

УДК 662.933.12

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АЭРОДИНАМИКИ, ТЕПЛОМАССОБМЕНА, ГОРЕНИЯ И ОБРАЗОВАНИЯ ОКИСЛОВ АЗОТА В ДВУХВИХРЕВОЙ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ КОТЛА БКЗ-640 С ХОЛОСТЫМ ДУТЬЕМ

Н.С. Чернецкая, А.В. Минаков, И.А. Брикман, М.Ю. Чернецкий

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск
E-mail: n_surzhikova@inbox.ru

На основе методов вычислительной гидродинамики выполнены численные исследования двухвихревой топочной камеры котла БКЗ-640 с холостым дутьем. Проведена оценка влияния различных режимных мероприятий в топке на эффективность сжигания топлива, условия шлакования экранных поверхностей, выбросы оксидов азота, а также получены данные по интегральным и локальным распределениям в топке температуры и тепловых потоков.

Ключевые слова:

Топочная камера, уголь, моделирование, шлакование, оксиды азота.

Key words:

Furnace, coal, modeling, slagging, nitrogen oxides.

В последнее время ОАО «Сибэнергомаш», г. Барнаул широко применяет ряд оригинальных решений для схем топочно-горелочных устройств при реконструкции котлов. В одной из разработок при реконструкции котла БКЗ-640-140 ст. № 4 Гусиноозерской ГРЭС принята двухвихревая схема расположения прямоточных горелок в три яруса. Схема отличается тем, что вместо горелок 2-го и 3-го ярусов в центральной зоне заднего экрана установлены сопла для подачи через них воздуха и дымовых газов рециркуляции. Данная топка получила название — топка с задним холостым дутьем. Схема топки приведена на рис. 1.

Экспериментальных сведений по аэродинамике рассмотренной конструкции топочно-горелочного устройства нет, при том что в некоторых вихревых топках и при диагональном расположении горелок аэродинамика не оптимальная, особенно при отключении части горелок.

Одним из способов сравнительной оценки разных схем сжигания, который позволяет дополнить, а в некоторых случаях заменить проведение исследований на крупногабаритной физической огневой модели является, математическое моделирование. Так, с помощью математического моделирования [1] было показано преимущество топки с задним холостым дутьем перед традиционной топкой с двухвихревой схемой сжигания. В работе [1] анализировались варианты со всеми работающими пылесистемами (горелками) и при отключении пылесистем с разгрузкой по топливу 3-го яруса горелок. По результатам расчетов были отмечены следующие отличительные особенности:

- в топке с холостым дутьем наибольшие тепловые потоки и температуры наблюдаются по центру фронтальной стенки на уровне 2-го, 3-го ярусов и ниже начала ската холодной воронки, а в двухвихревой схеме сжигания, максимальные величины, наоборот, имеют место на фронтальной стенке выше 3-го яруса горелок.

- Средняя расчетная температура перед ширмами для топки с холостым дутьем составила 1144 °С, а для двухвихревой топки — 1184 °С.
- Для варианта с двухвихревой схемой сжигания при разгрузке 3-го яруса горелок и правой полутопки наблюдались высокие температуры и тепловые потоки по центру фронтальной стены, а в модели с холостым дутьем — на уровне 2-го и 3-го ярусов, на левой и задней стенах.
- Также для модели с холостым дутьем на фронтальной стене высокие температуры и тепловые потоки проявляются на уровне 1-го яруса горелок и ниже, в области холодной воронки, в модели двухвихревой топки — на уровне 3-го яруса и выше.
- Температура на уровне нижнего среза ширм для варианта с холостым дутьем составила 1134 °С, а для двухвихревой схемы — 1170 °С.

В целом применение холостого дутья в топках с двухвихревой схемой, несмотря на более высокие температуры газов по центру топки на уровне начала ската и в центре холодной воронки, позволяет разгрузить топку выше уровня 3-го яруса горелок. Температура газов на выходе из топки снижается по сравнению с обычной двухвихревой схемой сжигания. Преимущество холостого дутья проявляется в отсутствие какого-либо наброса факела на стенки топки. В топке с двухвихревым сжиганием наблюдается увеличение температуры газов на выходе из топки, сопровождающееся набросом факела в зоне горения и выше нее, на фронтальную стенку, что является неблагоприятным с позиций шлакования.

В данной работе рассматриваются возможные варианты организации сжигания угольного топлива в топке котла БКЗ-640 с двухвихревой схемой сжигания и холостым дутьем с целью уменьшения недожога топлива, снижения концентрации оксидов азота, а также снижения температур и тепловых потоков в областях возможного шлакования

экранов топки. В работе использовался пакет программ «SigmaFlame», который успешно был применен для решения ряда задач моделирования топочных камер пылеугольных котлов [2].

В качестве математической модели в данном программном комплексе для описания течения в топочной камере была принята модель неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа. В рассматриваемой задаче течение газа считается установившимся, поэтому все уравнения записываются в стационарной постановке. Считается, что газы в топочной камере состоят из N_2 , O_2 , CO , CO_2 , H_2O и комплекса летучих C_xH_y . Модель включает уравнения неразрывности, уравнения баланса количества движения, уравнение переноса концентрации компонент, уравнение переноса энергии. В общем виде уравнения сохранения для скалярной величины ϕ записываются:

$$\nabla(\rho \mathbf{v} \cdot \phi) = \nabla(\Gamma \cdot \nabla \phi) + Q_\phi,$$

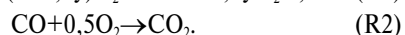
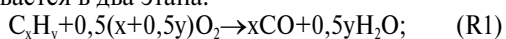
$$\phi = \{1, u, v, w, h, f_i, k, \varepsilon\},$$

где ϕ – скалярная величина; Γ – эффективный коэффициент диффузионного переноса; Q_ϕ – источник член; ρ – плотность, kg/m^3 ; \mathbf{v} – вектор скорости, m/s ; u, v, w – компоненты скорости, m/s ; h – удельная энтальпия, $Dж/кг$; k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций, m^2/c^2 ; ε – диссипация турбулентной энергии, m^2/c^3 ; f_i – массовая концентрация i -го компонента, $кг/кг$.

Как показывает практика расчетов процесса горения в топочной камере, применение k – ε модели турбулентности позволяет с достаточной степенью точности получить необходимые турбулентные характеристики для потока в топочной камере. В данной работе используется высокорейнольдсовая k – ε модель турбулентности. Для определения пульсационных характеристик течения вблизи стенок был использован метод пристеночных функций.

Высокий температурный уровень топочной среды и поверхностей обуславливает преобладание радиационного теплообмена. Решение уравнения переноса лучистой энергии базируется на P1 приближения метода сферических гармоник [3]. Коэффициенты поглощения газа вычисляются по модели суммы серых газов.

Расчет горения летучих компонент топлива основан на использовании глобальных необратимых реакций между горючим и окислителем. Скорость горения i -реагента, в том числе и летучих, определяется с учетом реакционной способности и концентрации горючего и окислителя, а также скорости турбулентного перемешивания топлива и окислителя. Данная модель представляет комбинацию кинетической модели горения газовых компонент с моделью «обрыва вихря» [4]. Летучие представляются в виде углеводорода C_xH_y , где x и y определяются исходя из состава угля. Горение летучих рассматривается в два этапа:



Константы данных реакций представлены в табл. 1.

Таблица 1. Кинетические параметры горения летучих компонент угля

Реакция	Предэкспоненциальный множитель A [m/c]	Энергия активации E [$Dж/моль$]
R1	$2,8 \cdot 10^9$	$2,023 \cdot 10^8$
R2	$2,2 \cdot 10^{12}$	$1,67 \cdot 10^8$

Для описания процессов движения угольных частиц использовался метод Лагранжа. Для расчета температуры частицы с учетом конвективного и радиационного теплообмена частицы с окружающим газом, при наличии процесса горения угольной частицы, использовалась модель, представленная в [5]. В данной модели были использованы эмпирические выражения, которые дали возможность скорректировать теплообмен с учетом массообменных процессов, происходящих при прогреве и горении угольной частицы.

Для моделирования процессов горения угольной пыли в настоящей работе была принята модель, учитывающая стадийность горения угля: прогрев, выход летучих и горение коксового остатка. Для определения скорости выхода летучих используются выражения, учитывающие сопротивление частицы выходу летучих, и кинетические механизмы разложения, основанные на выражениях аррениусовского типа с обобщенными кинетическими константами. Скорость горения коксового остатка определяется с учетом характера подвода окислителя к реагирующей поверхности и кинетикой реагирования. В модели для описания процесса горения коксового остатка с помощью эмпирического коэффициента учтено различие в изменении его структуры при нагреве и выходе летучих для различных углей. Более подробно с моделью горения угольной частицы можно ознакомиться в работе [5]. Влияние частиц на осредненное движение газа, изменение концентрации газовых компонент и энтальпию учитывалось на основе метода, изложенного в работе [6].

В работе рассматривается три возможных пути образования оксидов азота при сжигании угля: термический путь образования NO_x , быстрое образование NO_x и образование оксидов азота из топливного азота. Образование термических оксидов азота реализовано в математической модели на основе механизма, предложенного Я.Б. Зельдовичем. Быстрые NO_x образуются в присутствии углеводородных радикалов, они преобладают в топливах с высоким значением отношения водорода к углероду $H:C$. Модель образования быстрых оксидов азота реализована на основе механизма, предложенного С.П. Фенимором. Термические и быстрые NO_x не играют определяющей роли в процессе сжигания угля, хотя общая схема комплекса реакций, реализованная в модели, включает механизм их образования. Топливные NO_x вносят основной

вклад в общее количество оксидов азота, образующихся при факельном сжигании угля. Топливный азот, содержащийся в угольном веществе, частично выходит с летучими, а оставшаяся часть — при горении коксового остатка. Топливный азот в газовой фазе находится в виде NCH или NH и преобразуется в результате комплекса реакций при горении в NO или N . Присутствие свободного кислорода способствует образованию NO . Для минимизации выхода топливных NO принято, что уголь должен освобождаться от летучих при максимально возможной температуре в зоне, обогащенной топливом, — выход азота в составе летучих должен быть максимальным, и при пониженной концентрации кислорода преобладают реакции с образованием N по отношению к NO . В процессе газификации угольного топлива и горения коксового остатка происходит превращение азотосодержащих соединений в NH_3 (амиак) и в HCN (цианисоводородную кислоту).

В зависимости от условий, при которых протекают химические реакции этих соединений с топочными газами, происходит образование NO или N_2 . Для детального описания этих процессов необходимо использовать модели с числом реакций более 150. Решение пространственной задачи аэродинамики, теплообмена и горения для реальных топков с таким количеством химических реакций для практических приложений неприменимо из-за значительных затрат компьютерных ресурсов, поэтому для моделирования топливных оксидов азота используют упрощенные кинетические модели образования NO_x .

В данной работе для расчета топливных NO_x была выбрана модель, предложенная в [7], включающая в себя реакции (1, 2) с добавлением реакции «реберинга» (3):

$$\frac{dx_{\text{HCN}}}{dt} = -3,5 \cdot 10^{10} \exp(-3370 / T) x_{\text{HCN}} x_{\text{O}_2}^a, \quad (1)$$

$$\frac{dx_{\text{HCN}}}{dt} = -3 \cdot 10^{12} \exp(-30200 / T) x_{\text{HCN}} x_{\text{NO}}, \quad (2)$$

$$\frac{dx_{\text{NO}}}{dt} = -2,7 \cdot 10^6 \exp(-9466 / T) x_{\text{NO}} x_{\text{C}_m\text{H}_m}, \quad (3)$$

где x — молярная доля соответствующего компонента; a — порядок реакции по кислороду, который рассчитывается по следующим выражениям:

$$a = \begin{cases} 1,0, & x_{\text{O}_2} \leq 4,1 \cdot 10^{-3} \\ -3,95 - 0,9 \ln x_{\text{O}_2}, & 4,1 \cdot 10^{-3} < x_{\text{O}_2} \leq 1,11 \cdot 10^{-2} \\ -0,35 - 0,1 \ln x_{\text{O}_2}, & 1,11 \cdot 10^{-2} < x_{\text{O}_2} < 0,03 \\ 0, & x_{\text{O}_2} \geq 0,03 \end{cases}.$$

Уравнения сохранения для газовой фазы записываются в виде обобщенного закона сохранения в контрольном объеме. Для контрольного объема записывается конечно-разностный аналог уравнения. Для вычисления диффузионных потоков на гранях контрольного объема используется цен-

трально-разностная схема, имеющая второй порядок точности. При аппроксимации конвективных членов использовалась схема квадратичной интерполяции против потока (схема Леонарда или QUICK-схема), в значительной степени минимизирующая схемную вязкость. Для связи поля скорости и давления использовалась SIMPLE-С процедура.

Котел БКЗ-640-140 с естественной циркуляцией, П-образной компоновки. Топочная камера призматическая с твердым шлакоудалением, открытого типа, объемом $V_t = 4088 \text{ м}^3$, сечением $7,744 \times 18,176 \text{ м}$. Топка оборудована прямоточными горелками, расположенными по двухвихревой схеме в три яруса. В холодной воронке расположено 16 сопел нижнего дутья, направленных вверх под углом к горизонтали 15° . Распределение топлива по горелкам равномерное. В сопла холодного дутья, расположенные на задней стене, подается смесь из воздуха (0,12 от теоретически необходимого количества воздуха для полного сгорания топлива) и уходящих газов. Избыток воздуха на выходе из топки α , равен 1,2. В расчетах брался уголь «Переясловский» ЗБР. Тонкость помола пыли $R_{90} = 40 \%$. При расчете принималось, что в работе находится 20 горелок. На рис. 1 представлена модель топочной камеры.

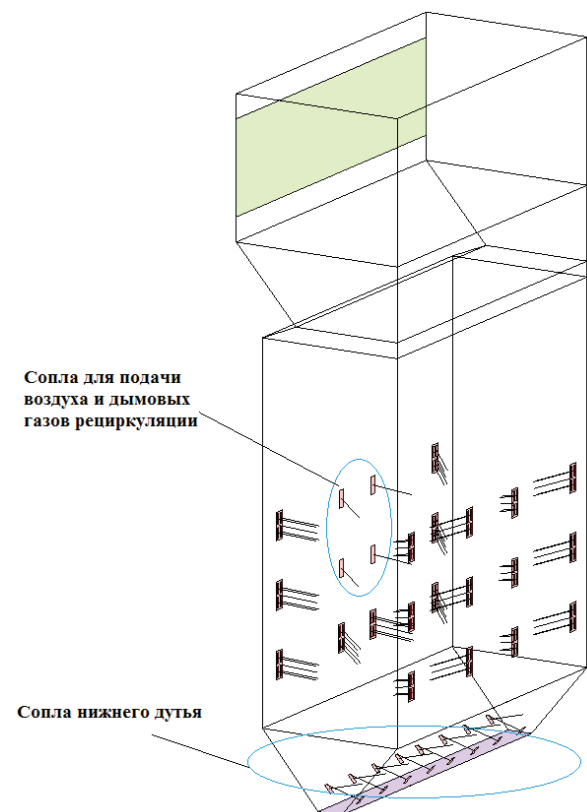


Рис. 1. Размещение горелок, сопел воздушного дутья и нижнего дутья на модели топочной камеры котла БКЗ-640

На рис. 2 приведены типичные результаты расчетов. Тангенциальное расположение горелок приводит к формированию вихревого движения газов в

топочной камере. В центральной части топки происходит наиболее интенсивное выгорание топлива, здесь формируется ядро горения (рис. 2, в, г, д). Максимальные температуры газа в топочной камере находятся на уровне третьего яруса горелок и составляют 1521 °С (рис. 2, г).

Сложное взаимодействие аэродинамических структур в топочной камере приводит к затягиванию области горения выше третьего яруса горелок (рис. 2, а, б). Результаты расчета выявили проблемную зону около задней стены, ниже аэродинамического пережима. В этой области высокие концентрации частиц, мало кислорода, высокие температуры и тепловой поток на стенку. На рис. 3 изображены температуры на стенах топочной камеры. Можно выделить несколько зон с наибольшими температурами и соответственно тепловыми потоками на стены: это область на фронтальной стенке между полутопками в районе горелок первого и второго яруса; скаты холодной воронки между полутопками; центральная часть левой и правой стены на уровне третьего яруса горелок; область на задней стенке в центральной части полутопка около горелок и выше третьего яруса горелок, а также в районе пережима.

На выходе из топочной камеры механический недожог равен $q_4=2,37\%$, концентрация NO_x – 661 мг/м³ (приведенная к $\text{O}_2=6\%$). Температура перед ширмами на отметке 23,75 м от низа холодной воронки составила 1144 °С.

Для исследования влияния режимных мероприятий на эффективность выгорания и уменьшение эмиссии окислов азота были рассмотрены следующие варианты:

- с отключенными соплами нижнего дутья;
- с изменением распределения воздуха в сопла заднего дутья III яруса;
- с отключением мельниц, в результате чего в работе остается 16 горелок;
- с изменением тонины помола, $R_{90}=30\%$;
- с изменением тонины помола $R_{90}=50\%$.

На рис. 4 представлено распределение температур на стенках топочной камеры для варианта с отключенными соплами нижнего дутья. Можно видеть, что ядро горения опустилось ниже, чем в варианте, принятом за базовый. В варианте без нижнего дутья температуры в пристеночной области фронтальной стены снизились. Температура перед ширмами составила 1113 °С.

Перерасчет распределения воздуха в сопла заднего дутья для варианта (б) был выполнен по следующим отношениям:

- расход смеси воздуха и уходящих газов рециркуляции на сопла заднего дутья 3 яруса $0,1V_0''+0,045V_{гЭФ}''$;
- расход смеси воздуха и уходящих газов рециркуляции на сопла заднего дутья 2 яруса $0,06V_0''+0,045V_{гЭФ}''$.

где V_0'' – теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сгорания топлива, м³/с; $V_{гЭФ}''$ – количество уходящих газов после электрофилтра, м³/с

Анализируя результаты расчетов при равномерной подаче воздуха через сопла заднего дутья и варианта (б), можно отметить более глубокое проникновение струи из сопел заднего дутья в ядро горения, что способствует снижению механического недожога топлива (табл. 2).

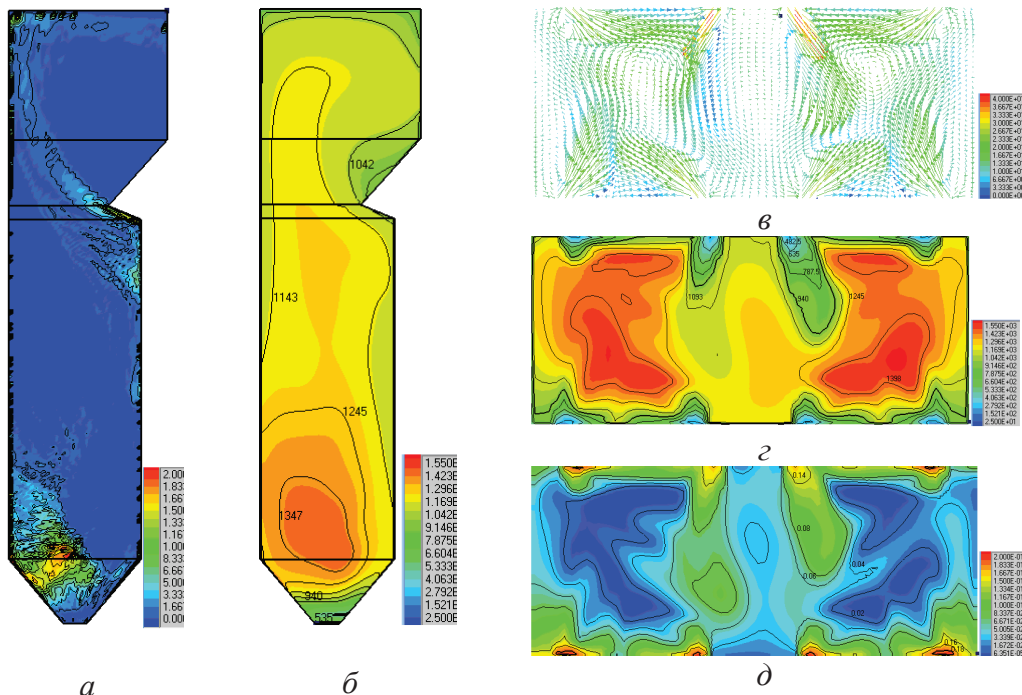


Рис. 2. Распределение параметров в топочной камере а) концентрация частиц по центру топки (кг/м³); б) поле температур по центру топки (°С); в) векторное поле скорости (м/с), (третий ярус горелок); г) поле температур (°С), (третий ярус горелок); д) концентрация кислорода (кг/кг), (третий ярус горелок)

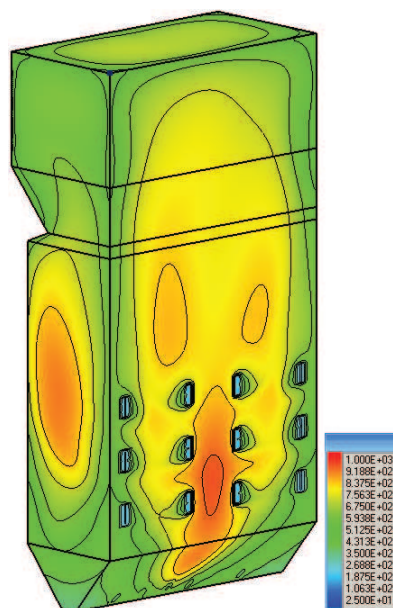


Рис. 3. Температура на стенках, °C (базовый вариант)

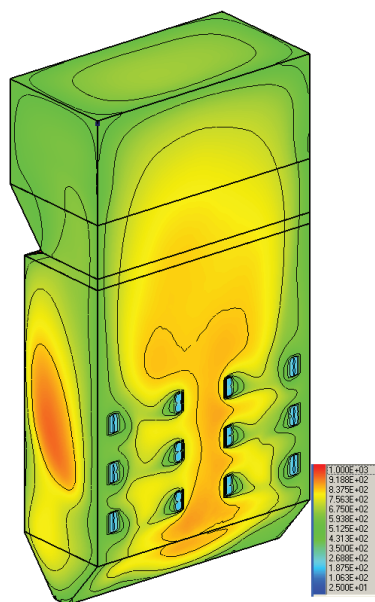


Рис. 4. Температура на стенках, °C (вариант а)

При отключении двух центральных горелок второго яруса на фронтальной стене и крайних на задней стене (вариант (в)) наблюдается увеличение температур около задней стенки между 1–3 ярусами горелки и уменьшение температур у задней стенки ниже аэродинамического пережима. На скате холодной воронки, на уровне 1–3 яруса горелки, в центральной части топки, и выше третьего яруса горелок на фронтальной стене, температуры и тепловые потоки более высокие по сравнению с результатами для базового варианта. На скате холодной воронки, между 1–3 ярусами горелок по центру топки на задней стене, температуры и тепловые потоки выше по сравнению с базовым вариантом. Выше третьего яруса горелок

на задней стенке температуры и тепловые потоки имеют более низкие значения по сравнению с вариантом без отключения горелок. Температура перед ширмами составила 1125 °C.

Для варианта с изменением тонины помола $R_{90}=30\%$ наблюдаются более высокие значения температур в районе 2–3 ярусов горелок на фронтальной стене. Температура перед ширмами составила 1153 °C. Для варианта с изменением тонины помола $R_{90}=50\%$, на скате холодной воронки, на уровне 1–2 яруса горелок в центральной части топки, температуры и тепловые потоки на фронтальной стене имеют значения выше по сравнению с базовым вариантом. Температура перед ширмами составила 1138 °C.

Результаты по механическому недожогу, концентрации оксидов азота и температуры перед ширмами для рассмотренных расчетов представлены в табл. 2. Можно видеть, что варианты, за исключением варианта без нижнего дутья, обеспечивают концентрацию оксидов азота на уровне 600...700 мг/м³.

Таблица 2. Значения механического недожога, концентрации оксидов азота и температуры перед ширмами

Вариант	Механический недожог q_4 , %	NO _x , (приведенная к O ₂ =6 %), мг/м ³	Температура перед ширмами (23,75 м), °C
Базовый	2,37	661	1144
а	1,36	818	1113
б	1,79	639	1140
в	3,71	577	1125
г	2,03	599	1153
д	3,01	717	1138

Выводы

Как показали результаты численного моделирования, предлагаемый вариант с холостым дутьем обеспечивает приемлемые выбросы оксидов азота и достаточно низкую температуру перед ширмами по условиям шлакования. При этом была выявлена «проблемная» зона около задней стены, ниже аэродинамического пережима. В данной области высокие концентрации золовых частиц, мало кислорода, высокие температуры и тепловой поток на стенку, что может привести к интенсивному шлакованию данной части топки. Расчетный анализ вариантов организации сжигания угольного топлива в топке котла БКЗ-640 с двухвихревой схемой сжигания и холостым дутьем показал, что возможно оптимизировать процесс сжигания с целью предотвращения шлакования проблемных зон без значительного увеличения механического недожога и концентрации оксидов азота.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.2071 «Моделирование физических процессов в элементах энергоэффективного теплоэнергетического оборудования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемьева Н.В., Чернецкий М.Ю., Хрусталева Г.Н. Сравнительный анализ по математической модели аэродинамики, теплообмена и температурных полей двухвихревой топки с наличием и без заднего холостого дутья // Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, удаление и использование золы: Сборник докладов V научно-практ. конф. – Челябинск, 7–9 июня 2011. – Челябинск: ОАО «ИЦЭУ», 2011. – Т. 3. – С. 157–166.
2. Майданик М.Н., Вербовецкий Э.Х., Дектерев А.А., Чернецкий М.Ю., Гаврилов А.А., Бойков Д.В., Бердин С.В. Математическое моделирование топки и поворотного газохода котла П-50Р при совместном сжигании твердого и газообразного топлива // Теплоэнергетика. – 2011. – № 6. – С. 37–42.
3. Siegel R., Howell J.R. Thermal Radiation Heat Transfer. – Washington D.C.: Hemisphere Publishing Corp., 1992. – 1072 p.
4. Magnussen B.F., Hjertager B.W. On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow // XIXth AIAA Aerospace Meeting. – St. Louis, USA, 1981. – P. 544–552.
5. Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании // Физика горения и взрыва. – 2011. – № 3. – С. 37–46.
6. Crow C.T., Sharma M.P., Stock D.E. The particle source in cell (PSI-CELL) model for gas-droplet flows // Journal of Fluids Engineering. – 1977. – V. 99. – P. 325–332.
7. De Soete G. Overall reaction rates of NO and N₂ formation from fuel nitrogen // Proc. XVth Int. Symposium on Combust. – Pittsburgh: The Combustion Institute, 1975. – P. 1093–1102.

Поступила 26.12.2012 г.

УДК 536.2:51-74

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ВО ВЛАГОУСТОЙЧИВОЙ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ КРИОЖИДКОСТЕЙ

В.Ю. Половников, А.М. Хабибулин

Томский политехнический университет
E-mail: polov@tpu.ru

Приведены результаты математического моделирования теплообмена в ограждающих конструкциях резервуара для хранения криожидкостей и численный анализ потерь холода рассматриваемого объекта с учетом промерзания изоляции, наличия миграции влаги к фронту фазового перехода и конденсации влаги на внешнем контуре взаимодействия. Установлены масштабы увеличения теплопритоков в рассматриваемой системе вследствие увлажнения, промерзания и наличия фазовых переходов в структуре и на поверхности слоя изоляции.

Ключевые слова:

Потери холода, математическое моделирование, тепловая изоляция, фазовые переходы, криожидкость.

Key words:

Loss of cold, mathematical modeling, thermal insulation, phase transitions, cryogenic liquid.

Введение

Целью энергетической политики России [1] является максимально эффективное использование природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики, повышения качества жизни населения страны и содействия укреплению ее внешнеэкономических позиций. Предполагается, что в результате реализации мероприятий, предусмотренных Стратегией [1], российский энергетический сектор внесет важнейший вклад в переход к устойчивому инновационному развитию российской экономики и обеспечит снижение удельной энергоемкости валового внутреннего продукта не менее чем в 2,3 раза к 2030 г.

Одним из направлений реализации Стратегии [1] в сфере энергоснабжения наряду с тотальной реконструкцией и применением автоматизированных узлов и систем управления является организация оптимальных режимов функционирования систем транспорта и хранения тепловой энергии. Су-

ществленную роль в выполнении Стратегии [1] призвана сыграть высокоэффективная тепловая изоляция, применяемая во всех областях промышленного производства и строительства.

Тепловая изоляция ограждений холодильных сооружений эксплуатируется в тяжелых условиях [2], прежде всего из-за непрерывных изменений температуры и влажности наружного воздуха, переменного воздействия солнечной радиации и ветра. Одной из особенностей работы изоляции холодильной техники является достаточно высокая вероятность конденсации водяного пара на поверхностях ограждения или внутри изоляции, а в некоторых случаях и замерзания выпавшей влаги [3]. Накопление влаги в теплоизоляционных конструкциях низкотемпературного оборудования может привести к столь значительному увеличению потерь холода, что необходима будет их полная замена [4].

Следует отметить, что используемые в настоящее время подходы к расчету тепловой изоляции