УДК 621.18.01

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА КВА-3,15
С КОАКСИАЛЬНЫМ ДВУСВЕТНЫМ ЭКРАНОМ****¹Волков А.Ф., ²Орумбаев Р.К., ²Кибарин А.А., ²Коробков М.С., ²Ходанова Т.В.**¹ТОО «Казкотлосервис», Алматы, e-mail: kazkotloservis@mail.ru;²Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, e-mail: kibarin@rambler.ru

Настоящая статья посвящена анализу тепловых испытаний водогрейного котла КВа-3,15 тепловой мощностью 3,15 МВт с коаксиальным двусветным экраном, которые проводились на специализированном испытательном стенде ТОО «Казкотлосервис». В статье представлена экспериментальная и расчетная оценка тепловой эффективности двусветных экранов, выполненных по форме коаксиальных цилиндров при сжигании дизельного топлива. Экспериментальными исследованиями показано, что водогрейный котел имеет высокий КПД на номинальной нагрузке 93–94%, двусветный экран надежно охлаждается, так как температура теплоносителя в экспериментах не превышала 85 °С. Показано, что новая конструкция котла позволяет повысить надежность работы топочной камеры и передней трубной доски, увеличить долю радиационного теплообмена, которая составила в экспериментах и по расчету порядка 70%, снизить на 15–20% затраты металла по сравнению с традиционными конструкциями жаротрубных котлов.

Ключевые слова: водогрейный котел, тепловые испытания, коаксиальный двусветный экран, радиационный и конвективный теплообмен, эффективность работы

**RESEARCHES RESULTS OF KVA-3,15 HOT-WATER BOILER WITH COAXIAL
DOUBLE-HEIGHT FURNACE SCREEN****¹Volkov A.F., ²Orumbaev R.K., ²Kibarin A.A., ²Korobkov M.S., ²Khodanova T.V.**¹LLP «Kazkotloservis», Almaty, e-mail: kazkotloservis@mail.ru;²Almaty University of Power Engineering and Telecommunication, Almaty, e-mail: kibarin@rambler.ru

This article is dedicated on analysis of thermal tests of KVa-3,15 hot-water boiler with heat power of 3,15 MW and coaxial double-height furnace screen; thermal test were made on specialized test-bench of «Kazkotloservis» LLP. Worked on a diesel fuel were made the experimental and calculated estimations of the heat efficiency of double-height furnace screens made in form of coaxial cylinders. Experimental researches shows that hot-water boiler has high efficiency level working on 93–94% of load, the double-height furnace screen is cooled properly due to the fact that heating agency temperature during the experiment did not exceed 85 °C. It is shown that the boiler constructions can improve the front tube sheet's and furnace's operational reliability, increase the part of radiation heat transfer and decrease the metal consumption, it is ca. 70% due to experiment and calculation. New construction also reduces ton 15–20% the metal needs in comparison with traditional fire-tubes boilers.

Keywords: hot-water boiler, thermal tests, coaxial double-height furnace screen, radiation and convection heat transfer, work efficiency

Жаротрубные котлы находят широкое применение в системах отопления. Топочные устройства жаротрубных котлов могут выполняться по проточной и реверсивной схеме [3, 5]. Жаротрубные котлы с реверсивной топкой обеспечивают интенсификацию конвективного теплообмена в топке, а также позволяют за счет активной рециркуляции части продуктов сгорания в корне факела горелки снизить эмиссию оксидов азота. Однако при этом происходит интенсификация теплообмена на трубной доске и начальных участках дымогарных труб в зоне разворота факела, из-за этих факторов трубная доска оказывается в чрезвычайно форсированном тепловом режиме, зачастую приводящем к ее перегреву. Поэтому подавляющее большинство зарубежных производителей водогрейных жаротрубных котлов ограничивают применение реверсивных топок котлами мощностью до 2,5 МВт [3, 4].

Для снижения уровня температур в районе передней трубной доски и увеличения доли радиационного теплообмена в водогрейных котлах серии КВа ТОО «Казкотлосервис» в жаровой трубе установлен коаксиальный двусветный экран.

Стальной водогрейный котел КВа-3,15 выполнен цилиндрическим жаротрубным с наружным прямоугольным кожухом. Диаметр обечайки корпуса Ø1850 мм с толщиной стенки 4 мм, длиной 3750 мм. К обечайке корпуса с двух сторон приварены трубные доски диаметром Ø1850 мм с толщиной стенки 8 мм и образуют корпус котла, который заполняется водой. С верхней стороны и по бокам корпуса, над цилиндрической топкой расположены 116 труб Ø57×3,5 мм длиной 3400 мм. В корпусе котла, ниже жаровых 116 труб в котле КВа-3,15 расположен корпус обечайки топки диаметром Ø1020 мм, длиной 3630 мм, с толщиной стенки 6 мм. Продольная ось корпуса обечайки топки

расположена на 280 мм ниже продольной оси обечайки корпуса котла. С фронтальной стороны котла КВа-3,15, корпус обечайки топки приварен по всему периметру к фронтальной трубной доске. Фронтальная трубная доска смещена внутрь котла от фронтального торца обечайки корпуса на 350 мм. Тем самым с фронтальной стороны обечайки корпуса образуется зазор объемом 0,87 м³ – между фронтальной трубной доской и теплоизолированной фронтальной крышкой котла КВа-3,15 для перепуска высокотемпературных газов, выходящих между наружным корпусом камеры горения и внутренним пространством корпуса обечайки топки.

На одной оси, внутри корпуса обечайки топки расположена двухцветная камера горения. Выполнена камера горения таким образом, что две ее стенки (внутренняя и наружная) с двух сторон совместно с внутренней стенкой топки работали как поверхности, получающие лучистую составляющую энергии от яркого факела, при сжигании дизельного топлива. Основная часть воспринятой лучистой составляющей энергии приходится на внутреннюю стенку топки и далее, после разворота факела на кольцевой канал, образованный наружной стенкой камеры горения и внутренней стенкой топки. Камера горения выполнена коаксиально из наружной трубы диаметром Ø820 мм, длиной 3345 мм и внутренней трубы диаметром Ø720 мм, длиной 3345 мм. С двух сторон камеры горения коаксиально расположенные трубы одинаковой длины проварены двумя кольцами, соответственно на-

ружным диаметром Ø820 мм и внутренним диаметром Ø720 мм.

Экспериментальные исследования водогрейного котла КВа-3,15 с двухцветным экраном проводились специалистами Алматинского университета энергетики и связи совместно со специалистами ТОО «Казкотлосервис» на оборудованном испытательном стенде ТОО «Казкотлосервис» (рисунок 1) в соответствии с методикой [1].

Приведенная на рис. 1 схема испытательного специализированного стенда при сжигании дизельного топлива включает водогрейный котел КВа-3,15 в комплекте с автоматизированной горелкой, емкости и дымовую трубу. Испытания проводились при нагрузке, близкой к номинальной, наблюдения за работой котла проводились на нагрузке 75 % и максимальной 115 %. Оснащение водогрейного котла КВа-3,15 измерительными приборами, тепловыми датчиками приведено на рис. 2.

Схема питания дизельным топливом состояла из емкости – расходный бак с указателем уровня, весы с минимальной градуировкой (бак емкостью 200 литров устанавливался на весах), вентиль для отбора пробы топлива, перепускной клапан, термометр, манометр и дренажный кран. По водяной стороне питания котла осуществлялось группой сетевых насосов IRG 65-200A. Циркуляция воды через две емкости по 50 м³ (рис. 1) допускала возможность обеспечивать длительную продолжительность опыта при постоянной температуре воды на входе.

Рис. 1. Принципиальная схема специализированного стенда для проведения теплотехнических испытаний котлов КВа с двухцветными экранами и автоматизированными горелками

Рис. 2. Схема установки для измерения расхода дизельного топлива: 1 – расходный бак; 2 – весы; 3 – промежуточный бак; 4 – фильтр; 5 – перепускной клапан; 6 – насос; 7 – форсунка; 8 – линия сброса топлива; $t^{\circ}\text{C}$ – измерение температур газов, состава газов и коэффициента избытка воздуха

С фронтальной стороны котлов установлены датчики, регистрирующие погасание факела. В топке котла две платиновые термопары измеряли температуру в двухсветном экране и перед входом в конвективную часть в пространстве между фронтальной трубной доской и передней крышкой. Для измерения температуры уходящих газов использовался измеритель температуры 2TRM1 с датчиком 50M с диапазоном от -50 до $+200^{\circ}\text{C}$. Для измерения температуры воды на входе и выходе из котла использовались измеритель температуры 2TRM1 с датчиком 50M с диапазоном от -50 до $+300^{\circ}\text{C}$. В камере горения и в поворотной камере использовались два измерителя температуры 2TRM1 с двумя датчиками ХА-68 с диапазоном от 0°C до $+1300^{\circ}\text{C}$. Для измерения давления в камере горения использовался измеритель давления многопредельный АДР-0,25.2(1)($\pm 0,25$ кПа).

Расход воды измерялся счетчиком механическим (расходомер), предварительно прошедшим тарирование весовым методом, точность которого удовлетворяет требованиям, предъявляемым к тепловым испытаниям.

Средства измерения и контроля – счетчик механический, измеритель давления, газоанализатор промышленный Testo-350, измеритель сажевого числа Testo-308 и секундомер – предварительно прошли поверку.

Потери тепла в окружающую среду определялись путем измерения температур внешних поверхностей котла раздельно по участкам, имеющим примерно равные значения температуры. Отдельно измерялись температуры по двум боковым теплоизолированным внешним поверхностям котла. По фронтальной части котла в нескольких точках тепловым оптическим датчиком. Отдельно

измерялись температуры с тыльной стороны котла в нескольких точках газосборной камеры и отдельно газохода котла, расположенного между котлом и между дымовой трубой. В результатах обработки измерений температуры тепловым оптическим датчиком в отчете приводится обработка в цвете и сравнивается с результатами измерений термопарами.

Температура окружающей среды при вычислении потерь тепла отдельными участками поверхности котла измерялись в точках, лежащих на расстоянии 1 м от боковой поверхности котла на высоте, соответствующей положению центра измеряемого участка.

Температуру воздуха, поступающего в топку, измеряли термометром, установленным на расстоянии не более 0,5 м от всасывающего патрубка дутьевого вентилятора (места поступления воздуха в топку).

Гидравлическое сопротивление котла при величине более 30 кПа ($0,3$ кгс/см²) определялось измерением давления воды пружинными манометрами.

Перед испытаниями жаротрубный водогрейный котел КВа-3,15 проработал на испытательном стенде на дизельном топливе более 8 часов. Поэтому внутренние поверхности нагрева, а именно стенки коаксиальной двухсветной цилиндрической топки и внутренние поверхности жаровых труб диаметром $\varnothing 57 \times 3,5$ мм, имели тонкие следы налета мелких фрагментов пылевидной сажи из-за низкой температуры стенки как коаксиальной двухсветной топки, так и жаровых труб.

Результаты измерений параметров котла КВа-3,15 при испытаниях на нагрузке, близкой к номинальной, и результаты расчетов эффективности работы котла представлены в табл. 1.

Кроме натурных испытаний были проведены расчетные исследования котла КВа-3,15 тепловой мощностью 3,15 МВт. Для этого были собраны расчетные модели котлов. Расчеты проводились при номинальных нагрузках. Моделирование работы

котла при различных нагрузках осуществлялось в программе BOILER DESIGNER [2].

Расчетная модель котла КВа-3,15 с двухцветным экраном с результатами расчетов при работе на дизельном топливе на номинальной нагрузке представлена на рис. 3.

Таблица 1

Результаты теплотехнических испытаний котла КВа-3,15 при нагрузке, близкой к номинальной

№ п/п	Измеряемый параметр	Ед. изм.	опыт № 1 (5 мин)	опыт № 2 (5 мин)	опыт № 3 (5 мин)
1	Температура теплоносителя на выходе из котла	°С	83	83,10	82,48
2	Температура теплоносителя на входе в котёл	°С	58,8	58,70	58,50
3	$\Delta t^{\circ}\text{C}$ разность температур между выходом из котла и входом в котёл	°С	24,20	24,40	23,98
4	Содержание кислорода в дымовых газах	%	3,41	3,43	3,41
5	Температура уходящих газов в дымовой трубе	°С	178,3	176,7	180,5
6	Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах	-	1,20	1,20	1,20
7	Потери теплоты с уходящими газами	%	6,4	7,2	7,5
8	Потери теплоты в окружающую среду	%	0,3	0,3	0,3
9	Температура теплоносителя в двухцветном экране	°С	84,6	83,60	84,90
10	Температура уходящих газов в двухцветном экране	°С	875,5	874,10	876,40
11	Температура газов в конвективной части	°С	523,5	524,70	498,50
12	Показание счётчика по воде	м³	959,3	967,10	967,20
13	Расход теплоносителя	м³/час	98,40	93,60	95,28
14	Расход топлива (дизельное, показание весов)	кг	91,5	112,40	71,50
15	Расход топлива	кг/ч	250,80	246,00	246,00
16	Давление топлива	Bar	10	10,00	10,00
17	Температура наружного воздуха	°С	33,50	33,50	33,50
18	Полученная мощность по расходу топлива	КВт	2945,97	2889,59	2889,59
19	Полученная мощность по расходу теплоносителя	КВт	2803,20	2724,21	2657,24
20	КПД по прямому балансу	%	94,0	93,8	92,0
21	КПД по обратному балансу	%	93,3	92,5	92,2

Рис. 3. Расчетная модель котла КВа-3,15 с двухцветным экраном

Таблица 2

Основные расчетные характеристики котла КВа-3,15

Наименование показателя	КВа-3,15, номинальная нагрузка (расчетные условия)	КВа-3,15, условия испытаний
1. Тепловая мощность, МВт	3,15	2,88
2. Рабочее давление воды, МПа	0,4	0,4
3. Температура воды на входе, °С	50	58
4. То же на выходе из котла, до °С	76	83,8
5. Перепад температур воды, °С	26	25,8
6. Гидравлическое сопротивление котла, МПа	0,12	0,12
7. Температура газов на выходе из топки, °С	887	828
8. Коэффициент избытка воздуха	1,3	1,2
9. Температура уходящих газов, °С	174	160
10. Расчетная температура воздуха, °С	10	34
11. Расход воды через котел, т/ч	102	96
12. Объем топки котла, м ³	2,56	2,56
13. Поверхность стен топки, м ²	26,65	26,65
14. Конвективная поверхность, м ²	65	65
15. Теплота сгорания топлива, ккал/кг	10200	10200
16. Расход топлива на котел, т/ч	0,29	0,26
17. Потери теплоты q_2 , %	8,19	5,96
18. Потери теплоты q_3 , %	0	0
19. Потери теплоты q_5 , %	0,3	0,3
20. КПД котла, %	91,5	93,74

Сводные результаты теплового и гидравлического расчета котла КВа-3,15 с двухцветным экраном на дизельном топливе на номинальной нагрузке представлены в табл. 2. При моделировании принималась температура воды на входе в котел 50 °С и расчетный (паспортный) расход теплоносителя 102 т/ч, для сравнения в таблице представлен расчет котла при параметрах физического эксперимента.

Как видно из представленных расчетных и конструктивных данных, котлы КВа-3,15 характеризуются развитой радиационной поверхностью нагрева. Котельный агрегат имеет высокий КПД, расчетный КПД хорошо согласуется с данными натурных испытаний.

Результаты теплотехнических испытаний водогрейного котла КВа-3,15 на нагрузке 2855 кВт показали, что максимально достигнутый КПД составляет более 95,4%, при расчетном КПД 93,8%, расчетная температура уходящих газов 180 °С, при максимально достигнутой температуре уходящих газов 237 °С (при мощности 115% от номинала), тепловое напряжение объема топки котла составило $Q/V_T = 1,43 \times 10^6$ ккал/м³, тепловое напряжение конвективной поверхности нагрева со вставками составило $q_k = 17949$ ккал/м²,

отношение общей поверхности нагрева ΣH к тепловой мощности котла составило $\Sigma H/N = 29,52$, отношение конвективной поверхности нагрева H_k/H_r к радиационной поверхности нагрева составило 2,19. Доля радиационной составляющей тепла в котле КВа-3,15 составила порядка 70%. Испытания показали, что количество дымогарных труб со стальными витыми вставками достаточное и в последующем производстве рекомендуется количество конвективных труб с витыми стальными вставками оставить в количестве 116 штук.

Выводы

1. Коаксиально выполненная топочная камера (топка) воспринимает лучистое тепло с двух сторон, существенно увеличивая теплосъем в топочном пространстве, а реверсное движение высокотемпературных газов по развитой поверхности коаксиального канала, образованного внешней стенкой топочной камеры и внутренней стенкой обечайки топки (жаровой трубы), приводит к росту доли конвективной составляющей. Средний КПД котла на нагрузках, близких к номинальной, находился на уровне 93–94%.

2. Проведенные теплотехнические испытания водогрейного котла КВа-3,15 из-

готовленного в ТОО «Казкотлосервис», и проведенные тепловые, гидравлические расчеты позволяют сделать вывод о том, что все основные теплотехнические показатели котла совпадают. Подтверждена эффективность двусветных экранов (повысилась надежность работы топочной камеры, снизилась температура в районе передней трубной доски, увеличилась доля радиационного теплообмена, снизились затраты металла).

Список литературы

1. Методика определения номинальной теплопроизводительности отопительных котлов теплопроизводи-

тельностью от 0,1 до 3,15 МВт. – М.: НИИ Сантехники, 1983. – 76 с.

2. Расчет котельных агрегатов с использованием современных программных продуктов: Учеб. пособие / Г.И. Доверман, А.В. Мошкарин, Б.Л. Шелыгин, Ю.В. Мельников / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2007. – 272 с.

3. Хаванов П.А. Теплотехнические особенности применения водогрейных котлов малой мощности // Вестник МГСУ. – 2011. – № 7. – С. 429–434.

4. Хаустов С.А., Загорин А.С. Современные тенденции проектирования жаротрубных котлов // Вестник науки Сибири. – 2014. – № 2 (12). – С. 21–28.

5. Цейтлин С.А. О развитии котлостроения для промышленных и отопительных котельных малой мощности // Журнал «Новости теплоснабжения». – 2001. – № 1 (4). – С. 19–23.