

УДК 621.184.004

А.А. РЕДЬКО, д-р техн. наук, проф., ХНУБА, Харьков,
А.В. ДАВИДЕНКО, асп., ХНУБА, Харьков,
С.В. ПАВЛОВСКИЙ, канд. техн. наук, асс., ХНУБА, Харьков,
В.Е. КОСТЮК, канд. техн. наук, с.н.с., в.н.с., НАУ "ХАИ", Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОДОТРУБНОГО ПАРОВОГО КОТЛА ДКВР(ДЕ)-10/14

Приведены результаты численного моделирования процессов течения и горения метана с кислородом в воздухе в вихревом факеле топки парового котла. Построена расчётная модель горелочного газомазутного устройства ГМГ-7 и топки двухбарабанного парового водотрубного котла ДЕ-10-14. Моделирование выполнено методом контрольного объёма. Определены структура факела, распределение скорости газов в топочном объёме и аэродинамическое сопротивление топки. Расчёты выполнены для топки парового котла с вторичным излучателем и без вторичного излучателя. Ил.: 3. Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: численное моделирование, процессы течения, паровой водотрубный котёл, аэродинамическое сопротивление.

Постановка проблемы. Решение задач модернизации горелочных устройств, анализ и выбор оптимальных режимов эксплуатации топок и котлоагрегатов требуют применения современных методов математического моделирования. Процессы смесеобразования, горения, рециркуляции продуктов сгорания и габариты факела, существенно зависят от конструкции горелочных устройств, конфигурации топочного объёма и кинетики реакции горения. Нормативный метод не всегда приемлем для решения этих задач, так как требует использования эмпирических поправок при расчёте температур газов и других характеристик параметров топки. Неравномерное и неустойчивое течение топочных газов при изменении тепловой нагрузки котла вызывает образование зон с низкими скоростями течений, зон с обратными течениями, с повышенными температурами, высокими плотностями радиационных тепловых потоков.

Эффективное сгорание топлива и полнота химических реакций во многом определяется аэродинамической структурой факела. Габариты факела горения должны исключить соприкосновение с низкотемпературными поверхностями экранных труб при различных режимах эксплуатации котла. При проектировании топок котлов должно быть обеспечено условие максимального тепловосприятия при минимальном аэродинамическом сопротивлении. Поэтому для решения задач обеспечения оптимальных режимов горения топливовоздушной смеси, конвективного и радиационного теплообмена с окружающими

© А.А. Редько, А.В. Давиденко, С.В. Павловский, В.Е. Костюк, 2016

экранными водотрубными пучками является эффективным применение численного моделирования аэродинамики и турбулентного горения в топке.

Анализ литературы. Известны исследования процессов аэродинамики различных топочных устройств с применением методики численного моделирования [1 – 4]. Большое внимание уделено топкам жаротрубных котлов [3]. В [2, 4] показано влияние крутки газового потока на интенсивность горения, структуру факела и аэродинамические процессы в топочном объёме жаротрубного котла. В [3] приведены результаты моделирования топочных процессов в топке котла БКЗ-420-140 при сжигании угольного топлива. Исследования аэродинамики топок котлов проведены в работах [1 – 5]. Расчёты также выполняли согласно нормативному методу [6].

Результаты выполненных исследований указывают на сложность течений газов в топочном объёме и их зависимость от распределений температуры газов, на наличие обратных потоков рециркуляции газов, на вихревой характер течений в поперечных сечениях топки. При этом визуализация результатов моделирования в двух- и трёхмерном вариантах в любом сечении топки позволяет проанализировать структуру топочной среды. Аэродинамическое сопротивление при движении топочных газов зависит от структуры факела, распределений температуры и скорости газов в объёме топки. Конвективный теплообмен газов с экранными трубными пучками также определяется интенсивностью аэродинамических процессов при вихревом движении газов. Однако топки с вторичными излучателями требуют более тщательного проектирования и учёта суммарного аэродинамического сопротивления топки.

Цель статьи – установление связи количественных характеристик топочной среды с геометрией объёма топки котла при размещении в ней вторичных трубчатых излучателей.

Объект и методика исследования. Исследован вертикально-водотрубный газомазутный котел ДЕ-10-14ГМ с горелочным устройством ГМГ-7, предназначенный для производства насыщенного и слабо перегретого пара с температурой 225°C с абсолютным давлением 14 кгс/см², номинальной производительностью 10 т/ч.

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 [7]. 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 Клайперона – Менделеева для термодинамического состояния смеси газов, уравнениями модели турбулентности k - ε Лаундера – Сполдинга и модели турбулентного горения Магнусена – Хертагера. Моделирование выполнено методом контрольного объёма.

Аэродинамическое сопротивление топки с реверсивным вторичным излучателем определяется по скорости закрученной струи [2, 8 – 11]:

$$\Delta p = \xi \frac{\omega_{\text{вх}}^2 \cdot \rho}{2}; \quad \omega_{\text{вх}} = \frac{V}{F} \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}, \quad (1)$$

где ρ , $\omega_{\text{вх}}$ – плотность и средняя скорость топливоздушной смеси на выходе из горелки; ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления; V – объёмный расход топливоздушной смеси через горелку; F – площадь сечения канала горелки; β – угол наклона выходной кромки лопатки относительно продольной оси канала.

Основные результаты и их анализ. Результаты численного исследования показали, что на выходе из вихревой горелки профиль аксиальной скорости имеет М-образную форму с провалом в приосевой зоне. Наблюдается снижение максимума скорости к периферии факела и образование зоны рециркуляции. Сложные траектории движения рециркулирующих газов приводят к увеличению аэродинамического сопротивления, возможности соприкосновения с низкотемпературными теплообменными поверхностями. Распределение скорости газового потока в объёме топки показано на рис. 1.

В продольно-горизонтальном сечении значение скорости на оси топки составляет 10,3 м/с, а вблизи боковых трубчатых поверхностей 2,5 м/с. В продольно-вертикальном сечении значения скорости вблизи верхнего барабана составляет 3 м/с, а вблизи нижнего барабана 3,2 м/с. Изолинии полного избыточного давления указывают на его снижение по длине топки. Общее падение давления по длине топки составляет 65 Па. На периферии факела давление потока газов снижается от 60 Па до 5 Па. Статическое давление газов по длине топки возрастает (рис. 2).

Для топки с вторичным излучателем аэродинамика газа существенно отличается.

Топка с реверсивным факелом. При размещении вторичного трубчатого излучателя с заглушенным торцом в топке, наблюдается реверсивное движение топочных газов, характерные профили скоростей и температур. В приосевой области закрученной струи появляются зоны с разрежением, что вызывает обратные токи рециркуляции.

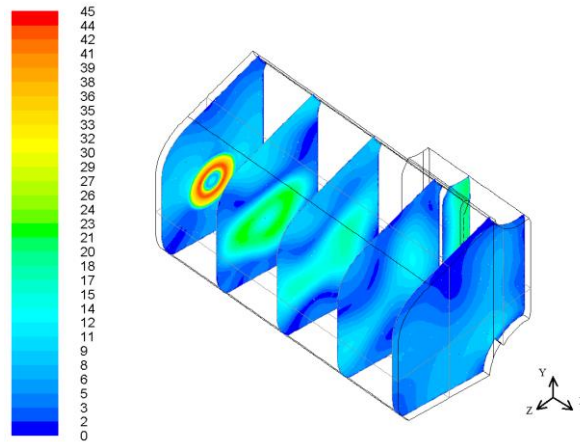
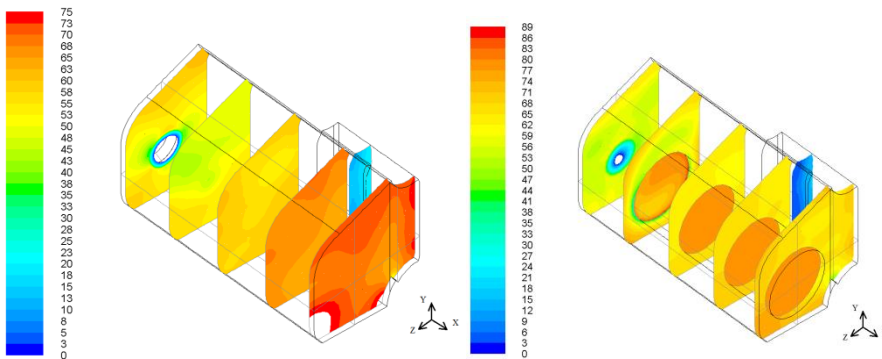


Рис. 1. Распределение скорости газового потока в объёме топки, (м/с)



а)

б)

Рис. 2. Статическое давление газов по длине топки:
а – без вторичного излучателя; б – с вторичным излучателем

На рис. 3 показано влияние диаметра вторичного излучателя. Значения потерь давления в топке котла приведены в таблице.

Таблица

Результаты расчёта потерь давления в топке котла

Наименование варианта	p , выход из амбразуры, Па	p , выход из топки, Па	Δp , Па
Без вторичного излучателя	206	65	141
С вторичным излучателем 840 мм	184	66	118
С вторичным излучателем 1260 мм	194	75	119

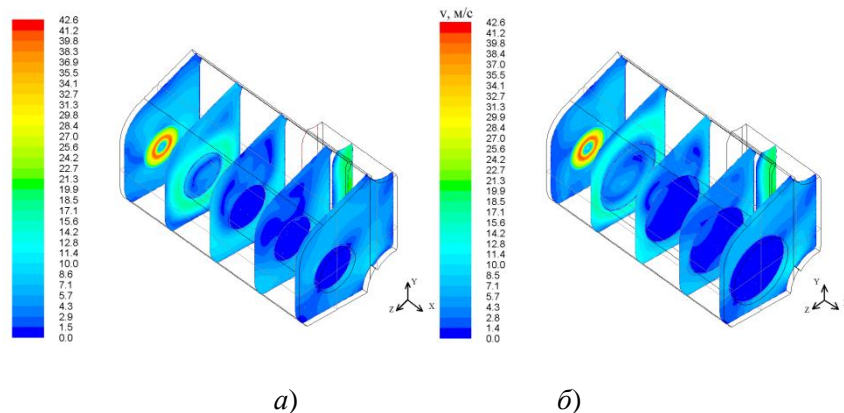


Рис. 3. Влияние диаметра вторичного трубчатого излучателя:
а) – диаметр 840 мм; б) – диаметр 1260 мм.

Скорость газов внутри тупикового излучателя (рис. 3) изменяется по глубине от 5 – 10 м/с на входе до 1,5 – 2 м/с в конце излучателя. В излучателе диаметром 840 мм наблюдаются медленные возвратные течения со скоростью 3 – 8 м/с, с увеличением диаметра скорости несколько возрастают до значений 5 – 10 м/с. Газы частично обтекают вторичный излучатель. Скорость газов в зависимости от диаметра излучателя увеличивается от 3 – 7 м/с до 8 – 17 м/с.

Выводы. Результаты численного моделирования показали, что горелочное устройство ГМГ-7 обеспечивает устойчивую аэродинамическую структуру течения и вихреобразования. Размещение в объёме топки вторичных излучателей обеспечивает образование обратных течений и стабилизацию процесса горения. Увеличение диаметра излучателя влияет на распределение скорости газов в объёме топки: с увеличением диаметра излучателя скорость газов вблизи боковых экранных трубчатых поверхностей повышается до 15-17 м/с, увеличивая конвективную составляющую теплового потока.

Список литературы: 1. 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. – Т. 28. – № 1. – С. 17-22. 2. Хаустов С.А. Численное исследование аэродинамики жаротрубной топки с реверсивным факелом / С.А. Хаустов, А.С. Заворин // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Том 323. – № 4. – С. 5-8. 3. Гиль А.В. Исследования аэродинамики и горения в топке котла БКЗ-420-140 применительно к вариантам замещения проектного топлива / А.В. Гиль, А.С. Заворин // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Том 310. – № 1. – С. 175-181. 4. Гунта А. Закрученные потоки: пер. с англ. / А. Гунта, Д. Лилли, Н. Сайред. – М.: Мир, 1987. – 588 с. 5. Тайлашева Т. С. Анализ опыта эксплуатации котлов типа ДКВР / Т.С. Тайлашева // Вестник науки Сибири. – 2014. – № 3 (13). – С. 11-15. 6. Мочан Н.И. Аэродинамический расчёт котлов. Нормативный метод / Н.И. Мочан – Л.: Изд-во Энергия, 1977. – 256 с. 7. Редько А.О. Моделивання процесів теплообміну в топках

водотрубних котлів ДКВР(ДЕ)-10/14 / А.О. Редько, А.В. Давіденко, С.В. Павловський, В.С. Костюк // Вісник НУ "Львівська політехніка". Серія: Теорія та практика будівництва. – 2016. – № 844. – С.180-187. **8.** Ахмедов Р.Б. Аэродинамика закрученной струи / Р.Б. Ахмедов Т.Б., Балагула, Ф.К. Рашидов и др. // М.: Энергия, 1977. – 240 с. **9.** Warnatz J. Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation, 4th Edition / J. Warnatz, U. Maas, R.W. Dibble. – Springer Berlin Heidelberg New York, 2006. – 388 p. **10.** Jakobsen H.A. Chemical Reactor Modeling / H.A. Jakobsen. – Springer, 2008. – 1244 p. **11.** Peters N. Turbulent combustion / N. Peters. – Cambridge University Press, 2000. – 304 p.

References:

1. Basok, B.I., Demchenko, V.G. and Martynenko, M.P. (2006), "Numerical simulation of aerodynamic processes in the furnace of the boiler with a secondary transmitter", *Industrial heating engineering*, Vol. 28, № 1, pp. 17-22.
2. Khaustov, S.A. and Zavorin, N.S. (2013), "Numerical study of aerodynamics fire-tube furnace with reversible torch", *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, Vol. 323, № 4, pp. 5-8.
3. Gil, A.V. and Zavorin, A.S. (2007), "Aerodynamics and combustion in the furnace of the boiler BKZ-420-140 with respect to the options of replacement project fuel", *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, Vol. 310, № 1, pp. 175-181.
4. Gupta, A., Lillie, D., and Sayred, N. (1987), "Twirled streams: Trans. from English", Mir, Moscow, 588 p.
5. Taylasheva, T.S. (2014), "Analysis of operating experience DKVR type boilers Siberia", *Bulletin of Science*, №3 (13), pp.11-15.
6. Mochan, N.I. (1977), "Aerodynamic calculation of boilers. Normative method", Publishing House Energy, Leningrad, 256 p.
7. Red'ko, A.O., Davidenko, A.V., Pavlovsky, S.V. and Kostyuk, V.E. (2016), "Modeling of heat transfer in furnaces water tube boilers DKVR (DE)-10/14", *News NU "Lviv politehnika". Series: Theory and practice of construction*, Lviv, № 844, pp. 180-187.
8. Akhmedov, R.B., Balagula, T.B., Rashidov, F.K. and Sakaev, A.Yu.(1977), "Aerodynamics swirling stream", *Energia*, Moscow, 240 p.
9. Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R.W. (2006), *Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation, 4th Edition*, Springer Berlin Heidelberg, New York, 388 p.
10. Jakobsen, H.A. (2008), "Chemical Reactor Modeling", Springer, 1244 p.
11. Peters, N. (2000), "Turbulent combustion", Cambridge University Press, 2000. – 304 p.

Статью представил д-р техн. наук, проф. Харківського національного університету будівництва і архітектури Редько А.Ф.

Поступила (received) 15.08.2016

Redko Andriy, Dr.Sci.Tech, Professor
Kharkiv National University of Construction and Architecture
Str. Sumskaaya, 40, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: (057)-700-16-40, e-mail: andrey.ua-mail@mail.ru

Davidenko Anastasiia, post-graduate student
Kharkiv National University of Construction and Architecture
Str. Sumskaaya, 40, Kharkov, Ukraine, 61002

Tel: (057)-700-16-40, e-mail: anastasiya.vyacheslavovna92@mail.ru

Pavlovskiy Sergiy, PhD Tech., assistant
Kharkiv National University of Construction and Architecture
Str. Sumskaia, 40, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: (057)-700-16-40, e-mail: pavlovskiy_s@mail.ru

Kostiuk Volodymyr, PhD Tech., Senior Researcher, Leading Researcher
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
Str. Chkalova, Kharkiv, Ukraine, 61070
Tel: (057)-788-43-41, e-mail: kostyuk.v@mail.ru
ORCID ID:0000-0003-0142-8060

УДК 621.184.004

Моделювання аеродинамічних процесів водотрубного парового котла ДКВР(ДС)-10/14 / Редько А.О., Давіденко А.В., Павловський С.В., Костюк В.Є. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № . – С.

Наведено результати чисельного моделювання процесів течії та горіння метану з киснем у повітрі у вихровому факелі топки парового котла. Побудовано розрахункову модель пальникового газомазутного пристрою ГМГ-7 і топки двобарабанного парового водотрубного котла ДЕ-10-14. Моделювання виконано методом контрольного об'єму. Визначено структуру факелу, розподіл швидкості газів в топковому об'ємі та аеродинамічний опір топки. Розрахунки виконано для топки парового котла з вторинним випромінювачем і без вторинного випромінювача. Ил.: 3. Табл. 1. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: чисельне моделювання, процеси течії, паровий водотрубний котел, аеродинамічний опір.

УДК 621.184.004

Моделирование аэродинамических процессов водотрубного парового котла ДКВР(ДЕ)-10/14 / Редько А.А., Давиденко А.В., Павловский С.В., Костюк В.Е. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 100 – 107.

Приведены результаты численного моделирования процессов течения и горения метана с кислородом в воздухе в вихревом факеле топки парового котла. Построена расчётная модель горелочного газомазутного устройства ГМГ-7 и топки двухбарабанного парового водотрубного котла ДЕ-10-14. Моделирование выполнено методом контрольного объёма. Определены структура факела, распределение скорости газов в топочном объёме и аэродинамическое сопротивление топки. Расчёты выполнены для топки парового котла с вторичным излучателем и без вторичного излучателя. Ил.: 3. Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: численное моделирование, процессы течения, паровой водотрубный котёл, аэродинамическое сопротивление.

UDC 621.184.004

Modelling of the aerodynamic processes of water-tube boiler DKVR(DE) -10/14 / Redko A.A., Davidenko A.V., Pavlovskii S.V., Kostyuk V.Ye. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Informatics and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 4 – 10.

The results of numerical modeling of flow and combustion of methane with oxygen in the air in a swirling furnace plume are presented. Calculation model of oil-gas burner device GMG-7 and two-drum steam water-tube boiler DE-10-14 is built. Modelling is carried out by control volume method. The flame structure, the distribution of gas velocity in the furnace volume and aerodynamic resistance of furnace are defined. Calculations are made for heating boiler with a secondary emitter and without secondary emitter. Figs.: 3. Table. 1. Refs.: 11 titles.

Keywords: numerical modeling, flow process, steam water-tube boiler, aerodynamic resistance.