

Theoretical and Applied Heat Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: HBLRJT

УДК 621.18

Modernization of Boiler Units Using Cyclone-Vortex Technologies of Fuel Combustion

Tatyana A. Kulagina^{*a} and Tatyana A. Solovieva^b

^a*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*
^b*Far Eastern Federal University
Vladivostok, Russian Federation*

Received 16.10.2024, received in revised form 22.11.2024, accepted 03.12.2024

Abstract. The peculiarities of the burner method of liquid and gaseous fuel combustion are described. The boiler load is regulated by changing the gas flow rate to the burners or the number of operating burners. In practice, burners often operate with significant excess air $\alpha = 1,4-1,6$ and more, reducing the flame temperature. These conditions do not always lead to complete combustion of gas. Regime measures on burners do not reduce NO_x formation. In our opinion, a promising option for modernization of the boiler unit on the example of hot-water boilers KVGМ-116,3–150 is the replacement of the burner method of combustion of gas or fuel oil with cyclone-vortex. The paper describes the description and design features of the cyclone-vortex preheater with the capacity of 65 MW. Operating conditions and efficiency of using the scheme “counterflow” on the boiler are considered. Cyclone-vortex combustion technology, utilization of low-potential heat from flue gases, injection of condensed liquid into the active zone of combustion, as well as the use of water circulation system in the boiler “counterflow”, allows to reduce the “carbon footprint”, improve environmental performance and achieve gross efficiency of KVGМ-116,3–150 boiler with respect to low heat of combustion up to 95–97 %.

Keywords: cyclone-vortex combustion technology, burner, hot-water boiler, pre-furnace.

Citation: Kulagina T. A., Solovieva T. A. Modernization of boiler units using cyclone-vortex technologies of fuel combustion. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(8), 1028–1034. EDN: HBLRJT



Модернизация котельных агрегатов с использованием циклонно-вихревых технологий сжигания топлива

Т. А. Кулагина^а, Т. А. Соловьева^б

^аСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

^бДальневосточный федеральный университет
Российская Федерация, Владивосток

Аннотация. Изложены особенности горелочного способа сжигания жидкого и газообразного топлив. Нагрузку на котле регулируют, изменяя расход газа в горелке или числом работающих горелок. На практике горелки часто работают со значительными избытками воздуха $\alpha = 1,4$ – $1,6$ и более, снижающими температуру факела. Эти условия не всегда приводят к полному сгоранию газа. Режимные мероприятия на горелках не снижают образования NO_x . На наш взгляд, перспективным вариантом модернизации котельного агрегата на примере водогрейных котлов марки КВГМ-116,3–150 является замена горелочного способа сжигания газа или мазута на циклонно-вихревой. В работе приводится описание и особенности конструкции циклонно-вихревого предтопка мощностью 65 МВт. Рассмотрены условия работы и эффективность использования на котле схемы «противоток». Циклонно-вихревая технология сжигания, утилизация низкопотенциальной теплоты из уходящих газов, впрыск сконденсировавшейся жидкости в активную зону горения, а также применение системы циркуляции воды в котле «противоток» позволяют снизить «углеродный след», улучшить экологические показатели и достичь КПД брутто котла КВГМ-116,3–150 относительно низшей теплоты сгорания топлива до 95–97 %.

Ключевые слова: циклонно-вихревая технология сжигания, горелка, водогрейный котел, предтопок.

Цитирование: Кулагина Т. А. Модернизация котельных агрегатов с использованием циклонно-вихревых технологий сжигания топлива / Т. А. Кулагина, Т. А. Соловьева // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(8). С. 1028–1034. EDN: HBLRJT

Котельные агрегаты, сжигающие газообразное или жидкое топливо, оснащаются газомазутными горелками [1–4]. Наиболее часто в энергетике используются универсальные газомазутные горелки без предварительного смешения, сжигающие в факеле высококалорийный природный газ или мазут. В горелочных устройствах внешнего смешения активная зона интенсивного перемешивания локализуется у корня факела, тем самым стабилизируя процесс горения. Такой принцип работы характерен для многочисленных конструкций горелок, особенно для тех, в которых стремятся к созданию вихревой структуры пламени [5–9], или струйной эжекции, усиливающей тепломассообмен. Конструкции горелок позволяют работать в разных диапазонах нагрузки котлов, не опасаясь проскока пламени, так как горение внутри горелки без воздуха невозможно. Однако стоит отметить, что устойчивость работы горелок характеризуется пределом регулирования, который строго ограничен напором воздуха. С учётом этого нагрузку на котле регулируют, изменяя расход газа в горелке или числом работающих горелок. Газомазутные горелки успешно выполняют свои задачи при оснащении котла малой мощности [1, 10] одной – тремя горелками [1, 11, 12].

В отличие от заявленных в паспорте характеристик, на практике горелки часто работают со значительными избытками воздуха $\alpha = 1,4\text{--}1,6$ и более, снижающими температуру факела. Эти условия не всегда приводят к полному сгоранию газа – факел получается растянутым, выходящим за границы топки. В затопленном пространстве топки котла не обеспечивается эффективное смесеобразование, вызванное ранним снижением скорости продуктов горения в большом объеме. Аэродинамическое качество топки котла не обеспечивает эффективное смесеобразование и равномерную турбулизацию тепловых потоков в большом объеме. Ярусное расположение большого количества горелок усложняет задачу по выравниванию тепловых потоков на разных нагрузках котла. Расположение горелок и условия регулирования усложняют задачу по выравниванию расходов первичного и вторичного воздуха на горелках. Сложности в регулировании расходов первичного и вторичного воздуха приводят к появлению газообразного недожога. Для снижения количества химического недожога организуют повышенный избыток воздуха на всех горелках. Улучшить условия регулирования и создать равномерное заполнение топки при любой нагрузке пытаются и за счёт увеличения числа горелок, что приводит в реальных условиях к усложнению эксплуатации котла, неравномерности формирования и распределения теплового потока в топке, снижению эффективности работы котла и существенной сложности наладки работы каждой горелки. При этом даже отлаженный режим горения на горелках и котле не гарантирует снижения выбросов оксидов азота. В частности, для горелок типа ГМ-10 паспортные значения выбросов оксидов азота NO_x при $\alpha = 1,4$ составляют 210 мг/м^3 , что превышает почти в два раза нормативные удельные выбросы NO_x , равные 125 мг/м^3 при $\alpha = 1,4$ согласно ГОСТ 50831–95. В технических характеристиках водогрейного котла марки КВГМ-116,3–150, оснащенного тремя горелками РГМГ-30, при номинальной нагрузке удельные выбросы окислов азота при $\alpha = 1,4$ составят 230 мг/м^3 при сжигании природного газа и 300 мг/м^3 при сжигании мазута. Таким образом, режимные мероприятия на горелках не снижают образования NO_x , при этом стоимость современных газомазутных горелок, особенно низкоэмиссионных, очень высока, а при компоновке котла несколькими горелками рекомендуемые амортизационные отчисления не компенсируют капитальных затрат на модернизацию котла. Организация третичного дутья или рециркуляция инертных газов усложняют технологическую схему котла.

Основной целью энергетической стратегии России до 2035 г. [13] является переход энергетического сектора страны через структурную трансформацию на более высокий, качественно новый уровень. Для достижения цели необходимо решить ряд задач, первой из которых является ускоренная модернизация основного оборудования, в нашем случае – это замена горелочного способа сжигания газа или мазута на циклонно-вихревой. Циклонно-вихревой предтопок (ЦВП) [14] интенсифицирует процессы смесеобразования топлива и воздуха. На рис. 1 представлен поперечный и продольный разрезы ЦВП мощностью 65 МВт, главной особенностью конструкции которого является наличие предварительной камеры сгорания (КС) с комбинированным подводом воздуха и газа. За счёт этого в КС ЦВП при больших тепловых напряжениях и высоких скоростях потока эффективно смешивается и горит топливно-воздушная смесь.

Сжигание мазута в ЦВП осуществляется через многосопловую центробежную форсунку, располагаемую по оси КС. Для сжигания газа в ЦВП организован тангенциальный (на $\approx 75\%$), торцевой (на $\approx 20\%$) и осевой (на $\approx 10\%$) вводы топлива от общего расхода газа. Подвод воздуха

на горение осуществляется на $\approx 25\%$ аксиально, с закруткой в осевом завихрителе, и на 75% тангенциально по всей длине КС, что позволяет реализовать в ЦВП многоступенчатое горение. Управляя процессом горения топлива в КС ЦВП, возможно получить области с высокими тепловыми напряжениями. Ступенчатое сжигание топлива в КС ЦВП создает условия для догорания факела в основном объеме топки котла, что существенно улучшает работу экранных и полурадационных поверхностей нагрева, повышая эффективность их работы и котельной установки в целом. При модернизации котельного агрегата КВГМ-116,3–150 устанавливают два ЦВП мощностью 65 МВт каждый на боковых экранах (рис. 2).

Реализация на котле КВГМ-116,3–150 схемы циркуляции «противоток», представленной на рис. 3, с возможностью перехода на «прямоток» позволяет существенно увеличить КПД котла при пиковых режимах работы. Эксплуатировать котёл КВГМ-116,3–150 по схеме «противоток» при нагрузках менее 70% от номинальной и при температуре сетевой воды ниже 70°C не рекомендуется по причине конденсации водяных паров в последнем конвективном пакете. Надежность работы котлов на меняющихся за отопительный сезон режимах циркуляции воды обеспечивается за счёт выполнения всех конвективных поверхностей нагрева из труб $d_{\text{н}}32$ мм.

Коэффициент полезного действия (КПД) котла КВГМ-116,3–150, работающего по схеме «противоток», возрастает в сравнении со штатной схемой – «прямоток». При сжигании в ЦВП

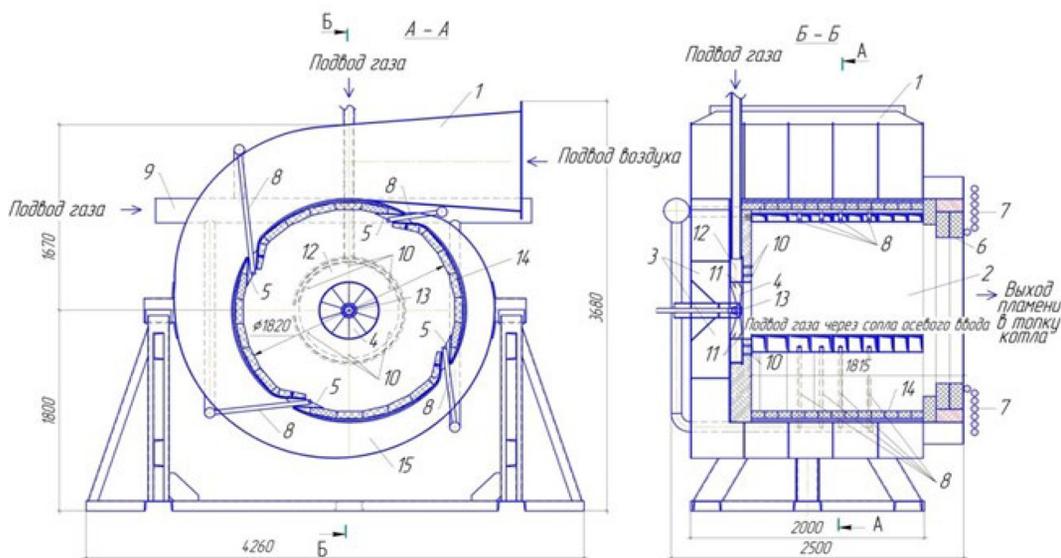


Рис. 1. Конструкция газомасляного ЦВП мощностью 65 МВт (поперечный и продольный разрезы): 1 – распределительный короб воздуха; 2 – камера сгорания; 3 – торцевая вихревая камера; 4 – аксиальный завихритель; 5 – сопла тангенциального ввода воздуха; 6 – пережим; 7 – поверхности нагрева котла; 8 – сопла тангенциального ввода газа; 9 – тангенциальный газовый коллектор; 10 – сопла торцевого ввода газа; 11 – сопла осевого ввода газа; 12 – торцевой газовый коллектор; 13 – многосопловая центробежная форсунка; 14 – обмуровка; 15 – «улитка»

Fig. 1. Design of gas-oil CVC of 65 MW capacity (transverse and longitudinal sections): 1 – air distribution box; 2 – combustion chamber; 3 – end vortex chamber; 4 – axial swirler; 5 – nozzles of tangential air input; 6 – clamping; 7 – boiler heating surfaces; 8 – nozzles of tangential gas input; 9 – tangential gas manifold; 10 – nozzles of end gas input; 11 – axial gas input nozzles; 12 – end gas manifold; 13 – multi-nozzle centrifugal nozzle; 14 – cladding; 15 – «snail»

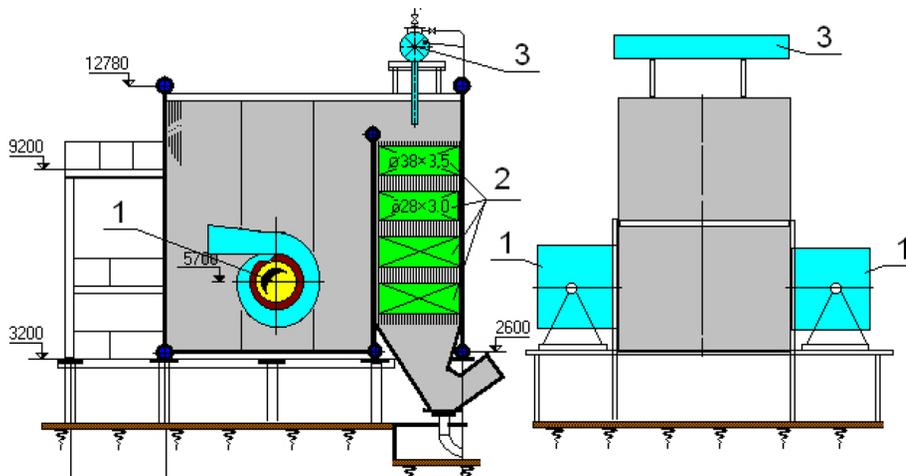


Рис. 2. Водогрейный котёл КВГМ-116,3–150: 1 – ЦВП; 2 – конвективные поверхности нагрева

Fig. 2. Converted KVGM-116,3–150 with CVC: 1 – CVC; 2 – convective surfaces of heaters

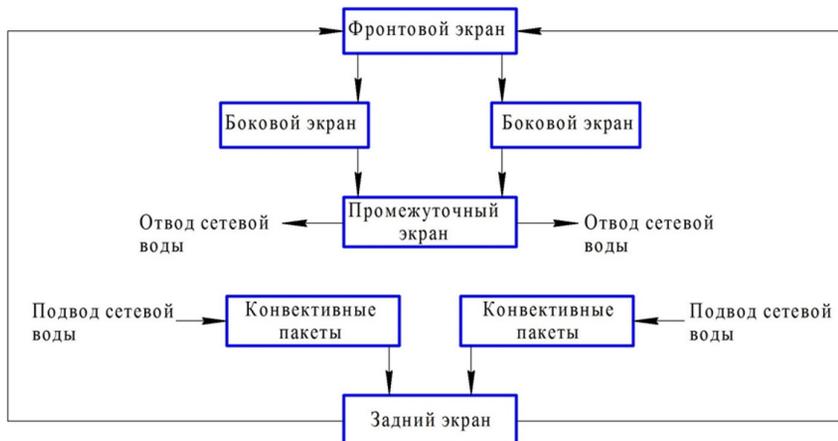


Рис. 3. Схема циркуляции «противоток»

Fig. 3. Circulation scheme «counterflow»

природного газа КПД котла на 2,8–3,1 % больше паспортного значения КПД, равного 93 %, а при сжигании мазута превышает на 1,9 % [15] паспортный КПД, равный 92 %.

Сжигание природного газа как основного вида топлива позволяет рассмотреть возможность получения низкопотенциальной теплоты, значительное количество которой содержится именно в водяных парах продуктов сгорания природного газа. Для осуществления этого процесса за котельным агрегатом целесообразно установить конденсационную теплообменную установку (КТУ). Такое решение приводит к сокращению выбросов парниковых газов за счёт снижения объёма и температуры уходящих дымовых газов. Снижение температуры части объёма дымовых газов за котлом до ≈ 50 °С позволяет увеличить теплопроизводительность котла при том же расходе сжигаемого газа и уменьшить влажность конденсируемых дымовых газов.

Образующийся в КТУ конденсат используется для впрыска на его поверхности нагрева с целью интенсификации процесса теплообмена и для впрыска в КС ЦВП – для снижения эмиссии оксидов азота. Впрыск конденсата, не более 5–8 % от расхода топлива, в область активного горения подавляет эмиссию NO_x на 20 % [16]. Осуществляется впрыск через многосопловую центробежную форсунку как эффективный способ утилизации замазученных вод на теплоисточнике [17], когда резервным или основным топливом является мазут. При установке за котельным агрегатом КТУ, теплоисточник получает тепловую энергию в виде подогретой исходной воды, что позволяет снизить затраты на собственные нужды и улучшает условия ионного обмена в фильтрах водоподготовки.

Таким образом, комплекс энергосберегающих мероприятий: циклонно-вихревая технология сжигания, утилизация теплоты из уходящих газов, впрыск сконденсировавшейся жидкости в активную зону горения, а также применение системы циркуляции воды в котле «противоток», позволяет снизить «углеродный след», улучшить экологические показатели и достичь КПД брутто котла КВГМ-116,3–150 относительно низшей теплоты сгорания топлива до 95–97 %.

Список литературы / References

- [1] Бузников Е. Ф., Роддатис К. Ф., Берзинш Э. Я. *Производственные и отопительные котельные*. М.: Энергоатомиздат, 1984. 248. [Buznikov E. F., Roddatis K. F., Berzinsh E. Y. *Industrial and heating boiler-houses*. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 248. (In Rus.)].
- [2] Спейшер В. А., Горбаненко А. Д. *Повышение эффективности использования газа и мазута в энергетических установках*. М.: Энергоатомиздат, 1991. [Speysher V. A., Gorbanenko A. D. *Increase of efficiency of gas and fuel oil utilization in power installations*. Moscow: Energoatomizdat, 1991 (In Rus.)].
- [3] Иванов Ю. В. *Газогорелочные устройства*. М.: Недра, 1972. 276. [Ivanov Y. V. *Gas-burner devices*. Moscow: Nedra, 1972. 276. (In Rus.)].
- [4] Тасс О. А., Стужин Ю. В. Промышленные исследования мазутных форсунок. *Сборник трудов «Вопросы исследования и расчета газомазутных топочных и горелочных устройств»*. Л.: Изд. ЦКТИ, 1967. 76 [Tass O. A., Stuzhin Yu. V. Industrial research of fuel oil nozzles. *Collection of works "Problems of research and calculation of gas-oil furnace and burner devices"*. L. Izd. TsKTI, 1967. 76. (In Rus.)].
- [5] Абрамович Г. Н. *Теория турбулентных струй*. М.: Физматгиз, 1960. 716. [Abramovich G. N. *Theory of turbulent jets*. Moscow: Fizmatgiz, 1960. 716. (In Rus.)].
- [6] Абрамович Г. Н. Теория центробежной форсунки. *В кн.: Промышленная аэродинамика*. М.: БНТ ЦАГИ, 1944. 18–26. [Abramovich G. N. Theory of Centrifugal Nozzle. In: *the book: Industrial Aerodynamics*. Moscow. BNT TSAGI, 1944. 18–26 (In Rus.)].
- [7] Абрамович Г. Н., Гиршович Т. А., Крашенинников С. Ю. и др. *Теория турбулентных струй*. Изд. 2-е, перераб. и доп.; ред. Г. Н. Абрамович. М.: Наука, 1984. 720. [Abramovich G. N., Girshovich T. A., Krasheninnikov S. Yu. et al. *Theory of Turbulent Jets*. Izd. 2nd, rev. and supplement; ed. by G. N. Abramovich. Moscow: Nauka, 1984. 720. (In Rus.)].
- [8] Ахмедов Р. Б. *Аэродинамика закрученных струй*. М.: Энергия, 1977. 240. [Akhmedov R. B. *Aerodynamics of swirling jets*. Moscow. Energia, 1977. 240. (In Rus.)].

[9] Ахмедов Р. Б., Балагула Т. Б., Рашидов Ф. К., Сакаев А. Ю. *Аэродинамика закрученной струи*. М.: Энергия, 1977 [Akhmedov R. B., Balagula T. B., Rashidov F. K., Sakaev A. Y. *Aerodynamics of a swirling jet*. Moscow: Energiya, 1977 (In Rus.)].

[10] Зыков А. К. *Паровые и водогрейные котлы*. Рипол Классик, 1987. 128. [Zykov A. K. *Steam and water-generating boilers*. Ripol Klassik, 1987. 128. (In Rus.)].

[11] Чепель В. М., Шур И. А. *Сжигание газов в топках котлов и печей и обслуживание газового хозяйства предприятий*. Л.: Гостоптехиздат, 1960 [Chepel V. M., Shur I. A. *Combustion of gases in furnaces of boilers and furnaces and service of gas economy of enterprises*. L.: Gostoptekhizdat, 1960 (In Rus.)].

[12] Иванов Ю. В. *Газогорелочные устройства*. М.: Недра, 1972. 276. [Ivanov Y. V. *Gas-burner devices*. Moscow: Nedra, 1972. 276. (In Rus.)].

[13] *Энергетическая стратегия России на период до 2030 г.* (с пролонгацией до 2035 г.). Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р. [Energy Strategy of Russia for the period up to 2030 (with prolongation up to 2035). Order of the Government of the Russian Federation from 13.11.2009, № 1715-r (In Rus.)].

[14] Shtym A. N., Shtym K. A., Dorogov Ye. Yu. *Boilers with cyclone chambers*. Vladivostok: Far Eastern Federal University Publishing House. (2012) 421.

[15] Shtym K. A., Solov'eva T. A. Conversion of KVGM-100–150 boiler to cyclone-swirl burning of gas. *Thermal Engineering*. 2015. 62. 3. 202–207.

[16] Shtym K. A., Dorogov E. I., Goncharenko Y. B., Upsky M. V., Experience of multinozzle swirl-type injectors study and application, *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 18(2). 2019. 301–314.; *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019 Pushpa Publishing House, Prayagraj. India. 18. (1). 193–205.

[17] Упский В. А., Упский М. В., Циклонное термообезвреживание загрязненных вод. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. S 4–3. 42–49. [Upsky V. A., Upsky M. V., Cyclone thermal treatment of polluted water. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2014. S 4–3. 42–49 (In Rus.)].