

DOI: 10.17516/1999-494X-0406

УДК 62-932.2

## Formation of an Axisymmetric Swirling Flow in a Cyclone-Vortex Pre-Heating with a Capacity of 65 MW

Konstantin A. Shtym<sup>a</sup>,  
Tatiana A. Solovyova<sup>\*a</sup>, Evgenij Iu. Dorogov<sup>a</sup>,  
Yury B. Goncharenko<sup>a</sup> and Ludmila V. Kulagina<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Far Eastern Federal University  
Vladivostok, Russian Federation

<sup>b</sup>Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 15.06.2022, received in revised form 18.06.2022, accepted 24.06.2022

**Abstract.** The article presents power facilities with boiler equipment equipped with cyclone-vortex preheaters with a capacity of 65 MW. The design differences of cyclone-vortex preheaters with one-sided and four-sided supply of gaseous fuel to the combustion chamber are considered. The principle of operation of the cyclone-vortex pre-heating, the features of the distribution of air and gas media in the combustion chamber of the cyclone-vortex pre-heating are described. The article presents a diagram of the location of experimental sections in cyclone-vortex pre-furnaces for conducting pneumometric studies, a list of parameters measured during research is given, information on the modes and loads of boilers during research is given. The results of pneumometric studies are presented. Graphs of changes in the parameters of the swirling flow in cyclone-vortex preheaters during gorenje and without gorenje of natural gas are given. The influence of one-sided and four-sided input of natural gas into the combustion chamber of cyclone-vortex pre-heating on the formation of a symmetrical swirling flow is estimated.

A comparative analysis of the parameters of the swirling flow showed the magnitude of the deviation of the aerodynamic axis of the swirling flow from the geometric axis of the combustion chamber of the cyclone-vortex pre-tank. According to the profile of the change in the tangential component of the full velocity vector, the regions of the formation of a swirling flow during combustion and without gorenje gorenje gas in the combustion chamber of the cyclone-vortex pre-heating are marked. The influence of axial air input on the combustion process and the temperature change of the swirling flow is revealed. Gorenje Analysis of data on oxygen content and temperature values of the «hot» flow showed the areas of gorenje and the areas of mixing of air and gas in the combustion chamber of the cyclone-vortex pre-heating.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: mtasta@mail.ru

The presented conclusions indicate that the uniform distribution of gas through all tangential air inlets during the combustion process allows to intensify the heat and mass exchange of fuel and air and achieve almost complete combustion of gas in the volume of the combustion chamber of cyclone-vortex pre-heating with subsequent gorenje in the boiler furnace.

**Keywords:** cyclone vortex primary furnace, hot water boiler, symmetrical vortex flow, boiler efficiency, gas, vortex gorenje.

**Acknowledgements.** This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-15-2020-806).

---

Citation: Shtym, K. A., Solovyova, T. A., Dorogov E. Iu., Goncharenko, Yu. B., Kulagina, L. V. Formation of an axisymmetric swirling flow in a cyclone-vortex pre-heating with a capacity of 65 MW. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(4), 448–458. DOI: 10.17516/1999-494X-0406

---

## Формирование осесимметричного закрученного потока в циклонно-вихревом предтопке мощностью 65 МВт

К. А. Штым<sup>а</sup>, Т. А. Соловьёва<sup>а</sup>,  
Е. Ю. Дорогов<sup>а</sup>, Ю. Б. Гончаренко<sup>а</sup>, Л. В. Кулагина<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Дальневосточный федеральный университет

Российская Федерация, Владивосток

<sup>б</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, Красноярск

---

**Аннотация.** Представлены энергообъекты с котельным оборудованием, оснащённым циклонно-вихревыми предтопками мощностью 65 МВт. Рассмотрены конструктивные отличия циклонно-вихревых предтопок с односторонним и четырехсторонним подводом газообразного топлива в камеру сгорания. Описан принцип работы циклонно-вихревого предтопка и особенности распределения воздушной и газовой сред в камере сгорания. Приведена схема расположения экспериментальных сечений в циклонно-вихревых предтопках для проведения пневмометрических исследований, дан перечень параметров, замеренных при исследованиях, а также информация по режимам и нагрузкам котлов. Показаны результаты пневмометрических исследований. Приведены графики изменения параметров закрученного потока в циклонно-вихревых предтопках при горении и без горения природного газа. Оценено влияние одностороннего и четырехстороннего ввода природного газа в камеру сгорания циклонно-вихревого предтопка на формирование симметричного закрученного потока.

Сравнительный анализ параметров закрученного потока показал величину отклонения его азродинамической оси от геометрической оси камеры сгорания. По профилю изменения тангенциальной составляющей вектора полной скорости отмечены области формирования закрученного потока при горении и без горения газа. Выявлено влияние аксиального ввода воздуха на процесс горения и изменение температуры закрученного потока. Анализ данных по содержанию кислорода и значениям температур «горячего» потока показал области горения и области смешения воздуха и газа в камере сгорания циклонно-вихревого предтопка.

Представленные выводы указывают на то, что равномерное распределение газа через все тангенциальные воздушные вводы в процессе горения позволяет интенсифицировать тепло- и массообмен топлива и воздуха и добиться практически полного сгорания газа в объёме камеры сгорания циклонно-вихревого предтопка с последующим догоранием в топке котла.

**Ключевые слова:** циклонная вихревая первичная печь, водогрейный котел, симметричный вихревой поток, эффективность котла, газ, вихревое горение.

**Благодарность.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2020-806).

Цитирование: Штым, К. А. Формирование осесимметричного закрученного потока в циклонно-вихревом предтопке мощностью 65 МВт / К. А. Штым, Т. А. Соловьёва, Е. Ю. Дорогов, Ю. Б. Гончаренко, Л. В. Кулагина // Журн.Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(4). С. 448–458. DOI: 10.17516/1999-494X-0406

Исследованиями в области сжигания жидкого и газообразного топлива в закрученном потоке учёные ДВФУ занимаются более сорока лет [1]. Основным достоинством циклонно-вихревой технологии (ЦВТ) сжигания является возможность интенсифицировать в циклонно-вихревом предтопке (ЦВП) процессы смесеобразования в камере сгорания (КС) ЦВП, что позволяет высокоэффективно сжечь газообразное или жидкое топливо и улучшить распределение тепловых потоков в топке котла [1, 2, 3, 4]. Результатами успешной научной работы в этом направлении являются внедрения ЦВТ сжигания топлива на энергообъектах Дальнего Востока.

На Якутской ТЭЦ в качестве основного котельного оборудования установлены водогрейные и паровые котлы, в частности водогрейный котел марки ПТВМ-100. На Якутской ТЭЦ находятся два котла этого типа, один из которых (водогрейный котел ст. № 2) оснащен двумя ЦВП мощностью 65 МВт каждый [5, 6].

По результатам исследований разработана и внедрена усовершенствованная конструкция газомазутного ЦВП [7, 8] на двух водогрейных котлах марки КВГМ-100–150 Хабаровской ТЭЦ-2 и на двенадцати котлах (шесть из которых марки КВГМ-100–150) Владивостокской ТЭЦ-1 и ТЦ «Северная» г. Владивостока. Установленные с боковых сторон котлов ЦВП, каждый мощностью 65 МВт, позволяют сжигать как газообразное (в качестве основного), так и жидкое топливо (в качестве резервного). Подвод воздуха в КС ЦВП организован комбинированно – аксиально через завихритель и тангенциально через воздушные вводы (рис. 1). Такая схема подвода воздуха обеспечивает низкое сопротивление циклонного предтопка, ступенчатость сжигания топлива, высокую эффективность процесса сжигания и широкий диапазон регулирования нагрузок. Сжигание жидкого топлива в КС ЦВП осуществляется с применением многосопловой центробежной форсунки, расположенной по оси КС ЦВП [7, 8, 9], а природного газа за счёт использования газовых сопел. Газ в КС ЦВП подводится комбинированно – через осевые газовые сопла, через сопла в торцевой стенке и через тангенциальные газовые сопла. Основным отличием ЦВП на котле типа ПТВМ-100 ст. № 2 и котлах КВГМ-100–150 является организация тангенциального ввода газа. В ЦВП котла ПТВМ-100 ст. № 2 применен односторонний тангенциальный ввод газа, т.е. через один из четырех воздушных вводов (рис. 1а), а в ЦВП котлов КВГМ-100–150 – четырехсторонний, через четыре тангенциальных воздушных ввода (рис. 1б). Влияние одностороннего и четырехстороннего тангенциального ввода газа в КС ЦВП на формирование осесимметричного вихря является целью исследования.

Результаты режимно-наладочных испытаний на котлах с ЦВП выявили оптимальное соотношение комбинированного ввода газа в КС ЦВП при высокой эффективности работы котлов. Коэффициент полезного действия (КПД) брутто достигает при сжигании газа 94.03–96,1 % [7, 8]. Таким образом, подвод газа комбинированно выступает основным режимом работы, а под-

вод газа через аксиальные и торцевые вводы – растопочным. Растопочный режим позволяет обеспечить прогрев ЦВП и котла за 30 мин. Работает ЦВП на растопочном режиме до 15 % нагрузки котла. Распределение газа при растопочном режиме позволяет заполнить камеру факелом на 20 % от общего объёма предтопка и при пуске в работу «мягко» прогреть обмуровку предтопка и экранные поверхности нагрева котла. Рост нагрузки котла осуществляется увеличением расхода газа, подаваемого через тангенциальные газовые сопла. Заполнение объёма КС ЦВП факелом при этом составляет 80 %. Комбинированное распределение газа – через тангенциальные, торцевые и осевые вводы – даёт эффективную работу котла на нагрузках от 15 до 100 % от номинальной.

С целью изучения процесса формирования симметрии закрученного потока в КС ЦВП проведены аэродинамические исследования при одностороннем и четырехстороннем тангенциальном вводе газа («горячий» поток) и выполнено сравнение с результатами исследований без горения («холодный» поток) топлива в ЦВП. Для исследований был изготовлен зонд, с помощью которого пневмометрическим методом измеряли параметры вихревого потока: направление, статическое и динамическое давления, температуру, содержание кислорода и оксида углерода. Для эксперимента подготовлен один из двух ЦВП котла ПТВМ-100 ст. № 2 Якутской ТЭЦ и один из двух ЦВП котла КВГМ-100–150 ст. № 5 Владивостокской ТЭЦ-1 (рис. 1). В экспериментальном ЦВП котла смонтированы отверстия для ввода исследовательского зонда. Длина КС ЦВП котла ПТВМ-100 ст. № 2 составляет  $L = 1750$  мм, диаметр  $D = 1750$  мм. Замеры производили в трёх сечениях (рис. 1а). Первое сечение расположено на расстоянии  $X_1 = 300$  мм ( $X_1/D = 0,199$ ) от торца камеры сгорания ЦВП, второе –  $X_2 = 770$  мм ( $X_2/D = 0,51$ ) и третье –  $X_3 = 1170$  мм ( $X_3/D = 0,77$ ).

Длина КС ЦВП котла КВГМ-100–150 ст. № 5 составляет  $L = 1460$  мм, диаметр  $D = 1800$  мм. Замеры производили в двух сечениях (рис. 1б). Первое на расстоянии  $X_1$ , равном 510 мм ( $X_1/D = 0,283$ ) от торца КС ЦВП, второе на  $X_2$ , равном 990 мм ( $X_2/D = 0,55$ ).

Исследование параметров закрученного потока без горения и при горении газа в ЦВП при комбинированном подводе выполняли на котле ПТВМ-100 ст. № 2 при нагрузке 89 Гкал/ч (89 % от номинальной нагрузки котла), а на котле КВГМ-100–150 ст. № 5 при нагрузке 50 Гкал/ч (50 % от номинальной нагрузки котла). При сжигании газа исследования на котле ПТВМ-100 ст. № 2 выполнялись при температуре наружного воздуха минус 47 °С, без горения газа температура воздуха менялась от плюс 3 до минус 9 °С. На котле КВГМ-100–150 исследования проводили при температуре воздуха 10–12 °С.

Вихревое движение потока характеризуется профилем изменения тангенциальной составляющей  $W_\varphi$  вектора полной скорости. Анализируя результаты исследований, проведенных в КС ЦВП котлов (рис. 2), можно выделить наличие областей, в которых тангенциальная составляющая  $W_\varphi$  вектора полной скорости возрастает от стенки КС ЦВП, а затем убывает к оси до нулевых значений. Эти области формируются и «горячим», и «холодным» потоками, которые разделяются между собой максимальными по значению тангенциальными скоростями  $W_{\varphi\max}$  и называются, соответственно, областью квазипотенциального и квазитвёрдого вращения. Для ЦВП котла ПТВМ-100 ст. № 2 максимальные значения тангенциальной скорости  $W_{\varphi\max}$  «холодного» потока отмечаются на радиусе 450–500 мм, а для ЦВП котла КВГМ-100-150 ст. № 5 – на радиусе 350–450 мм. Максимальные значения тангенциальной скорости наблюдаются после

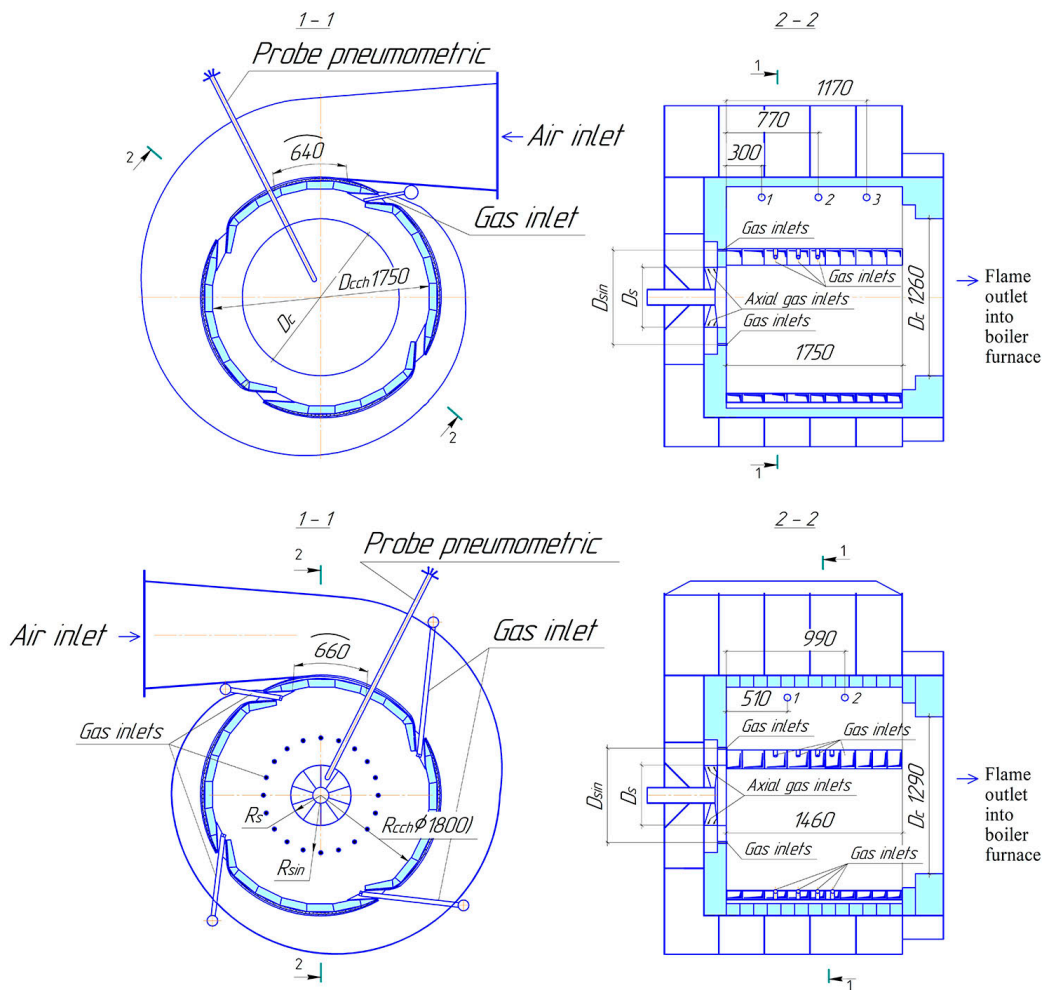


Рис. 1. Схема ЦВП с расположением экспериментальных сечений и основными размерами а) схема ЦВП котла ПТВМ-100 ст. № 2 б) схема ЦВП котла КВГМ-100-150 ст. № 5;  $D$  – диаметра КС ЦВП,  $D_{\text{ТВК}}$  – диаметр торцевой вихревой камеры,  $D_3$  – диаметр завихрителя,  $D_{\text{п}}$  – диаметр пережима

Fig. 1. Scheme of the CVC with the arrangement of experimental sections and limited dimensions a) scheme for CVC of water boiler PTVM-100 № 2 b) scheme for CVC of water boiler KVGM-100-150 № 5;  $D$  – diameter of the CS of the CVP,  $D_{\text{ТВК}}$  – diameter of the end vortex chamber,  $D_3$  – diameter of the swirler,  $D_{\text{п}}$  – clamping diameter

радиуса пережима. Радиус пережима  $R_{\text{п}}$  для КС ЦВП котла КВГМ-100-150 ст. № 2 составляет 645 мм. В первом сечении максимальная скорость  $W_{\text{фmax}}$ , равная 23 м/с, отмечена на радиусе 420 мм, а во втором ( $W_{\text{фmax}}$ , равная 22,2 м/с) – на радиусе 520 мм.

Максимальная по абсолютной величине  $W_{\text{фmax}}$  указывает на наибольшую интенсивность вихревого течения. Максимальные значения тангенциальной скорости занимают относительно протяженную зону, которая и является переходной между квазипотенциальной и квазитвёрдой областями. Протяженность её составила на исследуемых камерах в среднем 100–200 мм. Относительный диаметр пережима  $d_{\text{п}} = D_{\text{п}}/D$  ( $d = D_c/D_{\text{cch}}$ ) влияет на расположение максимальных тангенциальных скоростей в объёме камеры [1] и с его уменьшением  $W_{\text{фmax}}$  смещается к оси камеры, тем самым увеличивая область квазипотенциального вращения. Аналогичный харак-

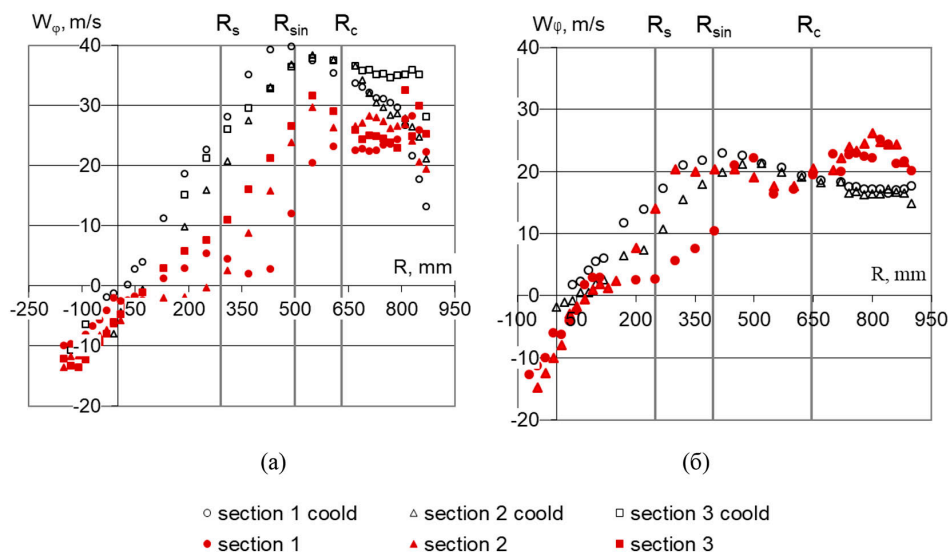


Рис. 2. Изменение тангенциальной составляющей вектора скорости закрученного потока: а) ПТВМ-100 ст. № 2; б) КВГМ-100-150-100 ст. № 5;  $R_s$  – радиус завихрителя;  $R_r$  – радиус торцевых сопел;  $R_n$  – радиус пережима

Fig. 2. Change in the tangential component of the velocity vector of the swirling flow: а) PTVM-100 art. № 2; б) KVGM-100-150-100 art. № 5;  $R_s$  – radius of the swirler;  $R_r$  – radius of end nozzles;  $R_n$  – clamping radius

тер изменения тангенциальной скорости «холодного» потока наблюдается и в КС ЦВП котла ПТВМ-100 ст. № 2. Максимальные значения  $W_{\phi\max}$  при исследованиях достигли 40 м/с, так как объём воздуха, подаваемого в КС ЦВП ПТВМ-100 ст. № 2, в два раза больше, чем в КС ЦВП котла КВГМ-100-150 ст. № 5.

Камера сгорания ЦВП котла ПТВМ-100 ст. № 2 и котла КВГМ-100-150 ст. № 5 имеет оптимальный параметр – калибр камеры  $d_n = D_n/D$  ( $d = D_c/D_{cch}$ ), равный 0,72, что позволяет создать интенсивный закрученный «холодный» поток в 63–73 % основного объёма камеры предтопка. В остальной части объёма, которая является областью квазитвёрдого вращения, интенсивность закрутки потока снижается и практически в оси КС предтопка  $W_\phi$  равна нулю.

Изменение профиля  $W_\phi$  в КС сгорания ЦВП (рис. 2) наглядно показывает, что формируемый четырехсторонним тангенциальным вводом воздуха закрученный «холодный» поток осесимметричен. Тангенциальная скорость с максимальных значений в исследуемых камерах убывает в зоне квазитвёрдого вращения тела. Практически на оси КС ЦВП  $W_\phi$  равна 0 м/с, что указывает на отсутствие вращения потока. Имеется незначительное несовпадение геометрической оси КС ЦВП и аэродинамической оси вращения закрученного потока. В КС ЦВП котла ПТВМ-100 ст. № 2 аэродинамическое отклонение «холодного» потока относительно геометрической оси КС не превышает 1,5 %, а в КС ЦВП котла КВГМ-100-150 – не более 7,8 %. Таким образом, четырёхсторонний тангенциальный ввод воздуха способствует равномерному формированию осесимметричного «холодного» потока в КС ЦВП.

Закрутка потока подтверждается профилем изменения тангенциальной составляющей  $W_\phi$  вектора полной скорости как «горячего» потока, так и «холодного» потока, но процесс горения оказывает влияние на изменение  $W_\phi$  (рис. 2). Особенность формирования структуры «горяче-

го» и «холодного» закрученного потоков качественно сохраняется и характеризуется возрастанием  $W_j$  от стенки КС ЦВП. В этой области происходит смешение газа с воздухом с последующим горением, сопровождаемое ростом температуры потока (рис. 3). При горении профиль тангенциальной составляющей вектора полной скорости имеет зоны деформации в квазипотенциальной и в квазитвёрдой областях, связанные с влиянием аксиального ввода воздуха, подвода газа на горение и непосредственно процессом устойчивого [1, 2, 3, 9] формирования и развития факела в предтопке.

Возрастания значений тангенциальной составляющей  $W_\phi$  вектора полной скорости в квазипотенциальной области и около стенки КС вызваны активным процессом смешения и началом горения топливно-воздушной смеси. В квазипотенциальной области характер изменения значений тангенциальной составляющей  $W_\phi$  вектора полной скорости практически совпадает с изменениями значений температур потока на тех же радиусах (рис. 2, 3) – с повышением температуры  $W_\phi$  возрастает. Подаваемый в тангенциальные сопла газ не только способствует развитию закрученного потока, но и интенсифицирует смесеобразование с тангенциально вводимым воздухом за счёт высоких скоростей (до 70 м/с при номинальных нагрузках) и началом процесса горения, увеличивающим скорость потока.

Несовпадение геометрической оси КС ЦВП и аэродинамической оси вращения закрученного потока при горении для котла ПТВМ-100 ст. № 2 не превышает 25 %, а для КВГМ-100-150 – 7,78 %. Таким образом, четырёхсторонний тангенциальный ввод воздуха и газа способствует равномерному формированию осесимметричного «горячего» потока в КС ЦВП.

Процесс смесеобразования и горения в квазипотенциальной области характеризуется не только изменением температуры потока (рис. 3), но и содержанием кислорода, вступающего в реакцию горения (рис. 4). Профили снижения температуры в первом сечении на радиусе от 0 до 150 мм (рис. 4) указывают на влияние аксиального ввода воздуха через трубу, предна-

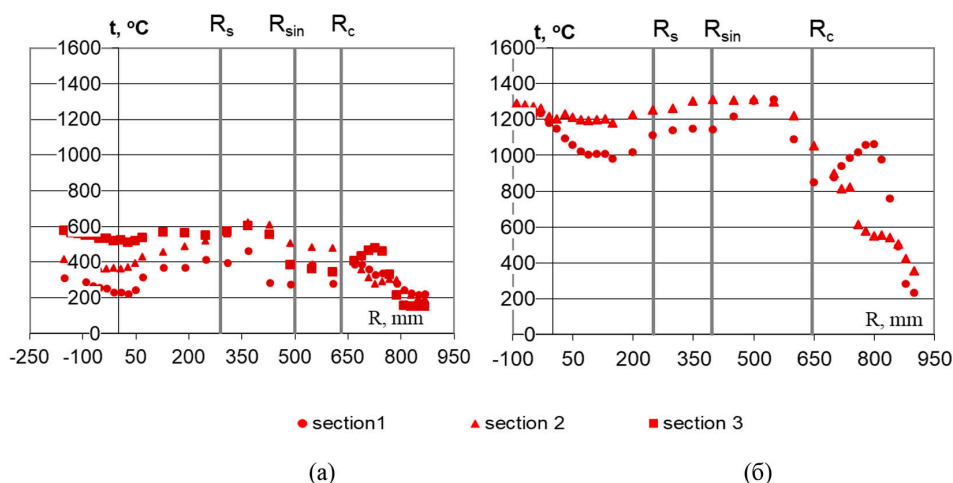


Рис.3. Изменение температуры закрученного потока: а) ПТВМ-100 ст. № 2; б) КВГМ-100-150-100 ст. № 5;  $R_s$  – радиус завихрителя;  $R_r$  – радиус торцевых сопел;  $R_n$  – радиус пережима

Fig. 3. Temperature change of the swirling flow: a) PTVM-100 art. № 2; b) KVGМ-100-150-100 art. № 5;  $R_s$  – the radius of the swirler;  $R_r$  – the radius of the end nozzles;  $R_n$  – the radius of the clamp

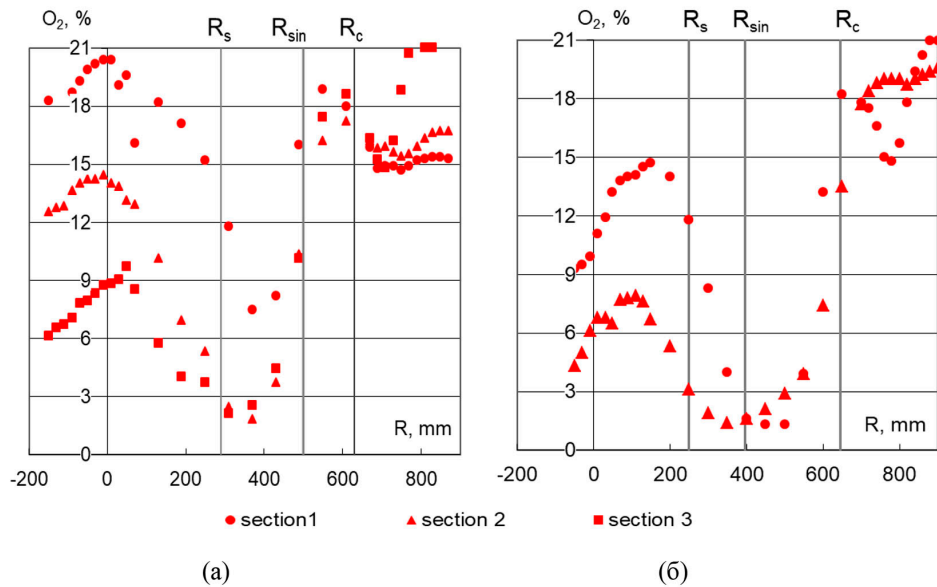


Рис. 4. Изменение содержания кислорода в закрученном потоке в КС ЦВП котла: а) ЦВП котла ПТВМ-100 ст. № 2; б) КВГМ-100-150 ст. № 5;  $R_s$  – радиус завихрителя;  $R_{\sin}$  – радиус торцевых сопел;  $R_c$  – радиус пережима

Fig. 4. Change in the oxygen content in the swirling flow in the CS of the central heating system of the boiler: a) the CVP of the PTVM boiler is 100 st. № 2; b) KVGM-100-150 st. № 5;  $R_s$  – radius of

значенную для расположения многосопловой центробежной жидкотопливной форсунки. По длине КС ЦВП также отмечено снижение значений температур потока в осевой области из-за аксиально подаваемого через лопаточный завихритель воздуха, который наиболее влияет на процесс горения именно в первом сечении, потому что содержание кислорода в этой области достаточно высокое и составляет 9,5–20 % в КС ЦВП котла ПТВМ-100 ст. № 2 и 15–18 % в КС ЦВП котла КВГМ-100-150 ст. № 5 (рис. 4).

В зависимости от нагрузки котла содержание кислорода в центральной части КС меняется – с ростом нагрузки увеличивается. Содержание кислорода в «горячем» потоке составляет 6–15 % в сечениях 2 и 3 для КС ЦВП котла ПТВМ-100 ст. № 2, а во втором сечении КС ЦВП котла КВГМ-100-150 ст. № 5 изменяется от 8 до 3,5 %. В диапазоне радиусов 200–550 мм содержание кислорода в «горячем» потоке составляет 1,5–9 %. Содержание кислорода и значения температур «горячего» потока показывают области горения и области смешения воздуха и газа.

Возрастание температуры в ЦВП позволяет добиться максимального сгорания топлива в объёме предтопка. Сформированный таким образом высокотурбулизированный факел способствует эффективному теплообмену с тепловоспринимающими поверхностями топочного объёма [4]. Максимальные температуры «горячего» потока (рис. 3) по результатам исследований таковы: 600 °С в КС ЦВП котла ПТВМ-100 ст. № 2 и 1330 °С в КС ЦВП котла КВГМ-100-150 ст. № 5.

Необходимость поддержания в камере предтопка высокой температуры для успешного процесса горения объясняется тем, что при температуре ниже 540 °С сложно получить полное сгорание природного газа. Значения температур (рис. 3) «горячего» потока в ЦВП котла ПТВМ-100 ст. № 2 указывают на неполное сгорание основной части газа в предтопке. При



этом процесс горения ускоряет перемещение закрученного потока из предтопка в топку котла, сокращая время пребывания недогоревшей топливно-воздушной смеси в предтопке. Последующее смешивание газа и продуктов горения с окислителем позволяет догореть части топлива и оксидам углерода уже в объёме топки котла. Оксид углерода, смешиваясь с окислителем  $O_2$ , горит в топке с выделением большого количества теплоты  $Q$  [11], превращаясь в двуокись углерода  $CO_2$  (1):



Об эффективности работы котла ПТВМ-100 ст. № 2 свидетельствует содержание  $CO$  в уходящих газах, которое при  $\alpha$ , равном 1,4, составляет от 9 до 15 мг/м<sup>3</sup>.

Процесс неполного сгорания топливно-воздушной смеси в предтопке в условиях аэродинамики топки котла служит причиной образования на экранных трубах локальных сажистых отложений, о чём свидетельствует состояние боковых топочных экранов слева от первого ЦВП А и справа от второго ЦВП Б котла ПТВМ-100 ст. № 2 (рис. 5). Надо отметить, что подобные условия возникают при работе котла на максимальных нагрузках, а также при пуске.

При пуске котла из холодного состояния не рекомендуется включать тангенциальный подвод газа в ЦВП в течение первых 30 минут, так как стенки КС ЦВП постепенно прогреваются и тем самым снижают температуру факела, что приводит к неполному сгоранию газа. В зимнее время увеличивается период прогрева ЦВП и котла из-за низких температур воздуха, подаваемого на горение (до минус 54 °С). Локальные области набрасывания на экранные поверхности окиси углерода представлены на рис. 4.

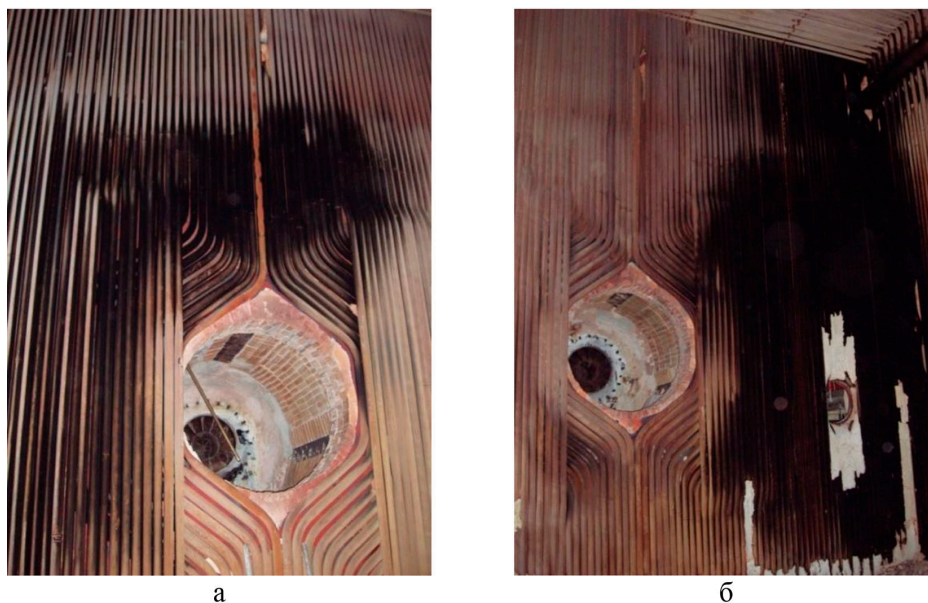


Рис.5. Состояние боковых топочных экранов котла ПТВМ-100 ст. № 2 а) слева от предтопка А; б) справа от предтопка Б

Fig. 5. The condition of the side furnace screens of the PTVM boiler is 100 art. № 2 а) to the left of the preheating A; b) to the right of the pre-heating B

При максимальных нагрузках на котле ПТВМ-100 ст. № 2 тангенциально раздающие газ трубки диаметром 38х3 мм не обеспечивают в предтопке полного смешения максимального расхода газа с воздухом даже при высоких скоростях газа  $\approx 70$  м/с. Основное и наилучшее перемешивание струи газа с окислителем происходит на границе взаимодействия газовых сред (воздушной и топливной), где и осуществляется горение. Перемешивание центральной части газовой струи с недостаточным количеством окислителя способствует генерации оксида углерода CO, реакцию окисления описывает уравнение (2):



При выталкивании закрученного потока в топку котла происходит заполнение пространства топки и областей возле экранных поверхностей, где локально (рис. 5) и происходит набрасывание на экраны окиси углерода закрученным потоком. С учётом разницы температур между теплоносителем в экранных трубах и факелом создаются зоны с пониженным температурным уровнем, где при низкой локальной концентрации кислорода ( $O_2 = 0-2$  %) создаются условия для восстановления углекислоты ( $CO_2$ ) до окиси углерода (3):



Реакция эндотермична и уже при температуре пламени  $800$  °С и ниже степень превращения  $CO_2$  в CO достигает  $80$  % с набрасыванием окиси углерода на экраны поверхности топки котла (см. рис. 5) [11].

Стоит отметить, что модернизация газового водогрейного котла ПТВМ-100МЦ ст. № 2В позволила эффективно сжигать газ в диапазоне температур холодного воздуха от минус  $54$  °С до плюс  $30$  °С с высокой энергетической и экологической эффективностью.

Равномерное комбинированное распределение воздуха и газа позволило интенсифицировать тепло и массообмен топлива и воздуха в КС ЦВП котла КВГМ-100-150 и добиться практически полного смешения в объёме КС ЦВП.

### Выводы

1. Четырёхсторонний тангенциальный ввод воздуха способствует равномерному формированию осесимметричного «холодного» потока в КС ЦВП. Аэродинамическое отклонение «холодного» потока относительно геометрической оси КС не превышает  $7,8$  %.

2. Четырёхсторонний комбинированный ввод воздуха и газа в КС ЦВП позволяет оптимально формировать факел в КС ЦВП и топке котла, получать наиболее эффективный режим горения при работе котла в диапазоне нагрузок  $10-100$  %. Несовпадение геометрической оси КС ЦВП и аэродинамической оси вращения закрученного «горячего» потока не превышает  $7,78$  %.

3. Односторонний тангенциальный ввод газа в КС ЦВП способствует отклонению аэродинамической оси «горячего» потока от геометрической оси КС ЦВП до  $25$  %.

4. Равномерное комбинированное распределение воздуха и газа интенсифицирует тепло и массообмен топлива и воздуха в КС ЦВП, что позволяет осуществить практически полное сгорание природного газа в объёме КС ЦВП с последующим догоранием в топке котла.

## Список литературы / References

- [1] ШТЫМ А.Н., ШТЫМ К.А., ДОРОГОВ Е.Ю. *Котельные установки с циклонными предтопками*. Владивосток: Изд. дом Дальневосточ. федер. ун-та, 2012, 421 с. [Shtym A.N., Shtym K.A., Dorogov E.Yu. *Boiler plants with cyclone pre-furnaces*. Vladivostok: Ed. house Far East. feder. un-ta, 2012, 421 p. (in Russian)].
- [2] БИРЮК, В. В., ВЕРЕТЕННИКОВ, С. В., ГУРЬЯНОВ, А. И., ПИРАЛИШВИЛИ, Ш. А. *Вихревой эффект. Технические приложения*. М.: Изд-во Научтехлитиздат, 2014, 213 с. [Biriuk V. V., Veretennikov S. V., Gurianov A. I., Piralishvili SH. A. *Swirl effect. Technical applications*. Moscow: Ed. Naughtekhlitizdat. 2014. 213 p. (in Russian)].
- [3] Satoru Ishizuka, Derek Dunn-Rankin, Robert W. Pitz, Robert Jj. Kee, Yuuyin Zhang, Huayang Zhu, Tadao Takeno, Makihito Nishioka, Daisuke Shimokuri. *Tubular combustion*. N.Y., 2013. 281 p.
- [4] ШТЫМ К.А., ДОРОГОВ Е.Ю., СОЛОВЬЁВА Т.А. Особенности теплообмена в топках котлов с вихревыми предтопками, *Сборник статей «Опыт эффективного использования энергетических ресурсов Дальнего Востока*. (Научно-технический журнал, спец. выпуск). М. Горная книга. 2014. №. 9421. С. 13–22 [Shtym K.A., Dorogov E.Yu., Solovieva T.A. Features of heat transfer in furnaces of boilers with vortex pre-furnaces, *Collection of articles "Experience in the effective use of energy resources of the Far East*. (Scientific and technical journal, special issue). M. Mining book. 2014. no. 9421, pp. 13–22 (in Russian)].
- [5] Shtym K.A., Dorogov E.Iu., Soloveva T.A., Goncharenko Y.B. Influence of gas combustion regime conditions upon swirled flow parameters, *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 18(1), 193–205.
- [6] Андриевский В.В. Проекты реконструкции и модернизации оборудования и тепловых сетей Якутской ТЭЦ, *Новости теплоснабжения*, 2014, № 9, 34–40 [Andrievsky V.V. Projects for the reconstruction and modernization of equipment and heating networks of the Yakutskaya CHPP, *Heat Supply News*, 2014, No. 9, 34–40 (in Russian)].
- [7] 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.
- [8] ШТЫМ К.А., СОЛОВЬЁВА Т.А. Повышение эффективности работы котельного агрегата за счёт установки циклонно-вихревого предтопка, *Новости теплоснабжения*, 2016, № 190(6), 30–33 [Shtym K.A., Solovyova T.A. Improving the efficiency of the boiler unit by installing a cyclone-vortex pre-furnace, *Heat Supply News*, 2016, 190 (6), 30–33. (in Russian)].
- [9] Shtym K.A., Dorogov E.Iu., Goncharenko Y.B., Upsky M.V. Experience of multinozzle swirl-type injectors study and application, *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 18 (2), 301–314.
- [10] Парра-Сантос Т. М., Мендоза-Гарсия В., Сац Р., Гутковски А. Н., Кастро-Руис Ф. Влияние закрутки потока на аэротермодинамические характеристики пламени в камере сгорания, *Физика горения и взрыва*, 2015, № 4 (51), 29-36. [Parra-Santos T. M., Mendoza-Garsiia V., Sats R., Gutkovski A. N., Kastro-Ruis F. Influence of flow swirling on the aerothermodynamic characteristics of the flame in ignition. *J. Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2015, №.4 (51), 29-36. (in Russian)].
- [11] Глинка Н.Л. *Общая химия*. Л: Химия, 1983 [Glinka N.L. *General chemistry*. L: Khimiya, 1983. (in Russian)].