

УДК 621.184.004

Численное исследование аэродинамических процессов в топке водотрубного парового котла при различных эксплуатационных режимах

А. А. Редько¹, А. В. Давиденко², С. В. Павловский³, Н. В. Куликова⁴,
И. А. Редько⁵

¹д.т.н., проф. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, andrey.ua-mail@mail.ru

²асп. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, anastasiya.vyacheslavovna92@mail.ru

³к.т.н., ассист. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, pavlovskiy_s@mail.ru

⁴к.т.н., ассист. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, natikkulikova@rambler.ru

⁵к.т.н., доц. Харьковский национальный университет городского хозяйства имени О.М. Бекетова, г. Харьков, Украина, germes_s@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты численного исследования аэродинамики топки водотрубного парового котла ДЕ-10/14. В котле размещена вихревая газомазутная горелка ГМГ-7 производительностью 718 м³/ч по природному газу. Выполнены расчёты полей распределения температуры топочных газов, плотности теплового потока на экранные трубчатые поверхности, скорости и давления газов в топочном объёме. Показано влияние аэродинамических процессов на теплообмен в топке котла при различных эксплуатационных режимах (номинальной мощности, 50% и 15% пропроизводительности).

Ключевые слова: численное исследование, аэродинамика, топка, паровой котёл.

Введение. Современная топочная техника характеризуется разнообразием аэродинамических схем: встречная компоновка вихревых и прямоточных горелок и тангенциальная компоновка, топки с плоскофакельными горелками, циклонные топки, кольцевые топки и др.

Локальная радиационная плотность теплового потока влияет на естественную циркуляцию воды в экранных трубах топочных камер. Неравномерный обогрев по ширине экранов приводит к различному расходу воды в параллельно работающих трубах и может вызвать нарушение гидродинамики, переменные условия охлаждения труб и вызывать усталостные разрушения, образование накипи внутри труб солевого контура парового котла.

В топочных устройствах определяющим является процесс конвективного перемешивания, который преобладает над молекулярной диффузией, и который существенно зависит от конструктивных параметров горелки – характер взаимодействия струй, обратные токи определяют аэродинамику топки.

Анализ аэродинамической структуры показывает, что основными причинами недостаточной эффективности аэродинамических схем при переменных

режимах является: разрушение циркуляционных зон продуктов сгорания, обеспечивающих стабилизацию горения, нарушение равномерности распределения горючего в потоке окислителя, выход концентрации топливной смеси в зонах обратных токов за пределы воспламенения. Горелочные устройства не обеспечивают устойчивую аэродинамическую структуру течений (равномерные поля скорости и искусственной турбулентности, систему устойчивых вихреобразований, необходимую глубину проникновения струй горючего в поток окислителя) горючего, окислителя и продуктов сгорания в широком диапазоне скорости с необходимым концентрационным полем топливной смеси. Горелочное устройство, реализующее современную технологию сжигания топлива, должно обеспечивать:

- рациональное первоначальное распределение горючего в потоке окислителя;
- высокий уровень интенсивности турбулентности, в области смесеобразования топливной смеси;
- устойчивую управляемую аэродинамическую структуру течения горючего, окислителя и продуктов сгорания с зонами обратных токов в области стабилизации факела;
- самоохладение горелочного устройства горючим и окислителем с термической подготовкой топливной смеси.

Поэтому вопросы аэродинамики топков котлов требуют глубокого изучения, что и определило актуальность настоящего исследования.

Постановка проблемы. В коммунальной энергетике и промышленности широко используются паровые котлы типа ДКВР (ДЕ). Модернизация котлов путём замены горелочных устройств есть наименее затратное мероприятие.

На водотрубных котлах ДКВР (моноблочные паровые котлы ДЕ, КЕ, ДСЕ, Е и КВЕ) устанавливались регистровые горелки ГМГм, ГМ, ГМП и РГМГ, работающие по принуждённому диффузионному смешиванию, когда турбулизация и закручивание потока воздуха достигается путём установки в горелке лопаточного регистра завихрителя [3].

Температура в локальной зоне горения превышает 1500 °С, когда начинается интенсивное окисление азота. Поэтому содержание оксидов азота по некоторым данным превышает значение 500 мг/м³ (котёл ДЕ-10/14), горение затягивается и нарушается симметрия факела относительно оси котла.

Уровень автоматизации управления процессом сжигания топлива ограничивается только защитными и показывающими функциями.

Горелки европейских производителей предназначены для жаротрубных котлов. Поэтому их использование на водотрубных котлах сталкивается с проблемой несоответствия габаритов факела размерам камеры топки сгорания котла. Европейские горелки являются длиннофакельными и не могут работать на водотрубных котлах с короткими топками, работающих под разрежением.

Фирма Weishaupt обеспечивает модернизацию и адаптацию горелок с коротким факелом к водотрубным котлам [4]. Повышенный уровень автоматизации с применением систем микропроцессорного регулирования, диапазон регулирования 1:7, применение частоточного и кислородного регулирования обеспечивает экономичность за счёт снижения потерь теплоты с уходящими газами и неполнотой сгорания топлива, снижение выбросов NO_x обеспечивается за счёт сниже-

ния максимального значения температуры в зоне горения до $1350 \div 1480$ °С.

Формулирование целей статьи. Численное исследование аэродинамики топки котла ДЕ-10/14 с горелкой ГМГ-7 при различной паропроизводительности котла (100%, 50%, 15%).

Объект и методика исследования. Исследованы вертикально-водотрубный газомазутный котёл ДЕ-10-14ГМ, предназначенный для производства насыщенного и слабо перегретого пара с температурой 225 °С абсолютным давлением 14 кгс/см^2 , номинальной производительностью 10 т/ч. Котёл оснащён одной горелкой ГМ-7 тепловой мощностью 7 Гкал/ч (8,12 МВт).

В топке по оси горелки размещён трубчатый тупиковый излучатель. Диаметр вторичного излучателя изменяется от 840 мм до 1260 мм, выходной диаметр горелки составляет 420 мм.

Процессы тепломассообмена являются нестационарными, что усложняет экспериментальное исследование и создание строгой теории. При моделировании процессов сжигания используются методы теории турбулентных струй, законы сохранения массы и импульса, физики горения и тепломассообмена [5].

Математическая модель радиационно-конвективного теплообмена в газовом тракте котла сформирована на основе усреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с учётом гравитации и с пренебрежением сжимаемостью. Модель составляют уравнение неразрывности, переноса импульса, энергии и химических компонентов газовой смеси, записанные в стационарной форме. Уравнения замкнуты законом Ньютона для тензора давления, законом Фурье для теплового потока, законом Фика для потока массы, законом Менделеева-Клапейрона для термодинамического состояния смеси газов, уравнениями модели турбулентности k - ϵ Лаундер-Сполдинга и модели турбулентного горения Магнусена-Хертагера [6-11]. Результаты численных исследований моделирования аэродинамики топочных процессов приведены в [12-16].

На основе чертежей котла и горелки ГМГ-7 построена геометрическая модель внутренней полости топки и горелки (рис. 1, а,б). Воздух в горелку ГМГ поступает двумя потоками – около 15 % в виде первичного воздуха через регистр с углом лопаток 60° (коэффициент крутки $n_1 = 2,4$), другая часть в виде вторичного воздуха в объёме около 95 % закручивается в лопаточном аппарате регистра, лопатками, установленными под углом 45° , коэффициент крутки $n_2 = 1,6$. Подача газа – центральная (42 отверстия), параллельно воздушному потоку при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,10$. Закрутка первичного и вторичного воздуха – в одну сторону. Тепловая мощность горелок – от 1570 до 8300 кВт.

Для расчёта температурных характеристик топочной камеры производится дискретизация её объёма (расчётной области) в соответствии с методом контрольного объёма. В результате такой дискретизации получается некоторое количество контрольных объёмов (расчётных ячеек) N_V с соответствующим количеством граней N_F , в том числе граничных граней $N_{F,b}$, которые принадлежат границе расчётной области. В центрах расчётных ячеек рассчитываются все интересные характеристики топочной среды.

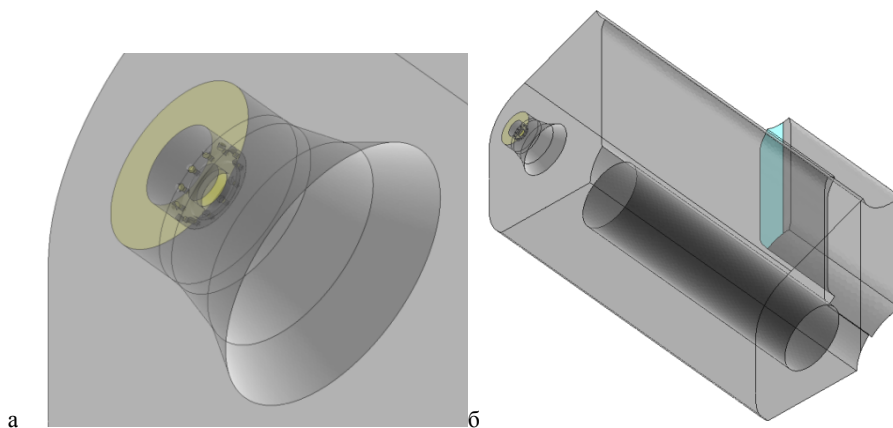


Рис. 1. Расчётные модели: а – модель горелки; б – модель топки котла

В центрах граничных граней рассчитываются температура стенки внутри и снаружи топки, а также плотность радиационного и конвективного потока на стенку. В настоящей модели количество ячеек и граней составляет: $N_V = 452\,533$; $N_F = 2\,985\,607$; $N_{F,b}$ – не контролируется.

Расчёты выполнялись также согласно нормативному методу аэродинамического расчёта котлов [11].

Основные результаты и их анализ. Номинальная паропроизводительность 10 т/ч (100 %). На данном режиме расход газа составляет 718 м³/ч, а расход воздуха – 8008 м³/ч [1, 2]. Коэффициент избытка воздуха составил $\alpha_v = 1,1$. Распределение скорости и давления топочных газов вдоль оси горелки в горизонтальной и вертикальной плоскостях показано на рис. 2, а, б.

Скорость газов в топочном объёме на оси горелки достигает значений 25-45 м/с. Вблизи экранных поверхностей скорость топочных газов ниже и составляет 10-15 м/с. Наблюдаются обратные течения продуктов сгорания в верхней зоне горения топки.

Температура газов в зоне горения до 2 м топлива составляет 1700-1800 °С, а вблизи стенок понижается до 900-1000 °С. Радиационная плотность теплового потока по глубине топки изменяется от 90 кВт/м² до 127 кВт/м², в верхней зоне топки радиационная плотность теплового потока понижается до значения 40-50 кВт/м².

На выходе образуются зоны с отрицательным давлением, что приводит к образованию вихрей топочных газов.

На выходе из вихревой горелки профиль аксиальной скорости имеет М-образную форму с провалом в приосевой зоне и смещённом максимуме скорости к периферии факела, откуда газы увлекаются в зоне рециркуляции.

Как видно, статическое давление на оси топки в зоне горения пониженное и составляет 10-20 Па, а в области вблизи фронта горения давление более высокое – 50-60 Па. На расстоянии 0,5 м от среза горелки статическое давление изменяется от 10 Па до 35-40 Па.

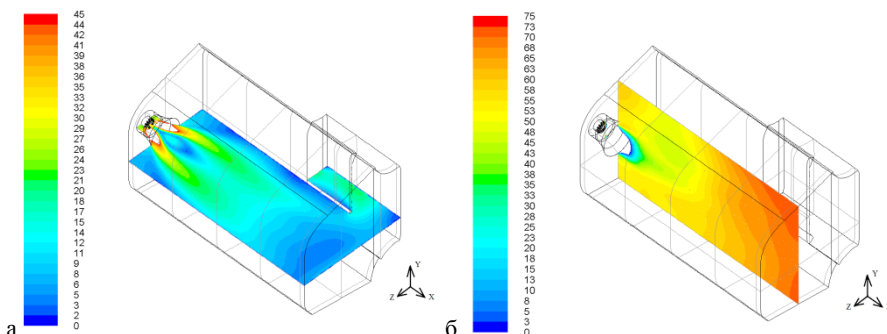


Рис.2. Распределение скорости и давления топочных газов вдоль оси горелки в горизонтальной и вертикальной плоскостях: а – распределение скорости газового потока в горизонтальном сечении; б – распределение давления газов в вертикальном сечении

На расстоянии до 2 м от среза горелки наблюдается область пониженного давления 35-40 Па над факелом, которая вызывает образование обратных токов продуктов сгорания в зону дожигания топлива.

Статическое давление повышается от 26,2 Па до 71,3 Па, а полное давления понижается от 126,1 Па до 74,3 Па. Потери давления в топке составляют 51,8 Па. Среднее значение скорости газов изменяется от 26,3 м/с до 4,5 м/с на выходе из топки.

Пониженная мощность котла (50 %). Снижение паропроизводительности котла моделировалось уменьшением расхода природного газа и воздуха через горелку. При данном режиме расход газа составил 359 м³/ч, а расход воздуха 4004 м³/ч. Коэффициент избытка воздуха составил $\alpha_v = 1,1$. Результаты расчётов показаны на рис. 3, а,б.

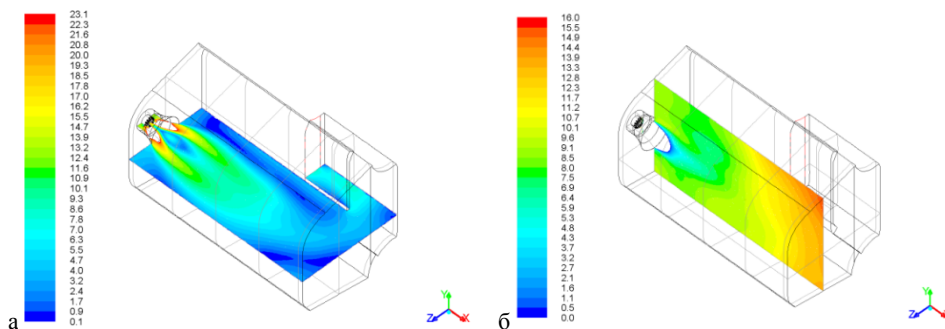


Рис.3. Результаты расчётов при мощности котла 50 %: а – распределение скорости газового потока в горизонтальном сечении; б – распределение давления газов в вертикальном сечении

Скорость истечения топливно-воздушной смеси понижается и на оси горелки составляет 22-14 м/с. Вблизи боковых экранных поверхностей скорость газов составляет 9-5 м/с.

На расстоянии до 2 м от среза горелки газы движутся вдоль верхней центральной части топки, а температура газов составляет 1600-1800 °С.

В промежутке от 1,5 м до 2,5 м по глубине топки экранные поверхности бу-

дут работать в условиях повышенной тепловой нагрузки 80-92 кВт/м². Заполнение продуктами сгорания топочного объёма снижается и нижняя часть объёма топки имеет более низкую температуру 800-900 °С, а нижние экранные поверхности – более низкую тепловую нагрузку 45-70 кВт/м².

Статическое давление повышается от 1,6 Па до 13,6 Па, а полное давление понижается от 26,2 Па до 14,2 Па. Область пониженного статического давления увеличивается до 1,5 м от среза горелки и сливается с областью над факелом горения, что увеличивает количество обратных токов продуктов сгорания. Потери давления в топке составляет 12,0 Па. Среднее значение скорости газов изменяется от 13,1 до 2,0 м/с на выходе из топки.

Пониженная мощность котла (15 %). При данном режиме расход газа составил 107,7 м³/ч, а расход воздуха 1200,6 м³/ч. Коэффициент избытка воздуха составил $\alpha_b = 1,1$. Результаты распределения скорости газов и давления представлены на рис. 4, а,б.

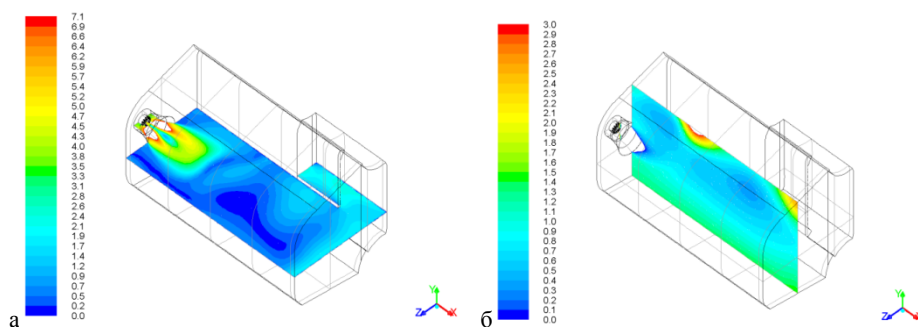


Рис.4. Результаты расчётов при мощности котла 15 %: а – распределение скорости газового потока в горизонтальном сечении; б – распределение давления газов в вертикальном сечении

Как видно, длина факела составляет 0,8-1,0 м. Факел «всплывает» к верху топки на расстоянии 0,5-1,0 м от среза горелки и в диапазоне от 1,5 м до 3 м глубины топки наблюдается температура 1200-1250 °С, а тепловой поток 20-25 кВт/м². В нижней области топки температура газов составляет 600-700 °С, а радиационная плотность теплового потока составляет 15-20 кВт/м², скорость газов снижается от 7 до 5 м/с в зоне горения топлива и до 1,5-2 м/с вблизи экранных поверхностей. На расстоянии 1,5 м плотность радиационного потока в верхней зоне топки составляет 50-55 кВт/м². Заполнение объёма топочными газами составляет около 20 %.

Статическое давление повышается от 0,46 Па до 1,58 Па, а полное давление понижается от 2,14 до 1,96 Па. Потери давления в топке составляют 0,18 Па. Среднее значение скорости газов изменяется от 3,3 м/с до 1,35 м/с на выходе из топки.

Выводы. Результаты численного моделирования аэродинамических процессов в топке водотрубного парового котла ДЕ-10/14 показывают, что изменение режимов эксплуатации существенно влияет на температурные условия экранных поверхностей. При этом изменяется радиационная плотность тепловых потоков по площади экранных поверхностей от 127 кВт/м² (100 %) до 20 кВт/м²

(15 %), что вызывает значительные температурные напряжения в материале стенок теплообменных труб. В закрученном потоке статическое давление ниже атмосферного, при этом максимум разрежения находится на оси, а вблизи границы – приближается к давлению окружающей среды. Аэродинамическая структура закрученной струи определяется границами струи, углом раскрытия струи, зоной обратных токов на оси, дальностью, неравномерностью распределения скорости. Установлено, что аэродинамическое сопротивление топки котла определяется в основном местным сопротивлением на выходе из горелки и сопротивлением вихря зоны рециркуляции.

Перспективы дальнейших исследований. Опыт эксплуатации водотрубных паровых котлов ДЕ-10/14 показал недостаточную эффективность горелочных устройств типа ГМГ-7. Газомазутные горелки ГМГ-7 не обеспечивают высокую скорость газов в топке котла и эффективность теплообмена с теплопринимающими экранными поверхностями. Реконструкция газогорелочного устройства позволяет произвести малозатратную реконструкцию котлов ДЕ-10/14. Поэтому исследование аэродинамических процессов в топке котла является перспективной задачей.

Литература

1. Монастырищенский машиностроительный завод [“Электронный ресурс”. – Электрон. данные. – Монастырище, 2016. – Режим доступа: <http://mmzavod.com.ua> . – Заглавие с экрана. – Дата обращения 10.09.2016
2. Бийский котельный завод [“Электронный ресурс”. – Электрон. данные. – Бийск, 2016. – Режим доступа: <http://www.bikz.ru> . – Заглавие с экрана. – Дата обращения 10.09.2016
3. Акопьянц Б.Е. Недостатки конструкции промышленных котлов ДКВР-20-13 /Б.Е. Акопьянц // Новости теплоснабжения. – 2000. – №4. – с. 10-11.
4. Новые решения. Модернизация водотрубных котлов, <http://www.weishaupt.kiev.ua>
5. Ахмедов Р.Б. Аэродинамика закрученной струи /Р. Б. Ахмедов, Т. Б. Балагула, Ф. К. Рашидов, А. Ю. Сокаев. – М.: Энергия, 1977. – 240с.
6. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен /Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер.– М.: Мир, 1990. – Т. 1. – 384 с.
7. Jakobsen H. A. ChemicalReactorModeling /H. A. Jakobsen. – Springer, 2008. – 1244 p.
8. Peters N. Turbulentcombustion /N Peters. – CambridgeUniversityPress, 2000. – 304p.
9. Суржиков С. Т. Тепловое излучение газов и плазмы /С. Т. Суржиков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 544 с.
10. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости /К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – Т. 1. – 502 с.
11. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости /С Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
12. Аэродинамический расчёт котлов. Нормативный метод. – Спб.: изд-во Энергия, 1977. – 256с.
13. Басок Б. И. Численное моделирование процессов аэродинамики в топке водогрейного котла с вторичным излучателем / Б. И. Басок, В. Г. Демченко, М. П. Мартыненко // Промышленная теплотехника. – 2006. – №1. – с.17-22.

14. Герман М. Л. Инженерный метод расчета температурного режима жаротрубных котлов с тупиковой топкой /М. Л. Герман, В. А. Бородуля, Е. Ф. Ноготов, Г. И. Пальченко// Теплообмен ММФ-2000: Труды IV Минского Междунар. форума. – Минск, 2000. Т.2. – С.21-30.

15. Хаустов С. А. Численное исследование аэродинамики жаротрубной топки с реверсивным факелом/ С. А. Хаустов, А. С. Загорин // Известия Томского политехнического университета. – 2013. Том 323. – № 4.

16. Гиль А. В. Исследования аэродинамики и горения в топке котла БКЗ-420-140 применительно к вариантам замещения проектного топлива /А. В. Гиль, А. С. Загорин, С. В. Красильников, С. В. Обухов, А. В. Старченко // Известия Томского политехнического университета. – 2007. Том 310. – № 1. – с. 175-181.

References

1. *Monastyrishenskiy mashynostroitelnyi zavod*, <http://mmzavod.com.ua>. Accessed 10.09.2016.
2. *Biiskiy kotelnyi zavod*, <http://www.bikz.ru>. Accessed 10.09.2016.
3. Акopyaнc B.E. “Nedostatki konstrukcii promyshlennykh kotlov DKVR-20-13.” *Novos-titeplosnabzheniya*, no. 4, 2000.
4. *Novyyeresheniya. Modernizatsiyavodotrubnykhkotlov*, <http://www.weishaupt.kiev.ua>.
5. Akhmedov R. B., Balagula T. B., Rasydov F. K., Sokaev A. Yu. *Aerodinamika zakruchennoi strui*. Energiia, 1977.
6. Anderson D., Tannehil G., Pletcher R. *Vychislitel'naya gidromekhanika i teploobmen*. Mir, 1990.
7. Jakobsen H. A. *Chemical Reactor Modeling*. Springer, 2008.
8. Peters N. *Turbulent combustion*. Cambridge University Press, 2000.
9. Surgukov S. T. *Teplovoe izluchenie gazov i plazmy*. Izd-vo MGTU im. Baumana, 2004.
10. Fletcher K. *Vychislitelnye metody v dinamike zhydkosti*. Mir, 1991.
11. Patankar S. *Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti*. Energoatomizdat, 1984.
12. *Aerodinamicheskii raschet kotlov. Normativnyi metod*. izd-vo Energiya, 1977.
13. Basok B. I. “Chislennoe modelirovanie processov aerodynamiki v topke vodogreynogo kotla s vtorychnym izluchatelem.” *Promyshlennaya teplotekhnika*, no. 1, 2006.
14. German M. L. “Inzhenernyi metod rascheta temperaturnogo rezhyma zharotrubnykh kotlov s tupikovoii topkoi.” *Teploobmen MМF-2000: Trudy IV Minskogo Mezhdunarodnogo foruma*. Vol. 2, 2000.
15. Khaustov S. A. “Chislennoe issledovanie aerodynamiki zharotrubnoi topki s reversivnym fakelom.” *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, vol. 323, no. 4, 2013.
16. Gil A.V. Issledovaniia aerodynamiki i goreniiia v topke kotla BKZ-420-140 primenitelno k variantam zamescheniia proektnogo topliva. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, vol. 310, no. 1, 2007.

УДК 621.184.004

Чисельне дослідження аеродинамічних процесів у топці водотрубного парового котла при різних експлуатаційних режимах

А. О. Редько¹, А. В. Давіденко², С. В. Павловський³, Н. В. Кулікова⁴,
І. О. Редько⁵

¹д.т.н., проф. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, andrey.ua-mail@mail.ru

²асп. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, anastasiya.vyacheslavovna92@mail.ru

³к.т.н., асист. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, pavlovskiy_s@mail.ru

⁴к.т.н., асист. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, natikkulikova@rambler.ru

⁵к.т.н., доц. Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна, germes_s@mail.ru

Анотація. Наведено результати чисельного дослідження аеродинаміки топки водотрубного парового котла ДЕ-10/14. У котлі розміщена вихровий газомазутний пальник ГМГ-7 продуктивністю 718 м³/год за природним газом. Виконано розрахунки полів розподілу температури топкових газів, щільності теплового потоку на екранні трубчасті поверхні, швидкості і тиску газів у топковому об'ємі. Показано вплив аеродинамічних процесів на теплообмін у топці котла при різних експлуатаційних режимах (номінальній потужності, 50 % і 15 % паропроductивності).

Ключові слова: чисельне дослідження, аеродинаміка, топка, паровий котел.

UDC 621.184.004

Numerical Study of Aerodynamic Processes in the Furnace Water-tube Boiler at Different Operating Conditions

A. Redko¹, A. Davidenko², S. Pavlovskiy³, N. Kulikova⁴, I. Redko⁵

¹Sc.D, professor. Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv, Ukraine, andrey.ua-mail@mail.ru

²Post-graduate student. Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv, Ukraine, anastasiya.vyacheslavovna92@mail.ru

³PhD, assistant professor. Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv, Ukraine, pavlovskiy_s@mail.ru

⁴PhD, assistant professor. Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv, Ukraine, natikkulikova@rambler.ru

⁵PhD, associate professor. O. M. Beketov National University of Urban Economy, Kharkiv, Ukraine, germes_s@mail.ru

Abstract: The results of numerical studies of aerodynamics of the furnace of water-tube steam boiler DE-10/14 are presented. The boiler is equipped by vortex gas-oil burner GMG-7 performing 718 m³/h of natural gas. Calculations of the flue gas temperature distribution fields,

the heat flow density on the surface of the tubular screen, velocity and pressure of the gases in the combustion volume are performed. The influence of aerodynamic processes on heat transfer in the boiler furnace at different operating conditions (power rating of 50% and 15% steam) is shown.

Keywords: numerical study, aerodynamics, furnace, steam boiler, heat transfer.

Надійшла до редакції 15 вересня 2016 р.