

УДК 662.995.662.61

СИГАЛ А.И.¹,
КАНЫГИН А.В.¹, САЕНКО Г.К.²¹Институт технической теплофизики НАН Украины²АК “Киевэнерго”

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОГРЕЙНОГО ВОДОТРУБНО – ДЫМОГАРНОГО КОТЛА

Наведено результати теплотехнічних випробувань та дослідної експлуатації водогрійного водотрубно-дымогарного котла КВВД-0,63 Гн в умовах комунальної теплової мережі.

Представлены результаты теплотехнических испытаний и опытной эксплуатации водогрейного водотрубно-дымогарного котла КВВД-0,63 Гн в условиях коммунальной тепловой сети.

The results of thermotechnical testing and experimental operation of a KVVD-0,63 Gn hot-water watertube-firetube boiler in municipal heat network are presented.

Одной из распространенных конструкций газотрубных котлов является котел, имеющий встроенные трубные пучки. Появление встроенных трубных пучков в таких котлах относится к началу прошлого века и было обусловлено необходимостью получения дополнительных поверхностей нагрева в пароперегревателях и кипятильных трубах паровых котлов либо улучшения циркуляции воды внутри котла при помощи водоподъемных труб, располагавшихся внутри жаровой трубы.

Жаротрубно-дымогарные котлы, имеющие трубные пучки, относятся к классу комбинированных котлов [1,2]. Как правило, такие агрегаты ранее использовались в качестве парогенераторов, были сравнительно компактными и находили широкое применение на передвижных установках, паровозах, а также на водном транспорте [2].

При использовании жаротрубно-дымогарных котлов в качестве водогрейных возникают условия для интенсивной низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева (в особенности сварных швов), вызванной выпадением кислотного конденсата из дымовых газов [3]. Кроме того, при сжигании газообразного топлива общее содержание термических и быстрых оксидов азота в уходящих газах водогрейных котлов составляет более 80% от общего количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу [4]. Для обеспечения надежной работы поверхностей нагрева и снижения эмиссии NO_x в практике кот-

лостроения в настоящее время используются различные методы. Логично предположить, что предварительный подогрев обратной сетевой воды в водотрубном пучке, встроенном в топку, должен приводить к повышению температуры воды в зоне расположения дымогарных труб и будет способствовать предотвращению выпадения в них кислотного конденсата. Также возможно понизить концентрацию NO_x в дымовых газах за счет улучшения теплообмена в топочном пространстве, т.е. за счет снижения максимальных локальных температур в зоне горения.

Таким образом, конструкция водогрейного водотрубно-дымогарного котла со встроенным в топку экраным пучком представляется технически обоснованной. Такая конструкция разработана Институтом технической теплофизики Национальной академии наук Украины. Котел КВВД-0,63 Гн – водогрейный водотрубно-дымогарный котел номинальной теплопроизводительностью 630 кВт с принудительной циркуляцией теплоносителя, рассчитан для работы на природном газе или жидком топливе и предназначен для выработки тепловой энергии в виде горячей воды с температурой до 95 °С и давлением до 0,6 МПа для отопления, технологических нужд и горячего водоснабжения. Котел (рис.1) состоит из следующих деталей и узлов:

- корпуса овальной формы;
- передней и задней трубных досок, приваренных к корпусу;

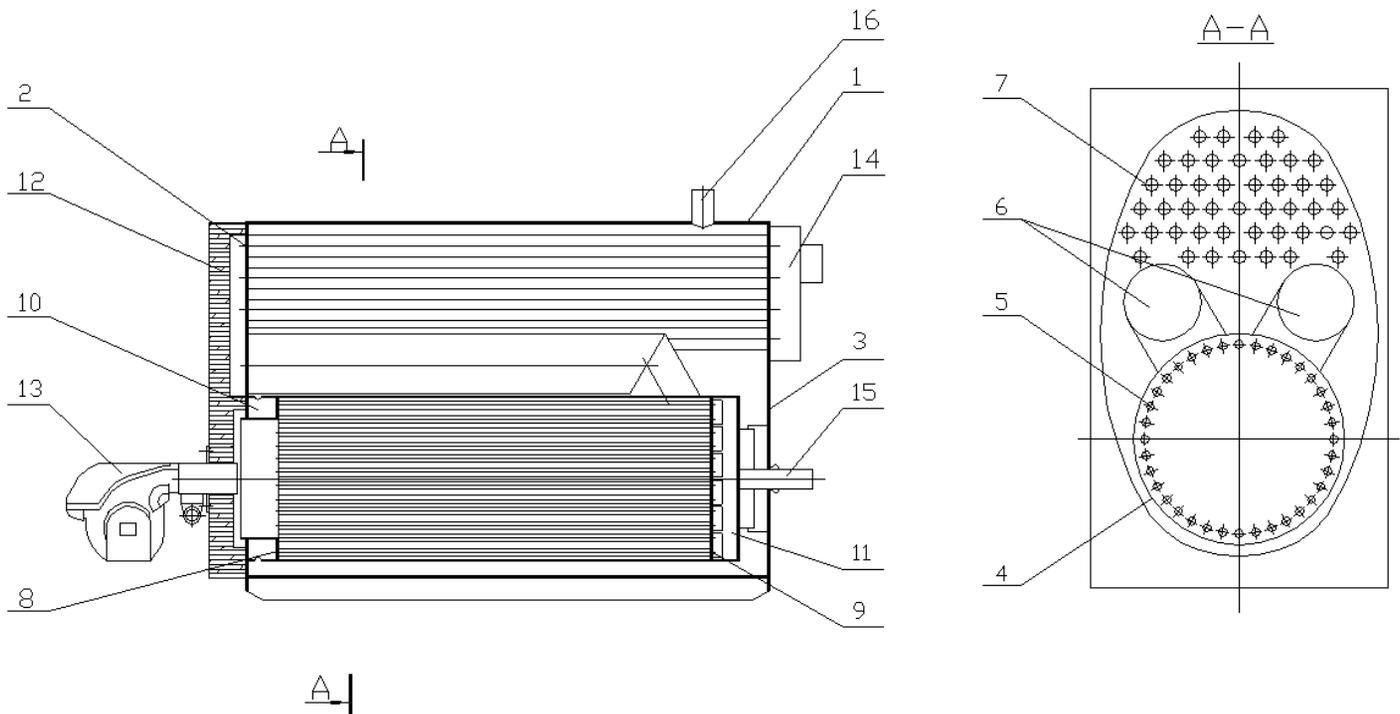


Рис.1. Конструкция котла КВВД-0,63 Гн:

1 – корпус котла; 2 – передняя трубная доска; 3 – задняя трубная доска; 4 – жаровая труба; 5 – трубы экранной системы; 6 – огневые трубы; 7 – дымогарные трубы; 8 – передняя кольцевая трубная доска; 9 – задняя кольцевая трубная доска; 10 – передняя кольцевая водяная камера; 11 – задняя кольцевая водяная камера; 12 – дверь котла с поворотной камерой; 13 – горелочное устройство; 14 – дымовая коробка; 15 – патрубок обратной сетевой воды; 16 – патрубок прямой сетевой воды.

- дымогарных труб, сваренных в верхние части передней и задней трубных досок;
- топочной камеры, включающей в себя жаровую трубу и экранную систему (экранный топочный пучок) с кольцевыми трубными досками;
- двери котла, в которой находится поворотная камера дымовых газов;
- горелочного устройства, которое крепится к фланцу на дверях котла.

В топочной камере между задней и передней кольцевыми водяными камерами сварены 36 экранных труб, формирующих экранный топочный пучок и разделенных на 12 трехходовых элементов. Обратная сетевая вода подается в заднюю водяную камеру, проходит в переднюю водяную камеру, обратно в заднюю и снова в переднюю (т.е. 3 хода). Из передней камеры вода через 12 радиально расположенных отверстий далее поступает в водяной объем корпуса котла. Внутренняя поверхность двери покрыта огнеупорной футеров-

кой. В дымогарные трубы котла вставлены пластинчатые турбулизаторы (завихрители), которые улучшают теплообмен внутри труб.

Предварительно проведенный анализ украинского рынка горелочных устройств для комплектации котла КВВД-0,63 Гн позволил по ряду факторов, главным из которых было соотношение “цена-качество”, использовать двухступенчатую газовую блочную вентиляторную горелку RS-70 и электронную автоматику RB/T концерна RIELLO S.p.a (Италия). Расчетные характеристики этого котла приведены в табл. 1.

Для проведения приемочных и сертификационных испытаний ОАО “Киевэнергоремонт” был изготовлен, а АК “Киевэнерго” смонтирован опытный образец котла КВВД-0,63 Гн в одной из районных котельных г. Киева. Наряду с котлом КВВД-0,63 Гн в котельной эксплуатируются семь водогрейных котлов НИИСТУ-5 тепловой мощностью по 0,65 МВт, которые были ус-

Табл. 1. Расчетные характеристики котла КВВД-0,63 Гн

Наименование параметра	Размерность	Значение
Номинальная теплопроизводительность	МВт	0,63
Диапазон регулирования тепловой нагрузки	%	40...100
Коэффициент полезного действия, не менее	%	92
Расход топлива (природный газ при $Q_n^p = 35600$ кДж/нм ³)	м ³ /ч	70±5%
Содержание оксидов азота (в пересчете на NO ₂) в сухих продуктах сгорания (приведенное к $\alpha=1$), не более	мг/м ³	200
Рабочее давление воды в котле	МПа	0,6
Температура воды на выходе из котла	°С	95
Перепад температуры воды	°С	25
Расход воды	м ³ /ч	22
Температура уходящих газов	°С	160
Масса котла, не более	кг	1700

тановлены ранее. Следует отметить, что котлы НИИСТУ-5 и котел КВВД-0,63 Гн практически одинаковы по мощности, и поэтому их параметры легко сравнивать. Суммарная мощность котельной после установки котла КВВД-0,63 Гн составила 5,19 МВт. Топливом является природный газ.

Основные результаты теплотехнических испытаний котла КВВД-0,63 Гн при работе на природном газе приведены в табл. 2. В правой части таблицы приведены данные испытаний типового современного жаротрубно-дымогарного котла КВа-0,63 Гн (Гс) производства ОАО «Красилковский машиностроительный завод» (Украина) при работе на расчетной нагрузке [5]. Сопоставление этих результатов интересно тем, что котел КВа-0,63 Гн (Гс) имеет сходную конструкцию (за исключением отсутствия в его топке трубного пучка) и был оснащен аналогичным горелочным устройством. При проведении испытаний горелочное устройство котла КВВД-0,63 Гн устойчиво включалось, удерживало факел и стабильно работало как на первой, так и на второй ступенях горения.

Разработанная конструкция топки котла в комплексе с горелочным устройством RS-70 позволила:

а) выйти на устойчивый и весьма низкий коэффициент избытка воздуха ($\alpha = 1,08$ по сравнению с $\alpha = 1,11...1,13$ для подобного оборудования) без нарушения удовлетворительного

горения и роста количества вредных выбросов в дымовых газах в режимах, близких к расчетным;

б) повысить фактическую полезную тепловую нагрузку котла на 4,6% по отношению к расчетной (678 кВт фактической нагрузки в сравнении с расчетной 630 кВт) без ухудшения других теплотехнических показателей;

в) понизить содержание оксидов азота в уходящих дымовых газах на 20 ppm по отношению к типовому жаротрубно-дымогарному котлу с жаровой трубой, не имеющей экранного топочного пучка (57 ppm в сравнении с 77 ppm);

г) получить допустимую и надежную длительную работу поверхностей нагрева котла при понижении температуры обратной сетевой воды до 48 °С (при работе котла на расчетной нагрузке и расчетном расходе сетевой воды) без дополнительных изменений режимов работы котла;

д) значительно уменьшить тепловую инерцию котла.

Сравнивая эффективность работы топочных камер различных котлов, необходимо стремиться к минимизации влияния конструкции горелочного устройства на качественные характеристики процесса горения, происходящего в топке. Поэтому, проводя по диаграмме (рис.2) оценку работы топки котла КВВД-0,63 Гн, в качестве примеров для сравнения выбиралось отечественное котельное оборудование, также оснащенное горелочными устройствами серии RS производства

Табл. 2. Сравнительная таблица результатов теплотехнических испытаний котлов КВВД-0,63 Гн и КВа-0,63 Гн (Гс)

Наименование параметра	Размерность	Фактическое значение		
		КВВД-0,63 Гн		КВа-0,63 Гн (Гс)
Нагрузка	%	66	104	100,5
Тепловая производительность	кВт	458	678	633
Тепловая мощность горелки	кВт	483	732	695
Расход газа по счетчику	м ³ /ч	48,82	73,87	72,1
Расход газа расчетный (0 °С, 101,3 кПа)	нм ³ /ч	47,78	72,42	68,4
Приведенная к нормальным условиям нижняя теплотворная способность газа (Q_n^p)	кДж/нм ³	36399	36399	36579
Расход воды	м ³ /ч	19,3	19,3	22,35
Температура воды на входе в котел	°С	48,3	57,3	60,2
Температура воды на выходе из котла	°С	68,7	87,5	84,6
Температура уходящих газов	°С	124,4	166,4	168
Температура газа	°С	18,0	15,0	17,2
Давление газа перед горелкой	кПа	0,8	1,68	1,5
Давление воздуха перед горелкой	кПа	0,71	1,5	1,4
Давление газов в топке	кПа	0,32	0,74	0,59
Разрежение за котлом	Па	50	30	29
Коэффициент избытка воздуха	-	1,21	1,08	1,12
Содержание в уходящих газах:				
-кислорода (O ₂)	%	4	1,8	2,4
-двуокси углерода (CO ₂)	%	9,6	10,8	10,5
-оксида углерода (CO)	ppm	20	4	12
-оксидов азота (NO _x)	ppm	54	57	77
Содержание оксидов азота (в пересчете на NO ₂) в сухих продуктах сгорания (приведенное к $\alpha=1$)	мг/м ³	137	128	180
КПД по обратному балансу	%	94,4	92,3	92,8
КПД по прямому балансу	%	94,8	92,6	91,1
Разность КПД	% абсл.	0,4	0,3	1,7

концерна RIELLO S.p.a. По представленным на рис.2 данным можно заключить, что конструкция топки котла КВВД-0,63 Гн выполнена на достаточно высоком техническом уровне, поскольку горелочное устройство RS-70 работало с показателями, декларированными изготовителем в технической документации [6,7].

Применение экранного топочного пучка в конструкции топки дало возможность интенсифицировать топочный теплообмен за счет введе-

ния дополнительных поверхностей нагрева, работающих в данном случае в жаровой трубе не только как лучевоспринимающие, но и как конвективные поверхности [1,8]. Передача теплоты конвекцией в топке котла КВВД-0,63 Гн осуществляется не только при движении газов вдоль жаровой трубы. Интенсивный конвективный теплообмен происходит и при поперечном омывании газами той части экранного топочного пучка, которая примыкает к огневым трубам и

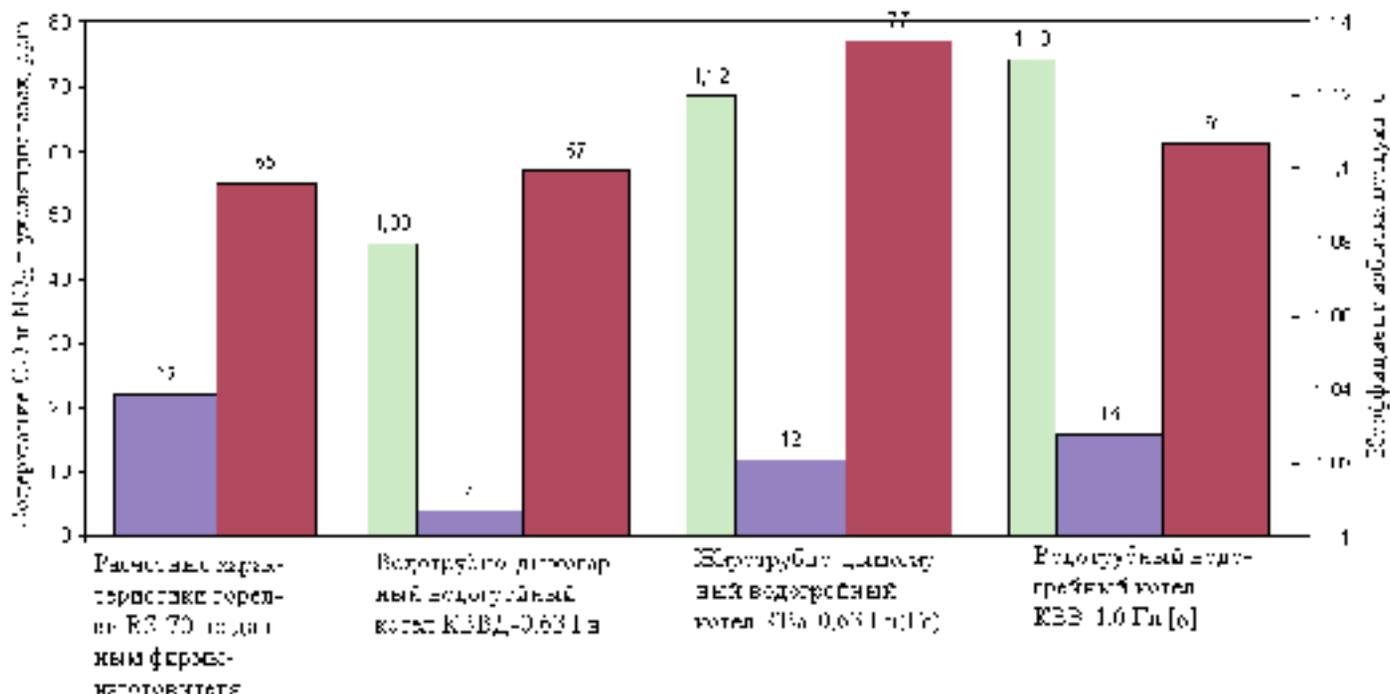


Рис.2. Качественные характеристики работы топочного устройства котла КВВД-0,63 Гн в сравнении с другими котлами: \square – α ; \blacksquare – CO; \blacksquare – NO_x.

образует подобие топочного фестона. В соответствии с расчетными данными суммарное тепловосприятие топки котла КВВД-0,63 Гн на 60% больше, чем у типового жаротрубно-дымогарного котла такой же тепловой мощности. Интенсификация теплообмена позволяет понизить температуру дымовых газов, покидающих топку, и, соответственно, сократить площадь конвективных поверхностей нагрева. При использовании экранного топочного пучка прирост аэродинамического сопротивления тягодутьевого тракта котла незначителен и составляет 98...147 Па (см. табл. 2).

Несмотря на дополнительную потерю напора сетевой воды, создаваемую экраным топочным пучком, гидравлическое сопротивление водяного тракта котла КВВД-0,63 Гн было несущественным и составляло величину, меньшую 100 кПа, при расходе сетевой воды на котел 19,3 т/ч.

График изменения КПД котла “брутто”, построенный по обратному балансу котла в зависимости от нагрузки, представлен на рис 3. Там же для сравнения приведены характеристики КПД других трехходовых котлов, оснащаемых блочными вентиляторными горелками:

- жаротрубно-дымогарных водогрейных котлов Vitomax 200 германской фирмы VISSMANN [9];
- жаротрубно-дымогарных водогрейных котлов Logano S825L германской фирмы Buderus [10];
- секционных чугунных водогрейных котлов Logano GE615 германской фирмы Buderus [11];
- водогрейного водотрубного котла КВВ-2,0 Гн полезной тепловой мощностью 2 МВт отечественного производства (котел КВВ-2,0 Гн оснащен горелочным устройством производства концерна RIELLO S.p.a. [12]).

Данное сравнение характеристик вполне допустимо, поскольку характеристики получены при сходных температурных условиях. Разность средних температур котловой воды в указанных случаях не превышает 2,5 °С и соответствует изменению КПД типового жаротрубно-дымогарного котла на 0,1 % [10].

Характеристика КПД “брутто” КВВД-0,63 Гн в диапазоне нагрузок 70...104 % имеет наиболее крутой наклон к оси абсцисс по сравнению с другими характеристиками. Последнее обстоятельство объясняется теплофизическими отличиями процессов теплообмена, проходящих в жаровой

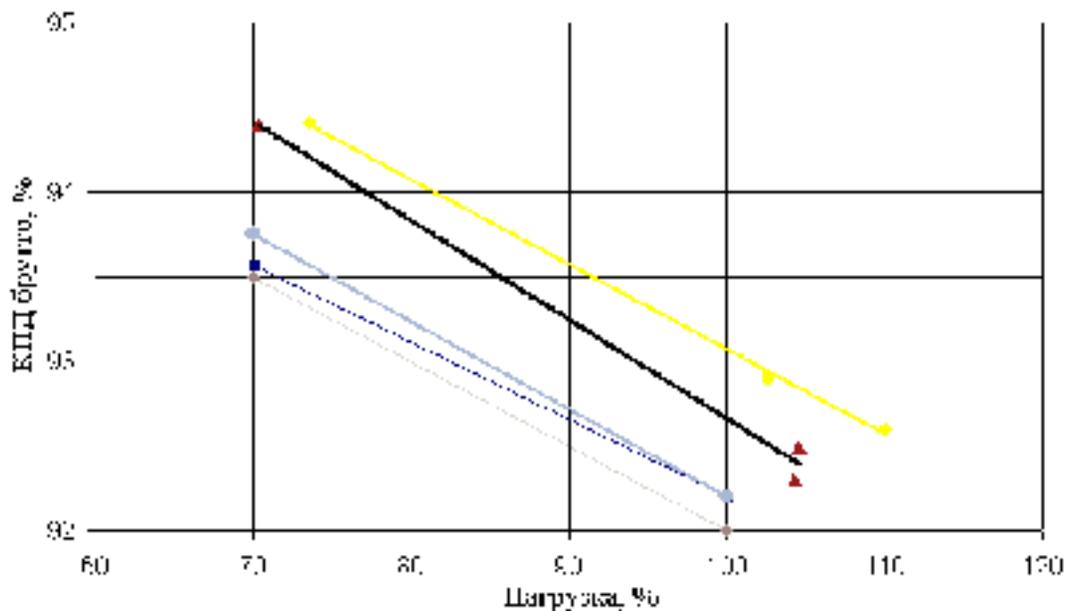


Рис.3. Изменение КПД брутто водогрейных котлов разных типов в зависимости от нагрузки:
 – жаротрубно-дымогарный водогрейный котел Vitomax 200 фирмы VISSMANN;
 – водотрубный водогрейный котел КВВД-2,0 Гн
 – водотрубно-дымогарный водогрейный котел КВВД-0,63 Гн;
 – жаротрубно-дымогарный водогрейный котел Logano S 825 L фирмы Buderus;
 – секционный чугунный водогрейный котел GE 615 фирмы Buderus;

трубе-топке, оснащенной экранным топочным пучком в сравнении с топкой типового жаротрубно-дымогарного котла. Такой вывод был сделан после сопоставления характеристик КПД котла КВВД-0,63 Гн при его работе с турбулизаторами разных конструкций, что позволило исключить влияние конструкции турбулизаторов на наклон характеристики КПД. Характеристика КПД при работе с турбулизаторами другой конструкции имела аналогичный наклон. Динамика изменения КПД котлов определяется главным образом изменением температуры уходящих газов (потери q_2). Поэтому котел с более крутой характеристикой КПД (водотрубно-дымогарный котел) допускает более экономичную работу при пониженных нагрузках.

Котел КВВД-0,63 Гн прошел сертификацию и регистрацию. Опытный образец котла КВВД-0,63 Гн находится в опытной эксплуатации с октября 2005 г. и к концу 2007 г. имел наработку 8720 часов. По отзывам обслуживающего персонала, котел в эксплуатации оказался простым и надежным. Он стабильно несет нагрузку, выдерживает заданную температуру сетевой воды и

требует минимального обслуживания со стороны эксплуатационного персонала. Отмечено особое удобство в использовании котла при низких тепловых нагрузках (нагрузки горячего водоснабжения в летний период), а также при его работе в режиме пиковой теплогенерирующей мощности. В этом случае регулирование температуры сетевой воды происходит в автоматическом режиме путем периодического включения (переключения) горелочного устройства. Работа устаревших котлов типа НИИСТУ-5 в таких режимах не представляется возможной.

В конструкции котла КВВД-0,63 Гн отсутствуют массивные и теплоемкие элементы, благодаря чему котел обладает незначительной тепловой инерцией. Поэтому внезапная остановка котла с прекращением расхода сетевой воды не приводит к вскипанию водяного объема в отличие от котлов НИИСТУ-5, где в таком случае котел приходится принудительно охлаждать.

Котел КВВД-0,63 Гн планируется использовать в системе жилищно-коммунального хозяйства Украины для замены изношенного и неэкономичного устаревшего оборудования.

Выводы

1. Котел КВВД-0,63 Гн может нести расчетную нагрузку и удовлетворяет требованиям действующих в Украине норм.
2. Он прост в изготовлении и может производиться в условиях коммунальных тепловых сетей.
3. Котел надежен, экономичен и прост в эксплуатации.
4. Обладает хорошими экологическими показателями (соответствует требованиям европейских норм "Blue angel" по выбросам NO_x и CO , которые в соответствии с этими нормами не должны превышать величин 57 и 72 ppm соответственно), высоким уровнем автоматизации технологического процесса и может считаться оборудованием европейского класса.
5. Котел может быть рекомендован для замены устаревших водогрейных котлов типа "Минск-1", "НИИСТУ-5", "Универсал", "Энергия" и др.
6. Для более глубокого изучения теплотехнических характеристик топки котла КВВД-0,63 Гн и достижения еще более высоких экологических показателей весьма желательно исследовать работу топки с современными горелочными устройствами отечественных производителей, а также с последними модификациями горелочных устройств концерна RIELLO S.p.a., обладающими низкими выбросами оксидов азота (LOW NO_x).
7. В связи с тем, что при испытаниях и эксплуатации котла КВВД-0,63 Гн были получены хорошие результаты, модернизацию жаротрубно-дымогарных водогрейных котлов путем создания на их базе комбинированных конструкций можно считать целесообразной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бузник В.М., Судовые парогенераторы.—Л.: Судостроение, 1970.—480 с.
2. Ковалев А.П. и Катковская К.Я., Котельные агрегаты, часть вторая.—М—Л.: Государственное энергетическое издательство, 1950.—204 с.
3. Котлы, бойлеры, пульта управления. Каталог.—Концерн RIELLO S.p.a, 2003.—144 с.
4. Азбука горения. Справочник.—Концерн RIELLO S.p.a, 2003.—156 с.
5. Протокол № 382/06 ВКС від 09.11.06. — Державне госпрозрахункове підприємство Сертифікаційний випробувальний центр опалювального обладнання (ДГП СВЦОО), 2006. — 19 с.
6. Протокол № 43/07 ВКПр від 8.05.07. — Державне госпрозрахункове підприємство Сертифікаційний випробувальний центр опалювального обладнання (ДГП СВЦОО), 2007. — 15 с.
7. Горелки. Каталог.—Концерн RIELLO S.p.a, 2003. — 464 с.
8. Гурвич А.М., Теплообмен в топках паровых котлов.—М—Л.: Государственное энергетическое издательство, 1950. — 175 с.
9. Технический паспорт котла Vitomax 200.—Фирма VISSMANN, 2003.—8с.
10. Документация для проектирования. Отопительные котлы Logano S825L, S825L LN и газовые конденсационные котлы Logano plus SB825L, SB825L LN.—Фирма Buderus, 2005.—96с.
11. Документация для проектирования. Чугунные отопительные Ecostream — котлы Logano GE315, GE515 и GE615.—Фирма Buderus, 2006. — 74 с.
12. Протокол № 107/02 ВКПр від 25.11.02. — Державне госпрозрахункове підприємство Сертифікаційний випробувальний центр опалювального обладнання (ДГП СВЦОО), 2002. — 16 с.

Получено 18.12.2007 г.