

УДК 621.18.01

ОПЫТ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА КВ-ГМ-7,56-95

**Орумбаев Р.К., Кибарин А.А., Коробков М.С., Ходанова Т.В.,
Сейдалиева А.Б., Отынчиева М.Т.**

Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, e-mail: kibarin@rambler.ru

Настоящая статья посвящена вопросам разработки и длительной эксплуатации экономичных водогрейных котлов средней тепловой мощности 7,56 МВт. Представленные в статье материалы описывают примеры внедрения таких котлов новой конструкции в котельных г. Алматы. Показана высокая экономичность, надежность и длительная безаварийная эксплуатация установленных котлов. В статье отражены основные конструктивные отличия от существующих аналогов, показаны преимущества и отличительные особенности описываемого варианта конструкции котла КВ-ГМ-7,56. На основе проведенных тепловых испытаний и длительного мониторинга технических данных представлены подтверждающие фактические показатели высокой экономичности работы новых котлов. Отличительной особенностью новой конструкции котлов является существенное качественное увеличение радиационной поверхности и, как следствие, увеличенное КПД водогрейного котла. Проанализированные данные мониторинга и испытаний в ходе эксплуатации показали хорошие результаты – достигнуты значения КПД водогрейного котла до 92–93%, а температура уходящих газов, измеренная на врезке дымовой трубы, до 127 гр.С в номинальном режиме работы, при этом, по сравнению с существующими аналогами, в новой конструкции отмечается увеличенный расход воды с сохранением температурного графика 70–95 °С.

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

LONG-TERM EXPERIENCE OF KV-GM-7,56-95 HOT-WATER BOILER OPERATION

**Orumbaev R.K., Kibarin A.A., Korobkov M.S., Khodanova T.V.,
Seydalieva A.B., Otyंचीeva M.T.**

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, e-mail: kibarin@rambler.ru

This article is about the issues of development and long-term operation of economically efficient hot-water boilers of average thermal power output range of 7.56 MW. The materials presented in the article describe the examples of the implementation of such new designs' boilers in the boiler houses of Almaty city. Boilers' high efficiency, reliability and long-term trouble-free operation are shown. The article reflects the main design differences from the existing analogues, shows the advantages and distinctive features of the described design of the KV-GM-7,56 boiler. On the basis of the conducted thermal tests and long-term monitoring of technical data the actual indicators of high efficiency of work of new boilers are presented. A distinctive feature of the new design of boilers is a significant qualitative increase in the radiation surface and as a result, increased efficiency level of the hot-water boiler. The analyzed data of monitoring and testing during operation showed good results – the efficiency of the hot-water boiler is up to 92-93%, and the temperature of the exhaust gases measured on the chimney insert is near to 127 C in the nominal operating mode, while, compared with existing analogues, the new design has an increased water flow rate while operating at the same temperature schedule of 70-95 °C.

Keywords: hot-water boiler, thermal tests, bi-radiated screen, radiation and convective heat transfer, reliability improvement, work efficiency level

В настоящее время в Республике Казахстан продолжается эксплуатация большого количества водогрейных котлов средней мощности, морально и физически изношенных, имеющих низкую эффективность и надежность. Основные конструкции водогрейных котлов КВ-ГМ и ПТВМ разрабатывались в середине прошлого века [1]. В связи с существенным развитием строительного сектора и ростом жилья [2], в последние годы в Казахстане продолжается проектирование и строительство новых котельных [3, 4] с заменой на новые водогрейные котлы с более мощными и энергоэффективными автоматизированными горелками.

Например, в котельной «Вокзальная» г. Алматы более восьми лет назад была произведена замена четырех паровых кот-

лов ДКВР на мазуте, работавших по схеме с паро-водяными подогревателями с фактическим КПД на мазуте до 89% и на природном газе до 90% [1] на водогрейные котлы КВ-ГМ-7,56-95. Новые водогрейные котлы КВ-ГМ-7,56-95 были разработаны по техническому заданию ТОО «Алматы Теплокоммунэнерго» с целью увеличения безопасности, единичной мощности, устранения промежуточной схемы подогрева воды паром в котельной, снижения выходной температуры воды из котла до 95 °С в ходе плановой замены морально и физически устаревших котлов серии ДКВР (газ-мазут) и аналогичных других котлов.

Авторами были разработаны новые конструкции водогрейных котлов для замены устаревших моделей действующих

и новых котельных. Целью исследования является проверка эффективности замены и экономичности использования новых конструктивных решений путем проведения теплотехнических испытаний отдельных агрегатов и мониторинга работы котлов в ходе длительной эксплуатации на действующих объектах теплоснабжения.

Материалы и методы исследования

Для выполнения задач исследования были использованы эмпирические и теоретические методы исследования. В том числе по результатам анализа и обобщения большого количества тематического материала были проведены тепловые расчеты и при помощи математического моделирования получены основные формульные зависимости ключевых исследуемых характеристик элементов конструкций котла. Численные выражения позволили подкрепить выдвинутые утверждения посредством проведения материального теплотехнических испытаний на физической модели – действующем котлоагрегате. Далее будут подробно описаны характерные особенности новой конструкции водогрейного котла.

В новом котле [5] был увеличен общий расход воды до 300 м³/ч с распределением по каждой симметричной стороне котла до 150 м³/ч и с обеспечением скорости воды от 1,23 до 2,2 м/с в зависимости от топочного или конвективного контура котла.

Конструкция топочных экранов нового водогрейного котла [5] была выполнена с цельносварными мембранами, с приваркой мембран к трубам с попеременным смещением от диаметральной плоскости. В конструкции котла КВ-ГМ-7,56-95 трубы фронтального, боковых, верхнего, нижнего, фестонного и тыльного экранов выполнялись с цельносварными мембранами. Смещенные поочередно в разные стороны мембраны топочных экранов обеспечивают более равномерный прогрев по периметру экранных труб. Цельносварная трубная экранная панель с поочередно смещенными в разные стороны от диаметральной плоскости мембранами образует жесткую конструкцию. Собранные таким образом экраны обеспечивают достаточную герметичность в топке, а конструкция водогрейного котла становится более прочной и практически невосприимчивой к возможным хлопкам (взрывам) и переменным тепловым нагрузкам.

В водогрейном котле КВ-ГМ-7,56-95 движение двух равных потоков воды по 150 м³/час по каждой симметричной половине выполнено по патенту на полезную модель [6]. При этом в наиболее теплонапряженной части фестонного экрана движение воды выполнено только восходящим, что допускает значительное форсирование теплового напряжения в топке. Конструкция котла с наиболее теплонапряженными экранами, в которых выполняется подъемное движение воды, является наиболее надежной с точки зрения эксплуатации котла в реальных условиях работы. Максимальный общий расход воды через два симметричных контура котла КВ-ГМ-7,56-95 составляет 300 м³/час, что в два раза больше, чем в серийно выпускаемых котлах КВ-ГМ-7,56-115 ОАО «ДКМ» [7]. В конвективной части котла топочные газы опускаются вниз, а весь поток воды поднимается вверх и схема работает по эффективной противоточной схеме. Поток воды в конвективной части котла

КВ-ГМ-7,56-95 разделен на две равные части и поднимается вверх по двум противоположным конвективным стойкам и конвективным пучкам труб. Выход воды осуществляется, как и вход, по двум отдельным трубопроводам только уже из нижнего коллектора тыльного экрана котла.

На основе анализа конструкций конвективных пучков водогрейных котлов, результатов расчета коэффициента теплоотдачи, ранее полученных авторами экспериментальных данных по теплообмену в конвективных пучках, была предложена новая конструкция с комбинацией двух конвективных пакетов, которая учитывала фактическое изменение коэффициента теплоотдачи в зависимости от изменения температуры и скорости газов. В конвективном пучке водогрейного котла КВ-ГМ-7,56-95 [6] изменялся относительный продольный шаг труб и диаметр труб, которые позволяли поддерживать высокий уровень теплоотдачи от газового потока к трубам по всей высоте двух разных конвективных пакетов, собранных из труб разного диаметра. Скорость воды в трубах изменялась от рядности труб в каждом пакете и теплового напряжения конвективных труб, определяемых высоким уровнем скорости газового потока.

Конструкция двух конвективных пакетов с разным диаметром труб [6] и с переменными по высоте относительными поперечными и продольными шагами труб в каждом из двух пакетов в водогрейном котле КВ-ГМ-7,56-95 имеют более высокие технико-экономические показатели относительно аналогичных котлов [1, 7]. Расчеты, выполненные в Boiler Designer [8], также подтверждают эффективность оптимизации конвективных пакетов водогрейных котлов. Отличие водогрейного котла КВ-ГМ-7,56-95 от аналогов состоит в том, что радиационная поверхность нагрева H_p может быть увеличена в 1,5 раза, а объем топки может быть увеличен в 1,35 раза практически без значительных изменений прежних габаритов котла. Конвективная поверхность нагрева котла КВ-ГМ-7,56-95 может быть увеличена на 27% путем изменения количества труб и продольного и поперечного шагов первого и второго пакетов труб. За счет этого во втором пакете труб по ходу газов скорость движения газов увеличена на 15–20% относительно скорости газов в первом пакете, а скорость воды снижена на 10–15%.

Предлагаемые технические решения позволяют получить увеличение единичной тепловой мощности котла КВ-ГМ-7,56-95 в 1,3 раза до 11,4 МВт (9,83 Гкал/час), в качестве примера такой модернизации можно привести котельную «КЭЧ» ТОО «АТКЭ», где такой водогрейный котел установлен и успешно работает. Установка на такой котел более мощной комбинированной газо-мазутной горелки РГМГ-10 с привязкой к существующим схемам позволило увеличить мощность типовой котельной.

Водогрейный котел с увеличенной топкой и с более мощной горелкой разделен на две симметричные равные части путем установки перегородки во всех поперечных коллекторах нижнего, фестонного, потолочного, фронтального и в тыльном экране.

В основном режиме работы (рис. 1) водогрейного котла КВ-ГМ-7,56-95 на природном газе вода с входной температурой 70°C и с расходом 300 м³/час поступает в котел параллельно двумя потоками к входному нижнему фронтальному коллектору и делится на два равных потока перегородкой, размещенной по середине коллектора.

Второй режим работы водогрейного котла КВ-ГМ-7,56-95 возможен на резервном топливе – мазуте с расходом воды через котел более 150 м³/час и выходной температурой воды порядка 115 °С. В этом режиме (рис. 1) вода с входной температурой 70 °С поступает в котел одним потоком через фронтальной входной коллектор при открытой фронтальной входной задвижке и далее продолжает движение по правому симметричному фронтальному нижнему подводному патрубку при открытой правой фронтальной задвижке.

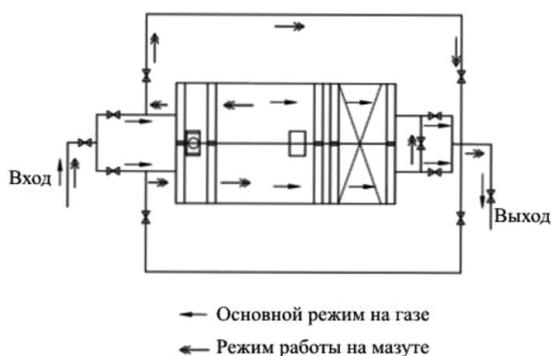


Рис. 1. Гидравлическая схема движения воды в контуре котла

Результаты исследования и их обсуждение

В котельной «Вокзальная» г. Алматы после установки котлов КВ-ГМ-7,56-95 (ст. № 1 и ст. № 2) с горелками ГМ-7 были проведены режимно-наладочные испытания для оптимизации режима сжигания

природного газа. Тепловые испытания показали высокую эффективность работы водогрейных котлов на различных режимах. При повторных тепловых испытаниях котлов в 2015–2016 гг. с участием авторов настоящей работы были подтверждены высокие технико-экономические показатели работы котлов. В процессе испытаний сжигался природный газ с теплотворной способностью 8231 ккал/м³, плотностью 0,725 кг/м³. Испытания проводились по стандартной методике [9]. Расчет КПД «брутто» производился методом обратного баланса по методике М.Б. Равича и В.И. Трёмбовля [10].

В табл. 1 и 2 представлены результаты испытаний котлов в котельной «Вокзальная» г. Алматы, проведенные авторами совместно с к.т.н. В.Н. Абрамовым.

На рис. 2 представлена зависимость расхода топлива (природного газа) V_p от тепловой мощности N , полученные для двух котлов. Полученная практически линейная зависимость и экспериментальные точки практически совпадают для двух совершенно идентичных водогрейных котлов, которые были изготовлены и смонтированы одной партией и все работы по котлам велись параллельно.

На рис. 3 представлена зависимость температуры уходящих газов t_{yx} в зависимости от тепловой нагрузки котла. Изменение температуры уходящих газов происходит от 75 °С при тепловой мощности котла 3,5 МВт до 127 °С при 7,08 МВт. При номинальной нагрузке температура уходящих газов будет на уровне 130 °С.

Таблица 1

Результаты испытаний котла КВ-ГМ-7,56-95 (ст. № 1) – «Вокзальная»

Тепловая мощность, МВт	3,5	4,43	5,3	6,18	7,08
Давление газа, кгс/м ²	204	357	524	686	894
Расход воды, т/ч	300	300	300	300	300
Давление воздуха, (кгс/м ²)	38	59	91	125	130
Температура воды на входе, °С	60	60	60	60	60
на выходе, °С	71	74	76	79	81
Расход газа, м ³ /час	400	500	600	700	800
Гидравлическое сопротивление котла, МПа, (кгс/см ²)	0,18 (1,8)	0,18 (1,8)	0,18 (1,8)	0,18 (1,8)	0,18 (1,8)
КПД, на природном газе, %	92,2	92,8	92,7	92,5	92,9
Температура наружного воздуха, °С	7	6	6	6	6
Содержание O ₂ в уходящих газах, %	4,23	2,91	3,04	3,10	0,93
Разрежение в топке, мм. вод. ст.	–3,8	–2,5	–1,8	–2,2	–2,5
Температура уходящих газов, °С	75	86	99	113	122
Потери тепла с уходящими, %	4,66	4,97	5,58	6,08	5,85
Потери тепла с хим. недожог, %	0	0	0	0	0
Потери тепла в окружающую среду, %	3,14	2,23	1,72	1,42	1,25
Теплота сгорания газа, Q _н , ккал/м ³	8231	8231	8231	8231	8231

Таблица 2

Результаты испытаний котла КВ-ГМ-7,56-95 (ст. № 2) – «Вокзальная»

Тепловая мощность, МВт	3,51	4,42	5,29	6,17	7,06
Давление газа, кгс/м ²	218	337	490	666	860
Расход воды, т/ч	300	300	300	300	300
Давление воздуха, (кгс/м ²)	38	58	96	122	147
Температура воды на входе, °С	60	60	60	60	60
на выходе, °С	71,5	74	76	78,5	80,5
Расход газа, м ³ /час	400	500	600	700	800
Гидравлическое сопротивление котла, МПа, (кгс/см ²)	0,18 (1,8)	0,18 (1,8)	0,18 (1,8)	0,18 (1,8)	0,18 (1,8)
КПД, на природном газе, %	92,0	92,7	92,3	92,4	92,5
Температура уличного воздуха, °С	8	8	8	8	8
Содержание O ₂ в уходящ газях, %	3,7	2,74	3,9	2,94	1,99
Разрежение в топке, мм. вод. ст.	-2,9	-2,7	-2,3	-2,2	-1,2
Температура уходящих газов, °С	84	91	106	117	127
Потери тепла с уходящими, %	4,8	5,05	5,97	6,16	6,23
Потери тепла с хим. недожог, %	0	0	0	0	0
Потери тепла в окруж. среду, %	3,2	2,25	1,73	1,44	1,27
Теплота сгорания газа, Q _н , ккал/м ³	8231	8231	8231	8231	8231

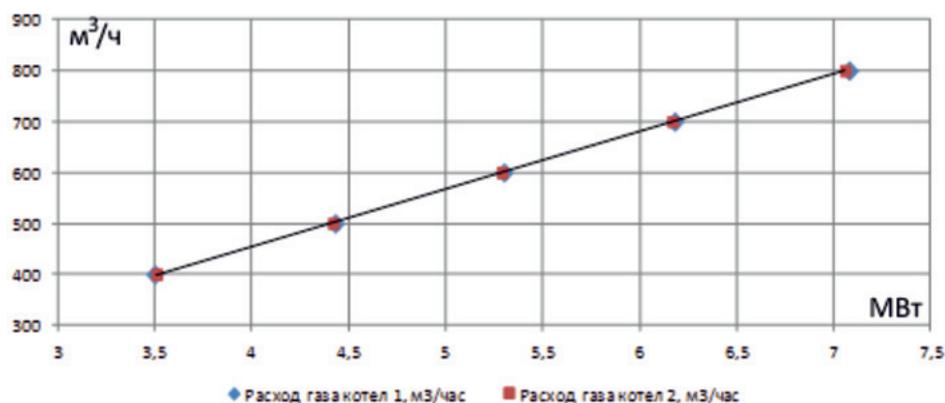


Рис. 2. Зависимость расхода газа от тепловой нагрузки

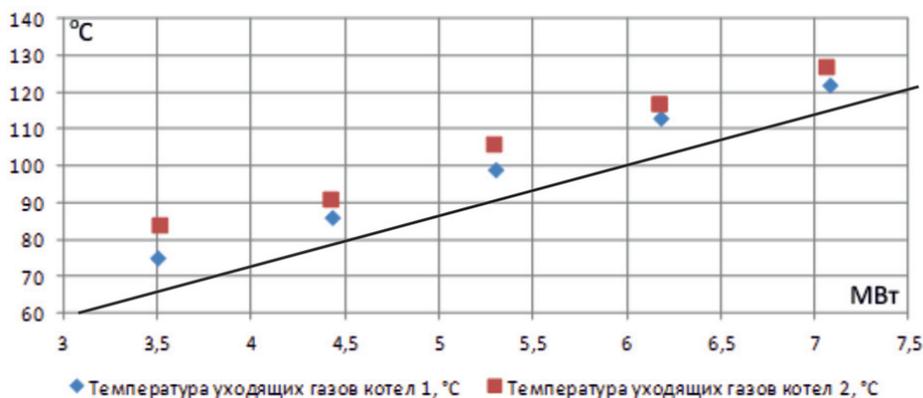


Рис. 3. Зависимость температуры уходящих газов от тепловой нагрузки

Отношение конвективной поверхности H_k к радиационной поверхности H_p котла КВ-ГМ-7,56-95 по сравнению с серийным котлом на 10% больше. Отношение суммарной поверхности нагрева к тепловой мощности котла $\Sigma H/N$ на 11% больше у водогрейных котлов КВ-ГМ-4,64-95 по сравнению с серийными. Изменение КПД котла во всем диапазоне нагрузок изменялось от 92,2% до 92,9%. Представленные данные и анализ работы котлов на котельной длительное время показал, что котел надежен и способен выдерживать высокую эффективность в широком диапазоне нагрузок. Длительная работоспособность двух рассматриваемых водогрейных котлов начиная с 2010 г., а также прошедший государственный экспертизу в Астане и утвержденный проект модернизации котельной «Вокзальная» дает надежду разработчикам на дальнейшую отработку и усовершенствование новой конструкции котла. Расчеты воспринятого полезного тепла водой в котле с установленными поверенными расходными шайбами позволили уточнить КПД котла по прямому балансу на +1,2%. При проведении теплотехнических испытаний котлов на пониженных нагрузках наблюдалось осаждение большого количества конденсата на конвективных пакетах труб, газоходы котла и даже в основании дымовой трубы. Конденсация водяных паров неоднократно наблюдалась на двух водогрейных котлах КВ-ГМ-7,56-95 («Вокзальная», Алматы-1), при работе котлов на малых нагрузках. Поэтому на двух водогрейных котлах КВ-ГМ-7,56-95 схема подключения по водяной стороне выполнена по прямоточной схеме, а конвективные пакеты труб подключены по противоточной схеме.

По результатам длительных исследований можно сделать вывод о том, что в водогрейных котлах с большими расходами воды и низким уровнем температуры следует обращать внимание и четко определять нижний предел и границу по тепловой мощности, чтобы не входить в температурную зону, когда начинается конденсация. Экспериментальные исследования также показали, что существует реальная возможность для котлов КВ-ГМ-7,56-95 увеличения тепловой производительности на 15–20% при применении более мощных горелок, так как в них существует запас по теплонапряжению топочного объема и конвективных поверхностей нагрева.

Специалистами кафедры ТЭУ НАО «АУЭС» проводится постоянный авторский надзор и продолжается обобщение опыта длительной эксплуатации новых

эффективных водогрейных котлов средней тепловой мощности на примере котлов КВ-ГМ-7,56-95 и малых водогрейных котлов на природном газе серии КСГн. По инициативе руководства ТОО «АТКЭ» и департамента энергетики и коммунального хозяйства города на протяжении ряда лет ведется плановая замена морально устаревших конструкций водогрейных котлов в городе Алматы в коммунальном секторе. Внесен определенный вклад по сокращению удельного расхода природного газа, улучшению экологии и по сокращению вредных выбросов и парниковых газов в воздушный бассейн города. Существенно увеличена казахстанская составляющая при закупках теплогенерирующего оборудования в виде водогрейных котлов (серий КСГн и КВ-ГМ).

Выводы

1. В НАО АУЭС разработаны и успешно эксплуатируются в ТОО «АТКЭ» новые водогрейные котлы КВ-ГМ-7,56-95, по основным параметрам – тепловой производительности, маневренности, надежности, КПД и удельным выбросам вредных веществ в атмосферу – превосходящие аналогичные конструкции водогрейных котлов по СНГ.

2. В водогрейных котлах с увеличенным расходом воды и с температурным графиком 70–95 °С и близким к ним следует более точно отмечать нижние границы по тепловой мощности для устранения конденсации и ускоренной коррозии конвективной части котлов.

3. Разработчики продолжают работы по оптимизации новых конструкций и режимов работы конвективных и радиационных поверхностей нагрева котлов КВ-ГМ-7,56-95.

Список литературы

1. Справочник по котельным установкам малой производительности / Под. ред. К.Ф. Роддатиса. М.: Энергоатомиздат, 1989. 488 с.
2. Постановление Правительства Республики Казахстан от 22 июня 2018 года № 372 Об утверждении Государственной программы жилищного строительства «Нұрлы жер» [Электронный ресурс]. URL: <http://adilet.zan.kz/rus/docs/P1800000372> (дата обращения: 20.08.2019).
3. Постановление Правительства Республики Казахстан от 28 июня 2014 года № 724 «Об утверждении Концепции развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан до 2030 года» [Электронный ресурс]. URL: <http://egov.kz/cms/ru/law/list/P1400000724> (дата обращения: 20.08.2019).
4. Министерство национальной экономики Республики Казахстан Комитет по статистике. Инвестиционная и строительная деятельность в Республике Казахстан за 2013–2017 годы / Статистический сборник, Астана, 2018. [Электронный ресурс]. URL: <http://stat.gov.kz/api/getFile/?docId=ESTAT282083> (дата обращения: 20.08.2019).

5. Орумбаев Р.К., Орумбаева Ш.П. Водогрейный котел // Иновационный патент Республики Казахстан № 22819. 2010. Бюл. № 8.
6. Орумбаев Р.К., Орумбаева Ш.П. Водогрейный котел // Патент Республики Казахстан на полезную модель № 2804. 2018. Бюл. № 18.
7. Описание, характеристики, вспомогательное оборудование на поставку водогрейных котлов КВ-ГМ-7,56-150Н и КВ-ГМ-7,56-115Н // официальный сайт АО «ДКМ» [Электронный ресурс]. URL: <http://dkm.ru/catalog/malye-kotly/36.html> (дата обращения: 16.08.2019).
8. Orumbayev R.K., Kibarin A.A., Khodanova T.V., Korobkov M.S. Efficiency assessment of bi-radiated screens and improved convective set of tubes during the modernization of PTVM-100 tower hot-water boiler based on controlled all-mode mathematic models of boilers on Boiler Designer software. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. Vol. 136. 012016. [Electronic resource]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/136/1/012016> (date of access: 16.08.2019).
9. Методика технического обследования котельных установок мощностью до 100 Гкал/час. Официальное издание: Агентство Республики Казахстан по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства (утверждена Приказом Председателя Агентства Республики Казахстан по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства от 23 января 2013 года № 76). 2012. 49 с.
10. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Тепло-технические испытания котельных установок. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 416.