

УДК 697.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ЗАКРУТКИ ПОТОКА НА
АЭРОДИНАМИКУ ФАКЕЛА В ЖАРОТРУБНЫХ КОТЛАХ

Топорен С.С., Федюшко Ю.М.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт «Академия строительства и архитектуры»,
295493, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 181.
E-mail: toporen1987@gmail.com; fedushko26@rambler.ru

Аннотация. Повышение энергоэффективности и надежности котельного оборудования жилищно-коммунального хозяйства является актуальной задачей, решение которой часто связано с модернизацией устаревших горелочных устройств. Ключевым фактором, определяющим эффективность и долговечность таких котлов, является аэродинамика закрученного факела, создаваемого вихревой горелкой. В данной статье методом компьютерного моделирования исследуется влияние степени закрутки потока и конфигурации воздухоподающих сопел на аэродинамическую структуру течения в топке котла. В качестве граничных условий приняты режимные параметры штатной работы горелки. В результате моделирования получены поля скоростей и турбулентной кинетической энергии для четырех конфигураций подачи воздуха, соответствующих разным значениям параметра закрутки. Установлено, что именно аэродинамическая асимметрия приводит к отклонению высокотемпературного ядра факела и фокусировке теплового потока на локальном участке экранных труб, что является основной причиной их локального перегрева, ускоренной коррозии и эрозии.

Предмет исследования: предметом исследования является аэродинамическая структура закрученного факела в топке водогрейного жаротрубного котла и её влияние на тепловую нагрузку, локальный перегрев и износ экранных труб.

Материалы и методы: в основе исследования лежит метод компьютерного гидрогазодинамического моделирования для анализа аэродинамической структуры закрученного потока в топочной камере котла. При построении модели были учтены реальные режимные параметры работы штатной вихревой горелки. В рамках работы проведено сравнительное моделирование для нескольких характерных конфигураций системы подачи воздуха, отличающихся расположением открытых сопел, что позволяет варьировать степень закрутки потока.

Результаты: в результате моделирования получены детальные поля скоростей и распределение турбулентной кинетической энергии, которые служат основой для последующего анализа структуры закрученного факела в топке водогрейного жаротрубного котла. Выявлено асимметричное поле течения с зоной рециркуляции. Установлено, что аэродинамическая асимметрия вызывает отклонение факела и локальный перегрев экранных труб.

Выводы: аэродинамическая асимметрия закрученного факела, обусловленная степенью закрутки потока, является основной причиной локального перегрева и ускоренной эрозии экранных труб жаротрубных котлов. Для повышения эффективности и надёжности оборудования необходима оптимизация геометрии горелки или системы подачи воздуха, направленная на выравнивание тепловой нагрузки. Совместный анализ турбулентности и траектории движения потоков является эффективным методом диагностики.

Ключевые слова: жаротрубный котел, вихревая горелка, степень закрутки, аэродинамика факела, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, энергосбережения и надежности тепловых сетей в жилищно-коммунальном хозяйстве уже давно находится в центре внимания научных исследований [1].

Тем не менее, большинство проблем в сфере теплоснабжения остаются неразрешенными, что обуславливает необходимость продолжения исследований в этой области.

Особенно актуальной является тема реконструкции и модернизации котельного оборудования, поскольку значительное количество объектов теплоснабжения характеризуется не только физическим, но и моральным износом: установленное теплоэнергетическое оборудование выработало свой ресурс и нуждается в замене [2].

При этом приобретение нового оборудования сопряжено со значительными капиталовложениями, поэтому выбор малозатратной реконструкции или

модернизации представляется оптимальным как с экономической, так и с технической точки зрения.

Жаротрубные котлы, отличающиеся надежностью и конструктивной простотой, составляют основу малой и средней энергетики. Их эффективность в значительной степени определяется работой горелочного устройства. Водогрейные котлы, являющиеся наиболее распространенными источниками тепловой мощности, широко используются в нашей стране для поддержания тепловой нагрузки. Это оборудование преимущественно постсоветского производства, характеризуется простотой эксплуатации и относительно низкой стоимостью. Основное назначение водогрейных котлов - нагрев воды для систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения [3].

Однако этим установкам присущ ряд существенных недостатков, отраженных в их режимных картах, среди которых пониженный коэффициент полезного действия, работа горелок с повышенным избытком воздуха и несоответствие

экологическим нормам по выбросам оксидов азота (NOx).

Таким образом, экономия топлива в технологическом процессе напрямую зависит от корректного выбора горелочного устройства, основными узлами которого являются ротационная форсунка, газовая часть периферийного типа, воздухонаправляющее устройство первичного воздуха и воздуховод первичного воздуха.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Проведенный анализ научной литературы позволяет выделить несколько ключевых направлений в исследованиях, посвященных оптимизации работы котельного оборудования, и определить место данного исследования в контексте современных научных разработок.

Многочисленные работы, такие как исследования О. Sigal (2017), констатируют необходимость снижения потребления энергоресурсов в коммунальной теплоэнергетике [4].

Ученые сходятся во мнении, что физический и моральный износ оборудования является основным препятствием для этого. Приоритет отдается не полной замене, а техническому перевооружению существующих агрегатов, что подтверждается работами Р.К. Орумбаева и А.А. Киббарина [5].

Данное исследование относится к модернизации не конструкции котла в целом, а его ключевого элемента - горелочного устройства.

Фундаментальные основы теплопередачи и горения, изложенные в классических трудах (Исаченко В.П. и др., 1975; Westbrook & Dryer, 1981) [2,7].

Современные исследования, включая работы А.А. Халатова и др. [3] по интенсификации теплообмена и исследования Г.Н. Любчика по аэродинамическим эффектам, детально изучают влияние структуры потока на эффективность сжигания.

В них подчеркивается, что параметр закрутки является одним из главных факторов, определяющих стабильность пламени, полноту сгорания и тепловыделение.

Использование компьютерного гидрогазодинамического моделирования стало базой для анализа сложных процессов в топках.

Публикации последнего десятилетия, в том числе в области энергетики (Ковецкий В.М. и др.) [1], демонстрируют, что моделирование является незаменимым инструментом для виртуального эксперимента, позволяющего детализировать поля скоростей, температур и концентраций.

В данной работе использована методология, применяемая в моделировании, для выполнения анализа асимметрии факела. При этом упор делается на анализ влияния степени закрутки на аэродинамику.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Современные жаротрубные котлы в основном оснащаются вихревыми горелками, формирующими закрученный поток топливоздушную смеси. Закрутка потока интенсифицирует турбулентное смесеобразование, стабилизирует фронт горения и создает компактный факел с высокой интенсивностью теплообмена.

Ключевым параметром, управляющим аэродинамикой такого факела, является степень закрутки, характеризующаяся безразмерным критерием, а именно соотношением тангенциальной и осевой составляющих импульса потока.

Примечательно парадоксальное влияние закрутки потока на выходе из горелки на движение газов в объеме топки. В частности, вихревой факел не изменяет прямолинейного характера движения топочных газов в призматической топке, сохраняя ее прямолинейность.

При этом закрученные потоки, развиваясь в топке, создают локальные вихревые структуры, которые захватывают топочные газы в ее нижней части.

В то же время прямолинейные струйные факелы способны сформировать вихревое движение в топке в целом, а взаимодействия группы таких струй создает интенсивное крупномасштабное вихревое движение, охватывающее основной объем топки.

Особенность вихревого факела с закруткой потока, заключается в том, что воспламенение смеси происходит преимущественно за счёт формирования в центральной части интенсивной зоны рециркуляции обратных токов. Эта зона возвращает смесь к корню факела, обеспечивая непрерывный устойчивый поджиг поступающего топлива.

Именно этот параметр оказывает решающее влияние на структуру течения, определяя размеры, конфигурацию и стабильность факела, а также общую интенсивность процесса горения.

Моделирование аэродинамических и теплотехнических процессов в топке котла со штатным, вихревым горелочным устройством является ключевым инструментом для анализа, оптимизации и прогнозирования работы котлоагрегата.

Для построения модели топки со штатной горелкой были приняты предельные условия:

- расход газа - 0,71 м³/с;
- расход воздуха - 7,85 м³/с;
- давление на выходе из топки - 101 кПа;
- коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,08$.

Результаты моделирования аэродинамических процессов в топке представлены на рис. 1.



Рис. 1. Траектория движения потоков, м/с
Fig. 1. Flow trajectory, m/s

Анализ распределения скорости позволяет сделать ряд важных практических выводов о работе топочного устройства. Наблюдаемый диапазон скоростей от 0 до 65 м/с свидетельствует о существовании неоднородного и высокоинтенсивного потока. Такая картина, характеризующаяся резкими перепадами между зонами высоких скоростей и областями, близкими к застою, что является классическим признаком сильно закрученного вихревого течения, формируемого горелкой.

Критически важным является наличие обширной зоны с околонулевой скоростью, которая, соседствуя с высокоскоростными областями, прямо указывает на формирование устойчивой внутренней рециркуляционной зоны обратных токов. Эта зона, выполняя ключевую роль стабилизатора пламени, обеспечивая постоянный поджиг топливоздушную смеси.

Именно такая искажённая аэродинамическая структура является причиной отклонения высокотемпературного ядра факела и фокусировки теплового потока на локальном участке экранных труб, вызывая их локальный перегрев, сопровождающийся ускоренной коррозией и

эрозией. Для предотвращения данных негативных явлений требуется оптимизация потока, которая может быть достигнута за счёт регулировки степени закрутки либо модификации геометрии горелки.

Значение параметра закрутки газового потока зависит от конфигурации открытых сопел в топке.

Моделирование газового потока проводилось для четырех случаев подачи воздуха через сопла в топку, с соответствующими параметрами закрутки:

- сопла открыты в шахматном порядке - 2,5;
- открытый нижний ряд сопел - 4,5;
- открытый верхний ряд сопел - 4,5;
- открыты оба ряда сопел - 3,0.

Из визуализации поля кинетической энергии (рис. 2) видно, что максимальная скорость достигается в случае открытых сопел одного ряда, а минимальная - со всеми открытыми соплами.

Анализ шкалы поля кинетической энергии турбулентности потока, позволяет сделать выводы об интенсивности вихревых процессов в топке. Представленный диапазон значений характеризует умеренный, а не экстремальный уровень турбулентных пульсаций.

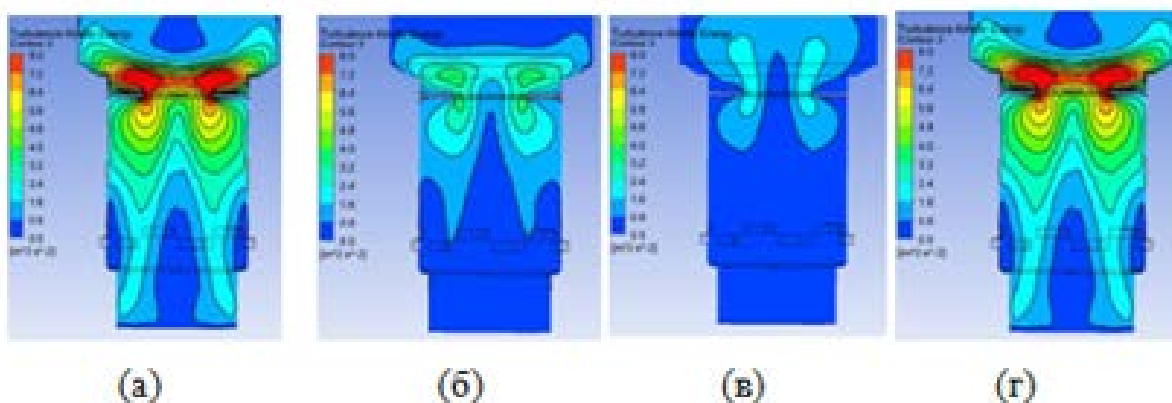


Рис. 2. Поле кинетической энергии турбулентности потока: а - открытые сопла нижнего ряда; б - открытые сопла в шахматном порядке; в - открыты все сопла; г - открытые сопла верхнего ряда
Fig. 2. Kinetic energy field of flow turbulence: a - open nozzles of the lower row; b - open nozzles in a checkerboard pattern; c - all nozzles are open; d - open nozzles of the upper row)

Такой уровень является типичным и, в целом, благоприятным для устойчивого процесса горения в вихревом факеле, поскольку обеспечивает необходимую интенсивность перемешивания топлива с воздухом без риска чрезмерного охлаждения зоны реакции или срыва пламени.

Качественная оценка предполагает, что максимальные величины турбулентной энергии (близкие к верхней границе шкалы) будут локализованы в областях с наибольшими градиентами скорости, то есть на границах струй, в зонах сдвига между закрученным периферийным потоком и центральным ядром, а также непосредственно в области стабилизации фронта пламени.

Минимальные значения будут наблюдаться в ядре установившегося потока или в центре обширных рециркуляционных зон.

Ключевым для практической оценки является именно пространственное распределение этих контуров. Если зона максимальной турбулентности смещена и прижата к одной из стенок топочной камеры то, это является прямым подтверждением асимметрии аэродинамики, выявленной ранее по траектории движения потоков. В таком случае именно эта область будет точкой наиболее агрессивного теплообмена, где сочетание высокой конвективной скорости потока и интенсивной турбулентной диффузии многократно усиливает тепловую нагрузку на экранные трубы, ускоряя процессы окисления и эрозии металла.

ВЫВОДЫ

Таким образом, поле кинетической энергии турбулентности потока служит важным диагностическим инструментом с дополняющим анализом траектории движения потоков и её симметричности, является одним из критериев корректной работы горелочного устройства.

Переход от качественного к количественному анализу степени крутки, особенно в контексте переходных процессов, является необходимым условием для разработки следующего поколения высокоэффективных, долговечных и экологических жаротрубных котлов.

Перспективным направлением является создание систем активного управления аэродинамикой факела с обратной связью, где степень крутки могла бы адаптивно меняться в ответ на изменение режимных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковецкий В.М. Газотурбинные двигатели в энергетике: достижения, особенности, возможности / В.М. Ковецкий, Ю.Ю. Ковецкая. Проблемы общей энергетике. – 2008. – Т. 17. – С. 24 – 30.
2. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

3. Халатов А.А. Теплоотдача при поперечном обтекании воздухом однорядного пучка труб со спиральными канавками // Инженерно-физический журнал / А.А. Халатов, Г.В. Коваленко, А.Ж. Мейрис. – 2018. – Т. 91, – №1. – с. 70-77.

4. Sigal O. Ways of reduction of natural gas consumption in municipal heat energy sector // Thermophysics and Thermal Power Engineering / O. Sigal. – 2017. – Vol. 39(4). – P. 53 – 59.

5. Орумбаев Р.К. Основные направления технического перевооружения водогрейных котлов типа ПТВМ и КВГМ // Новое слово в науке и практике: Гипотезы и апробация результатов исследований: сб. материалов / Р.К. Орумбаев, А.А. Кибарин. – С. 98–104.

6. Использование конструктивных особенностей и аэродинамических эффектов насадка Борда при создании малотоксичных топливо-сжигающих модулей/ Г.Н. Любчик, Г.Б. Варламов, Г.А. Микулин и др.// Технологические системы. –2002.– No 1. –С. 130–133

7. Westbrook C. K. Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames / C. K. Westbrook, F. L. Dryer. Combustion Science and Technology. – 1981. - V 27. - P. 31-43.

REFERENCES

1. Kovetsky V. M. Gas Turbine Engines in Power Engineering: Achievements, Features, and Potential / V. M. Kovetsky, Yu. Yu. Kovetskaya. Problems of General Power Engineering. – 2008. – Vol. 17. – Pp. 24–30.

2. Isachenko V. P. Heat Transfer / V. P. Isachenko, V. A. Osipova, A. S. Sukomel. – Moscow: Energia, 1975. – 488 p.

3. A. A. Khalatov. Heat Transfer in Transverse Air Flow around a Single-Row Tube Bundle with Spiral Grooves // Engineering Physics Journal / A. A. Khalatov, G. V. Kovalenko, A. Zh. Meiris. – 2018. – Vol. 91, – No. 1. – Pp. 70–77.

4. Sigal O. Ways of reduction of natural gas consumption in municipal heat energy sector // Thermophysics and Thermal Power Engineering / O. Sigal. – 2017. – Vol. 39(4). – P. 53 – 59.

5. Orumbaev R.K. Main directions of technical re-equipment of hot water boilers of the PTVM and KVGM types // A new word in science and practice: Hypotheses and testing of research results: collection of materials / R.K. Orumbaev, A.A. Kibarin. – P. 98–104.

6. Using design features and aerodynamic effects of Borda packing in the creation of low-toxicity fuel-burning modules / G.N. Lyubchik, G.B. Varlamov, G.A. Mikulin, et al. // Technological systems. –2002.–No. 1. –S. 130–133

7. Westbrook C. K. Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames / C. K. Westbrook, F. L. Dryer. Combustion Science and Technology. – 1981. - V 27. - R. 31-43.

MODELING AND ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE DEGREE OF FLOW TWIST ON THE AERODYNAMICS OF THE FLARE IN FIRE TUBE BOILERS

Toporen S.S., Fedyushko Yu.M.

Vernadsky Crimean Federal University, Institute "Academy of Construction and Architecture"
181, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea 295050
E-mail: toporen1987@gmail.com, fedushko26@rambler.ru

Abstract. Improving the energy efficiency and reliability of boiler equipment in housing and communal services is an urgent task, the solution of which is often associated with the modernization of outdated burners. The key factor determining the efficiency and durability of such boilers is the aerodynamics of the swirling torch created by the vortex burner. In this article, the influence of the degree of flow twist and the configuration of the air supply nozzles on the aerodynamic structure of the flow in the boiler furnace is investigated by computer modeling. The operating parameters of the burner's normal operation are accepted as boundary conditions. As a result of the simulation, velocity and turbulent kinetic energy fields were obtained for four air supply configurations corresponding to different values of the twist parameter. It has been established that it is precisely the aerodynamic asymmetry that leads to the deflection of the high-temperature core of the flare and the focusing of the heat flux on the local section of the shield pipes, which is the main cause of their local overheating, accelerated corrosion and erosion.

Subject of the study the subject of the study is the aerodynamic structure of a swirling torch in the furnace of a hot-water fire-tube boiler and its effect on thermal load, local overheating and wear of screen pipes.

Materials and methods: the research is based on the method of computer hydrogasdynamic modeling for the analysis of the aerodynamic structure of the swirling flow in the furnace chamber of the boiler. When constructing the model, the actual operating parameters of the standard vortex burner were taken into account. As part of the work, comparative modeling was carried out for several characteristic configurations of the air supply system, which differ in the location of open nozzles, which allows varying the degree of flow twist.

Results: as a result of the simulation, detailed velocity fields and the distribution of turbulent kinetic energy were obtained, which serve as the basis for the subsequent analysis of the structure of a swirling torch in the furnace of a hot-water fire-tube boiler. An asymmetric flow field with a recirculation zone is revealed. It is established that the aerodynamic asymmetry causes the deflection of the flare and local overheating of the shield tubes.

Conclusions: the aerodynamic asymmetry of the swirling flare, due to the degree of flow twist, is the main cause of local overheating and accelerated erosion of the screen pipes of fire tube boilers. To increase the efficiency and reliability of the equipment, it is necessary to optimize the geometry of the burner or the air supply system, aimed at equalizing the heat load. Joint analysis of turbulence and flow trajectories is an effective diagnostic method.

Key words: fire tube boiler, vortex burner, degree of twist, flare aerodynamics, modeling.