

УДК 621.184.004

Редько А.А., Давиденко А.В., Павловский С.В., Куликова Н.В., Редько И.А.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТОПКЕ ВОДОТРУБНОГО ПАРОВОГО КОТЛА ДЕ-10/14 ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ

Введение. Основным источником теплоты в топках котлов являются потоки лучистой энергии. Вклад конвективного теплообмена не превышает 3÷4 %. При высоких скоростях топочных газов (50÷70 м/с) его роль увеличивается. В топках газовых котлов структура факела горящего топлива и концентрация трёхатомных продуктов сгорания (RO_2 и H_2O) определяют объёмное излучение газов. Температура газовой среды существенно влияет на теплообмен в топке, так при снижении температуры в топке на 10 % тепловосприятие теплообменных поверхностей уменьшается в 1,5 раза. В топочном объёме наблюдается пространственное несимметричное поле температур излучающей среды. Неравномерность тепловосприятия в подъёмных трубах топки влияет на массовый расход пароводяной смеси. Плотность пароводяной смеси определяется местом подвода теплоты по высоте топки. Подвод теплоты в нижней части парогенерирующих труб приводит к снижению плотности пароводяной смеси в подъёмных трубах и вызывает рост скорости смеси в контуре и повышению эффективности теплообмена. При подводе теплоты к верхним участкам труб ухудшаются теплообменные процессы.

Методы расчёта теплообмена в топках котлов приведены в [1–3]. Разработаны различные математические модели расчёта, которые служат основой инженерных методик [10]. В настоящее время для диагностики температурного состояния металла экранных водотрубных поверхностей требуется знание распределения температуры газов в объёме топки, радиационных и суммарных плотностей тепловых потоков, структуры факела. Поэтому актуальным является численное исследование процессов теплообмена в топочных камерах.

Состояние проблемы. Исследование эффективности теплообмена, аэродинамики и методов снижения оксидов азота путём проведения натурных огневых теплотехнических и экологических испытаний затратные и трудоёмкие [4]. При этом топочные устройства котельных установок характеризуются разнообразием аэродинамических схем (встречная компоновка вихревых и прямоточных горелок, тангенциальная компоновка, циклонные и кольцевые топки, топки с плоскофакельными горелками и др.), геометрией и объёмом топок, что затрудняет экспериментальное моделирование. Разработка численных методов и моделей основывается на теоретических исследованиях физико-химических процессов сжигания топлив [5–7]. Достаточно полные сведения по химической кинетике процессов горения отсутствуют, и поэтому применяются приближенные постановки. В работах [8–17] численными методами исследовались различные типы котлов, как крупных энергетических и промышленных, так и котлов малой мощности. Исследовались топки жаротрубных и водотрубных котлов. Однако, исследование теплообмена, аэродинамики и методов снижения выбросов оксидов азота продолжается, что и определяет актуальность данного исследования. Поэтому в настоящее время при исследовании процессов сжигания топлив широко используются численные методы моделирования и компьютерные технологии.

Тепловая нагрузка топки определяется величиной Q/V [МВт/м³] и при изменении паропроизводительности котла возможно её регулирование в широком диапазоне 1:7. При этом существенно изменяются тепловые, аэродинамические и экологические характеристики котлов.

Цель работы. Численное исследование теплообмена в топке водотрубного котла ДЕ-10/14 при различной паропроизводительности (100, 50 и 15 %).

Объект и методика исследования. Исследован вертикально-водотрубный газомазутный котел ДЕ-10-14ГМ, предназначенный для производства насыщенного и слабо перегретого пара с температурой 225 °С абсолютным давлением 14 кгс/см², номинальной производительностью 10 т/ч. Котел оснащен одной горелкой ГМ-7 тепловой мощностью 7 Гкал/ч (8,12 МВт).

Процессы теплообмена 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 теплообмена.

Математическая модель радиационно-конвективного теплообмена в газовом тракте котла сформирована на основе усредненных за Рейнольдсом уравнений Навье-Стокса с учетом 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 Клапейрона–Менделеева для термодинамического состояния смеси газов, уравнениями модели турбулентности k - ε Лаундер-Сполдинга и модели турбулентного горения Магнусена–Хертагера [18–23]. На основе чертежей котла и горелки ГМГ-7 построено геометрическую модель внутренней полости топки и горелки (рис. 1).

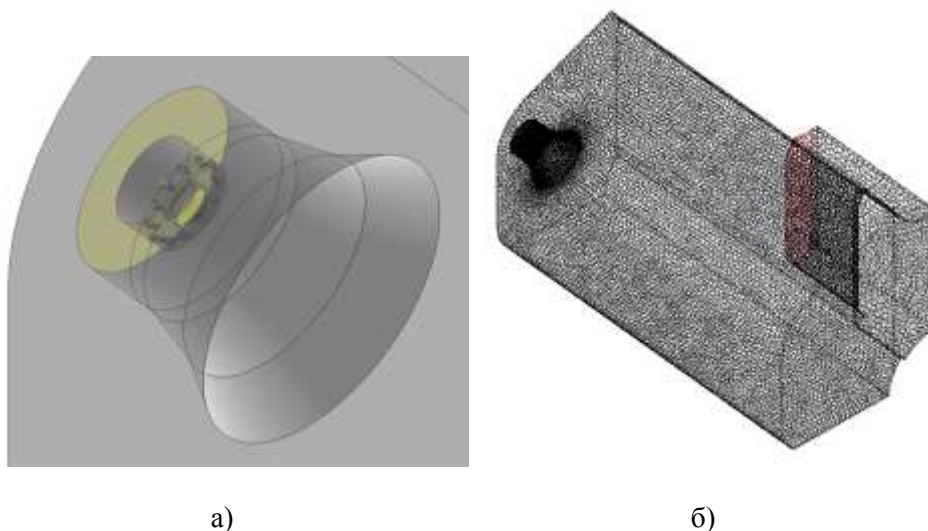


Рисунок 1 – Расчётные модели: а) – модель горелки; б) – расчётная сетка топки котла

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.

Для расчета 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 интересующие характеристики топочной среды. В центрах граничных граней рассчитываются температура стенки внутри и снаружи топки, а также плотности 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 теплового расчёта котлов [24].

Основные результаты и их анализ. Трёхмерное представление температурных полей при различных режимах приведено на рис. 2.

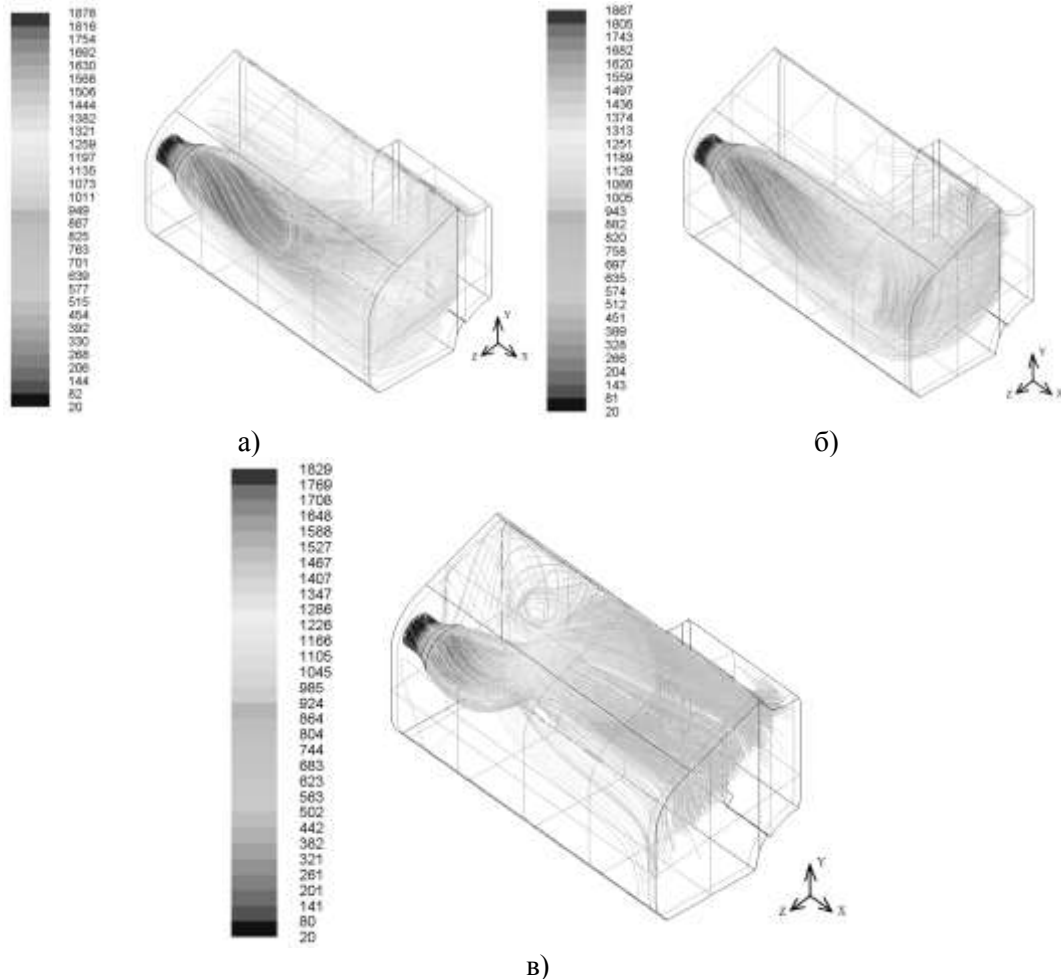


Рисунок 2 – Значения температурных полей при различных режимах: а) 100 % от номинальной нагрузки; б) 50 % от номинальной нагрузки; в) 15 % от номинальной нагрузки

Наблюдается существенное изменение температуры в топочном объёме от

области ядра горения, как по глубине топки, так и к пристеночной области к экранным трубчатым поверхностям.

Результаты расчёта температурного поля, представленные в плоскостях по оси горелки, показывают область максимальных температур по глубине и высоте топки (рис. 3). На рис. 3 представлена структура факела, видимым фронтом горения является участок длиной до 2,5 м и в диаметре 0,8–1 м.

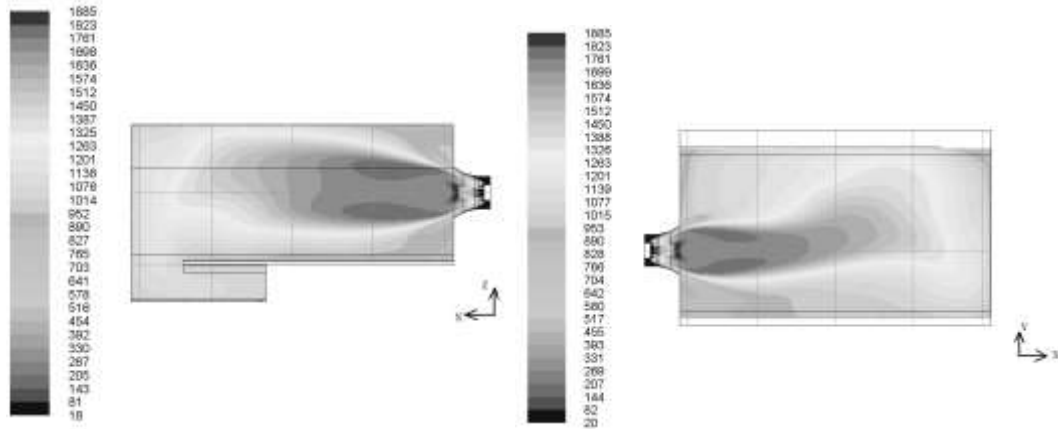


Рисунок 3 – Структура факела: а) – вид сверху; б) – вид сбоку

В этой области происходит сгорание предварительно подготовленной топливно-воздушной смеси при температуре 1500–1700 °С. Температурное поле в поперечных сечениях по глубине топки (на срезе горелки и через 1 м), указывает на значение температуры на оси и вблизи пристеночной области.

На рис. 4 показано изменение средней температуры газов по глубине топки при различных режимах нагрузки котла. Температура газов на выходе из топки изменяется от 1070 до 700 °С.

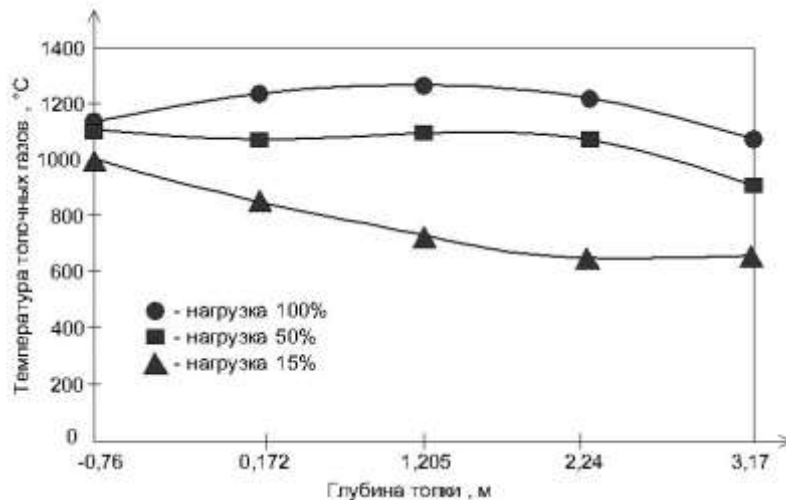


Рисунок 4 – Распределение температуры топочных газов по глубине топки при различных режимах эксплуатации

Значения средней плотности теплового потока показаны на рис. 5 и 6. Максимальные значения плотности теплового потока наблюдается на расстоянии от 1 м до 2,2 м по глубине топки и достигает значений 130–140 кВт/м². При изменении

режимов експлуатації і теплової навантаження щільність теплового потоку змінюється від 140 кВт/м^2 до $20\text{--}25 \text{ кВт/м}^2$, що викликає значительні термічні напруження в металі екранних труб. Установлено, що лучистий теплообмін являється основним механізмом теплопереносу ($67\text{--}70 \%$) від топочних газів до екранним трубчастим поверхностям.

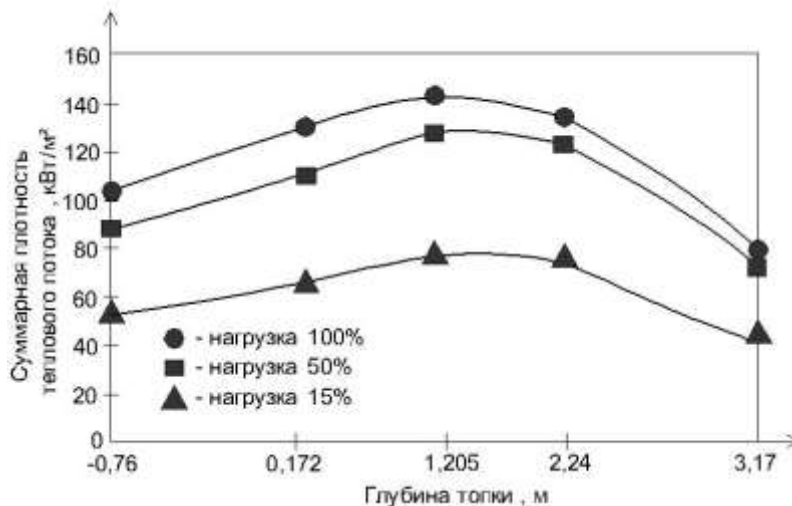


Рисунок 5 – Розподіл сумарної щільності теплового потоку по глибині топки при різних режимах експлуатації

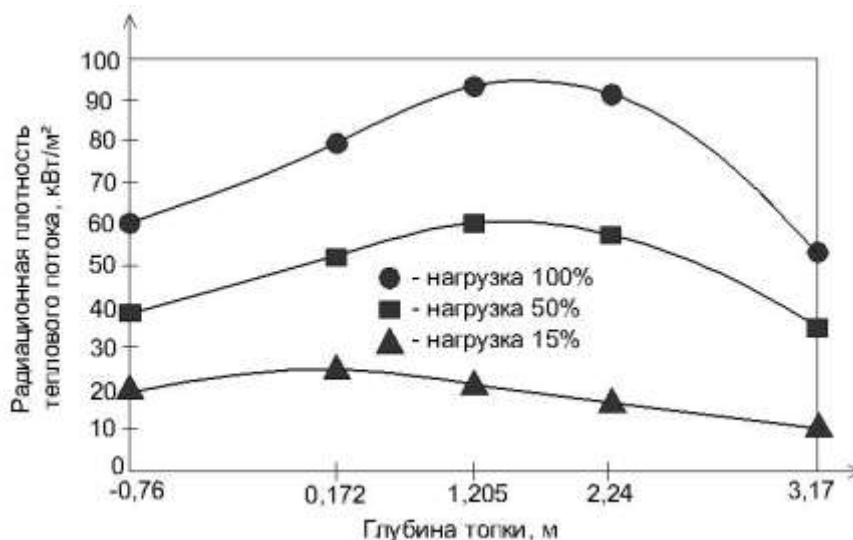


Рисунок 6 – Розподіл радіаційної щільності теплового потоку по глибині топки при різних режимах експлуатації

Висновки. Результати чисельного моделювання процесів теплообміну при сжигании газів в топочному об'ємі котла ДКВР-10/14 (ДЕ-10/14) з горелкою ГМГ-7 показали, що в топці створюється не осесиметричний, неізотермічний факел довжиною від 1,5 м до 2,5 м діаметром около 1 м.

При понижении теплової навантаження і зниженні паропроизводительности факел зменшується в довжину до 0,8–1,0 м і «вспливає», а дожигание происходит вверху топки. Середня щільність теплового потоку змінюється по глибині топки від 100 кВт/м^2

до 80 кВт/м². При изменении тепловой нагрузки плотность теплового потока снижается до 60 кВт/м². Заполнение топочного объёма снижается до 20 %, скорость газов понижается от 45 м/с до 4-6 м/с. Механизм лучистого теплообмена составляет при этом 20%. Таким образом, горелка ГМГ-7 с коэффициентом крутки $n_1=2,4$ и $n_2=1,6$ не обеспечивает эффективное сжигание газа и организацию теплообмена в топочном объёме котла ДЕ-10/14. При этом, выброс оксидов азота на выходе из топки котла увеличивается до значений 191–198 мг/м³.

Литература

1. Блох А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов / А.Г. Блох. – Л.: Энергоатомиздат. 1984. – 240 с.
2. Михайлов А.Г. Методы расчёта теплообмена в топках котлов / А.Г. Михайлов // Омский научный вестник. 2008. – №3(70). – С. 81–84.
3. Михайлов А.Г. Вопросы теплообмена в топках газотрубных котлов. Обзор методов расчёта / А.Г. Михайлов // SWorld. – 2013. – С.1.
4. Устименко Б.П., Алияров Б.К., Абубакиров Е.К. Огневое моделирование пылеугольных топок / Б.П. Устименко, Б.К. Алияров, Е.К. Абубакиров. – Алма-Ата: Наука. 1982. – 212 с.
5. Устименко Б.П., Джакубов К.Б., Кроль В.О. Численное моделирование аэродинамики и горения в топочных технологических устройствах / Б.П. Устименко, Б.К. Алияров, Е.К. Абубакиров. – Алма-Ата: Наука, 1986. – 224 с.
6. Алексеенко С.В. Численное и экспериментальное моделирование турбулентных течений в топочных камерах / С.В. Алексеенко, И.Н. Гусев, В.М. Ерошенко, В.Б. Рабовский // Инж.-физ. Журн. 1990. – Т.5, – №6. – С. 948–955.
7. Пашков Л.Т. Основы теории горения: Учебное пособие / Л.Т. Пашков – М.: МЭИ (ТУ). 2002. – 125 с.
8. Басок Б.И., Демченко В.Г., Мартыненко М.П. 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.
9. Тайлашева Т.С. Анализ опыта эксплуатации котлов типа ДКВР / Т.С. Тайлашева // Вестник науки Сибири. 2014. – №3(13). – С. 11–15.
10. Герман М.Л., Бородуля В.А., Ноготов Е.Ф., Пальченко Г.И. Инженерный метод расчета температурного режима жаротрубных котлов с тупиковой топкой / М.Л. Герман, В.А. Бородуля, Е.Ф. Ноготов, Г.И. Пальченко // Тепломассообмен ММФ-2000: Труды IV Минского Междунар. форума. – Минск, 2000. Т.2. – С. 21–30.
11. Хаустов С.А., Заворин А.С., Фисенко Р.Н. Численное исследование процессов в жаротрубной топке с реверсивным факелом / С.А. Хаустов, А.С. Заворин, Р.Н. Фисенко // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т.322, – № 4. – С. 43–47.
12. Осинцев К.В. Учёт неоднородности и нестабильности тепловой структуры топочного факела при использовании многофункциональных горелок / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 2007. – №6. – с. 66–70.
13. Долинский А.А., Халатов А.А., Кобзарь С.Г., Назаренко О.А., Мещеряков А.А. Использование компьютерного моделирования при малозатратной модернизации котла ниисту-5 / А.А. Долинский, А.А. Халатов, С.Г. Кобзарь, О.А. Назаренко, А.А. Мещеряков // Пром. теплотехника. –2007. – Т. – 29, №5. – С. 80–91.

14. Халатов А.А., Кобзарь С.Г. Компьютерные технологии в модернизации котлов и камер сгорания / А.А. Халатов, С.Г. Кобзарь // *Аква-Терм.* – 2007. – №1. – С.12–15.
15. Askarova A.S., Karpenko E.I., Loktionova I.V., Messerle V.E., Ustimenko A.V. Optimization of the combustion of power-station technologies / A.S. Askarova, E.I. Karpenko, I.V. Loktionova, V.E. Messerle, A.V. Ustimenko // *Thermal Engineering.* – 2004. Vol.51. – №6. – P. 488–493.
16. Щелоков В.И., Ладыничев В.В., Лисейкин И.Д., Тодорович А.В. Модернизация водогрейных водотрубных котлов типа ПТВМ и КВГМ / В.И. Щелоков, В.В. Ладыничев, И.Д. Лисейкин, А.В. Тодорович. // *Новости теплоснабжения.* – 2004. – №5(45).
17. Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю. Исследование образования вредных веществ в камере сгорания БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ / А.С. Аскарлова, С.А. Болегенова, В.Ю. Максимов // VIII Всероссийская конф. «Горение твёрдого топлива». Новосибирск, РФ. 2012. – С. 9.1–9.4.
18. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М.: Мир. 1990. – Т. 1. – 384 с.
19. Jakobsen H.A. Chemical Reactor Modeling / H.A. Jakobsen. – Springer. 2008. – P. 1244.
20. Peters N. Turbulent combustion / N. Peters. – Cambridge University Press. 2000. – P. 304.
21. Суржииков С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы / С.Т. Суржииков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 544 с.
22. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – Т. 1. – 502 с.
23. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
24. Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод. М.: Энергия, 1973. – 232 с.

Bibliography (transliterated)

1. Blokh A.G. (1984), Heat transfer in furnaces of steam boilers [Теплообмен в топках паровых котлов, Energoatomisdat], Energyatompublishing, Leningrad, 240 pp.
2. Mikhailov A.G. (2008), “Methods for calculating heat transfer in boiler furnaces” [Metody rascheta teploobmena v topkakh kotlov, Omskii nauchnyi vestnik], Omsk Scientific Bulletin, №3 (70), Omsk, p. 81–84.
3. Mikhailov A.G. (2013), “Problems of heat transfer in furnaces-tube boilers. Review of calculation methods” [Voprosy teploobmena v topkakh gazotrubnykh kotlov. Obzor metodov rascheta], SWorld, Omsk.
4. Ustimenko B.P., Aliyarov B.K., Abubakirov Y.K. (1982), “The fire simulation of coal-fired furnaces” [Ognevoe modelirovanie pyleugolnyh topok, Nauka], Science, Alma-Ata, p. 212.
5. Ustimenko B.P., Dzhakubov K.B., Kroll V.O. (1986), “Numerical modeling of aerodynamics and combustion flue technological devices” [“Chislennoe modelirovanie aerodinamiki i gorenija v topochnykh tekhnologicheskikh ustroistvah”, Nauka], Science, Alma-Ata, p. 224.
6. Alekseenko S.V., Gusev I.N., Eroshenko V.M. Rabovsky V.B. (1990), “Numerical and experimental modeling of turbulent flows in the combustion chamber” [“Chislennoe i

experimentalnoe modelirovanie turbulentnyh techenii v topochnykh kamerah”, Inzhenerno-Fizicheskii zhurnal], Journal of Engineering Physics and Thermophysics., V.5. №6, p. 948–955.

7. Pashkov L.T. (2002), Fundamentals of combustion theory: Textbook [“Osnovy teorii goreniiya: Uchebnoe posobie”], Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Moscow, 125 pp.

8. Basok B.I., Demchenko V.G. Martynenko M.P. (2006), "Numerical modeling of aerodynamic processes in the furnace of the boiler with a secondary emitter" [“Chislennoe modelirovanie processov aerodinamiki v topke vodogreynogo kotla s vtorichnym izluchatelem”, Promyshlennaya teplotekhnika], Industrial heating engineering, №1, p. 17–22.

9. Taylasheva T.S. (2014), "Analysis of operating experience DKVR type boilers" [“Analiz opyta expluatacii kotlov tipa DKVR”, Vestnik nauki Sibiri], Journal of Siberian science, №3 (13) P. 11–15.

10. Herman M.L., Borodulya V.A., Nogotov E.F., Palchenok G.I. (2000), "Engineering calculation method of temperature fire-tube boilers with a combustion chamber deadlock" [“Inzhenernyi metod rascheta temperaturnogo rejyma jarotrubnyh kotlov s tupikovoi topkoi”, Trudy IV Minskogo Mejdunarodnogo foruma], Proceedings of IV Minsk International forum, Minsk, V.2., p. 21–30.

11. Khaustov S.A., Zavorin A.S., Fissenko R.N. (2013), "Numerical study of processes in the fire tube furnace with reversible flame" [“Chislennoe issledovanie processov v jarotrubnoi topke s reversivnym fakelom”, Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta], Proceedings of the Tomsk Polytechnic University, Volume 322, number 4, 43–47.

12. Osintsev K.V., Osintsev V.V., (2007), "Accounting for heterogeneity and instability of the thermal structure of fuel flare using multifunction torch" [Uchet neodnorodnosti i nestabilnosti teplovoi struktury topochnogo fakela pri ispolzovanii mnogofunkcionalnykh gorelok”, Teploenergetika], Thermal Engineering, №6, p. 66–70.

13. Dolinsky A.A., Khalatov A.A., Kobzar S.G., Nazarenko O.A., Meshcheryakov A.A. (2007), "The use of computer modeling in low-cost modernization of boiler NIISTU-5" [“Ispolzovanie kompyuternogo modelirovaniya pri malozatratnoi modernizacii kotla NIISTU-5”, Promyshlennaya teplotekhnika] Industrial Heat Engineering, T. 29, №5, p.80–91.

14. Khalatov A.A., Kobzar S.G. (2007), “Computer technologies in the modernization of boilers and combustion chambers” [“Kompyuternye tekhnologii v modernizacii kotlov i kamer sgoraniya”] Aqua-Therm, №1, p. 12–15.

15. Askarova A.S., Karpenko E.I., Loktionova I.V., Messerle V.E., Ustimenko A.V., (2004), «Optimization of the combustion of power-station technologies», Thermal Engineering, Vol.51., №6, p. 488–493.

16. Schelkov V.I., Ladynichev V.V., Liseikin I.D., Todorovich A.V. (2004), “Modernization of the hot-water water-tube boilers PTVM and KVGM” [Modernizaciya vodogreinyh vodotrubnyh kotlov tipa PTVM i KVGM] heating News, №5 (45).

17. Askarov A.S., Askarova S.A., Bolegenova S.A., Maksimov V.J. (2012), “Study of the formation of harmful substances in the combustion chamber BKZ-75 Shakhtinskaya heat and power plant” [“Issledovanie obrazovaniya vrednyh veshestv v kamere sgoraniya BKZ-75 Shakhtinskoi TEC”, VIII Vserossiiskaya conf. “Gorenie tverdogo topliva”], VIII All-Russian Conf. "The burning of solid fuel", Novosibirsk, pp. 9.1-9.4.

18. Anderson D., Tannehill J., Pletcher R. (1990), “Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer” [“Vychislitel'naya gidromekhanika i teploobmen”], Mir, Moscow, Volume 1, p. 384.

19. Jakobsen H.A. (2008), "Chemical Reactor Modeling", Springer, p. 1244.
20. Peters N. (2000), "Turbulent combustion", Cambridge University Press, p. 304.
21. Surzhikov S.T. (2004), "Thermal radiation of gases and plasma" ["Teplovoe izluchenie gazov i plazmy"], Publishing House of the MSTU. Bauman, Moscow, p. 544.
22. Fletcher C. (1991), "Computational methods in fluid dynamics" ["Vychislitelnye metody v dinamike jydкости"], Mir, Moscow, Volume 1, p. 502.
23. Patankar S. (1984), "Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics" [Chislennye metody resheniya zadach teploobmena dinamiki jydкости", Energoatomisdat], Energiyatompublishing, Moscow, p. 152.
24. The heat calculation of boiler units. Standard method, (1973), ["Teplovoi raschet kotelnyh agregatov. Normativnyi metod"], Energy, Moscow, p. 232.

УДК 621.184.004

Редько А.О., Давіденко А.В., Павловський С.В., Кулікова Н.В., Редько І.О.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІНУ В ТОПЦІ ВОДОТРУБНОГО ПАРОВОГО КОТЛА ДЕ-10/14 ПРИ РІЗНОМУ ТЕПЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Наведено результати чисельного дослідження процесів теплообміну в топці парового котла ДЕ-10/14 з пальником ГМГ. Визначено структуру факела, наявність зворотних струмів і течій поблизу теплообмінних поверхонь топки котла. Показані поля розподілу температури, щільності променистого теплового потоку в топковому об'ємі при різних експлуатаційних режимах (100, 50 і 15 % паропродуктивності котла).

Redko A. O., Davidenko A. V., Pavlovskiy S. V., Kulikova N. V., Redko I. O.

NUMERICAL MODELING OF HEAT TRANSFER IN THE FURNACE WATER TUBE STEAM BOILERS DE-10/14 AT DIFFERENT HEAT CAPACITY

The results of numerical studies of heat transfer processes in a furnace boiler DE-10/14 with a burner of HMG given. Determined the structure of the torch, the presence of reverse currents and currents near the heat exchange surfaces of the boiler furnace. Showing field distribution of temperature, density of the radiant heat flow in the combustion volume at different operating conditions (100, 50 and 15 % of steam boiler).