности для угля с $V^2 \leq 20\%$), применяют «подсветку» факела за счет сжигания природного газа или мазута, долей до 25 % в общем тепловыделении. При использовании «подсветки» в корне факела на более реакционное «подсветочное» топливо расходуется основная часть окислителя, поэтому угольная пыль в факеле горит в условиях пониженной концентрации кислорода. Это приводит к росту физического недожога и, соответственно, к ограничению допустимого нижнего предела для теплоты сгорания используемых углей. Все это, а также высокая цена «подсветочного» топлива ограничивает возможности его применения на ТЭС. Приведена предварительная достоверная количественная оценка его последствий. Проанализировано влияние зольности топлива на температурные поля в топке котла, как критерий возможности и эффективности перехода к использованию на тепловых электростанциях непроектных углей вместо дефицитного проектного топлива. Приведен расчет температурного поля топки котла с помощью вычислительной программы «FURNACE (KGTU)». Обоснован выбор метода расчета характеристик теплообмена в топке пылеугольного котла.

Ключевые слова: котельная установка, под топки, газовое окно, объем, дымовые газы, температура, номинальный режим, проектный уголь, обогащение, зольность, шлакование, модель теплообмена, аппроксимация, коэффициент излучения, экран.

Гулей Александр Богданович, канд. тех. наук, доцент, тел: +38(050) 4 02 62 12; e-mail: sm261245@gmail.com
Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, Україна, 61003

ОЦІНКА ТЕМПЕРАТУР ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ ГАЗОВОГО ВУГІЛЛЯ В ТОПЦІ КОТЛА ТПП-312А ПРИ ЗМІНІ СКЛАДУ ВУГІЛЛЯ ВІД ЗБАГАЧЕНОГО ДО НИЗЬКОСОРТНОГО

У статті розглянуто питання переходу до використання на теплових електростанціях непроектного вугілля замість дефіцитного проектного палива. Вугілля є сьогодні основним паливом для ТЕС в Україні, а його домінування в сировинному енергетичному балансі України відповідає загальносвітовому тренду. У переважній більшості котли, що експлуатуються на ТЕС України, були спроектовані для спалювання вугілля з зольністю від 18 % до 25 %. За час експлуатації парку котлів теплота згоряння вугілля порівняно з проектними характеристиками зменшилася в 1,5 рази, а ККД котлів на ТЕС знизилася до рівня від 80 % до 82 %. Для компенсації втрат ККД (зокрема для вугілля з), застосовують «підсвічування» факела за рахунок спалювання природного газу або мазуту, часток до 25 % у загальному тепловиділенні. При використанні «підсвічування» докорінно факела на більшій реакційній «підсвічувальне» паливо витрачається основна частина окислювача, тому вугільний пил у факелі горить в умовах зниженої концентрації кисню. Це призводить до зростання фізичного недопалювання і, відповідно, до обмеження допустимої нижньої межі для теплоти згоряння використовуються вугілля. Все це, а також висока ціна «підсвічувального» палива обмежує можливості його застосування на ТЕС. Наведено результати попередньої достовірної кількісної оцінки його наслідків. Проаналізовано вплив зольності палива на температурні поля в топці котла, як критерій можливості та ефективності переходу до використання на теплових електростанціях непроектного вугілля замість дефіцитного проектного палива. Наведено розрахунок температурного поля топки котла за допомогою обчислювальної програми «FURNACE (KGTU)». Обґрунтовано вибір методу розрахунку характеристик теплообміну в топці пилувугільного котла.

Ключові слова: котельня установка, під топки, газове вікно, обсяг, димові гази, температура, номінальний режим, проектне вугілля, збагачення, зольність, шлакування, модель теплообміну, апроксимація, коефіцієнт випромінювання, екран.

Gulei Alexander Bogdanovich, cand. teh. sciences, associate professor, тел: +38(050) 4 02 62 12;

E-mail: sm261245@gmail.com.

Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, str. Universitetska 16, Kharkiv, Ukraine, 61003;

EVALUATION OF TEMPERATURE OF PRODUCTS OF COMBUSTION OF GAS COAL IN THE BOILER FURNACE TPP-312A CHANGES IN THE COMPOSITION OF COAL FROM THE ENRICHED TO LOW-GRADE

The article covers the issues of transition for use in thermal power plants non-design coal instead of scarce project fuel. Coal is the main fuel for thermal power plants in Ukraine, and its dominance in the energy balance of Ukraine is in line with global trend. The vast majority of boilers, operated at thermal power plants of Ukraine, was designed to burn coals with ash content from 18% to 25 %. During the operation of the Park of boilers calorific value of coal compared with the project performance has decreased in 1,5 times, and the efficiency of boilers at thermal power plants decreased to the level from 80 % to 82 %. To compensate for the efficiency losses (particularly for coal), used the "lighting" of the torch by burning natural gas or fuel oil, 25% stake in the total dissipation. When using "backlight" in the root of the torch on the more reactionary "podsvetchnogo" consumption is the main part of the oxidizer, so the coal dust in the flame burning under conditions of low oxygen concentration. This leads to an increase of physical underburning and, accordingly, to limit the permissible lower limit for the calorific value of used coal. All this, plus the high price of "podsvetchnogo" fuel limits its application in thermal power plants. Given prior reliable quantitative assessment of its consequences. The effect of the ash content of fuel on temperature field in a boiler furnace, as a criterion of the ability and effectiveness of the transition to the use at thermal power plants non-design coal instead of scarce project fuel. The calculation of the temperature field of the furnace of the boiler by means of a computer program "FURNACE (KGTU)". Justification of the choice of method for calculating the characteristics of heat transfer in the furnace of a pulverized coal boiler.

Key words: boiler plant, furnace, gas window, volume, flue gases, temperature, nominal regime, project coal, enrichment, ash content, slagging, heat exchange model, approximation, radiation coefficient, screen.

Введение

Уголь является сегодня основным топливом для ТЭС в Украине, причем доминирование его в сырьевом энергетическом балансе Украины соответствует общемировому тренду что, по-видимому, сохранится на длительную перспективу.

В подавляющем большинстве котлы, эксплуатируемые на ТЭС Украины, произведены в 1950 - 1970-х годах, и они были спроектированы для сжигания углей с зольностью от 18 % до 25 % [1]. Так, согласно [2], за время эксплуатации сегодняшнего парка котлов теплота сгорания угля по сравнению с проектными характеристиками уменьшилась в 1,5 раза. По этой причине, а также из-за физического износа котлов и систем пылеприготовления, КПД котлов на ТЭС снизились до уровня от 80 % до 82 %.

Для компенсации потерь КПД (в частности для угля с $V^2 \leq 20\%$), часто применяют «подсветку» факела за счет сжигания природного газа или мазута, долей до 25 % в общем тепловыделении. При использовании «подсветки» в корне факела на более реакционное «подсветочное» топливо расходуется основная часть окислителя, поэтому угольная пыль в факеле горит в условиях пониженной концентрации кислорода. Это приводит к росту физического недожога и, соответственно, к ограничению допустимого нижнего предела для теплоты сгорания используемых углей. Все это, а также высокая цена «подсветочного» топлива ограничивает возможности его применения на ТЭС.

Эффективным способом обеспечения необходимого качества энергетического угля является его обогащение, то есть уменьшение зольности. За счет этого удастся исключить «подсветку» факела, сохранив полноценное сжигание в котлах пылеугольных ТЭС [3]. Поэтому возникает задача выбора угля и оценки уровня его обогащения. Но цена такого угля высока, и ТЭС Украины чаще всего экономически не готовы к его использованию.

Из вышесказанного следует, что для теплоэнергетики Украины актуально широкое использование на ТЭС низкосортных (непроектных) углей, доля которых в угледобыче страны велика. Термин «проектные» относится к углям, под характеристики которых спроектированы эксплуатируемые на ТЭС котельные установки [4]. Поэтому для ТЭС перспективно обеспечение экономической эффективности сырьевого ресурса путем перехода на использование наиболее дешевых и доступных низкосортных углей [5]. К таким обычно относят угли с теплотой сгорания до 14 МДж/кг, зольностью выше 50 % и влажностью до 40 %. Для Украины такие угли характеризуются средним и высоким содержанием серы, и высоким выходом летучих веществ [6].

Однако использование непроектных углей приводит к нарушению устойчивости горения в топке, шлакованию поверхностей теплообмена, снижению количества и ухудшению качества пыли, и росту вредных выбросов в окружающую среду [4, 5]. Поэтому переход на непроектные угли нуждается в предварительной оценке последствий их использования. По результату такого оценивания оптимизируют поиск замещающих углей, на начальных этапах прогнозируют значимые последствия смены топлива [4, 7], уменьшают затраты на экспериментальную проверку предложенных решений.

Влияние балласта твердого топлива на характеристики процесса горения в топках пылеугольных паровых котлов

Для энергетических марок углей из-за неоднородности угольной массы в первую очередь важны два показателя — содержание золы и серы. С их помощью обеспечивается стабильность качества угля, что является определяющим для энергетиков. Так, например, снижение зольности на 10% увеличивает теплоту сгорания угля почти на 25 % [8].

Увеличение зольности топлива негативно влияет на базовый для работы котла процесс горения в топке, что следует из анализа нижеследующих публикаций.

В работе [9] приведены экспериментальные данные, полученные на котле ТП-100 при сжигании смеси АШ и шлама. На их основании рассмотрена зависимость $\eta_{бр}$ котла от A^p топлива и показано, что за счет роста потерь теплоты q_2 и q_4 величина $\eta_{бр}$ снижается суммарно на величину от 5 % до 7 %. В свою очередь, в работе [10] отмечено, что при сжигании газовых и длиннопламенных углей вклад q_4 в общее снижение $\eta_{бр}$ существенно ниже. Так, для донецких углей ГСШ в диапазонах изменения $Q_n^p =$ от 21,8 МДж/кг до 15,9 МДж/кг и $A^p =$ от 22 % до 40 %, значение q_4 возрастает от 0,32 % до 0,77 %. Суммарное уменьшение $\eta_{бр}$ котла ТПП-312, сжигающего ГСШ в указанном диапазоне изменения Q_n^p , составляет 1,9 % или 0,15 % на каждый МДж/кг.

Изменение зольности топлива существенно сказывается на температуре дымовых газов в топке. В частности, из экспериментальных результатов работы [9] следует, что при сжигании угля марки АШ увеличение A^p топлива приводит к снижению температуры газов в зоне шлаковой летки, а также к росту температуры ϑ_T'' в районе газового окна на выходе из топки. Так, снижение величины Q_n^p на 4 МДж/кг (за счет роста A^p), приводит к росту ϑ_T'' на 150 оС. При изменении A^p топлива от 32 % до 42 % при номинальной нагрузке котла ϑ_T'' возрастает на 60 оС.

В работе [11] для бурых углей расчетным путем (при постоянной горючей массе топлива и изменении его влажности) установлено, что повышение A^c на каждые 10 %

приводит к снижению адиабатической температуры g_a дымовых газов на величину от 40 оС до 100 оС. Температура факела при этом снижается на величину от 30 оС до 90 оС. В свою очередь, уменьшение W^p на 10 % повышает g_a на величину от 100 оС до 160 оС, а температуру в ядре факела на величину от 85 оС до 130 оС (в зависимости от зольности).

В работе [12] результаты расчётного анализа, выполненного для котла ПК-10, показали, что характер изменения g_T'' (при увеличении A^p топлива на величину от 17 % до 46 %) существенно изменяется, проходя через экстремум. При росте A^p на величину от 17 % до 26 % величина g_T'' падает от 1248 оС до 1230 оС, а при дальнейшем росте A^p величина g_T'' достигает 1302 оС. Там же предложено объяснение полученной зависимости температуры g_T'' : снижение g_T'' с ростом A^p до определённого предела происходит за счёт увеличения степени черноты факела, а при дальнейшем увеличении A^p рост g_T'' происходит за счёт преимущественного влияния рассеивания лучистой энергии на частицах золы при возрастании ее концентрации в топке. Выполненный в [12] расчет базируется на трехмерной модели теплообмена в топках пылеугольных котлов [13]. В [12] также отмечается, что похожие в качественном отношении результаты получаются и при расчётах g_T'' по 3-й редакции нормативного метода Теплового расчета котлов [14]. По-видимому, такое сходство объясняется близостью базовых физических моделей радиационного теплообмена в топках котлов, принятых в [13] и [14]. В пользу такого вывода говорят и данные [12] о том, что при подобных расчетах согласно более ранней редакции нормативного метода [15], где эффект рассеивания лучистой энергии не учитывался, результаты для малозольных и высокозольных углей существенно отличались от результатов, полученных согласно [13] и [14].

Из приведенных результатов следует, что при росте A^p угля происходит уменьшение температуры ядра факела, а с ней и температуры газов в ошипованной части топки. При этом температуры g_T'' газов на выходе из топки с увеличением зольности растут, но для низких значений A^p угля возможно и уменьшение g_T'' .

Постановка задачи исследования

Все проблемы, создаваемые использованием непроектных углей, в конечном итоге «оказываются» в топке котла вместе с угольной пылью, где она достаточно (или недостаточно) эффективно сгорает. Поэтому для выбора оптимальных свойств угля необходимы оценки характеристик процесса его горения в топке котла [4].

Из приведенного анализа источников следует, что изменение зольности топлива влияет на температуры дымовых газов, в том числе и в зонах, где шлакование поверхностей тепловых экранов приводит к потере работоспособности котла. Поэтому в качестве объекта исследования мы рассматриваем температурные поля дымовых газов в топке. Предполагается, что температуры шлака равны температурам соответствующих дымовых газов.

Конечной целью данного исследования является выбор угля, который можно сжечь в данном котле с требуемой эффективностью и без шлакования поверхностей тепловых экранов. Критерием для этого выбора являются температуры начала деформации золы и температуры начала нормального жидкого шлакоудаления для исследуемого угля.

Характеристики проектного топлива

Проектное топливо - донецкий уголь марки Г, класс «отсев» (аналог –№ 7 в [14]).

Рабочая масса этого угля: $W^P = 12,0 \%$; $A^P = 35,0 \%$; $C^P = 41,3 \%$; $H^P = 3,0 \%$; $N^P = 0,8 \%$; $S_{к+орг}^P = 3,1 \%$; $O^P = 4,8 \%$. Выход летучих на горючую массу – $V^e = 42 \%$. Нижняя теплота сгорания (рассчитанная по составу рабочей массы) $Q_n^P = 16548$ кДж/кг.

Температура $t_{н.ж.}$ нормального жидкого шлакоудаления для используемого угля $t_{н.ж.} = 1500$ °С [14]. Температура начала деформации шлака $t_A \cong 1200$ °С согласно [16] и по данным технической документации ТЭС. Фракционный состав золы угля - 16,6 мкм.

Конструктивные и режимные характеристики котла ТПП-312А, необходимые для теплового расчета топки

Для решения задачи исследования необходимы данные о конструктивных и режимных характеристиках топки котла, принципиальная схема которого приведена на рис. 1. Паровой котел прямоточный, сверхкритического давления рабочего тела, с промежуточным перегревом пара. Он вырабатывает перегретый пар с давлением 25 МПа и температурой 545 °С. Расход перегретого пара 263,9 кг/с (950 т/ч), расход вторичного пара 216,7 кг/с.

Компоновка котла выполнена по П-образной схеме. Топка открытая, однокамерная, прямоугольного сечения. В верхней части камеры (под перевалом на высоте 15,2 м) вводятся дымовые газы рециркуляции. Высота до ширмового пароперегревателя - 34 м. Высота топки - 41,5 м. Размеры газового окна: 9 м×17 м. Объем топки - 5100 м³. Подовые экраны и НРЧ до отметки 14 м покрыты зажигательным поясом. Шлакоудаление жидкое через две летки в поду топки. Топка оборудована восьмью вихревыми горелками, встречно расположенными в один ярус на фронтальной и задней стенках. Высота оси горелок - 3,36 м.

Моделирование зависимости расхода угля от его зольности

Расчет номинального режима работы котла выполнен для проектного угля согласно нормативному методу расчета котлов [17]. Получены следующие характеристики: КПД котла brutto $\eta_{бр} = 92,4 \%$; полезно использованная теплота в топке $Q_1^P = 664500$ кВт.

При моделировании зольность изменяют от $A^P = 15\%$ до $A^P = 60\%$ с шагом 5%. Анализ раздельного влияния компонентов балласта топлива предполагает фиксацию содержания в топке котла одного из них (например - влаги) при заданном изменении другого (зольности).

При моделировании это условие можно выполнить лишь приближенно, зафиксировав величину $W^P = \text{const}$. В принципе, это возможно за счет применения разомкнутой схемы пылеприготовления с использованием шнековых сушилок как отдельно, так и в сочетании с шахтными сушилками [5]. Но при этом расход влаги включает и переменную долю, определяемую изменением расхода угля, что приводит к дополнительному тепловому эффекту, который является погрешностью модели (нарушается условие фиксации расхода влаги). Но этот эффект отвечает реальным условиям горения в топке.

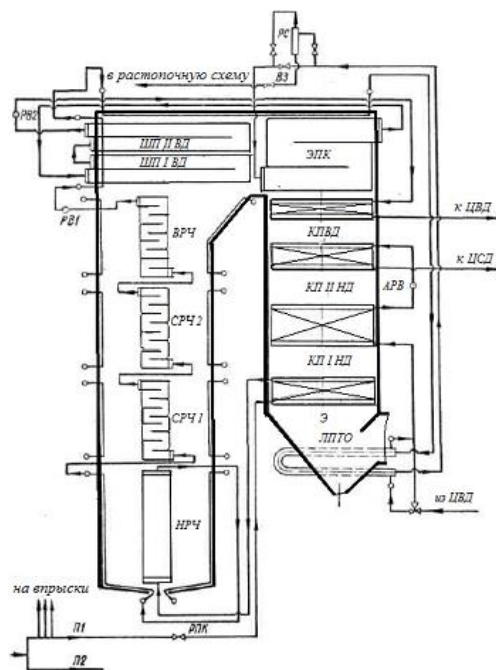


Рис. 1 - Принципиальная тепловая схема котла ТПИ-312 А

В работе моделируется подсушка угля в ходе топливоподготовки до постоянной величины $W^P = 10 \%$. Пересчет состава рабочей массы топлива выполняется согласно [17].

По данным [18], для газового угля при изменении расхода в 2 раза величина $\eta_{бр}$ изменяется (падает) в пределах до 2 % от первоначальной. Поэтому принимаем величину $\eta_{бр}$ постоянной на всем диапазоне изменения A^P , и равной 92,4 % (номинальный режим). Величина Q_1^P также принимается постоянной (соответствует номинальному режиму). Результаты расчетов Q_H^P и расхода топлива B_P приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость расчетных величин Q_H^P и B_P от величины A^P угля

$A^P, \%$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$Q_H^P, \text{кДж/кг}$	23594	22188	20775	19366	17955	16553	15260	13849	12440	10918
$B_P, \text{кг/с}$	30,3	32,3	34,4	37,0	39,9	43,2	46,9	51,7	57,5	65,5

Выбор и обоснование метода расчета характеристик теплообмена в топке пылеугольного котла

Для решения поставленной в работе задачи необходимы оценки температурных полей дымовых газов в объеме топки. Их получение сводится к решению многофакторной стационарной, нелинейной, неоднородной и трехмерной задачи тепломассообмена в топке котла. Это решение базируется на нормативном методе ЦКТИ [14], который дает

возможность получать оценки характеристик теплообмена в топке. Но идеализированная одномерная схема топочного процесса и ряд предположений, которые лежат в ее основе, зачастую недостаточно соответствуют реальным условиям работы топочных устройств. Так, в работе [19] отмечается, что нормативный метод базируется на применении теории подобия к процессам теплообмена, и суммарный теплообмен определяется в зависимости от безразмерных критериев Больцмана (Bo) и критерия Бугера (Bu) в [14]. Фактически, это эмпирический метод, с многочисленными не всегда физически обоснованными поправками от конструктивных, режимных и прочих факторов, а также от свойств топлива. Кроме того, соотношение критериев Bo и Bu индивидуально для каждого котла и обобщающая его зависимость может дать грубое приближение.

Также в [19] делается вывод, что при подготовке эксперимента по сжиганию непроектного угля необходима компьютерная модель горения в топке на физически обоснованных принципах. И таким требованиям отвечает модель зонального метода расчета теплообмена, предложенная в [13, 20]. Автор указывает на то, что тестирование этой модели по результатам исследований достаточно большого количества котлов в ВТИ, УралВТИ, а также по данным испытаний зарубежных котлов [13] показало хорошее соответствие. Метод [13, 20] соединяет в себе возможности, как зональных методов, так и подходов нормативного метода. Принципиальным преимуществом метода является трехмерное описание геометрии топки котла и представление коэффициентов теплообмена нелинейными и неоднородными зависимостями. Также в расчетной модели [20] учитывается рассеяние лучей золовыми частицами, что существенно повышает ее адекватность исследуемым процессам.

При пространственном описании топки согласно [13, 20], ее объем целесообразно разделить на зоны, в пределах которых предполагается идентичность и однородность процессов тепломассообмена, полей температур, скоростей и других переменных состояния рабочей среды и элементов конструкции. Такое разделение оптимально выполнять плоскими параллельными гранями. При этом объемные зоны образуются в виде параллелепипедов, а поверхностные — прямоугольников. В результате действительные непрерывные поля температуры и физических характеристик тел заменяются конечным числом ступенчато-прерывных однородных участков. В каждой объемной зоне задаются тепловыделение и массовые перетечки через все плоскости соприкосновения с соседними объемными зонами, а также радиационные характеристики среды. В каждой поверхностной зоне задаются температуры стенок, температура внутренней среды, тепловые сопротивления и степень черноты внешнего загрязнения стенок.

Расчет температурного поля топки котла с помощью вычислительной программы «FURNACE (KGTU)». Представление исходных данных

Схема аппроксимации объема топки для котла ТПП-312А показана на рис. 2, где топка разбита на объемные зоны (блоки). В свою очередь, каждый блок разбит на кубы одинакового размера (на рисунке не показаны), в пределах которых температура и оптико-геометрические характеристики среды принимаются постоянными.

При этом размеры блоков кратны величине ребра куба, которая вычисляется для каждого случая. Интегральные уравнения теплообмена излучением в топке заменяются при этом конечной системой нелинейных балансовых алгебраических уравнений. Из решения этой системы определяется пространственное поле температур дымовых газов, которое соответствует температурам кубов. Такой подход существенно повышает физическую адекватность модели теплообмена в топке и дает возможность ее более детального исследования.

Схема аппроксимации (рис. 2) объема топки блоками по осям координат задана следующим образом: $X \times Y \times Z = 4 \times 3 \times 11$. В итоге, количество блоков аппроксимации – 144, количество кубов – 828. Размер ребра куба получен равным 1,804 м.

Для решения поставленной задачи целесообразно использовать возможности свободно распространяемого программного обеспечения (СРПО), которое включает программы, ориентированные на моделирование теплоэнергетических систем [21]. К СРПО относится и вычислительная программа «Furnace (KGTU)», разработанная под

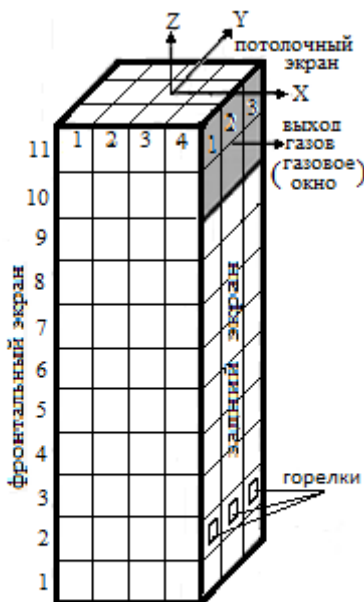


Рис. 2 - Схема аппроксимации блоками объема топки котла ТПШ-312А

руководством д.т.н. Е.А. Бойко (Красноярский государственный технический университет) [22]. Программа предназначена для использования при наладке и эксплуатации топок паровых котлов и позволяет проводить вычислительные эксперименты. В ней реализован зональный метод расчета теплообмена [20]. Программа имеется в свободном доступе в Internet [22]. Для горелок задаются распределения подаваемого в топку воздуха и дымовых газов (приняты двумерными) по глубине и высоте топки. Также задается распределение воздуха и аксиальных массовых скоростей газов в каждом горизонтальном слое.

В программе введена «изотермическая проверка» - сравнение степени черноты объема топки, полученной суммированием тепла излучения от всех объемных зон при одинаковой температуре в них, со степенью черноты, рассчитанной по эффективной толщине газового слоя. Расхождение должно быть не более 10%, но обычно оно не превышает 5%.

Полученная при расчете система нелинейных балансовых уравнений решается методом Ньютона-Рафсона и требует трех-шести итераций.

Результаты исследования влияния зольности угля на температуры в топке парового котла ТПШ-312А. Оценки температур дымовых газов в зоне пода топки

В табл. 2 и на рис. 3 приведены температуры $t_{под}^{min}$ дымовых газов для блока с координатами ($Z=1; X=1; Y=1$) в зоне пода топки в зависимости от зольности угля. Температуры газа в этом блоке соответствуют минимальному уровню в зоне пода топки.

Как следует из таблицы 2, изменение зольности от 15 % до 60 % приводит к уменьшению минимальной температуры газов в зоне пода топки на 152 °С.

Таблица 2

Температуры $t_{под}^{min}$ дымовых газов в зоне пода топки для блока с координатами (Z=1; X=1; Y=1) в зависимости от зольности угля

Зольность топлива, A^p , %	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Температуры газов $t_{под}^{min}$, °C	1666	1656	1642	1635	1623	1620	1591	1554	1533	1514

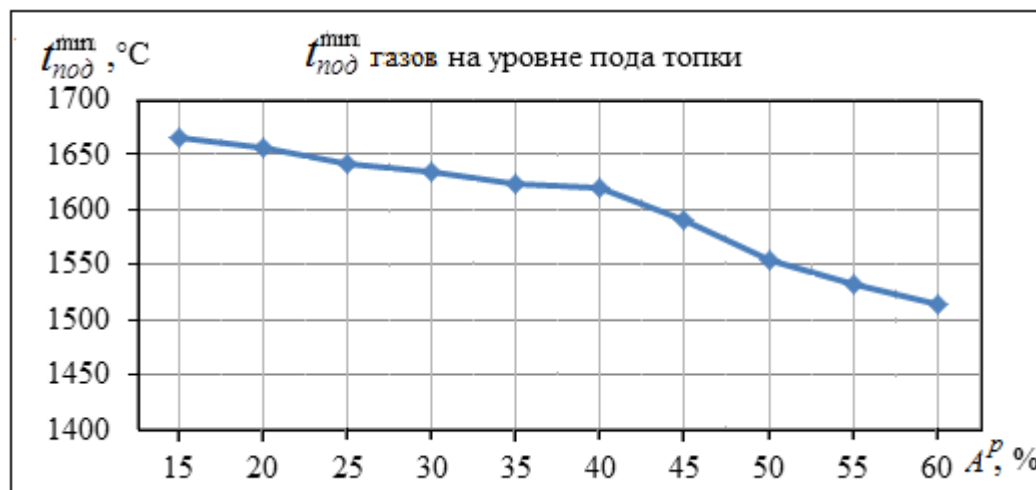


Рис. 3. Температуры $t_{под}^{min}$ газов в зоне пода топки для блока (Z = 1; X = 1; Y=1) в зависимости от зольности угля

Наиболее интенсивное падение температуры происходит в диапазоне изменения зольности от 45 % до 50 % и равно 44 °C, то есть, на 1 % роста зольности приходится 7,4 °C падения температуры. В диапазоне от 35 % до 40 % температура газов практически постоянна.

Оценки температуры дымовых газов на выходе из топки

В табл. 3 и на рис. 4 приведены результаты оценки температуры дымовых газов g_T'' на выходе из топки в зависимости от величины A^p угля.

Таблица 3

Температуры дымовых газов g_T'' на выходе из топки в зависимости от зольности A^p угля

Зольность A^p , %	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
g_{Tmax}'' , °C, блок (Z=10; X=4; Y=2)	1241	1223	1207	1209	1215	1231	1238	1253	1289	1333
g_{Tmin}'' , °C, блок (Z=11; X=4; Y=1)	1106	1087	1070	1072	1079	1096	1107	1149	1193	1262

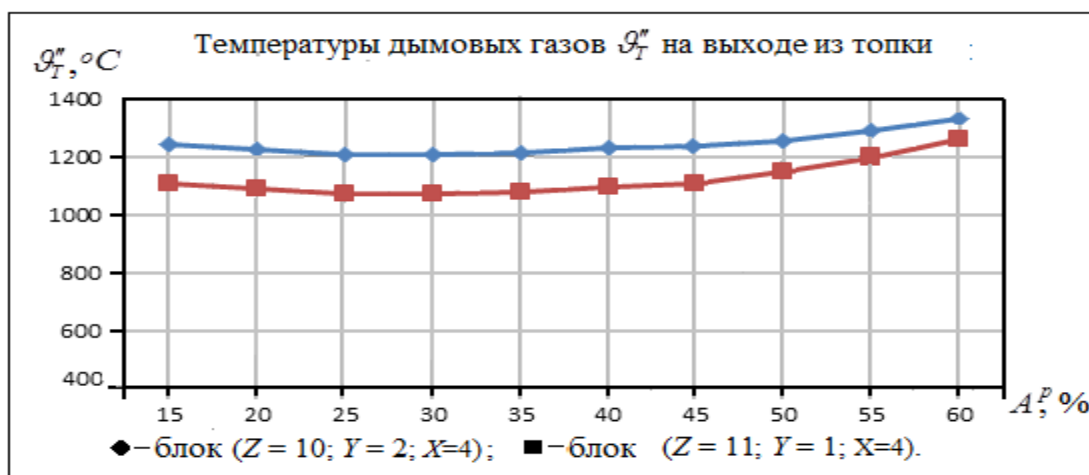


Рис. 4 Зависимость температуры g_T'' дымовых газов на выходе из топки от зольности угля

Из данных табл. 3 следует, что с ростом зольности топлива (от $A^P = 15\%$ и до $A^P = 25\%$) на 1% , величина g_T'' падает, в среднем, на $3,4\text{ }^\circ\text{C}$ в блоке ($Z=10; Y=2; X=4$) и на $3,6\text{ }^\circ\text{C}$ в блоке ($Z=11; Y=1; X=4$). На интервале изменения зольности от $A^P = 25\%$ до $A^P = 30\%$ величина g_T'' практически постоянна. В свою очередь, с ростом зольности топлива (от $A^P = 30\%$ и до $A^P = 60\%$) на 1% , величина g_T'' растет, в среднем, на $20,7\text{ }^\circ\text{C}$ в блоке ($Z=10; Y=2; X=4$) и на $31,7\text{ }^\circ\text{C}$ блоке ($Z=11; Y=1; X=4$).

Распределение в плоскости газового окна температур g_T'' газов, средние температуры $g_{T\text{cp}}''$ газов и максимальные градиенты температуры $\Delta g_{T\text{max}}''$ (полная температурная разверка по газу) в зависимости от зольности A^P угля приведены в табл. 4.

Из данных табл. 4 следует, что максимальный перепад $\Delta g_{T\text{max}}''$ между температурами блоков в плоскости газового окна изменяется незначительно - от $135\text{ }^\circ\text{C}$ для зольности $A^P = 15\%$ до $131\text{ }^\circ\text{C}$ при $A^P = 45\%$. При дальнейшем возрастании зольности до максимальной величины $A^P = 60\%$, $\Delta g_{T\text{max}}''$ падает до $71\text{ }^\circ\text{C}$. Для проектного угля с $A^P = 35\%$ величина $\Delta g_{T\text{max}}''$ равна $136\text{ }^\circ\text{C}$.

Выводы из результатов выполненной работы

1. Существующие расчетные модели горения в топке обеспечивают получение достоверных численных оценок последствий смены проектного угля для температурных режимов работы топки, что важно для возможности оптимального выбора замещающего угля.
2. В нашем случае температура дымовых газов на уровне пода топки падает с переменной скоростью для всего заданного диапазона изменения зольности угля, но минимальная величина этой температуры остается выше температуры нормального жидкого шлакоудаления ($1500\text{ }^\circ\text{C}$) для используемого угля. Поэтому можно исключить возможность шлакования пода топки и забивания леток.

3. Температура g_T'' газов на выходе из топки при изменении зольности от $A^P = 15\%$ до $A^P = 30\%$ падает (на 34 оС), от $A^P = 30\%$ до $A^P = 35\%$ практически постоянна, а при изменении зольности от $A^P = 35\%$ до $A^P = 60\%$ возрастает (на 118 оС). Такой характер изменения g_T'' можно объяснить влиянием золы на основные характеристики радиационного теплопереноса в запыленных средах.

Таблица. 4

Распределение в плоскости газового окна температур газов g_T'' , средняя температура $g_{T\text{cp}}''$ и максимальные градиенты $\Delta g_{T\text{max}}''$ в зависимости от A^P угля

Зольность $A^P, \%$	Координаты куба	Y=1, X= 4	Y=2, X= 4	Y=3, X= 4	Средняя температура в газовом окне, $g_{T\text{cp}}'', \text{oC}$	Максимальный градиент по газу в газовом окне, $\Delta g_{T\text{max}}'', \text{oC}$
		Температуры g_T'', oC газов в плоскости газового окна				
15	Z=11	1106	1155	1106	1151	135
	Z=10	1109	1241	1190		
25	Z=11	1070	1119	1070	1129	137
	Z=10	1155	1207	1155		
35	Z=11	1079	1129	1079	1138	136
	Z=10	1162	1215	1162		
45	Z=11	1107	1158	1107	1163	131
	Z=10	1185	1238	1185		
55	Z=11	1193	1240	1193	1232	96
	Z=10	1239	1289	1239		
60	Z=11	1262	1301	1262	1291	71
	Z=10	1293	1333	1293		

Так, при увеличении зольности растет коэффициент излучения факела горящего топлива, что приводит к увеличению количества полезно использованного экранами тепла, отчего температура газов уменьшается. Одновременно растет поглощение лучистой энергии более холодными пристеночными газами, от чего величина полезно использованного тепла падает, и температура газов возрастает. В свою очередь, рост зольности потока газов увеличивает рассеяние лучистой энергии факела на частицах золы, что приводит к уменьшению количества полезно использованного тепла, и температура газов возрастает. Таким образом, соотношение вклада каждого из указанных процессов в суммарный эффект определяет величину g_T'' для заданной величины зольности.

- Полученные оценки величин и характер изменения температур газов g_T'' на выходе из топки, не противоречат данным литературных источников, рассмотренных в работе.
- Полученные результаты показали, что для номинального режима работы котла ТПП-312А его надежная работа (без шлакования экранов в зоне газового окна) возможна только для зольности исследованного топлива в интервале от $A^P \approx 25\%$ до $A^P \approx 35\%$ (это без учета свойств первичного слоя золы топлива).

6. С ростом зольности топлива величина максимального температурного градиента $\Delta g_{Tmax}''$ газов на выходе из топки уменьшается в пределах от $137\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $71\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поэтому величину средней по газовому окну температуры g_{Tcp}'' можно использовать для тепловых расчетов только для зольности от $A^p \approx 55\%$ до $A^p \approx 60\%$. В остальных случаях необходимо учитывать максимальную температуру газов в этой плоскости.

Список использованной литературы:

1. Чернявский Н. В. Влияние обогащения энергетических углей на их калорийность и эффективность сжигания на тепловых электростанциях // Збагачення корисних копалин: науково-технічний збірник. – Дніпропетровськ, Нац. гірн. університет. - 2012. – Вип. 49(90). – С.10-22.
2. Шуваева Н. М. Повышение эффективности подготовки к факельному сжиганию низкоресурсных углей Украины / Н. М. Шуваева, О. М. Борисенко, О. А. Борисенко // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2005. – № 6. – С. 124-129.
3. А. Ю. Майстренко Вопросы повышения эффективности использования твердого топлива на ТЭС/ Майстренко, Н. В. Чернявский // Энергетика и электрификация. – 2004. – С. 17-27.
4. Гиль А. В. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо: Монография/А. В. Гиль, А. В. Старченко, А. С. Загорин. –Томск: СТТ, 2011 –184 с.
5. Белосельский Б. С., Барышев В. И. Низкосортные энергетические топлива: особенности подготовки и сжигания. / Б. С. Белосельский, В. И. Барышев – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 136 с.
6. Ильченко К. Д., Ревенко М. Б. Теплофизические свойства углей Украины / К. Д. Ильченко, М. Б. Ревенко - Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов. – Днепропетровск: издательство НМЕТАУ 2009. – С.110-117.
7. Томилов В.Г. Исследование влияния качества топлива на эффективность котельных агрегатов в условиях задачи изменения топливного баланса ТЭС / В.Г. Томилов, Е.Н. Яганов // Состояние и перспективы развития электротехнологии. Том II Теплоэнергетика: материалы Международн. научн.-техн. конф. – Иваново, 2013. - С. 94-97.
8. Маркова В. Обогащаться углем / В. Маркова, В. Чурашев // Эксперт Сибирь. - 2011. - №15-16. С. 26-30.
9. Капельсон Л. М. Влияние качества АШ на работу котла с полуоткрытой топкой / Л. М. Капельсон, В.Ф. Бусурин и др. // Электрические станции. - 1978. - №5. - С. 20-23.
10. Ларионов В. Ф. Влияние качества твердого топлива на экономичность работы котлов блоков 200 и 300 МВт/ В.Ф. Ларионов, В. И. Кошман, А. Е. Суворов // Энергетика и электрификация. – 1986. - №4. - С. 2-3.
11. Пылеприготовительные системы буроугольных котлов в СССР и за рубежом [Текст]: обзор / НИИ Эинформэнергомаш; отв. ред. В. Н. Бугина. - М.: НИИ Эинформэнергомаш, 1978. - 39 с.
12. Алехнович А.Н. Влияние минеральной части на показатели и характеристики энергетических углей / А.Н. Алехнович // Энергетик. – 2008. – № 3. – С. 8–13
13. Абрютин А.А. Развитие метода и программы трехмерного зонального расчета теплообмена в топочных камерах пылеугольных котлов / А.А. Абрютин, Э.С. Карасина, Б.Н. Лившиц и др.// Теплоэнергетика.- 1998.- №6. – С. 20-24.
14. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). Изд. 3-е, перераб. и дополн./НПО ЦКТИ, СПб, 1998.-256 с.
15. Резников М. И. Котельные установки электростанций: Учебник для техникумов. 3-изд., перераб. / Резников М. И., Липов Ю. М. – М. Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.
16. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). [Под ред. Н. В. Кузнецова]. 1973. М.: Энергия, 1973. - 296с.
17. Бойко Е.А. Котельные установки и парогенераторы (Тепловой расчет парового котла). Учебное пособие / Е.А. Бойко И. С. Деринг, Т. И. Охорзина. - Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – 96 с.
18. Мадоян А. А. Эффективное сжигание низкосортных углей в энергетических котлах /А. А. Мадоян, Балтян В. Н., Гречаный А. Н. - М: Энергоатомиздат, 1987. (Б-ка теплотехника). – 104 с.
19. Алехнович А.Н. Состояние и проблемы расчета теплообмена в пылеугольных топках / А. Н. Алехнович. // Электрические станции. - 2015. - № 3. - С.32-36.
20. Карасина Э.С. Опыт применения программы трехмерного зонального метода расчета теплообмена в топочных камерах пылеугольных котлов энергоблоков мощностью 350 и 575 МВт/ Э.С. Карасина, Б.Н. Лившиц, Б.Р. Чудновский, А.Е. Таланкер. - Теплоэнергетика, 2010, №10
21. Демиденко Л.Л. Возможность использования свободно распространяемого программного обеспечения при подготовке студентов–теплоэнергетиков / Л.Л. Демиденко., Р.В. Хасанова, А.В. Мурзадеров и др. // Современные информационные технологии. 2013. № 17 (17). С. 239-243.

21. Бойко Е.А. Программа трехмерного зонального метода расчета теплообмена в топочных камерах паровых котлов. Руководство пользователя. [Электронный ресурс]/ Е.А. Бойко//Режим доступа к журн.:// <http://enek.ru>.

Referenses:

1. Chernyavskiy N. V. Vliyanie enriching of power coals on their calorie content and efficiency of incineration on thermal power-stations of // Zbagachennyya korisnikh kopalinn: naukovno-tekhnichniy zbirnik. – Dnpropetrovsk, Nac. grn. universitet. –2012. – Vip. – 49(90). – P. 10–22.
2. Shuvaeva N. M. Povyshenie to efficiency of preparation to torch incineration of nizkoreakcionnykh coals of Ukraine / N. M. of Shuvaeva, O. of M. of Borisenko, O. A. Borisenko // Announcer Nac. tekhn. un-that "KHPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Power and heating engineering processes and equipment. it is Kharkov: NTU "KHPI". – 2005. – № 6. – С. 124–129.
3. Maystrenko A. Yu. voprosy increases of efficiency of the use of hard fuel on TES/ And. Yu. Maystrenko, N. V. Chernyavskiy // Energy and electrification. – 2004. – P. 17–27.
4. Gil A. V. Primenenie numeral design of fire-box processes for practice of translation of caldrons on an unproject fuel: Monograph / A. V. Gil, A. V. Starchenko, A. S. Zavorin. it is Tomsk: STT, 2011. – 184 p.
5. Beloselskiy B. S., Baryshev V. I. Nizkosortnye power fuels: features of preparation and incineration. / B. . Belosel'skiy, V. I. Baryshev – M.: Energoatomizdat, 1989. – 136 p.
6. Ilchenko K. D., Revenko M. B. Teplofizicheskie properties of coals of Ukraine / K. D. Ilchenko, M. B. Revenko – Metallurgical heating engineering. Collection of scientific labours. – Dnepropetrovsk: publishing house NMETAU, 2009. – P. 110–117.
7. Tomilov V. G. Issledovanie influences of quality of fuel on efficiency of caldrion aggregates in the conditions of task of change of fuel balance of TES / V. Tomilov, E. N. Yaganov the // State and prospects of development of elektrotekhnologii. Tom II Teploenergetika: materials of Mezhdunarodn. nauchn.– tech. konf. – Ivanovo. 2013. – P. 94–97.
8. Markov V. Obogatit'sya by coal / V. Markov, V. Churashev // Expert Siberia.–2011.–№ 15–16. P. 26–30.
9. Kapelson L. M. Vliyanie qualities of ASH to work of caldrion with the half-open heating / L. M. of Kapelson, V. F. Busurin and other of // the Electric stations. –1978. –№ 5. – P. 20–23.
10. Larionov V. F. Vliyanie qualities of hard fuel on the economy of work of caldrons of blocks 200 and 300 MVt/ of V. of F. Larionov, V. And. Koshman, A. E. Suvorov // Energy and electrification. – 1986. – № 4.–P. 2–3.
11. Pyleprigotovitel'nye of the system of lignite caldrons in the USSR and abroad [Text]: review / NII of Einformenergomash; otv. red. V. of N. Butine. - M.: of NII of Einformenergomash, 1978. –39 p.
12. Alekhnovich A. N. Influence of mineral part on indexes and descriptions of power coals / A. N. Alekhnovich // Power engineering Specialist. – 2008. – № 3. – P. 8–13
13. Abryutin A. A. Razvitie method and program of three-dimensional zonal calculation of heat exchange in the fire-box chambers of pyleugol'nykh caldrons / And. And. Abryutin, E. P. Karasina, B. N. Livshic and dr.// Teploenergetika. –1998. – № 6. – P. 20–24.
14. Teplovoy calculation of caldrons (normative method). A publ. 3th, pererab. and dopoln. / NPO of CKTI, SPb, 1998. – 256 p.
15. Reznikov M. I. Kotelnye settings of power-stations: Textbook for tekhnikumov. 3-izd., pererab. / Reznikov M. I., Lipov Yu. M. – M. Energoatomizdat, –1987. – 288 p.
16. Thermal calculation of caldrion aggregates (normative method). [Under red. N. V. Kuznecova]. 1973. M.: Energy, 1973. – 296 p.
17. Boyko E. A. Kotel'nye settings and parogeneratory (Thermal calculation of steam-boiler). Train aid / E. A. Boyko And. P. Dering, T. And. Okhorzina. it is Krasnoyarsk: IPC KGTU, 2005. – 96 p.
18. Madoyan A. A. Effektivnoe incineration of low-grade coals in the power caldrons of /A. A. Madoyan, Balyan V. N., Grechanyy A. N. – M.: Energoatomizdat, 1987. (B-ka of heating engineer).– 104 p.
19. Alekhnovich A. N. Sostoyanie and problems of calculation of heat exchange in the pyleugol'nykh heatings / A. N. Alekhnovich. // the Electric stations. – 2015. –№ 3. – P.32–36.
20. Karasina E. S. Opyt applications of the program of three-dimensional zonal method of calculation of heat exchange in the fire-box chambers of pyleugol'nykh caldrons of power units by power 350 and 575 MVt/ E. S. Karasina, B. N. Livshic, A. E. Chudnovskiy, A. E. Talanker. – Teploenergetika, 2010, № 10.
21. Demidenko L. L. Vozmozhnost' using of freely expandable software for preparation of studentov–teploenergetikov / L. L. Demidenko., R. V. Khasanova, A. V. Murzaderov and other// Modern information technologies. 2013. № 17 (17). P. 239–243.
22. Boyko E. A. Programma three-dimensional zonal method of calculation of heat exchange in the fire-box chambers of steam-boilers. User's guide. [Electronic resource]/ E. A. Boyko//Rezhim of access to zhurn.:// <http://enek.ru>.

Прийнята до друку 05. 12. 2019