

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»  
(ПГУАС)

**С.Г. Прохоров**

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ВОДОГРЕЙНЫХ  
И ПАРОВЫХ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

Пенза 2015

УДК 621.18 : 697.326

ББК 31.38+31.361

П84

Рецензенты: доктор технических наук, профессор  
А.Г. Аверкин (ПГУАС);  
директор ООО «Теплогаз» Л.Н. Ерма-  
кова

**Прохоров С.Г.**

П84 Модернизация водогрейных и паровых котлов малой мощности:  
моногр. / С.Г.Прохоров. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 120 с.  
**ISBN 978-5-9282-1343-5**

Приведены основные направления и разработки по модернизации водогрейных и паровых котлов малой мощности. Дана технико-экономическая оценка модернизации на конкретных примерах.

Подготовлена на кафедре «Теплогазоснабжение и вентиляция» и предназначена для инженерно-технических работников, аспирантов и студентов, обучающихся по направлению 08.03.01 и 08.04.01 «Строительство».

**ISBN 978-5-9282-1343-5**

© Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства, 2015

© Прохоров С.Г., 2015

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

КПД	коэффициент полезного действия
НПК	научно-производственная компания
$\alpha$	коэффициент избытка воздуха
$\alpha_1$	коэффициент избытка первичного воздуха
ИГК	инжекционная горелка Казанцева
БИГ	блочная инжекционная горелка
$\alpha_k$	коэффициент избытка воздуха за котлом
$\alpha_T$	коэффициент избытка воздуха на выходе из горелки
$C_{CO}, C_{NOx}$	концентрация оксида углерода и оксидов азота в продуктах сгорания, мг/м <sup>3</sup>
$\alpha_T$	коэффициент избытка воздуха в топке
ppm	объемная часть вещества на миллион объемных частей воздуха
ЧРП	частотно-регулируемый привод

Примечание. Не указанные выше условные обозначения расшифрованы в тексте.

## ВВЕДЕНИЕ

Паровые и водогрейные котлы малой мощности являются основой котельного парка коммунальной энергетики. При этом старые котлы не удовлетворяют современным требованиям по энергоэффективности и охране окружающей среды.

Замена котлов на современные требует значительных затрат и осложняется дефицитом средств у теплоснабжающих предприятий, что мотивирует их на модернизацию котлов. Она не требует значительных инвестиционных затрат, может быть выполнена в короткие сроки и позволяет достигнуть современных показателей по энергоэкологической эффективности.

Информационный поиск позволил выделить основные направления модернизации:

- установка дополнительных поверхностей нагрева в топочном пространстве и конвективной части;
- интенсификация теплообмена в топке путем установки вторичных излучателей – твердых тел, переизлучающих тепловой поток на экранные поверхности в виде отраженного тепла и собственного излучения;
- установка дополнительных перегородок в газоходах с изменением хода дымовых газов;
- интенсификация теплообмена в топке путем нанесения теплопоглощающего покрытия на экранные поверхности;
- установка новых горелок;
- установка экономайзеров и воздухоподогревателей;
- перевод паровых котлов в водогрейный режим работы;
- модернизация автоматики и т.д.

Целью данной монографии является рассмотрение и обобщение опыта модернизации паровых и водогрейных котлов малой мощности на основе материалов информационного поиска и разработок кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства.

# 1. МОДЕРНИЗАЦИЯ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ

## 1.1. Реконструкция котлов

Котлы «Универсал», «Тула», «Энергия», НР, НИИСТУ, «Минск» и другие характеризуются бесшумностью, надежностью в эксплуатации, простотой конструкции и доступностью в ремонте, малой чувствительностью к качеству воды. Вместе с тем при эксплуатации данных котлов, имеющих невысокий КПД, удельные расходы топлива не удовлетворяют современным требованиям по энергоэффективности. В результате реконструкции достигаются:

- повышение КПД и снижение удельных расходов топлива;
- увеличение установленной мощности и возможность подключения дополнительной нагрузки;
- возможность использования персонала низкой квалификации для проведения реконструкции и последующей эксплуатации.

Информационный поиск позволил выявить примеры реконструкции котлов данного типа.

В чугунный секционный котел «Универсал» установили экран 4 (рис. 1), выполненный из чугунных Г-образных стальных труб диаметром не более диаметра входного отверстия заднего нижнего тройника [1].

Входной патрубок 5 экрана соединен с обратной линией системы отопления, а выходной патрубок 7 – с входным отверстием нижнего тройника 8 котла.

Вода с обратной линии системы отопления через циркуляционный насос поступает во входной патрубок экрана, проходит через стальные трубы, отводит теплоту от стенок экрана и через нижний тройник поступает в правый и левый пакеты котла. В результате: увеличивается поверхность нагрева котла, КПД и срок службы котла в 2 раза; повышается надежность работы котла; улучшается удаление воздуха, выделившегося из воды при её нагревании.

Характерная особенность, объединяющая все чугунные секционные котлы, заключается в том, что они были разработаны с приоритетом на надежность, прочность, ремонтпригодность в большей степени, чем на экономию топлива. Например, котел «Универсал-6» (рис.2) состоит из средних и крайних (лобовых) секций. Секции соединены между собой конусными ниппелями и стяжными болтами, проходящими через отверстия этих ниппелей. Соединенные между собой средние секции образуют пакеты, являющиеся правой и левой половинами котла.

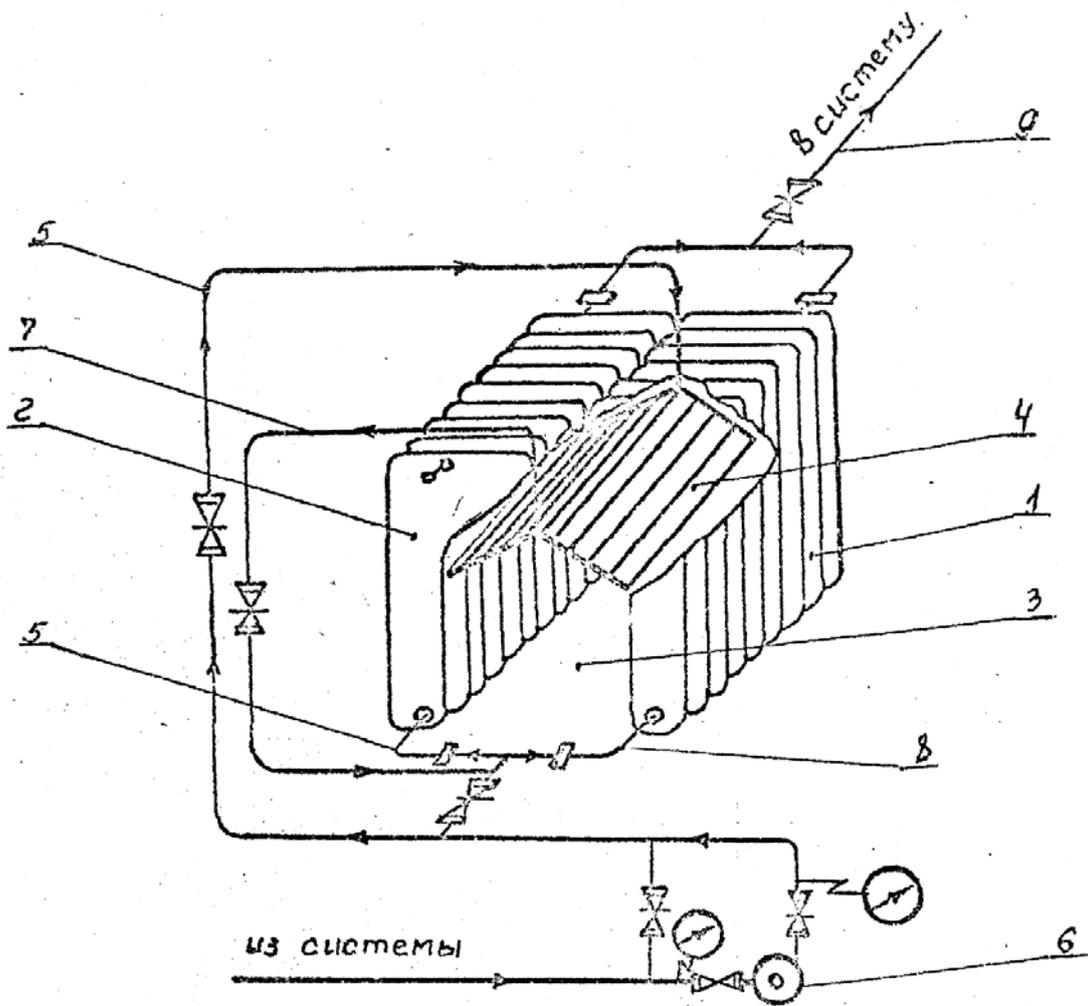


Рис. 1. Реконструкция котла «Универсал»:  
 1 – правый пакет; 2 – левый пакет; 3 – выступ над топкой; 4 – экран;  
 5 – входной патрубок; 6 – циркуляционный насос; 7 – выходной патрубок;  
 8 – нижний тройник котла; 9 – подающая линия системы отопления

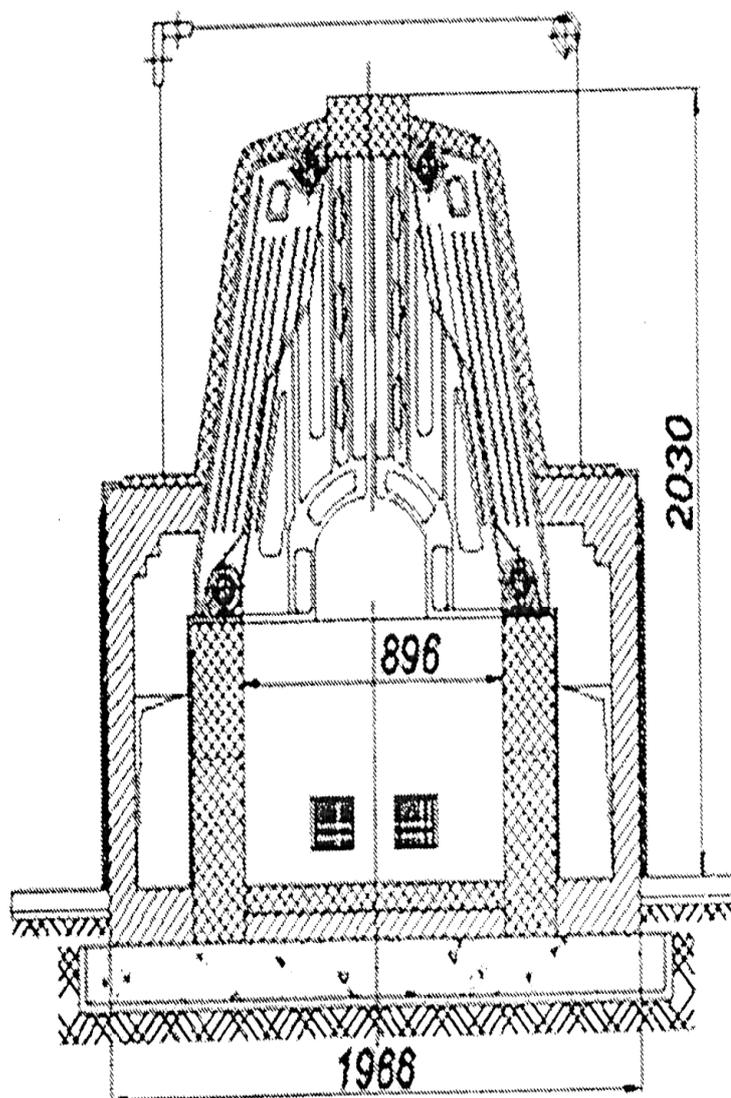


Рис. 2. Чугунный котел «Универсал-6»

При сжигании газового топлива дымовые газы из топки поднимаются вверх, омывают выступы секций, разделяются на два потока и по каналам, образованным вертикальными ребрами секций, опускаются в боковые газоходы, откуда поступают в сборные газоходы и далее в дымовую трубу. Низкий КПД является общим недостатком чугунных секционных котлов шатрового типа.

С целью повышения КПД НПК «Вектор» разработал проект модернизации и реализовал его на одном из котлов «Универсал-6» [2]. Проектом предусмотрено более полное использование конвективной и лучистой составляющих теплоотдачи от факела и дымовых газов к поверхностям нагрева.

На рис.3 приведен поперечный разрез модернизированного котла. Для более полного использования конвективной составляющей с внешней поверхности чугунных секций устроен трехходовой газопровод. Для более полного использования лучистой составляющей теплоотдачи в топке котла размещены дополнительные поверхности нагрева:

- по четыре трубы диаметром 108 мм с каждой стороны;
- подовая трубная панель.

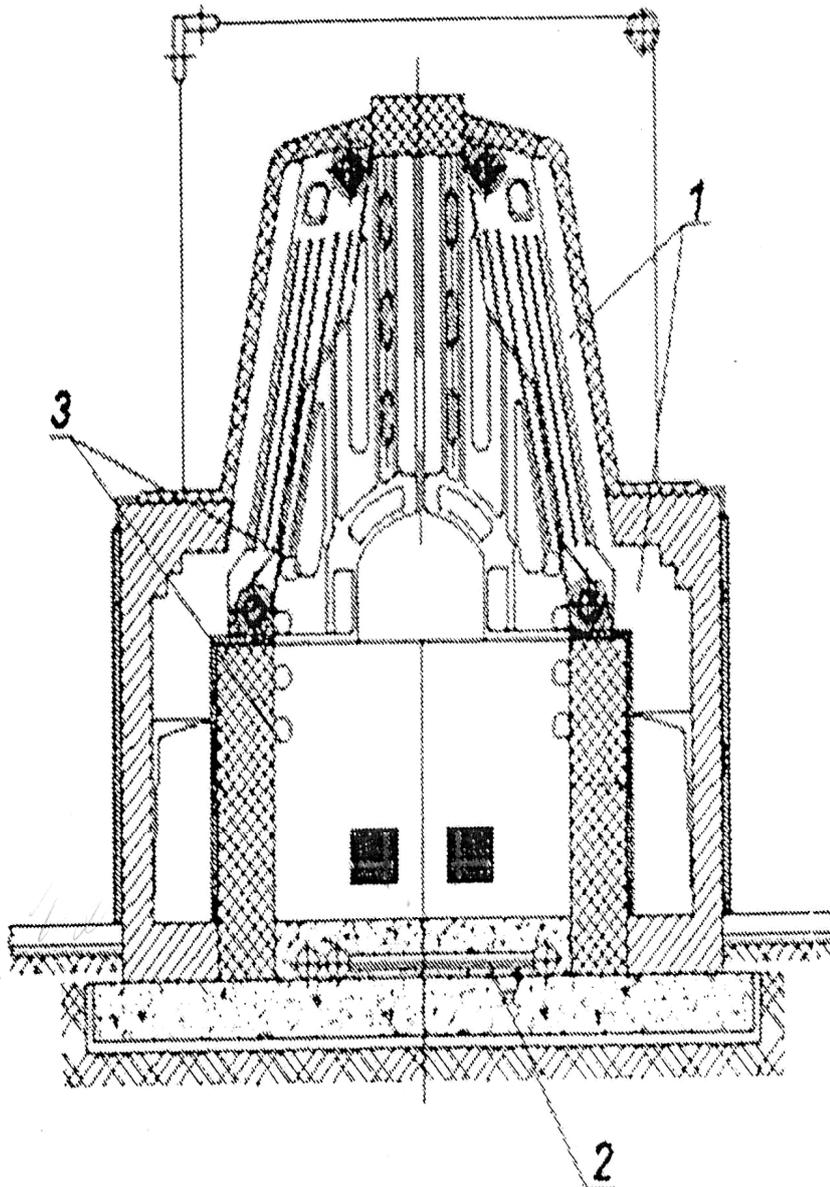


Рис. 3. Модернизированный котел «Универсал-6»:  
1 – трехходовой газопровод; 2 – дополнительная подовая трубная панель;  
3 – дополнительные трубные поверхности нагрева

Сравнительный анализ результатов испытаний котла «Универсал-6» до и после модернизации показал следующее. КПД котла увеличился с 82,19 % до 92,47 % (за счет снижения потери тепла в окружающую среду ( $q_5$ ) на 57 % и снижения потери тепла с уходящими газами ( $q_2$ ) на 55 %). Максимальная теплопроизводительность котла увеличилась с 0,52 до 0,58 Гкал/ч (более чем на 11 %). Температура уходящих газов снизилась с 289 до 170 °С. Аэродинамическое сопротивление котла увеличилось на 15-25 Па (1,5-2,5 кгс/м<sup>2</sup>) и находится в пределах резерва разрежения, создаваемого дымовой трубой. Гидродинамическое сопротивление котла возросло на 0,0003 МПа (0,003 кгс/м<sup>2</sup>) и находится в пределах резерва напора, создаваемого насосной установкой.

При реконструкции котла НИИСТУ-5 [3] между обмуровкой и боковыми экранами установлены промежуточные экраны, последовательно соединенные по воде с задним экраном (рис. 4).

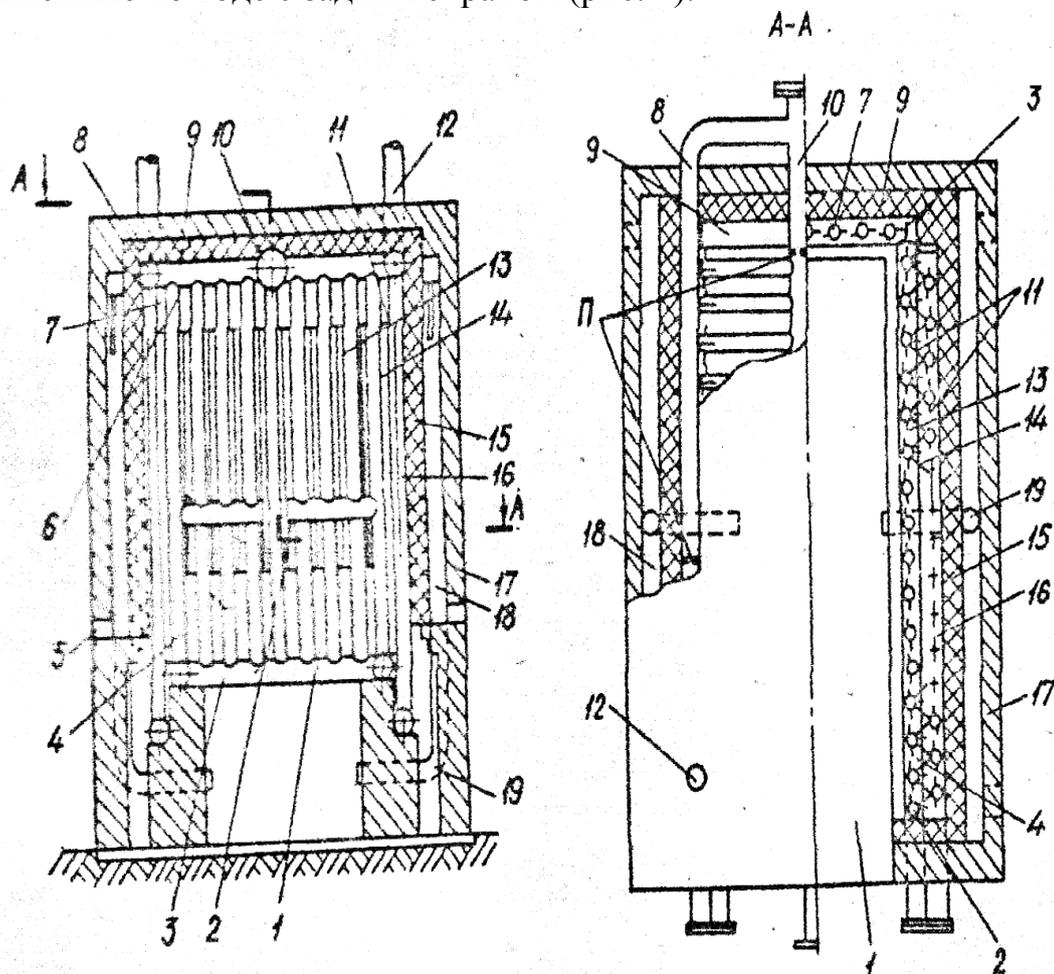


Рис. 4. Реконструкция котла НИИСТУ-5:

- 1 – топка; 2 – передний экран; 3 – задний экран; 4 – боковые экраны; 5 – шибер воздуха; 6 – верхний экран; 7 – теплообменные трубы; 8 – переточная труба; 9 – поперечные коллекторы; 10 – продольные коллекторы; 11 – плавники; 12 – труба подачи воды в котел; 13 – диафрагмы; 14 – конвективные газоходы; 15 – внутренняя обмуровка; 16 – промежуточные экраны; 17 – внешняя обмуровка; 18 – воздухоподогреватель; 19 – опускная труба

Котел состоит из топки 1, переднего 2, заднего 3, боковых 4, верхнего 6 обрамляющих экранов, составленных из теплообменных труб 7 диаметром 76 мм, поперечных коллекторов 9, продольных коллекторов 10, плавников 11 и диафрагм 13, конвективных газоходов 14, внутренней 15 и внешней 17 обмуровки, промежуточных экранов 16, воздухоподогревателя 18, опускной трубы 19 диаметром 89 мм, шиберов воздуха 5, трубы подачи воды в котел 12, переточной трубы 8.

Поперечные и продольные коллекторы выполнены из труб диаметром 114 мм, теплообменные трубы промежуточных экранов – из труб диаметром 89 мм. За задним экраном газохода нет. Внутренняя обмуровка выполняется вплотную к теплообменным трубам промежуточных экранов.

Циркуляция воды в котле многоходовая. Вода двумя параллельными потоками поступает в котел в верхние продольные коллекторы промежуточных экранов. Встречая перегородки, имеющие в верхней части отверстия диаметром 10 мм для пропуска воздуха, по теплообменным трубам опускается в нижние продольные коллекторы. Затем по теплообменным трубам поднимается в верхние продольные коллекторы промежуточных экранов и через переточные трубы перетекает в продольный коллектор верхнего экрана. Встретив перегородку опускается по теплообменным трубам заднего экрана в нижний поперечный коллектор заднего экрана, а из него в нижние продольные коллекторы боковых экранов. По трубам боковых экранов и переднего экрана вода поднимается в верхний продольный коллектор верхнего экрана.

Площадь и объем топки, коэффициент избытка воздуха – без изменений. Параметры работы котла до и после реконструкции представлены в табл.1.

Т а б л и ц а 1

Техническая характеристика

Параметры	До реконструкции	После реконструкции
Номинальная мощность, Гкал/ч	0,71	1,08
Поверхность нагрева, м <sup>2</sup>	46,5	70,7
Расход газа, м <sup>3</sup> /ч	85-110	110-140
Температура уходящих газов, °С	240	200
Потери теплоты не более, % :		
с уходящими газами	10,8	9,4
в окружающую среду	2,2	1,2
КПД, %	87	89,4
Габаритные размеры (в обмуровке), мм	3350×2105×2800	3250×2355×2800

Практически при тех же габаритных размерах теплопроизводительность котла увеличилась; более развитая конвективная поверхность нагрева формирует активный конвективный газоход; воздухоподогреватель, вмонтированный в боковые стенки обмуровки, снижает тепловые потери в окружающую среду и защищает котел от парообразования в случае внезапной остановки.

«УКРНИИИНЖПРОЕКТ» предложил два варианта реконструкции котлов НИИСТУ-5. Первый вариант – увеличение теплопроизводительности до 1 Гкал/ч с одновременным повышением КПД (рис.5). Второй вариант – повышение КПД при неизменной паспортной производительности (рис. 6).

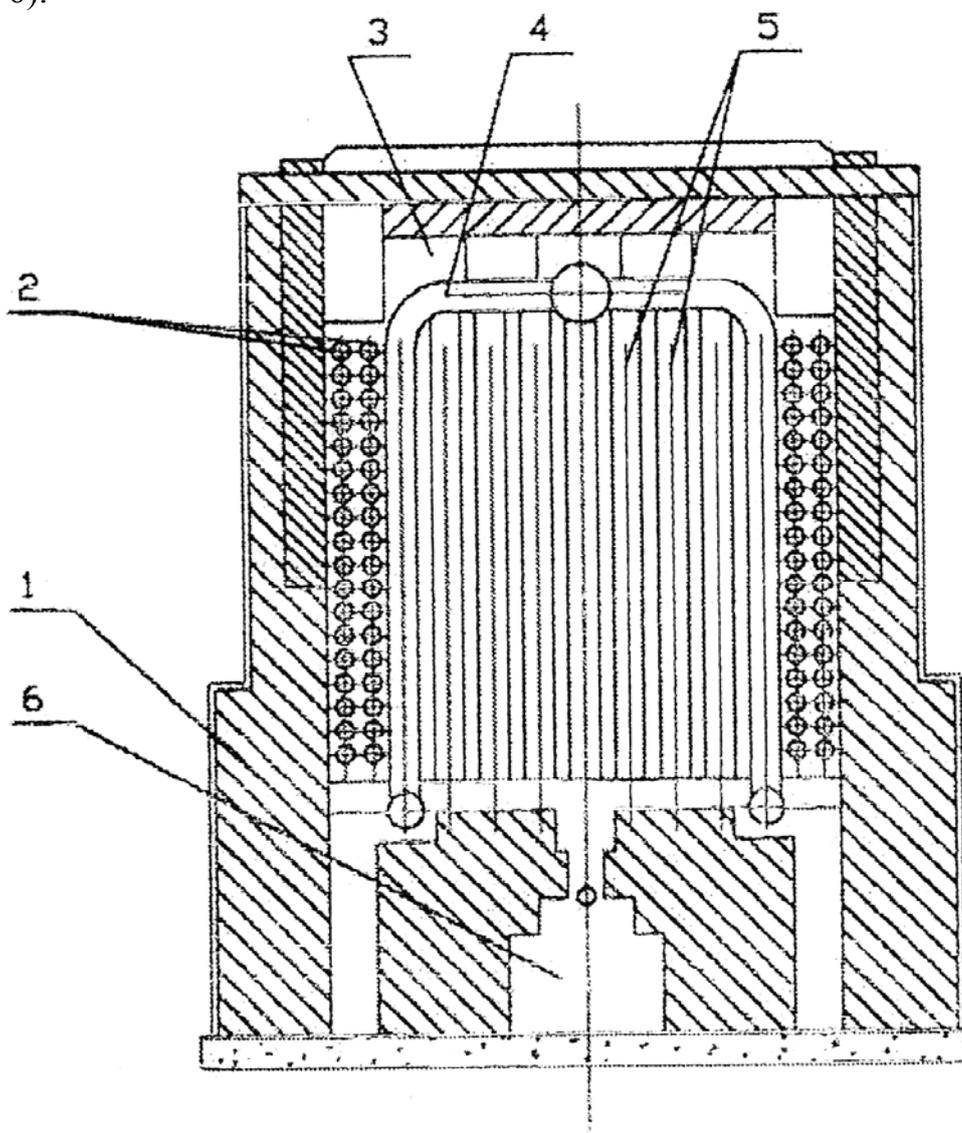


Рис. 5. Реконструкция водогрейного котла НИИСТУ-5. Увеличение теплопроизводительности и повышение КПД:  
 1 – обмуровка; 2 – дополнительная конвективная поверхность теплообмена;  
 3 – окна; 4 – конвективная поверхность теплообмена; 5 – радиационная поверхность теплообмена; 6 – топка

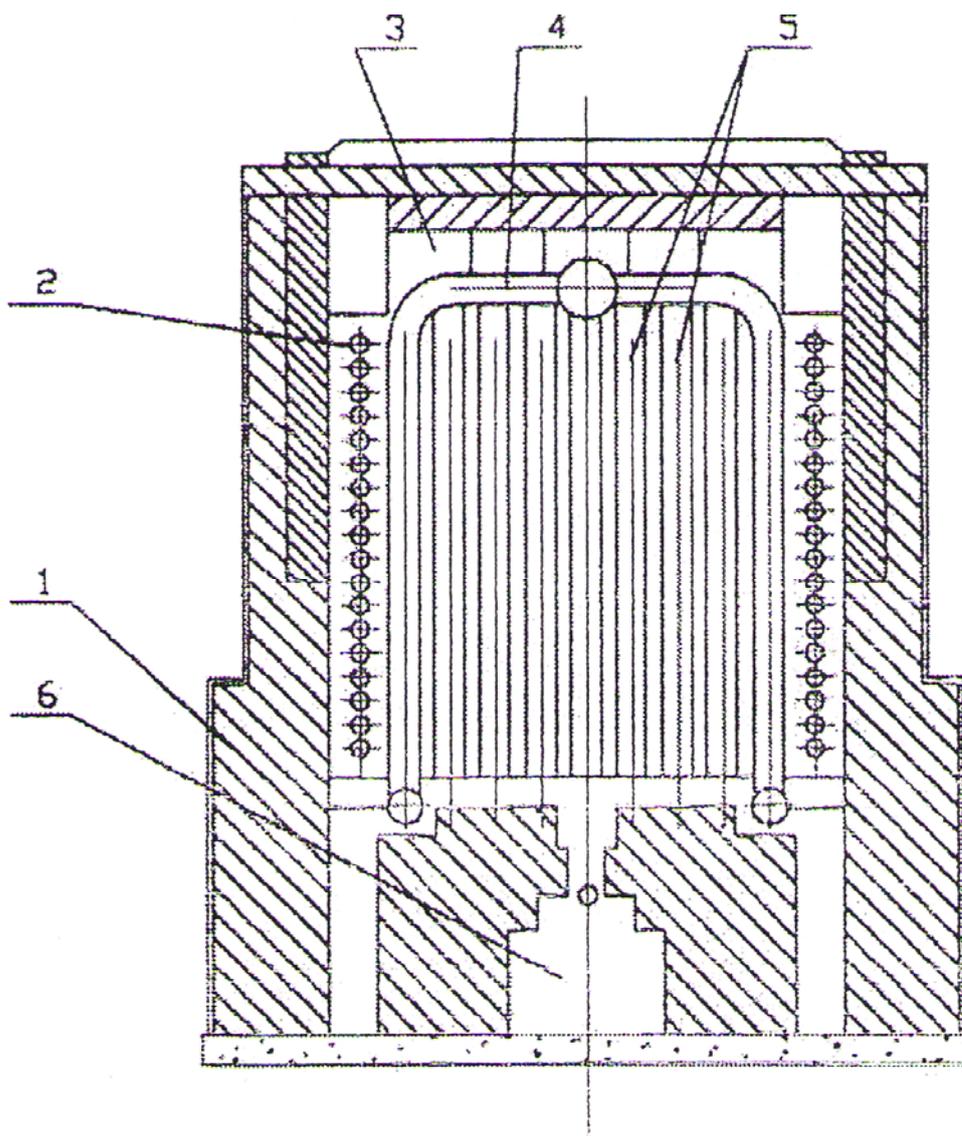


Рис. 6. Реконструкция водогрейного котла НИИСТУ-5. Повышение КПД:  
 1 – обмуровка; 2 – дополнительная конвективная поверхность теплообмена;  
 3 – окна; 4 – конвективная поверхность теплообмена; 5 – радиационная  
 поверхность теплообмена; 6 – топка

В связи с увеличением теплопроизводительности по первому варианту реконструкции необходимо установить новую горелку мощностью не менее 1 Гкал/ч. Для второго варианта может сохраняться существующая горелка.

Реконструкция заключается в установке в левом и правом газоходах дополнительных конвективных теплообменников. Продукты сгорания из топки через два окна в верхней части экранной поверхности поступают в расширенные газоходы конвективной части котла с установленными в них теплообменниками. После теплообменников продукты сгорания поступают в боровы, которые должны быть расширены в такой же пропорции, как и

газоходы конвективной части котла. Небольшое увеличение аэродинамического сопротивления реконструируемого котла позволяет использовать существующее оборудование.

Результаты эколого-режимных испытаний реконструированного водогрейного котла НИИСТУ-5 на газовом топливе:

- теплопроизводительность – 0,89 Гкал/ч;
- температура уходящих газов – 130 °С;
- КПД – 92,4 %;
- содержание СО (при  $\alpha=1$ ) – 94 мг/м<sup>3</sup>;
- содержание NO<sub>x</sub> (при  $\alpha=1$ ) – 134 мг/м<sup>3</sup>.

Время окупаемости затрат на реконструкцию не превышает одного года.

ЗАО НПК «Вектор» разработал техническую документацию и осуществил опытно-промышленную проверку реконструкции котлов «НР-18» и «ЗИО-60» [4]. Цель работы заключалась в увеличении их теплопроизводительности. Так, например, реконструкция котла «НР-18» заключалась (рис.7):

- в разборке обмуровки котла с тыльной стороны и в установке в топочном пространстве двух дополнительных трубных экранов 1;
- в устройстве четырех перегородок в дымоходах котла, для чего на боковых поверхностях, снаружи делались вертикальные штробы (по две с каждой стороны), через которые были установлены межтрубные перегородки 2. Стрелками условно указано направление движения дымовых газов.

По окончании монтажных работ, проем с тыльной стороны и штробы заделывались (обмуровка восстанавливалась).

В результате реконструкции:

- теплопроизводительность котла увеличилась на 0,2-0,25 Гкал/ч;
- температура уходящих дымовых газов снизилась с 220 до 110 °С;
- КПД возрос с 78 до 90-92 %.

Продолжительность остановки котла на реконструкцию составляет 5-6 дней. Затраты на реконструкцию незначительны и окупались в течение одного отопительного сезона.

В [5] разработаны и реализованы новые схемы циркуляции воды, которые предусматривают дифференцирование по направлению её движения по отдельным частям в каждой секции или по частям нескольких секций в пакете. Новые схемы обеспечивают гидродинамическую устойчивость и надежное охлаждение стенок каналов в зависимости от направления движения воды и теплонапряженного участка секции или пакета в целом.

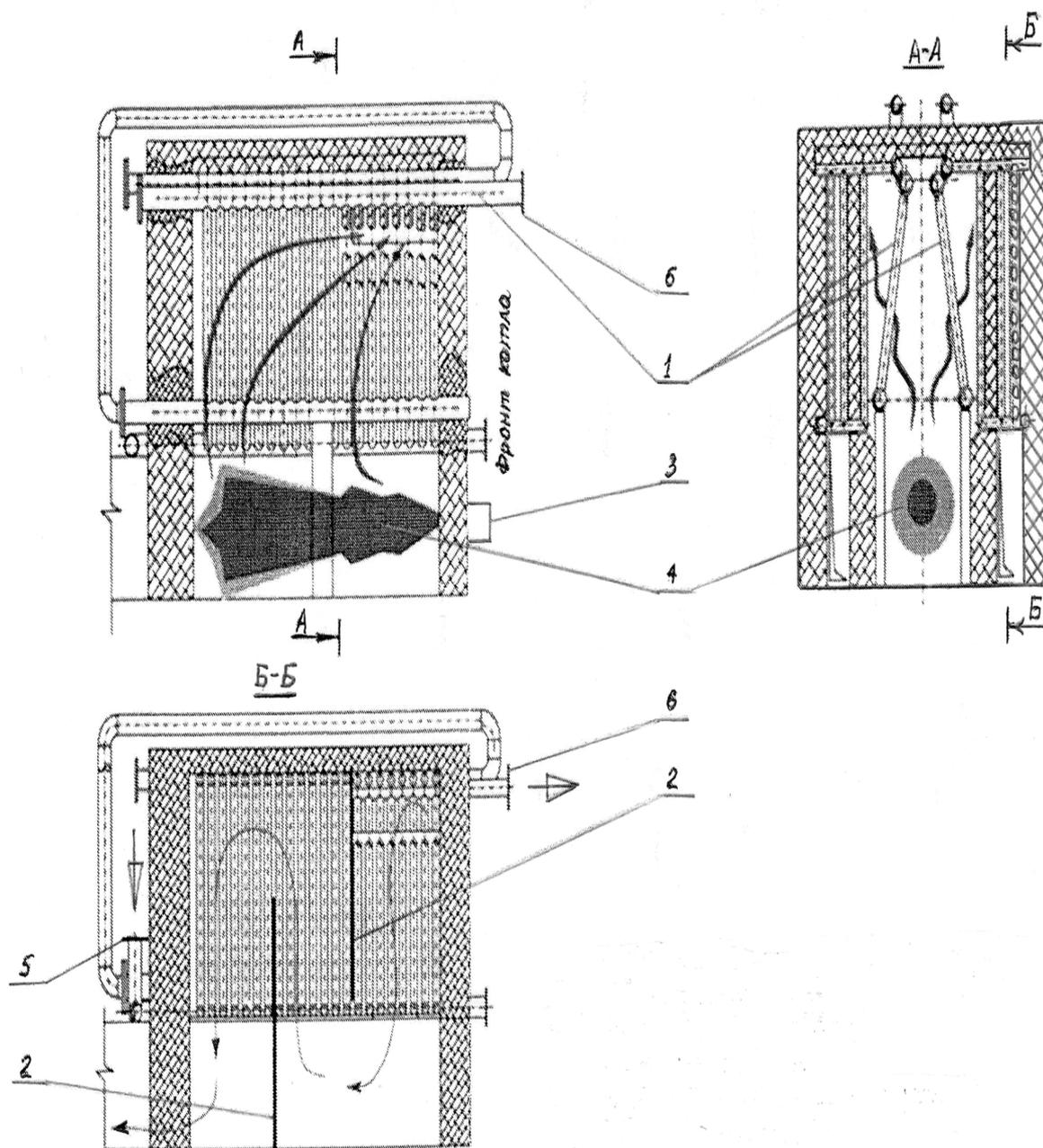


Рис. 7. Модернизированный стальной котел НР-18:

1 – дополнительные панели; 2 – межтрубные перегородки; 3 – горелочное устройство; 4 – факел; 5 – вход подогреваемой воды; 6 – выход нагретой воды

Поверхность нагрева водогрейного котла содержит многоканальные секции (рис.8), последовательно соединенные между собой отверстиями ниппельных головок, снабженных направляющими перегородками, которые образуют в их полости соответственно радиационные 1 и конвективные 2 отсеки. Каждый из пакетов секций содержит по два перфорированных коллектора, верхний 3 и нижний 4, устанавливаемые в отверстиях ниппельных головок. При этом внутри перфорированных

коллекторов размещаются профилированные перегородки 5 и 6 таким образом, чтобы отверстия в коллекторах совпадали и располагались напротив радиационных 1 и конвективных 2 отсеков каждой секции. Причем размеры и форма верхних 5 и нижних 6 перегородок изменяются. В полости каждой ниппельной головки устанавливались разделительные ребра 4, которые устраняли утечку воды из конвективной части в радиационную.

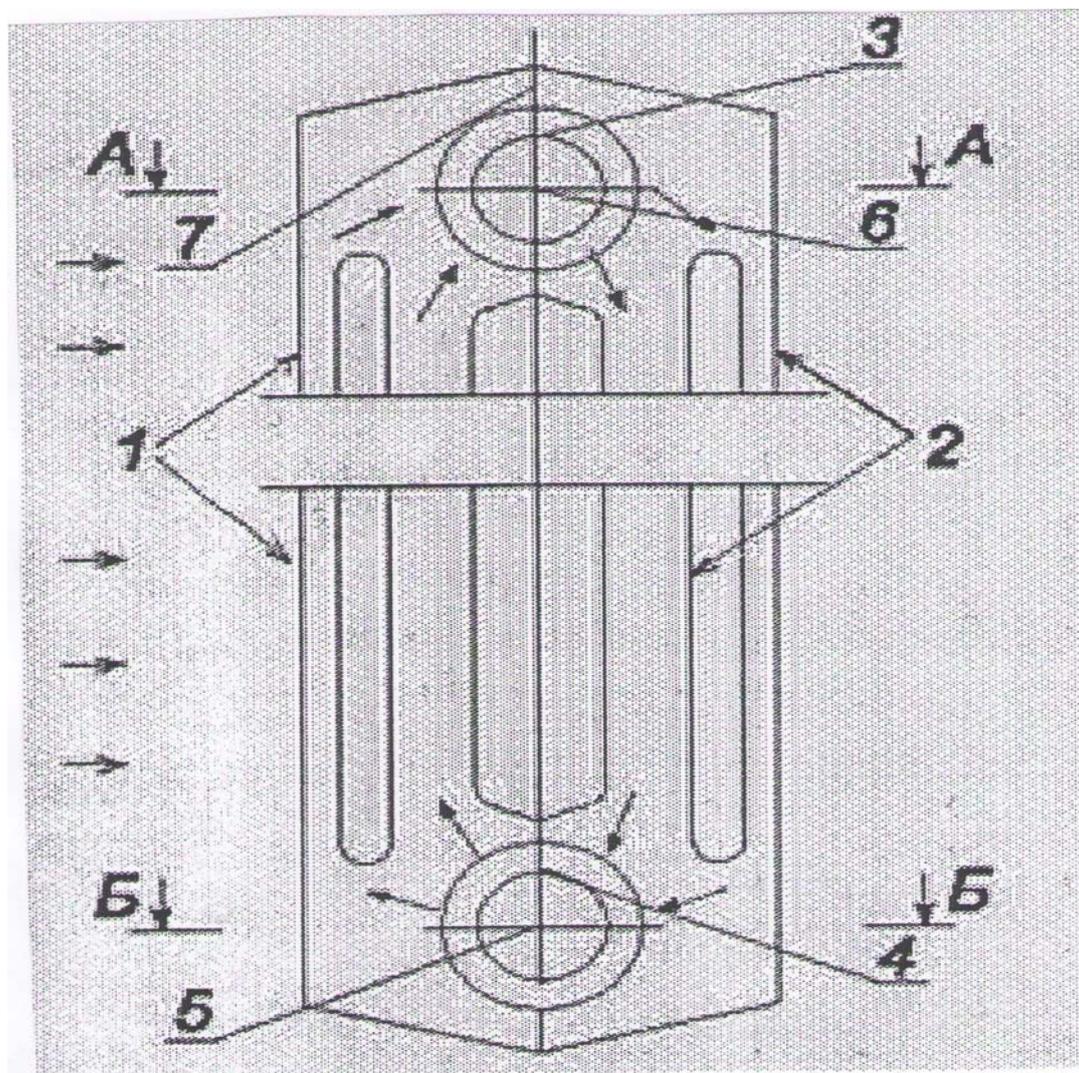


Рис. 8. Поперечное сечение колонковой чугунной секции:  
 1 – радиационная часть секции; 2 – конвективная часть; 3 – верхний перфорированный коллектор с направляющими перегородками;  
 4 – нижний перфорированный коллектор; 5 – направляющие перегородки нижнего коллектора; 6 – направляющие перегородки верхнего коллектора;  
 7 – перегородки внутри секций

В зависимости от теплопроизводительности котла предусматриваются различные варианты выполнения съемных перфорированных коллекторов с направляющими перегородками, которые могут обеспечить практически любую схему циркуляции воды. Рассмотрим три возможные схемы

движения воды, учитывающие различное тепловосприятие радиационной и конвективной частей каждой секции котла.

На рис. 9 приведена схема движения воды по двум смежным секциям с перепуском в верхней и нижней ниппельной камере на две последующие секции. Вода из нижнего коллектора поступает в первую секцию и радиационную часть второй секции, по этим элементам вода поднимается в верхний коллектор 3, в котором с помощью перегородки 6 перепускается в конвективную часть второй секции и конвективную часть третьей секции. Далее по конвективным частям второй и третьей секций вода опускается в нижний коллектор. В нижнем перфорированном коллекторе вода перепускается с помощью перегородок 5 в радиационные части третьей и четвертой секций котла. В результате по наиболее теплонапряженным радиационным частям всех секций пакета вода выполняет восходящее движение с большей скоростью, что положительно сказывается на гидродинамической устойчивости циркуляции и надежности котла в целом.

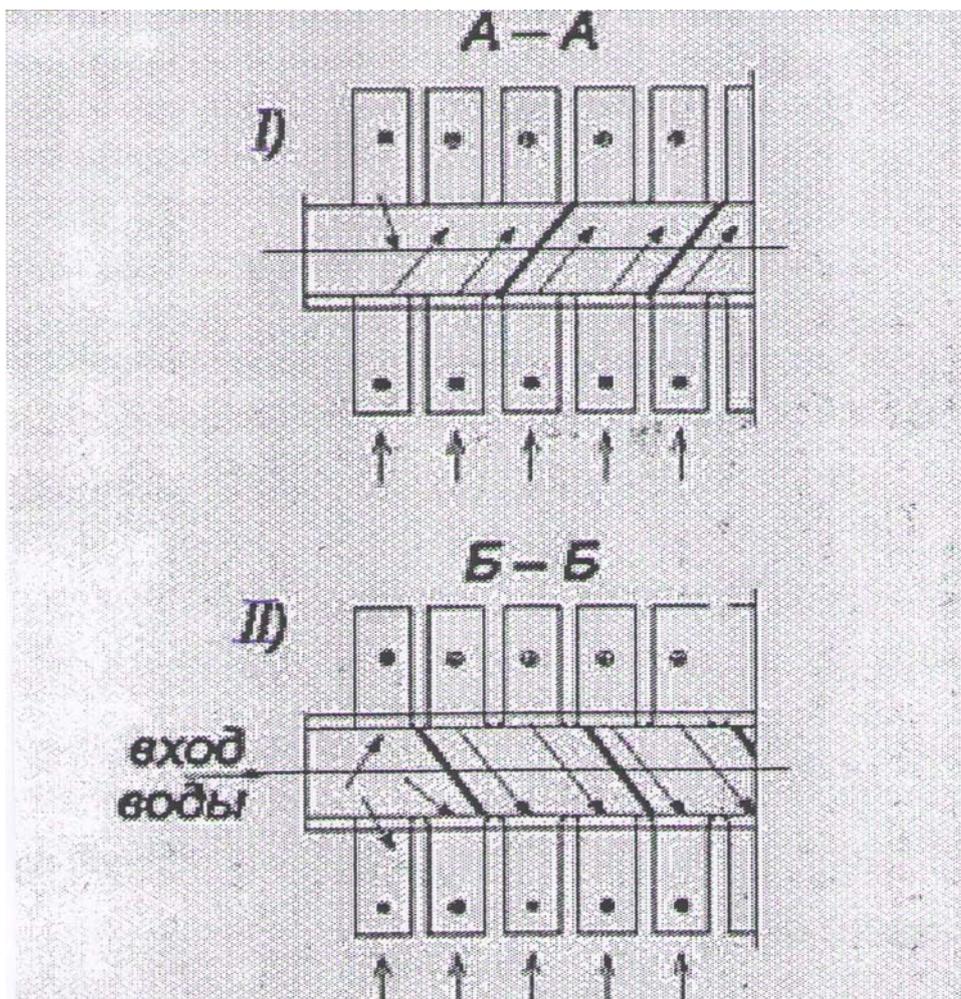


Рис. 9. Схема движения воды по двум частям соседних секций:  
I – A-A – поперечное сечение верхней ниппельной камеры;  
II – B-B – поперечное сечение нижней ниппельной камеры чугунных секций

На рис. 10 приведена схема движения воды, проходящей последовательно каждую часть последующей секции. Причем перепуск воды из радиационной части одной секции в конвективную часть следующей секции производится в верхнем коллекторе, в котором с помощью перфорированной перегородки 6 поток воды направляется в конвективную часть второй секции и по ней опускается вниз. Нижняя часть пакета секций по условиям эксплуатации находится в теплонапряженной части топки и поэтому в этой части секций перегородками 5 обеспечивается надежное охлаждение водой нижних угловых зон каждой секции. По радиационной части второй секции вода поднимается в верхний коллектор 3 и с помощью перфорированной перегородки 6 вода перепускается в конвективную часть третьей секции и т.д.

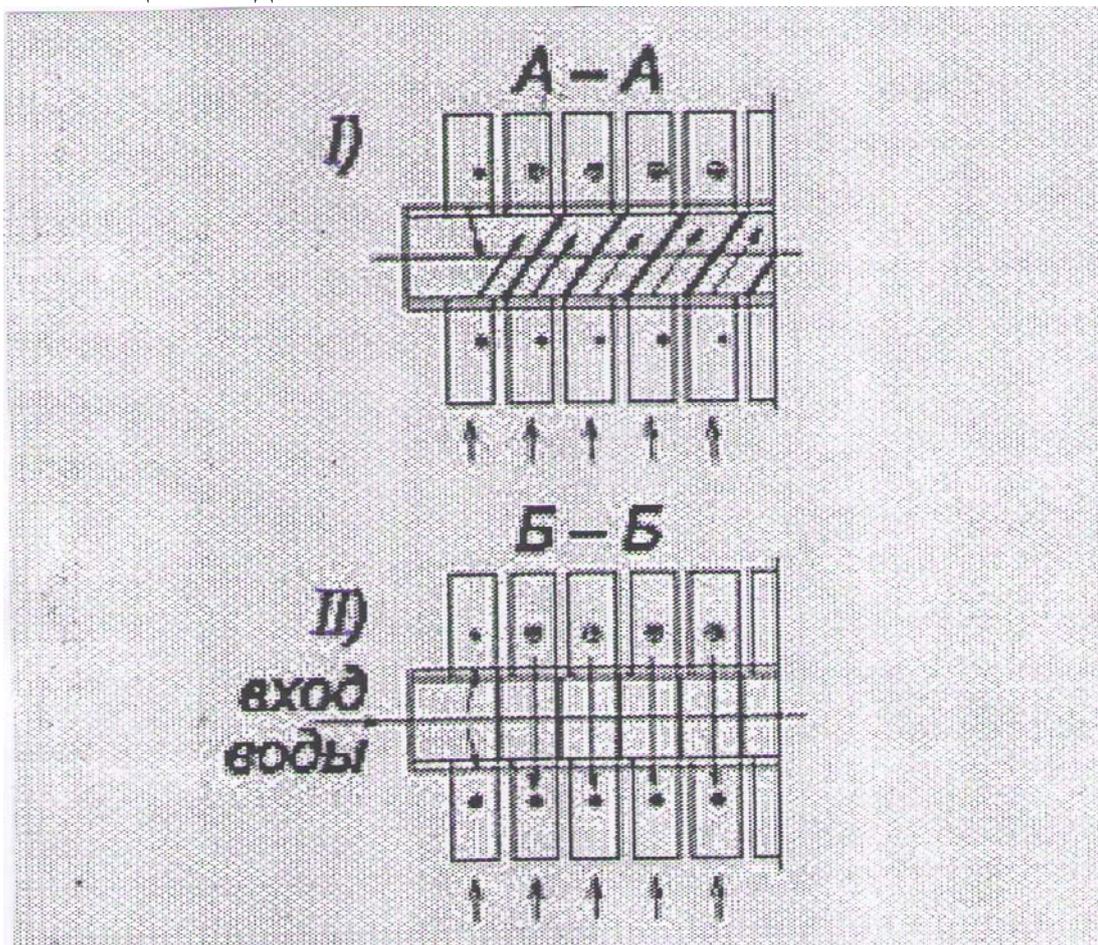


Рис. 10. Схема движения воды последовательно по каждой части секции:  
 I – А-А – поперечное сечение верхней ниппельной камеры;  
 II – Б-Б – поперечное сечение нижней ниппельной камеры чугунных секций

Предлагаемые схемы, кроме рассмотренных колонковых решений, могут быть реализованы в чугунных секциях котлов «Факел», «Рапидо» и др.

## 1.2. Существующее газооборудование

Секционные котлы предназначались для сжигания твердого топлива. Поэтому при переводе их на газовое топливо правильный выбор типа и конструкции горелочных устройств, их число и место установки в топке определяли экономичность, безопасность и долговечность работы.

Анализ на существующее положение показал ряд вариантов газооборудования котлов (на конкретных примерах). Техническая оценка этих решений с учетом современных требований по эксплуатационной надежности и энергоэкологической эффективности приводится ниже.

Газооборудование с применением многофакельных инжекционных горелок низкого давления приведено на рис. 11. [6]. Горелки устанавливаются на колосниковой решетке с зазором для прохода вторичного воздуха между образующими горелок. Число горелок и их тепловую мощность определяют по необходимому расходу газа на котел. Для монтажа горелок с лобовой секции котла снимают существующую гарнитуру и устанавливают новый фронтальный лист с устройствами для наблюдения за процессом горения и для розжига горелок. Горелки крепят к этому фронтальному листу. Подачу вторичного воздуха регулируют с помощью заслонки на поддувальном отверстии или шибером (в газоходе).

Такое переоборудование котлов обеспечивает равномерный обогрев секций котла, исключает соприкосновение пламени с холодными поверхностями нагрева, имеет достаточный диапазон изменения нагрузки, способствует полному сжиганию газа с минимальной концентрацией вредных веществ в продуктах сгорания и работает практически бесшумно. Содержание оксидов азота – 80-120 мг/м<sup>3</sup>, КПД – 0,82-0,9. Недостаток – ограничение по тепловой мощности котла (до поверхности нагрева 25 м<sup>2</sup>) из-за невозможности размещения горелок на колосниковой решетке.

Пример газооборудования котла с большой поверхностью нагрева с применением групповой инжекционной горелки ( $\alpha_1=0,3-0,4$ ) приведен на рис.12.

Вторичный воздух поступает к пламени через щель и гнезда, выложенные специальной кладкой на колосниковой решетке, за счет разрежения в топочной камере.

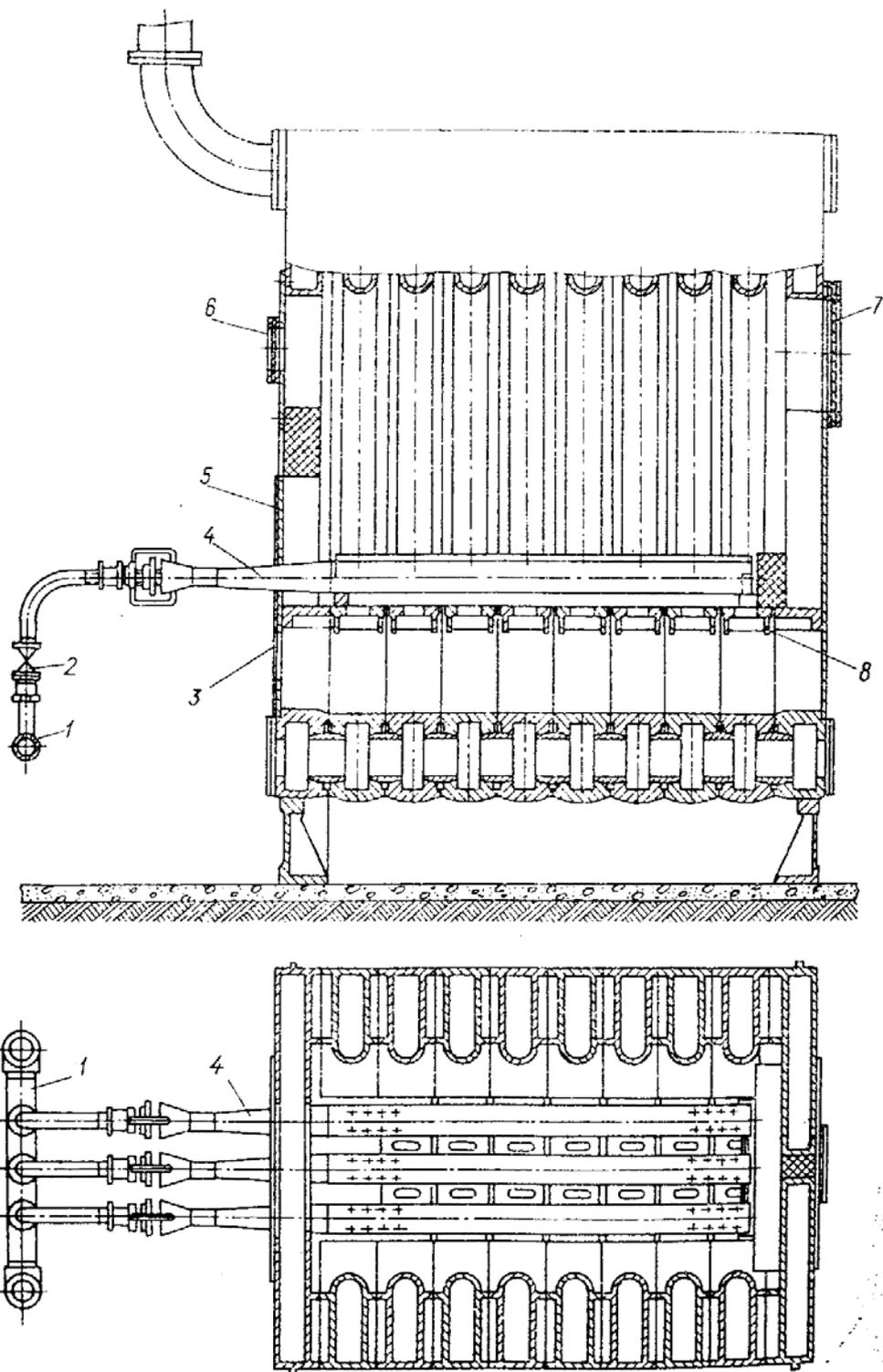


Рис. 11. Установка на котле Стреля многофакельных инжекционных горелок:  
 1 – газовый коллектор; 2 – кран; 3 – отверстие для подачи вторичного воздуха с раздвижными шторками; 4 – многофакельная инжекционная горелка;  
 5 – фронтное устройство; 6 – смотровое окно; 7 – предохранительный взрывной клапан; 8 – колосниковая решетка

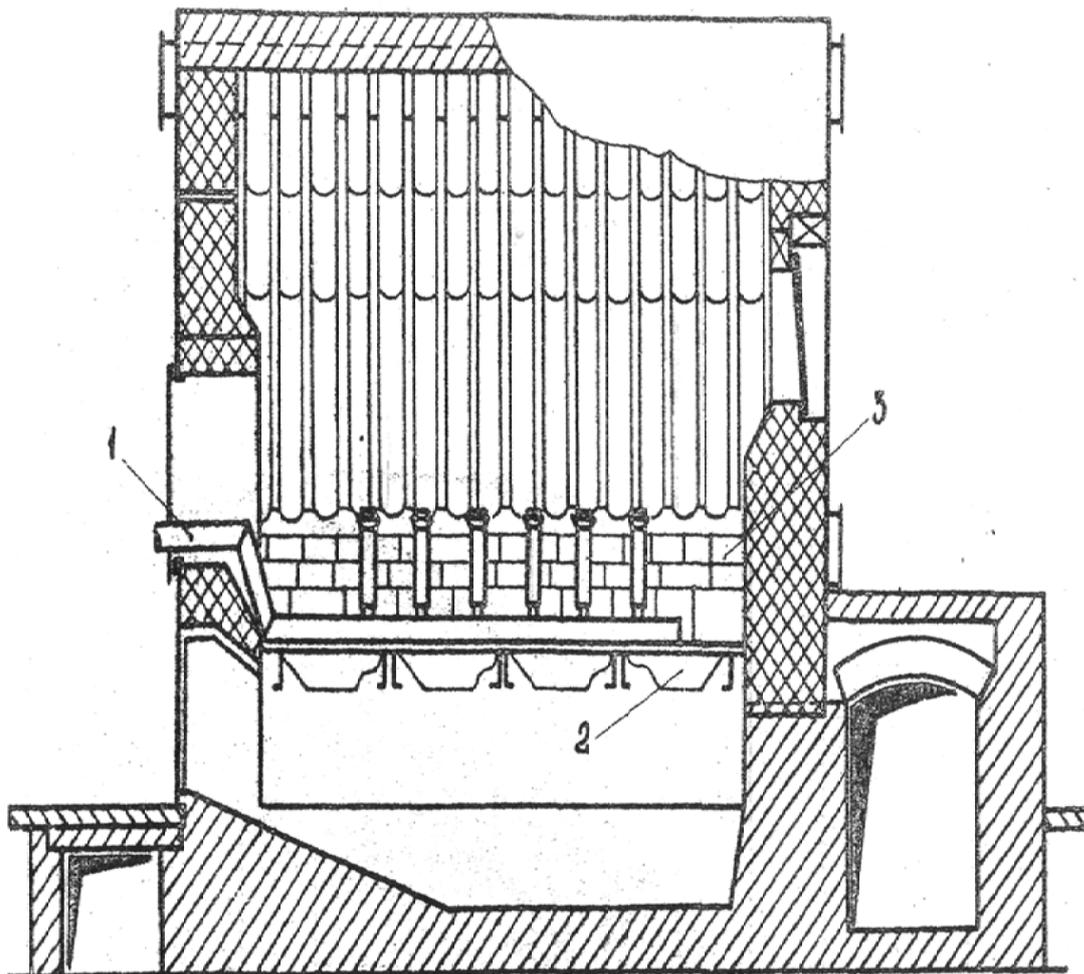


Рис. 12. Установка групповой инъекционной горелки с  $\alpha_1 < 1$  на чугунном секционном котле МГ-2:  
 1 – горелка; 2 – колосниковая решетка; 3 – кирпичная кладка

При переоборудовании котлов тепловой мощностью более 290 кВт приходится устанавливать горелки, имеющие большую единичную мощность, например инъекционные среднего давления. На рис. 13 приведено газооборудование котла НРч с поверхностью нагрева  $43 \text{ м}^2$  с установкой инъекционных горелок среднего давления однофакельного типа. С котла снимается существующая фронтальная гарнитура и на шпильках устанавливается специальный фронтальный лист. В нем имеется отверстие для горелки и запальника, перекрываемое раздвижными шторками. На каждом котле устанавливается по две горелки, что позволяет расширить диапазон регулирования тепловой нагрузки котла за счет выключения одной из них.

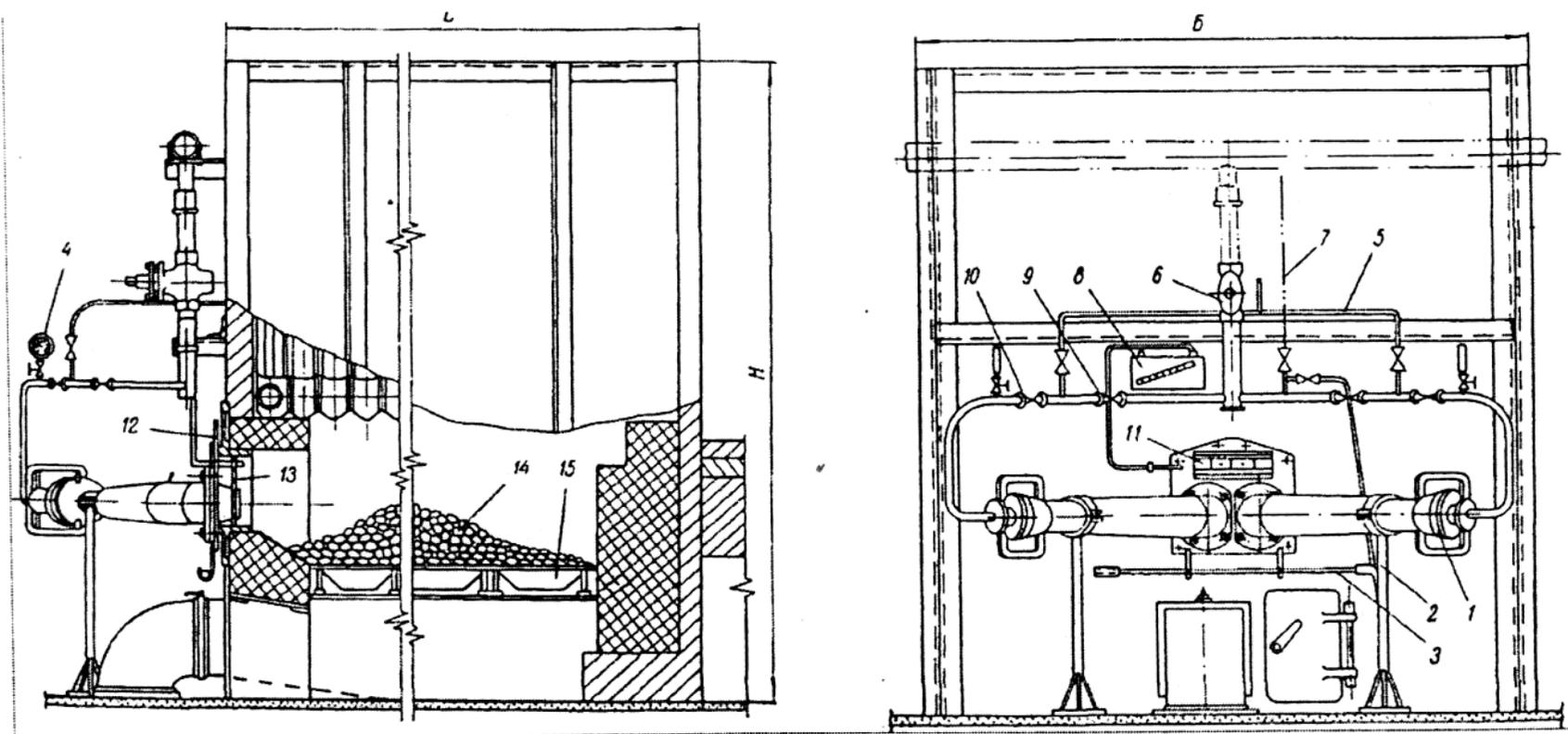


Рис. 13. Установка инъекционных горелок среднего давления на котле НРч:  
 1 – инъекционная горелка среднего давления; 2 – подставка под горелку; 3 – переносной запальник; 4 – пружинный манометр; 5 – газопровод безопасности; 6 – общий отключающий кран; 7 – продувочный газопровод; 8 – тягомер; 9 – контрольный кран; 10 – рабочий кран; 11 – смотровое окно с раздвижными шторками; 12 – фронтальной лист; 13 – отражательный лист; 14 – керамическая горка; 15 – колосниковая решетка

На рис. 14 показано переоборудование котла «Универсал» с установкой газовых инжекционных горелок среднего давления с кольцевым стабилизатором. Это позволяет обеспечить большую безопасность работы котла, особенно в момент розжига горелок, по сравнению со стабилизаторами в виде керамических горок и туннелей. Нижняя часть секций, расположенная в зоне непосредственного воздействия факела, защищается стенкой из шамотного кирпича на ~150 мм выше оси горелки.

Для сжигания газа среднего давления «Мосгазниипроект» рекомендует устанавливать горелки ИГК с  $\alpha_1 > 1$  в поддувальной части топки котла с фронта (рис. 15, 16). Колосниковую решетку демонтируют. Сжигание газа осуществляется в керамической топке, обеспечивающей хорошее равномерное распределение тепловых потоков на секционные поверхности нагрева котла.

При необходимости иметь резервное твердое топливо колосниковая решетка котла сохраняется. Для предохранения от пережога при работе на газовом топливе и недопущения неорганизованной подачи воздуха колосниковую решетку покрывают двумя слоями листового асбеста толщиной 6-8 мм и поверх их кладкой из ряда огнеупорного кирпича. Инжекционные горелки среднего давления с  $\alpha_1 > 1$  так же устанавливают с фронта котла над защищенной колосниковой решеткой. Однако при таком переоборудовании, когда факел развивается около поверхностей секций, имеет место неравномерное распределение тепловых потоков на поверхности нагрева, что приводит к перегреву отдельных секций котла, особенно при отсутствии химводоподготовки в котельной.

Переоборудование котлов с применением инжекционных горелок с  $\alpha_1 > 1$  имеет ряд преимуществ: отпадает необходимость в установке дутьевого вентилятора и воздухопроводов, проще автоматика, используются газопроводы меньших диаметров. Установка с фронта горелок БИГ обеспечивает дополнительные преимущества: малогабаритность, простоту розжига и наблюдения за процессом горения, простоту обвязки газопроводов.

С целью максимально повысить равномерность распределения тепла по топочному объему широкое распространение получил метод переоборудования путем установки подовых горелок.

Институтом «Ленгипроинжпроект» были проведены исследования работы котлов «Универсал», НРч, оборудованных горизонтальными щелевыми горелками (рис. 17). При изменении давления газа в пределах 400-800 Па и разрежении в топке 6-15 Па, химический недожог отсутствовал, а коэффициент избытка воздуха за котлами не превышал 1,3.

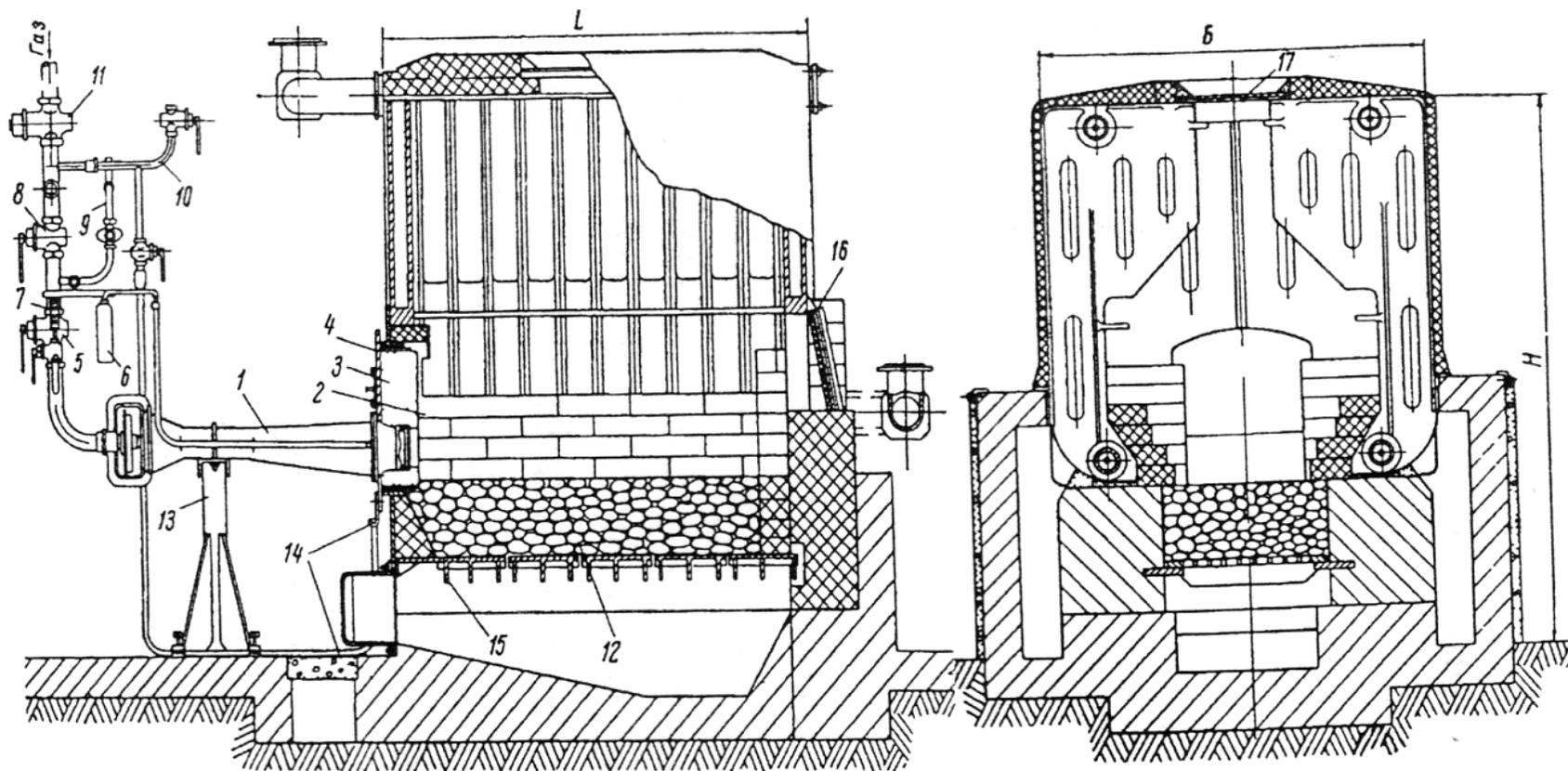


Рис.14. Установка инъекционных горелок среднего давления с кольцевым стабилизатором на котле «Универсал»:  
 1 – инъекционная горелка с кольцевым стабилизатором; 2 – защитные стенки; 3-футеровка из огнеупорного бетона;  
 4 – фронтной лист; 5 – рабочий кран; 6 – тягомер; 7 – пружинный манометр; 8 – контрольный кран; 9 – газопровод безопасности; 10 – продувочный газопровод; 11 – общий отключающий кран; 12 – засыпка из битого шамотного кирпича;  
 13 – подставка под горелку; 14 – переносный запальник и резиновый шланг; 15 – колосниковая решетка;  
 16, 17 – взрывные предохранительные клапаны

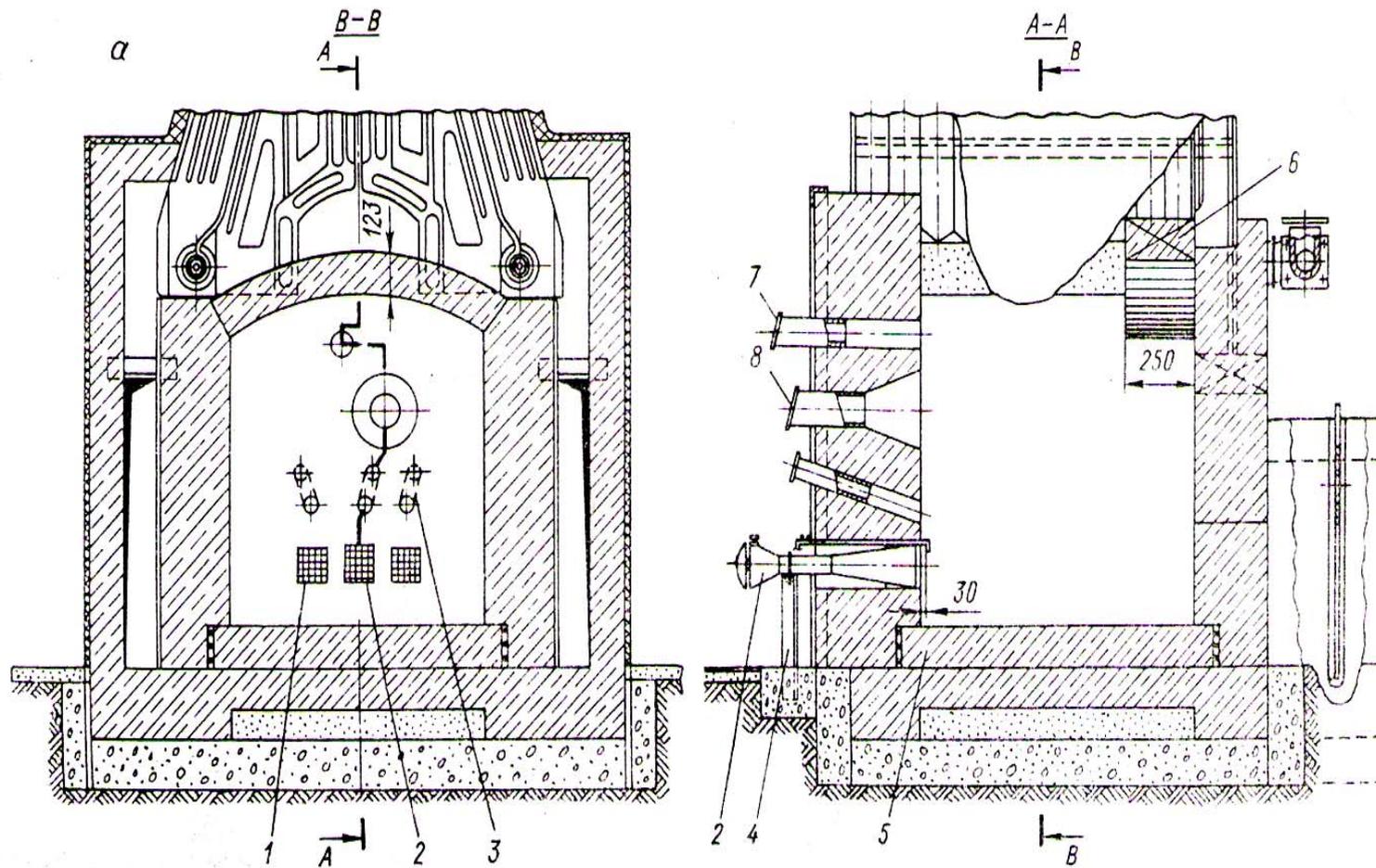


Рис.15. Установка горелок типа ИГК в топке котла «Универсал-6»:  
 1 – горелка ИГК-1-25 (ИГК-25М); 2 – горелка ИГК-1-35 (ИГК-60М); 3-запальное отверстие; 4 – подставка под горелки;  
 5 – под из огнеупорного кирпича; 6 – выравнивающий свод из огнеупорного кирпича; 7 – камера контроля разрезания;  
 8 – смотровое окно

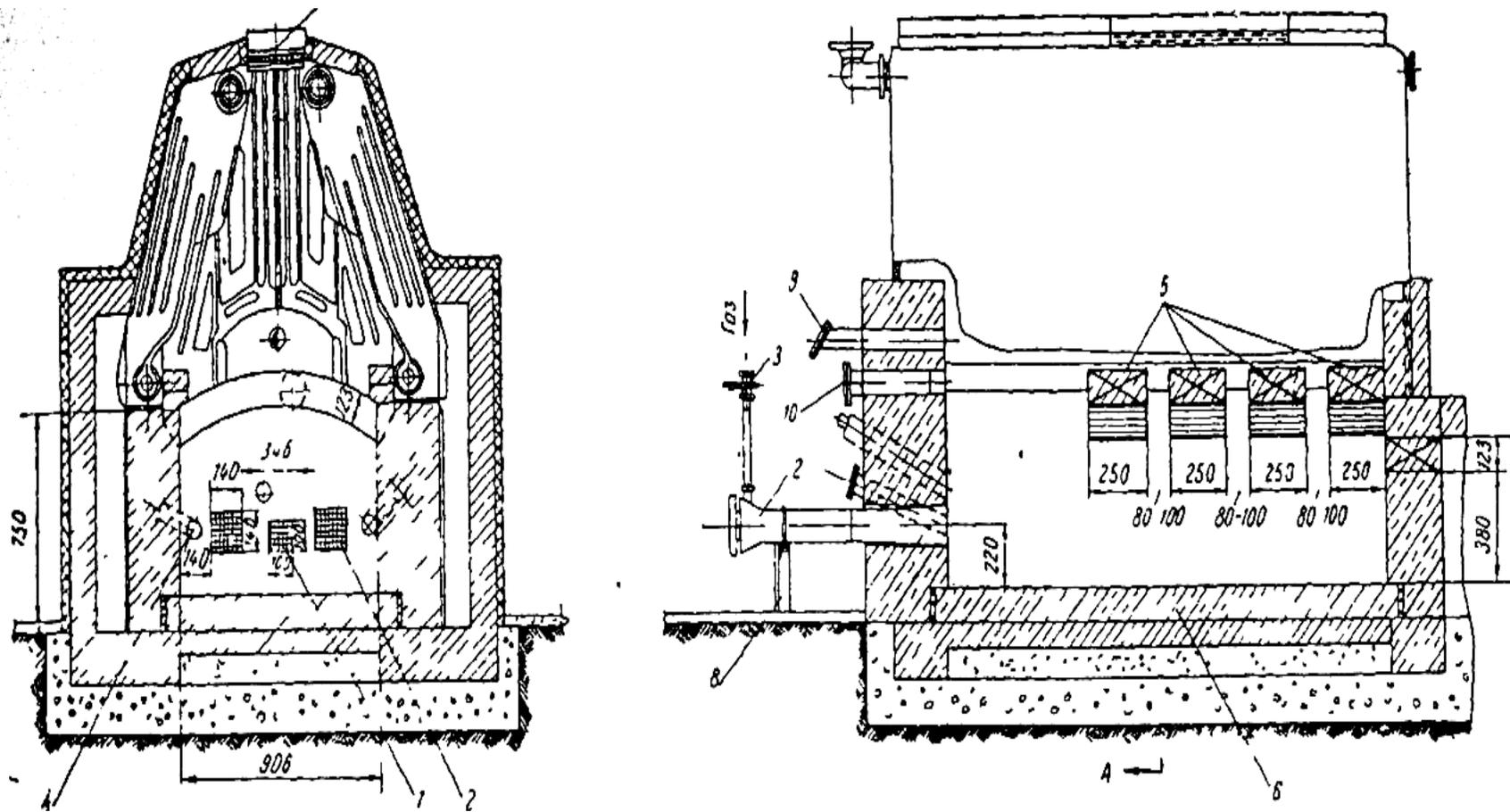


Рис.16. Приспособление топки котла «Универсал-6» для работы на газовом топливе:

- 1 – инжекционная горелка среднего давления типа I ИГК-25М; 2 – инжекционная горелка среднего давления типа I ИГК-60М;
- 3 – рабочий кран; 4 – запальные отверстия; 5 – выравнивающие своды из огнеупорного кирпича;
- 6 – под из огнеупорного кирпича; 7 – взрывной предохранительный клапан; 8 – подставка под горелки;
- 9 – камера контроля разрежения; 10 – смотровое окно для наблюдения за сводами

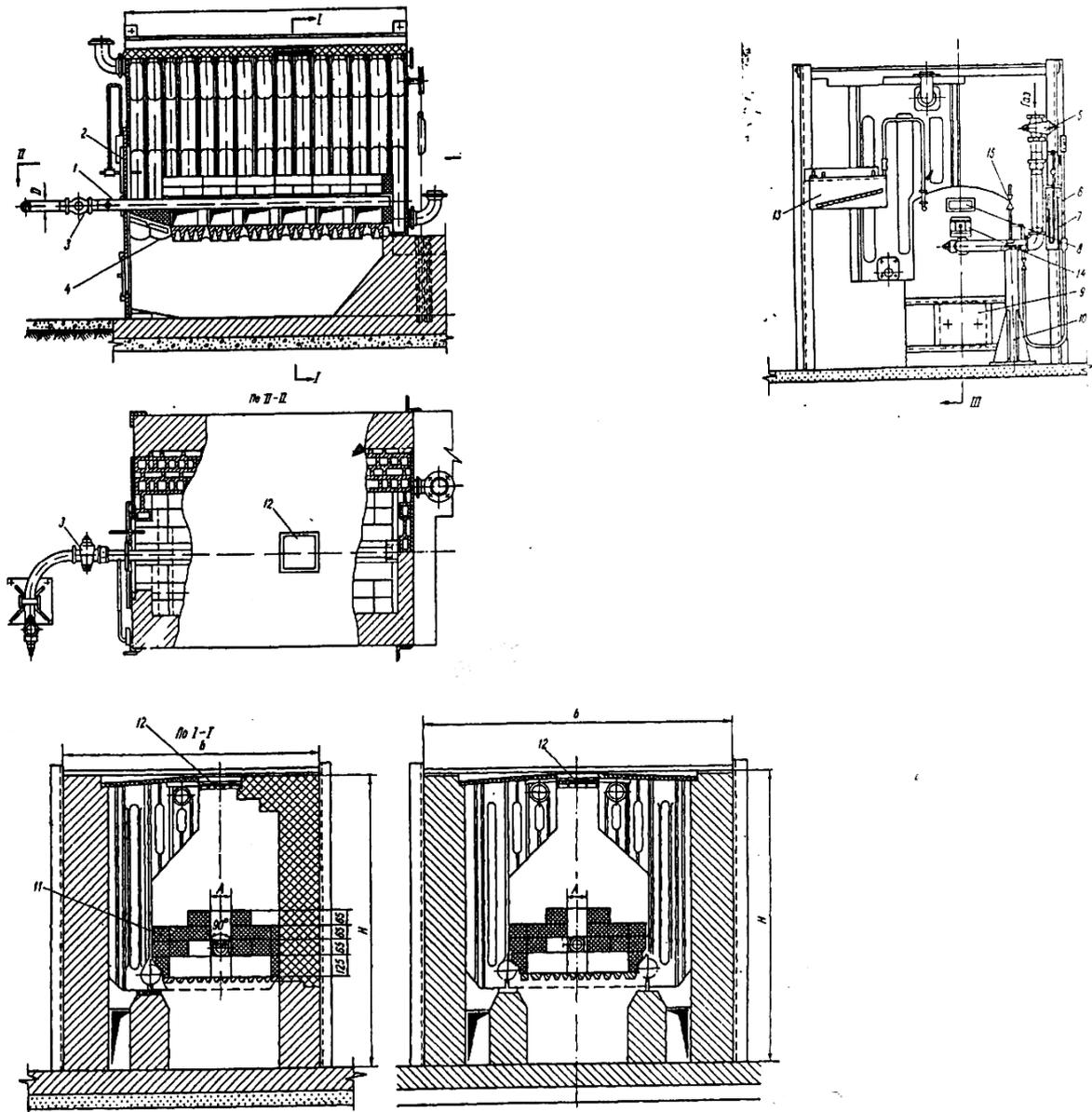


Рис. 17. Установка горизонтальной (подовой) щелевой горелки низкого давления без принудительной подачи воздуха на котле «Универсал-4»

полушатрового типа:

- 1 – газовый коллектор; 2 – фронтный лист; 3 – рабочий кран; 4 – колосниковая решетка; 5 – отключающий кран; 6 – переносный запальник; 7 – U-образный водяной манометр; 8 – гляделка; 9 – регулировочная шторка на поддувале;
- 10 – подставка под горелку; 11 – кладка из огнеупорного кирпича;
- 12 – предохранительный взрывной клапан; 13 – тягомер; 14 – отверстие для запальника; 15 – газопровод безопасности и продувочный газопровод

В котлах «Энергия-3» и МГ-2 (рис.18) устанавливались по два газовых коллектора в своей щели. В котлах с поверхностью нагрева больше  $50 \text{ м}^2$  вместо двух отдельных газовых коллекторов устанавливали одну двухтрубную горелку, имеющую вид камертона (рис.19).

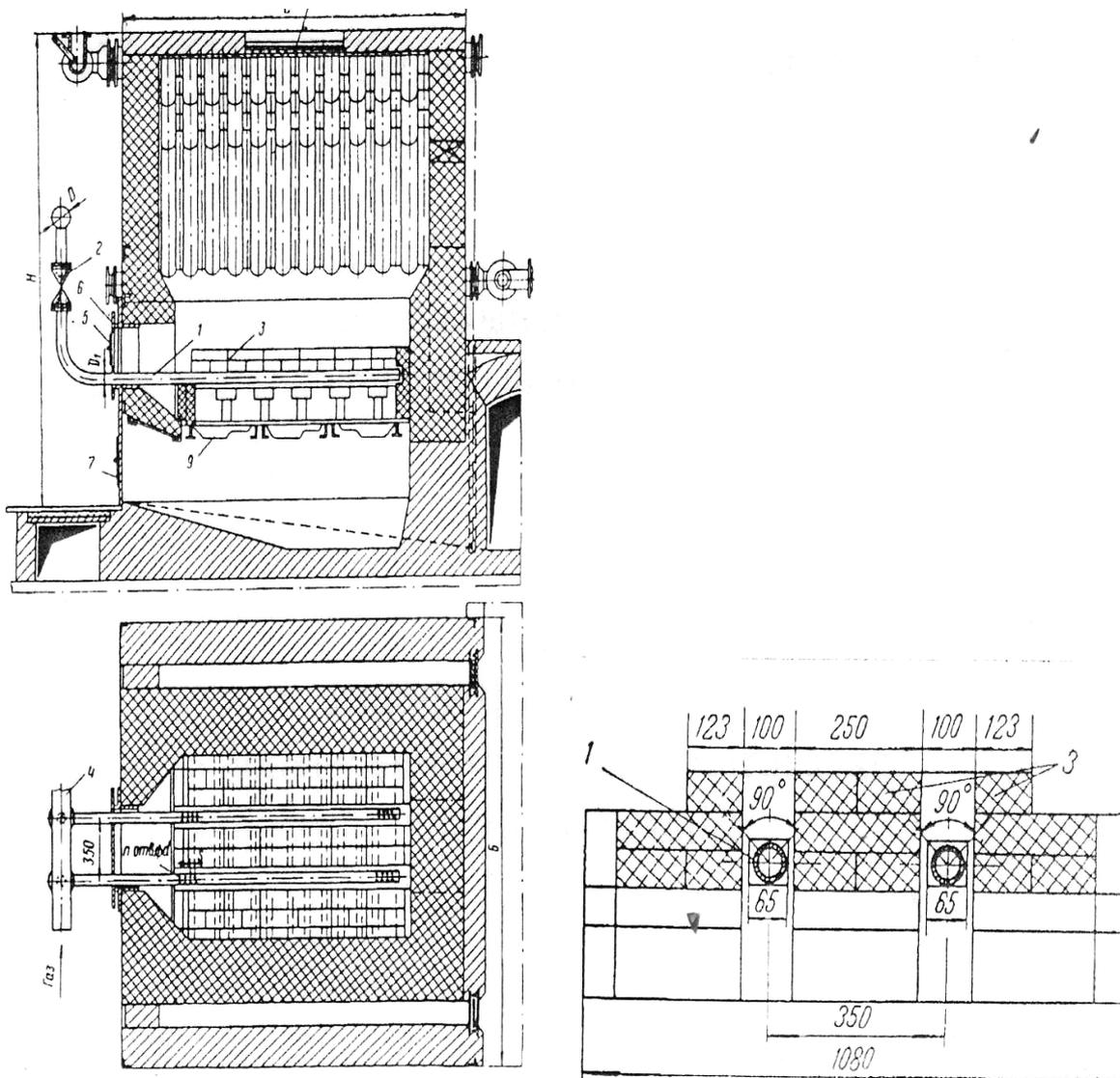


Рис.18. Установка горизонтальной щелевой горелки на котлах МГ-2 с поверхностью нагрева 54,6 и 71,4 м<sup>2</sup>:  
 1 – газовый коллектор; 2 – рабочий кран; 3 – кладка из огнеупорного кирпича;  
 4 – газопровод котла; 5 – гляделка с раздвижными шторками; 6 – фронтальной лист; 7-поддувальные дверки; 8 – взрывной предохранительный клапан;  
 9 – колосниковая решетка

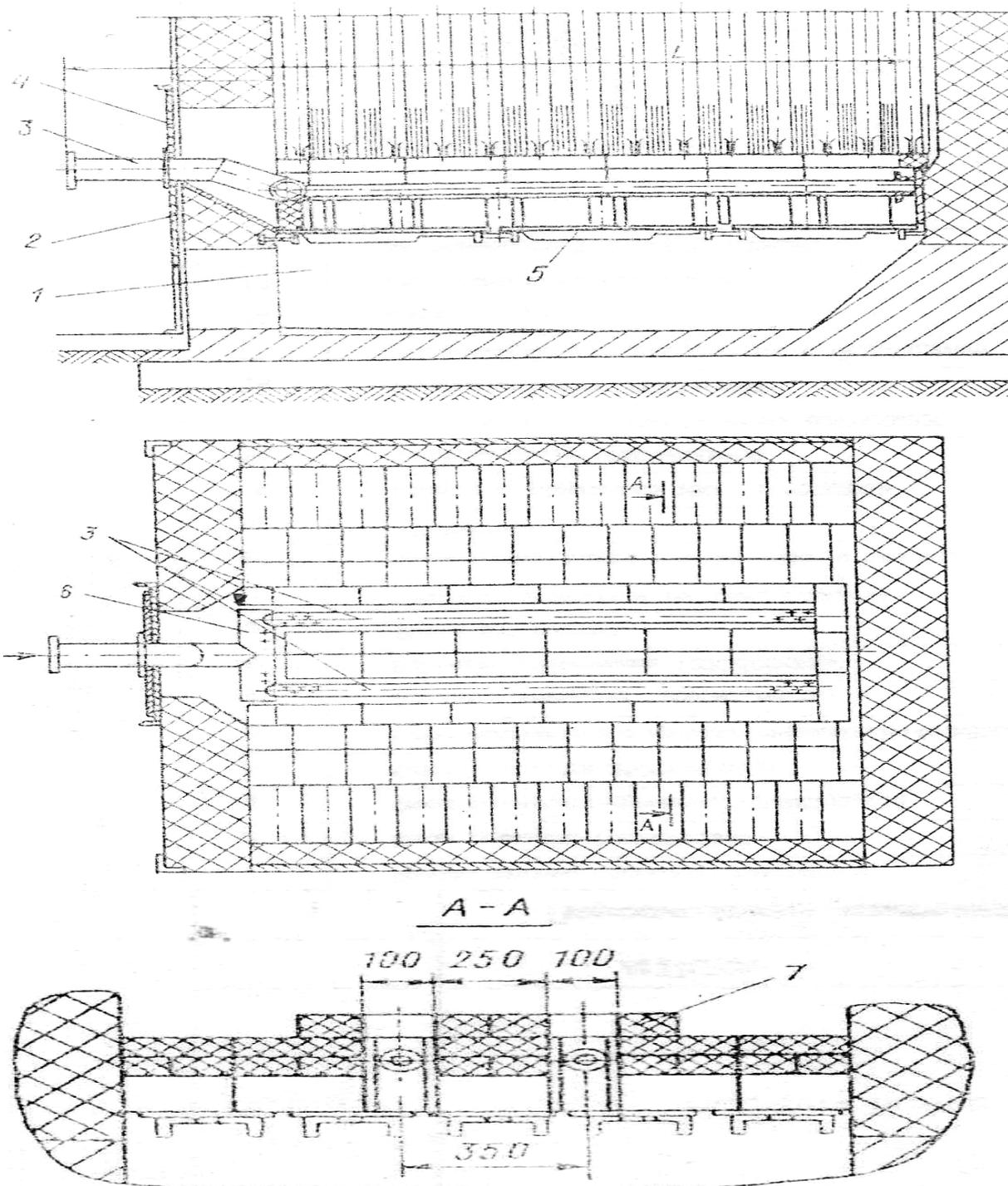


Рис.19. Установка двухтрубной горизонтальной щелевой диффузионной (подовой) горелки в топке секционного чугунного котла:  
 1 – поддувальное пространство; 2 – фронтной лист; 3 – горелка; 4 – смотровое окно; 5 – колосниковая решетка; 6 – поперечный патрубок;  
 7 – кладка из огнеупорного кирпича

Переоборудование котла «Универсал-6» с установкой многощелевой одноколлекторной горелки низкого давления показано на рис.20. Щель из огнеупорного кирпича сверху перекрыта тремя рядами кирпича, образующими четыре щели для выхода газовой смеси. В результате факел разбивается на четыре отдельных факела, что сокращает его длину (высоту). Для нормальной работы разрежение за котлом должно быть не ниже 50 Па. При этом: КПД=85 %, отсутствует химнедожог при  $\alpha_k=1,25-1,27$  (при номинальной нагрузке), обеспечивается устойчивая работа котла. Недостатки: повышенный нагрев коллектора из-за излучения на него раскаленных кирпичей, коробление металла и образование окалины.

При недостаточной высоте топки колосниковая решетка демонтируется, горелка располагается ниже ее уровня на специальных опорных балках. Для равномерности распределения воздуха по длине топки применяется металлический перфорированный лист (рис. 21).

Установка форкамерной (подовой) горелки на котле «Универсал-4» показана на рис. 22. Серьезным недостатком является сложность выкладки смесителей, трудность совмещения их осей с осями сопел и большая высота факела; высокие температуры и тепловые напряжения, которые возникают в форкамере горелки, приводят к разрушению форкамер и завалу смесителей.

При подаче в котельную газа низкого давления часто применяют горелки с принудительной подачей воздуха при переводе котлов на газовое топливо.

На рис. 23 приведена установка горелки низкого давления «Ленгипроинжпроект» на котле НРч. Горелка крепится к фронтальному листу. Из устья горелки в топку подается газозвушная смесь с коэффициентом избытка воздуха больше единицы ( $\alpha_r=1,05-1,10$ ). Устойчивая работа обеспечивается стабилизатором горения- керамической горкой. Максимум температур находится на близком расстоянии от устья горелки (4-5 калибров).

Установка горелки ГА на котле МГ-2 показана на рис. 24. Предотвращение стальных деталей горелки от обгорания достигается их футеровкой огнеупорной массой следующего состава: шамотный порошок – 75 %; глина огнеупорная – 10 %; кварцевый песок – 5 %; раствор – 10 % (раствор состоит из 60 % жидкого стекла и 40 % каустической соды (17 %-й)). Недостатки: сложность в изготовлении, большой расход металла, уменьшается поверхность теплообмена, повышенная температура уходящих газов и недостаточно высокий КПД.

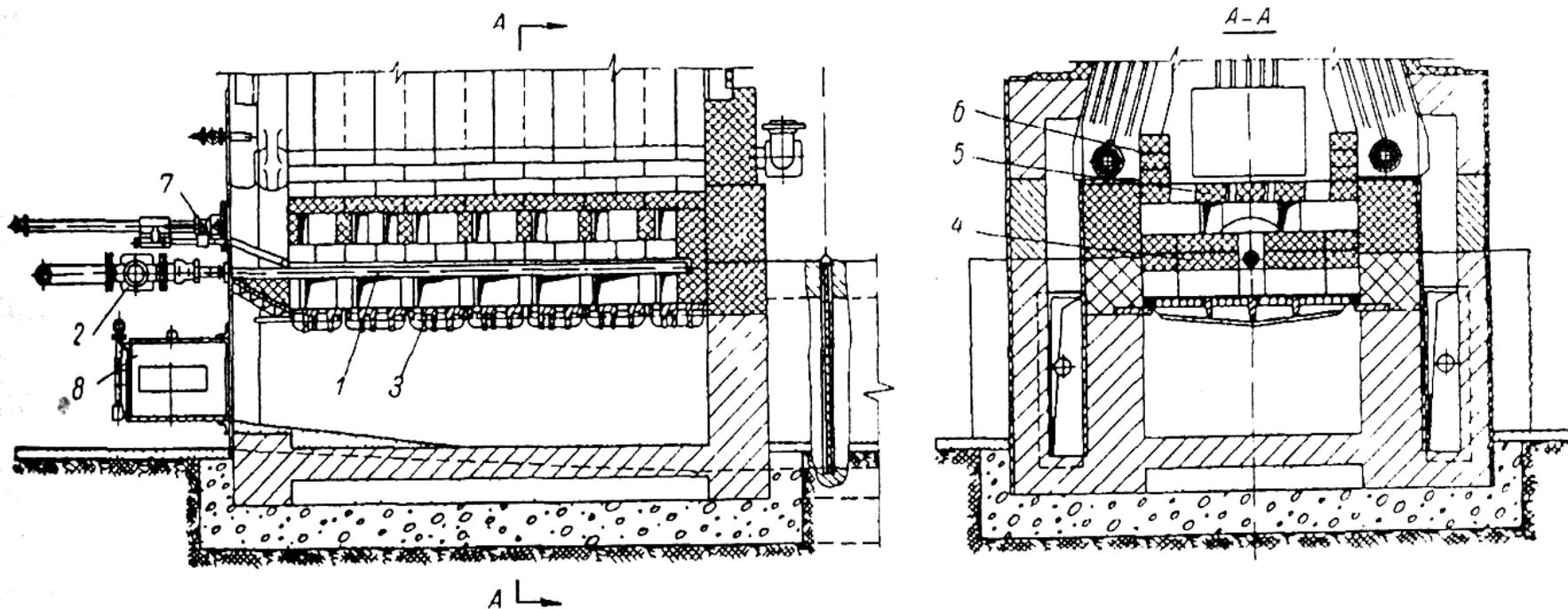


Рис. 20. Установка на котле «Универсал-6» многощелевой одноколлекторной горелки низкого давления конструкции «Ленгипроинжпроект»:  
 1-газовый коллектор; 2 – рабочий кран; 3 – колосниковая решетка; 4 – кладка из огнеупорного кирпича; 5 – многощелевой под; 6 – защитные стенки; 7 – стационарный запальник; 8 – пропорционирующий клапан автоматики АГК-2

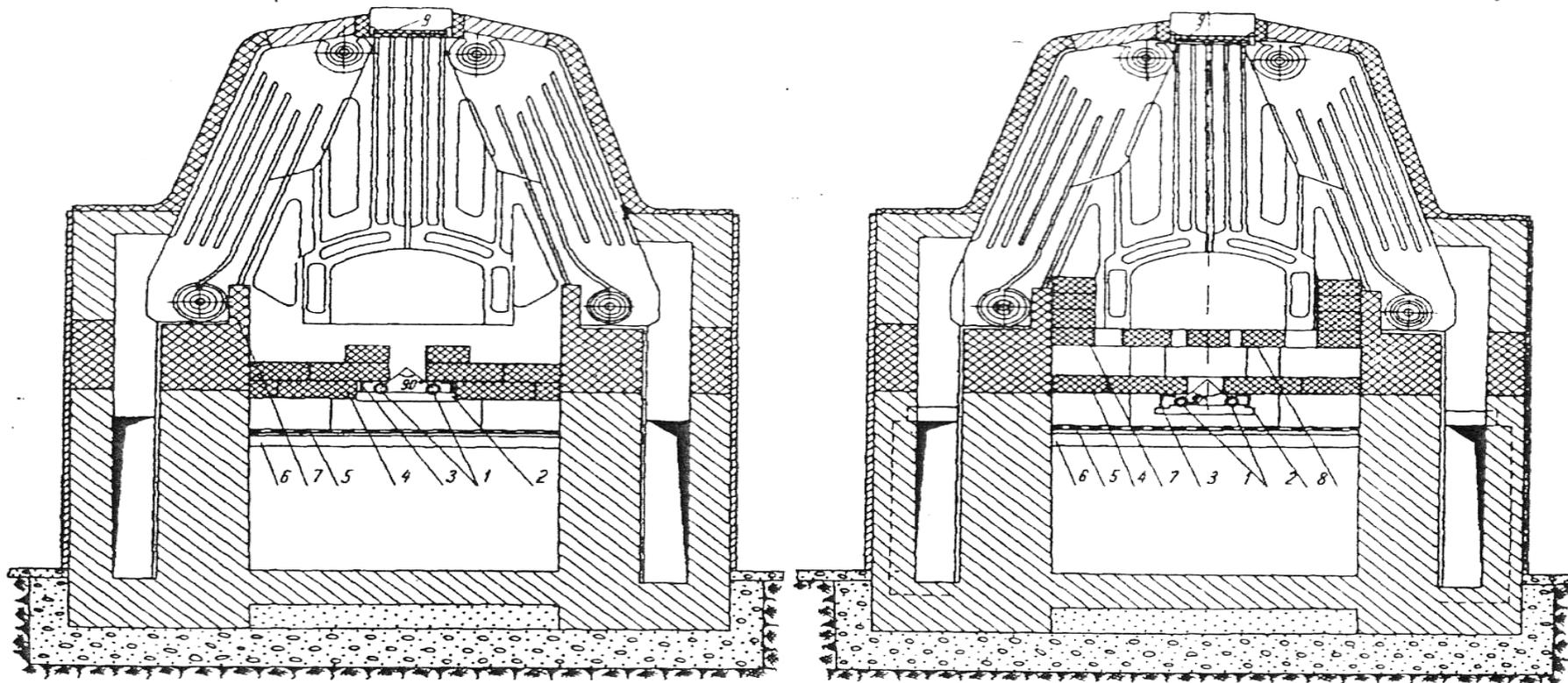


Рис. 21. Сниженная установка горизонтальных щелевых горелок с двумя газовыми коллекторами на котле «Универсал-6»:  
 1 – газовые коллекторы; 2 – опора под коллекторы; 3 – опора кирпичной кладки; 4 – огнеупорный кирпич;  
 5 – перфорированный лист; 6 – опора перфорированного листа; 7 – защитная стенка; 8 – многощелевой под;  
 9 – взрывной предохранительный клапан

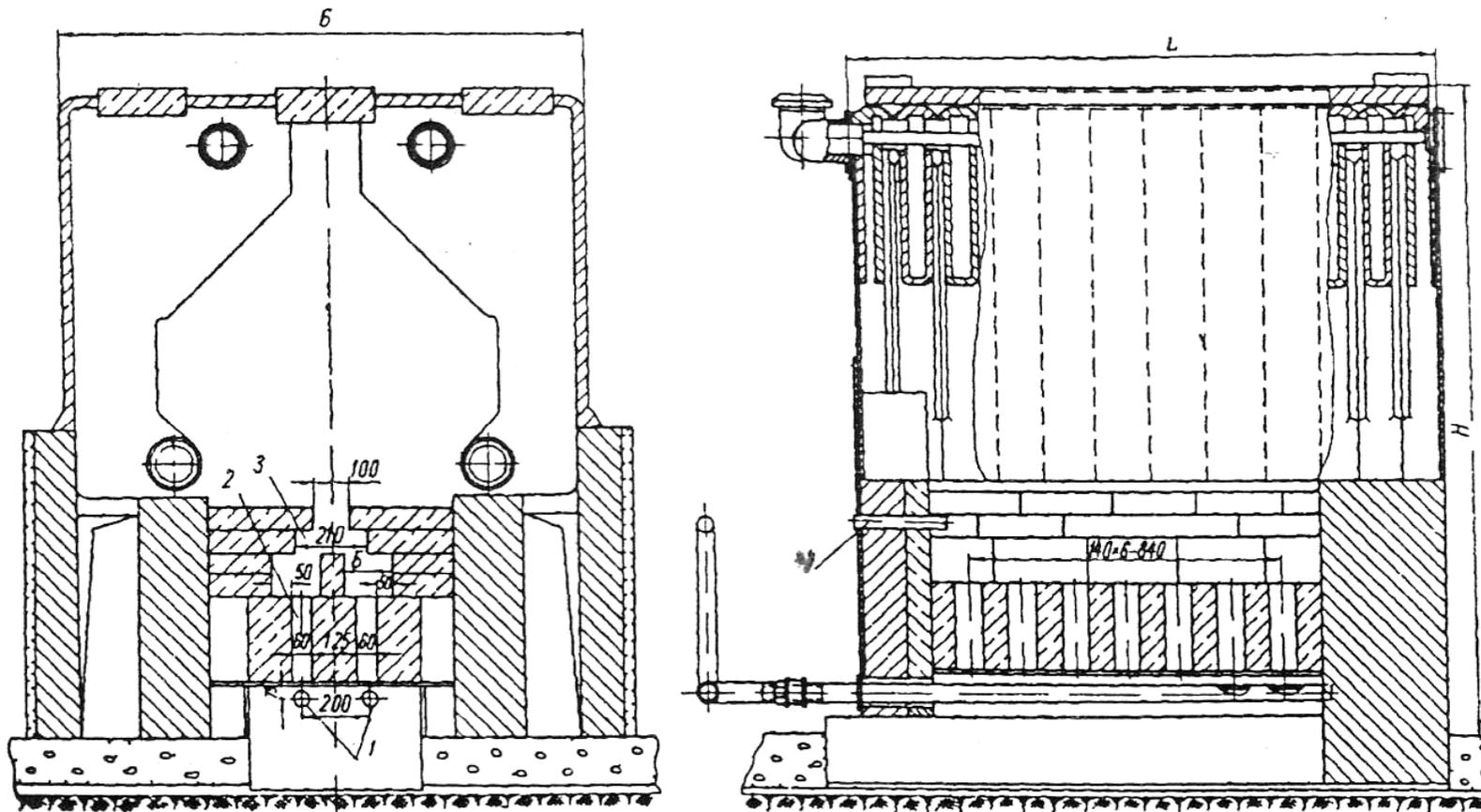


Рис. 22. Установка форкамерной горелки на котле «Универсал-4»:  
 1 – газовый коллектор с огневыми отверстиями; 2 – смеситель; 3 – форкамера; 4 – отверстия для зажигания

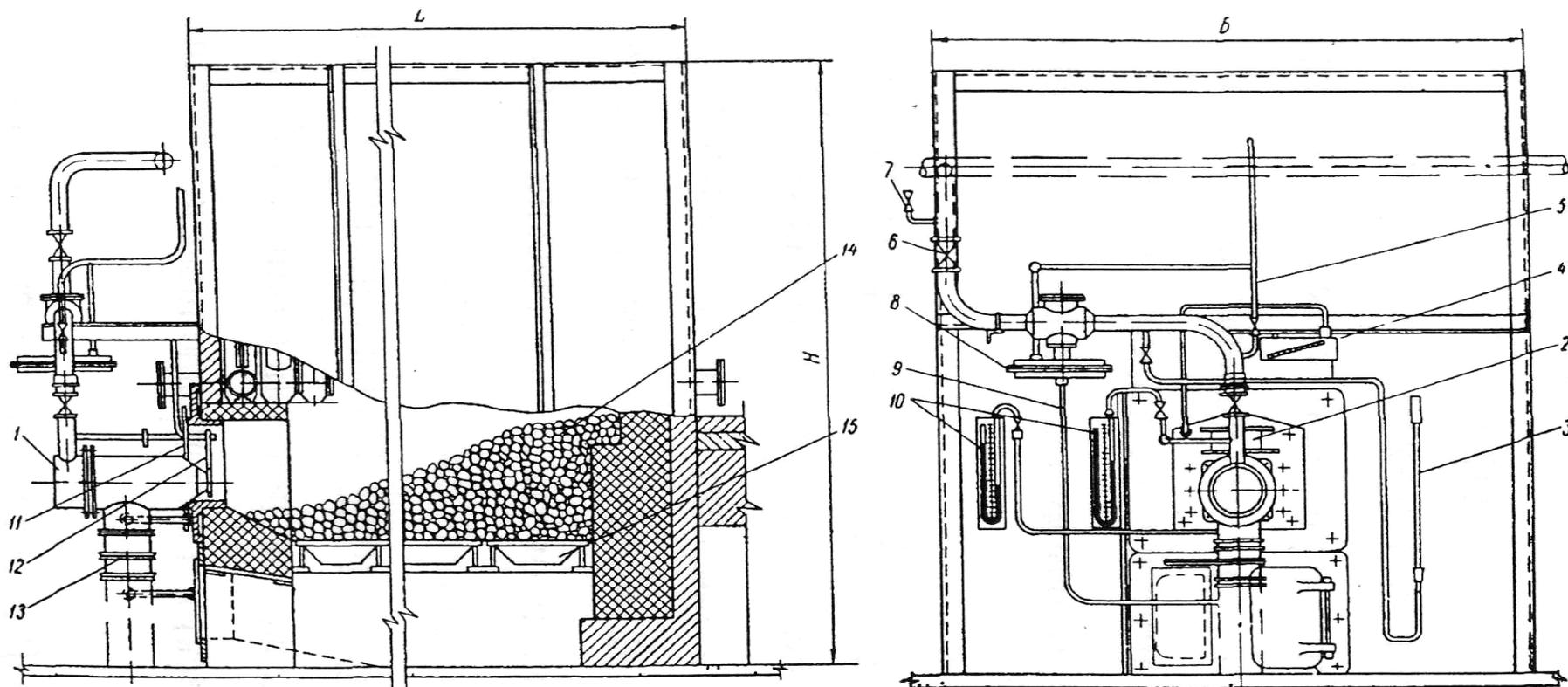


Рис.23. Установка горелки низкого давления с принудительной подачей воздуха на котле НРч:  
 1 – горелка низкого давления с принудительной подачей воздуха; 2 – смотровое окно с раздвижными шторками;  
 3 – переносный запальник; 4 – тягомер; 5 – газопровод безопасности; 6 – общий отключающий кран; 7 – продувочный газопровод; 8 – клапан блокировки газа и воздуха; 9 – импульсный трубопровод к клапану блокировки; 10 – U-образный манометр; 11 – фронтальной лист; 12 – отражательный лист; 13 – воздушная регулировочная заслонка; 14 – керамическая горка; 15 – колосниковая решетка

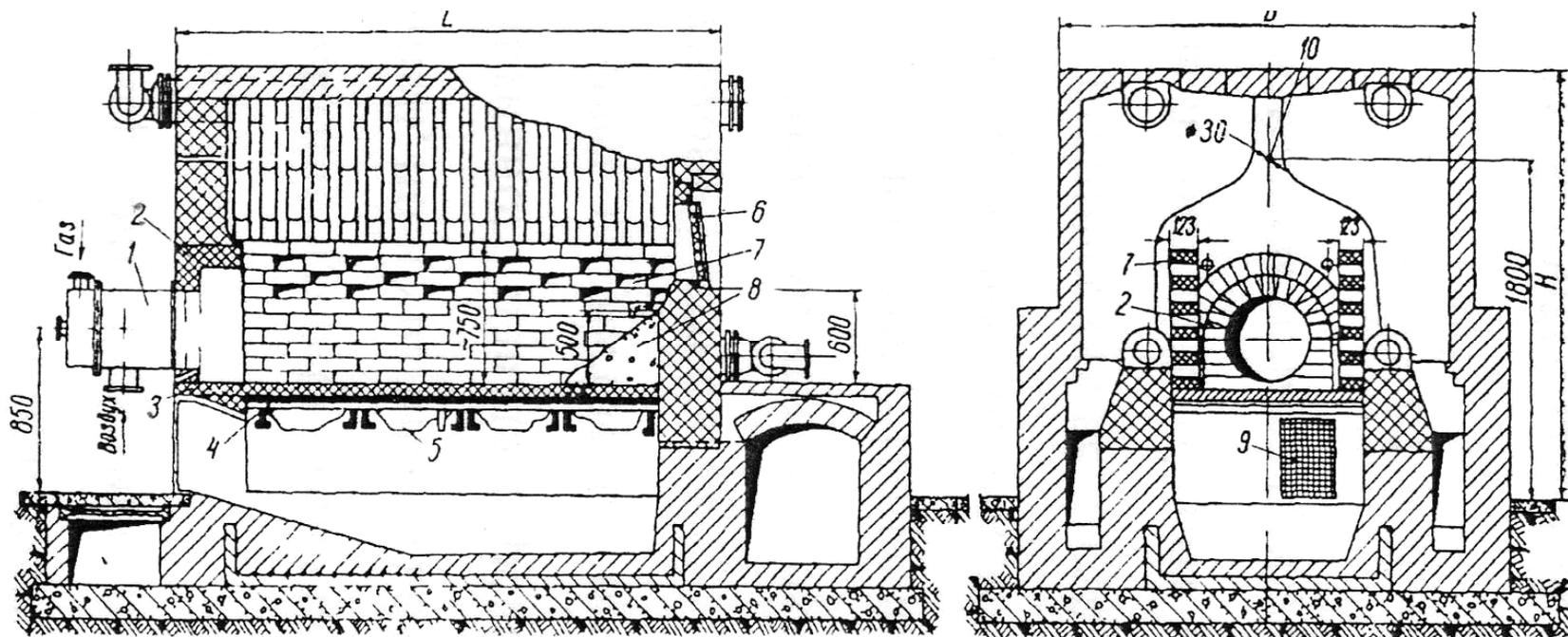


Рис.24. Установка горелки низкого давления с принудительной подачей воздуха на котле МГ-2:  
 1 – горелка низкого давления с принудительной подачей воздуха; 2 – обмуровка горелки; 3 – кирпичная кладка на колосниках; 4 – листовой асбестовый картон; 5 – колосниковая решетка; 6 – предохранительный взрывной клапан;  
 7 – боковые защитные стенки из огнеупорного кирпича; 8 – защитная горка из битого огнеупорного кирпича;  
 9 – сетка на поддувальных дверках; 10 – отверстие для импульсной трубки к тягомеру

Вариант перевода котла «Тула-3» на газовое топливо (рис.25) с демонтажем колосниковой решетки и установкой горелки ГГВ снижает указанные недостатки. Горелка устанавливается на уровне поддувального отверстия. Такая компоновка горелки в топке обеспечивает равномерное распределение тепловых потоков и длительную безаварийную работу котла.

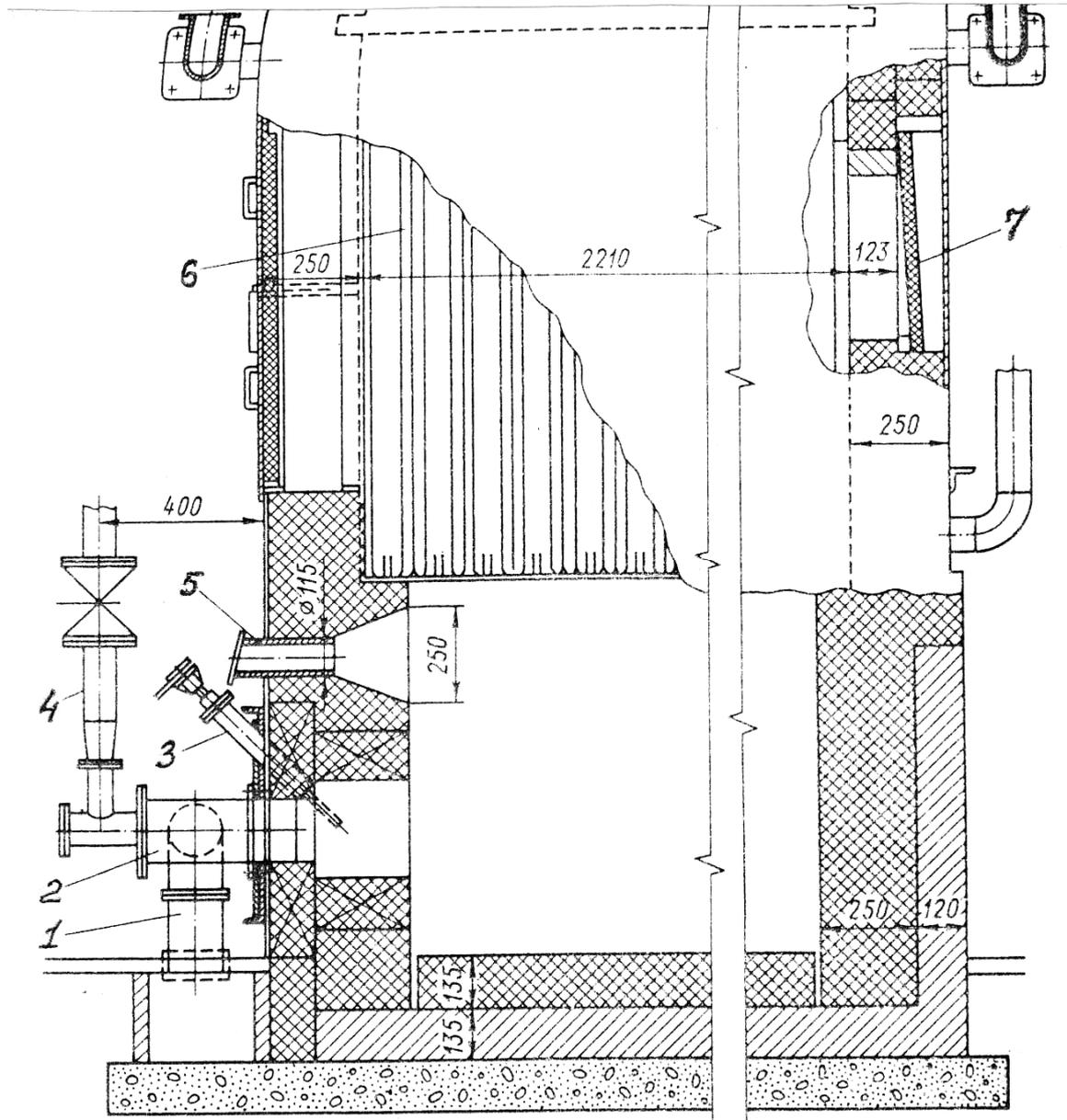


Рис. 25. Установка горелки типа ГГВ в топке котла «Тула-3»: 1 – воздуховод; 2 – горелка типа ГГВ; 3 – контрольный электрод; 4 – газопровод; 5 – смотровая труба; 6 – секции котла; 7 – предохранительный взрывной клапан

## Выводы

1. Информационный поиск показал, что при переводе секционных котлов с твердого на газовое топливо применялись следующие горелочные устройства:

– многофакельные инжекционные горелки низкого давления, устанавливаемые на всю длину колосниковой решетки топки (только для котлов с поверхностью нагрева до 25 м<sup>2</sup>);

– инжекционные однофакельные горелки среднего давления, устанавливаемые с фронта топки котла над колосниковой решеткой или в поддувальной части топки с демонтажем колосников;

– горелки с принудительной подачей воздуха (автоматизированные горелочные блоки), устанавливаемые с фронта топки котла над колосниковой решеткой или в поддувальной части топки котла с демонтажем колосников;

– горизонтально-щелевые (подовые) горелки без принудительного дутья на колосниковой решетке или ниже её уровня (решетка демонтируется).

2. Газооборудование с применением инжекционных многофакельных горелок обеспечивает хорошее сжигание газа ( $C_{\text{NOx}}=80-120$  мг/м<sup>3</sup>, КПД=70-82 %), равномерное распределение теплового потока по всем секциям котла. Вариант имеет ограничение по тепловой мощности из-за больших габаритных размеров горелок.

3. Применение инжекционных горелок среднего давления характеризуется малой глубиной регулирования, необходимостью применения стабилизаторов горения, неравномерностью распределения тепла и сильным шумом при работе.

4. Наиболее современным является газооборудование с применением горелок с принудительным дутьем (горелочных блоков). Автоматическое регулирование ( $\alpha=1,02-1,05$ ) удовлетворяет требованиям по энергосбережению (КПД=86-90 %). Однако усложняется эксплуатация, повышаются энергозатраты и уровень шума, не обеспечивается требуемая равномерность тепловых потоков.

5. Установка инжекционных и дутьевых горелок ниже уровня колосниковой решетки не приводит к улучшению показателей работы котлов.

6. Газооборудование с применением подовых горелок является наиболее простым конструктивным решением. Обеспечивается: высокая устойчивость горения, широкий диапазон регулирования тепловой нагрузки, высокая энергорентабельность, практически бесшумная работа, наибольшая из рассмотренных вариантов равномерность распределения тепловых потоков по секциям котла, низкий уровень выхода оксидов азота (90-120 мг/м<sup>3</sup>).

Однако не удовлетворяются современные требования по энергосбережению (повышенные избытки воздуха, КПД=70-85 %).

7. Таким образом, модернизация газооборудования с применением современной автоматики регулирования и безопасности является объективно необходимым для котлов, имеющих ресурс 15-20 лет. Это наиболее экономичное и эффективное направление совершенствования сжигания газа в данных котлах.

### 1.3. Модернизация газооборудования

В ходе выполнения исследовательских, опытно-конструкторских работ и промышленных испытаний были созданы два варианта модернизированной горизонтально-щелевой (подовой) горелки с принудительной подачей воздуха и комплексной автоматикой регулирования и безопасности работы [7]. Целью разработки являлось: устранение неравномерности тепловой нагрузки по длине топки, повышение эффективности и качества сжигания газа, улучшение смесеобразования, повышение надежности работы, простота монтажа горелок.

Первый вариант- подовая горелка с принудительным дутьем включает в себя туннель, образованный блоками из огнеупорного материала, размещенный в нем газовый коллектор с двумя рядами отверстий, расположенных в шахматном порядке, и воздухоподводящий канал, выполненный в виде воздуховода прямоугольного сечения клиновидной формы со щелью, расположенной в его клиновидной части под отверстиями газового коллектора, а блоки и газовый коллектор прикреплены к воздуховоду.

Использование воздуховода прямоугольного сечения клиновидной формы со щелью, расположенной в его клиновидной части под отверстиями газового коллектора, приводит к равномерному распределению поля скоростей воздуха по всей длине щели, что позволяет улучшить смесеобразование газа с воздухом и улучшает качество сгорания газа.

Соединение воздуховода с блоками из огнеупорного материала и газовым коллектором позволяет получить простое в эксплуатации устройство, которое легко устанавливается и демонтируется в топке при ремонтных работах.

На рис. 26 схематически изображена предлагаемая конструкция подовой горелки с принудительным дутьем.

Горелка содержит:

- газовый коллектор 1, подключенный к источнику газа и снабженный поперечными отверстиями постоянного диаметра 2 под углом атаки 90°;
- блоки из жаропрочного бетона 5, образующие туннель;
- вентилятор 4;
- воздуховод 3;

- газовый коллектор 1 и воздуховод соединены хомутом 6;
- блоки и воздуховод соединены скобами 7.

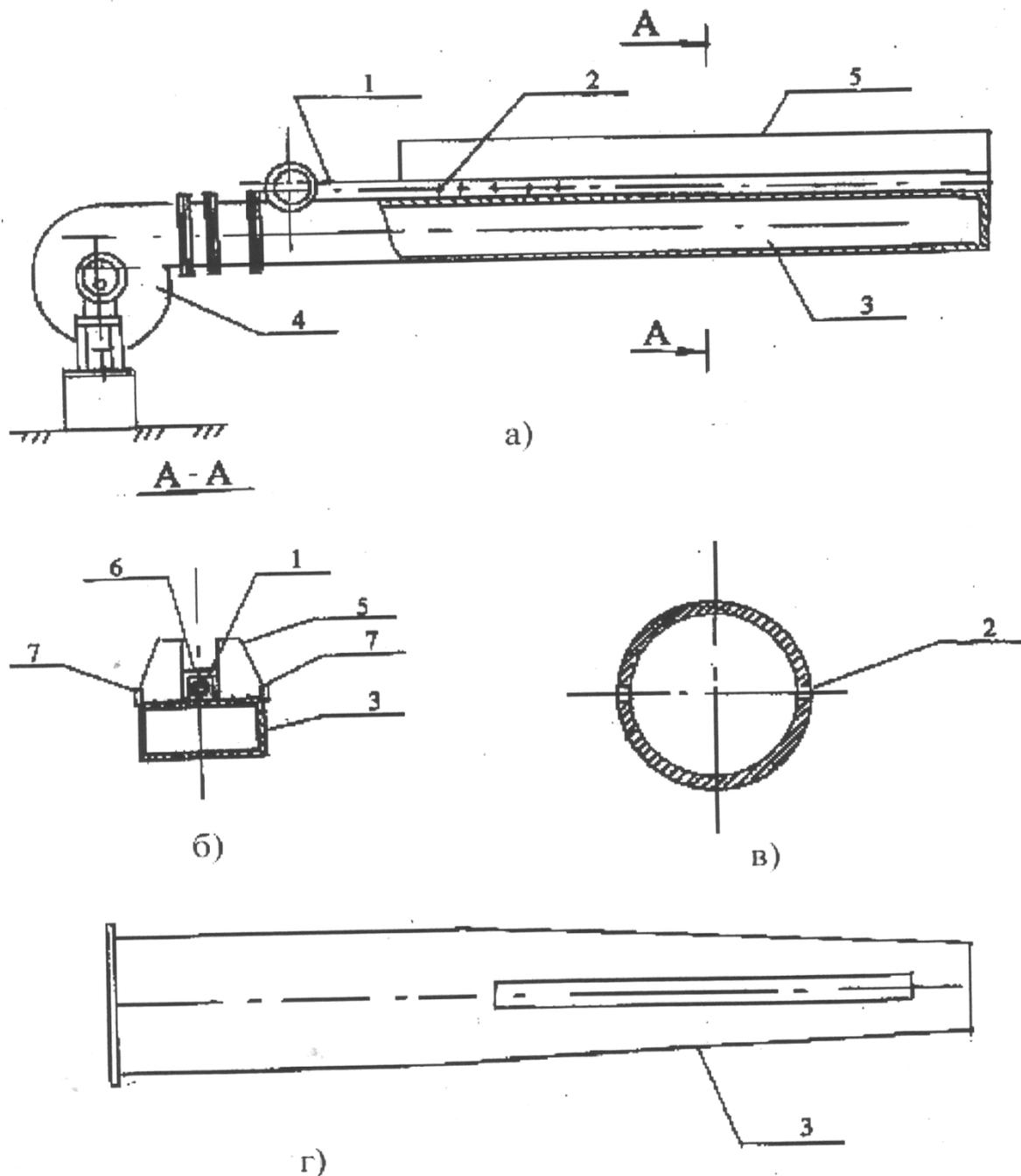


Рис. 26. Конструкция горизонтально-щелевой (подовой) горелки с принудительным дутьем (первый вариант):  
 а – вид сбоку (разрез); б – разрез А-А; в – газовая горелка – разрез;  
 г – воздуховод – вид сверху:  
 1 – газовый коллектор; 2 – отверстия; 3 – воздуховод; 4 – вентилятор; 5 – блоки из жаропрочного бетона; 6 – хомут; 7 – скобы

Установка горелки на котле показана на рис.27.

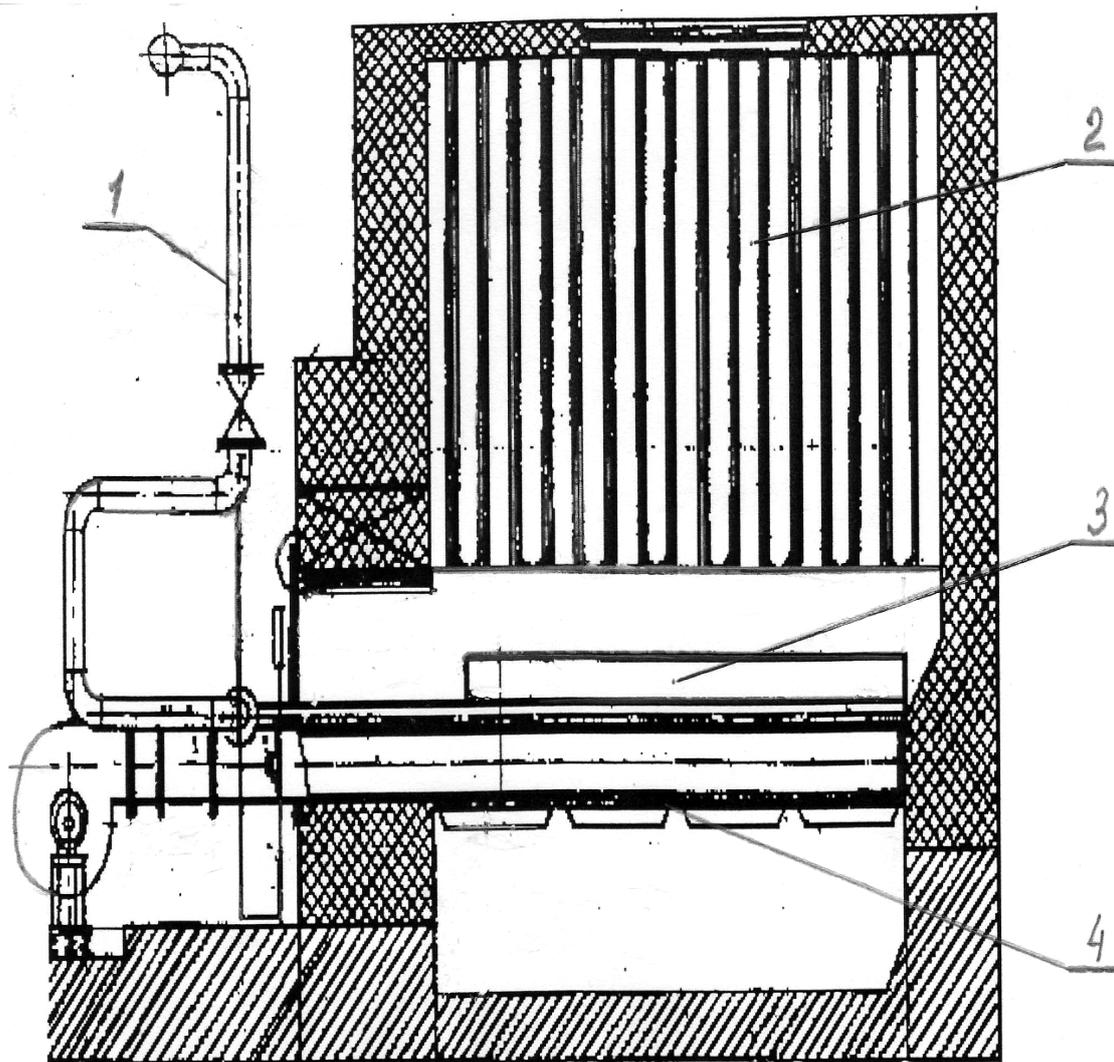


Рис. 27. Схема установки горизонтально-щелевой (подовой) горелки с принудительным дутьем (вариант 1) на чугунном секционном котле «Энергия-3»:

1 – газопровод; 2 – секции котла; 3 – горелка; 4 – колосниковая решетка

Второй вариант – горелка состоит из следующих элементов (рис. 28):

– газовая труба 1 с двумя рядами огневых отверстий 2 под углом атаки  $90^\circ$ :

– огневая щель- стабилизатор 3 из огнеупорной керамики (шамотного кирпича класса А), которая монтируется на колосниковой решетке котла;

– дутьевой центробежный вентилятор 4 с частотным регулированием, который подает необходимый для горения воздух в огневую щель 3.

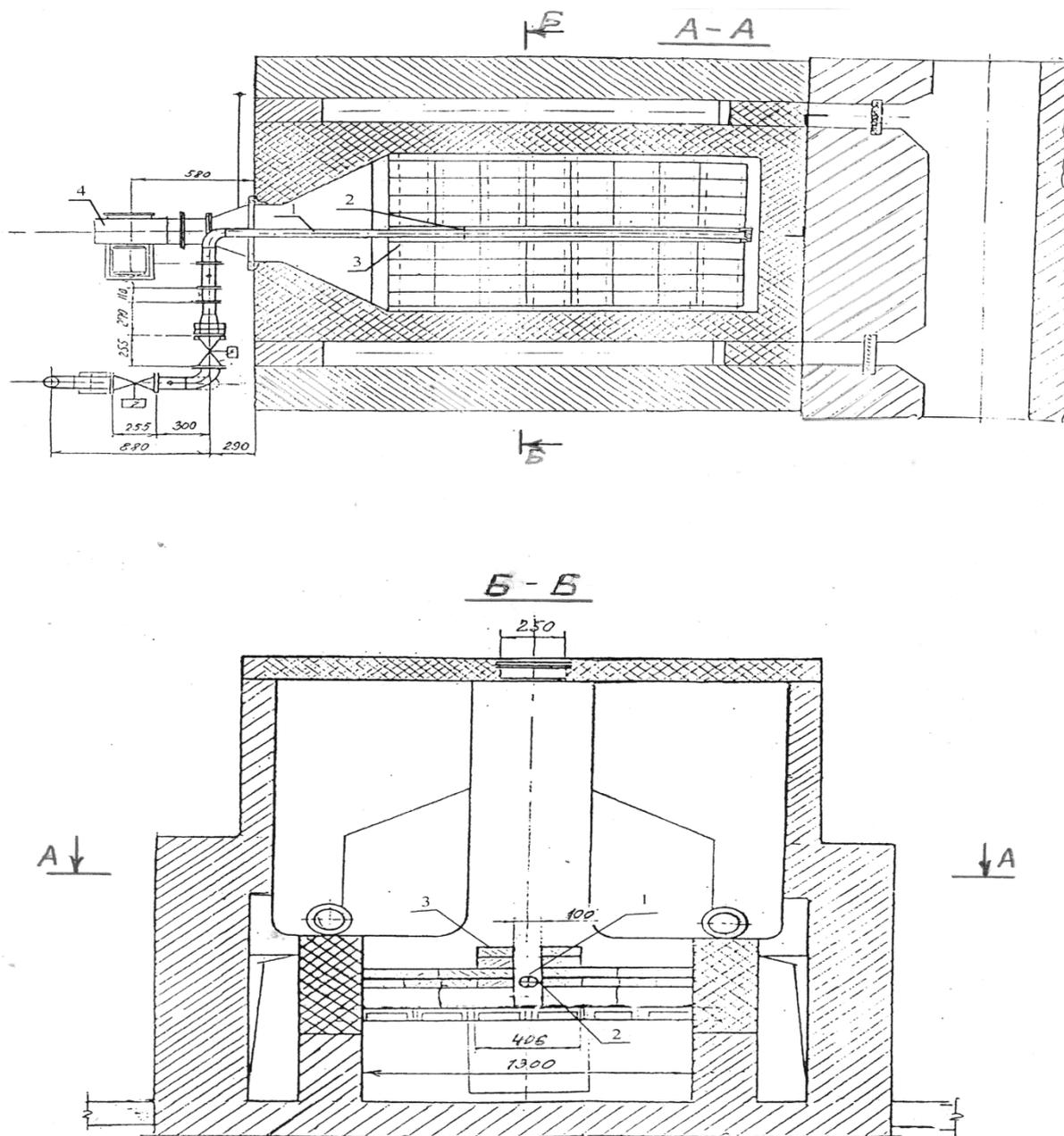


Рис. 28. Схема конструкции горизонтально-щелевой (подовой) горелки с принудительным дутьем (вариант 2):  
 1 – газовая труба; 2 – огневые отверстия; 3 – огневая щель; 4 – вентилятор

Смешение газа с воздухом и начало горения газозвушной смеси осуществляется в огневой щели. Пламя (продолжение горения) заполняет всю высоту топки котла и обеспечивает равномерный теплообмен всех секций котла. Схема установки горелки на котле приведена на рис. 29.

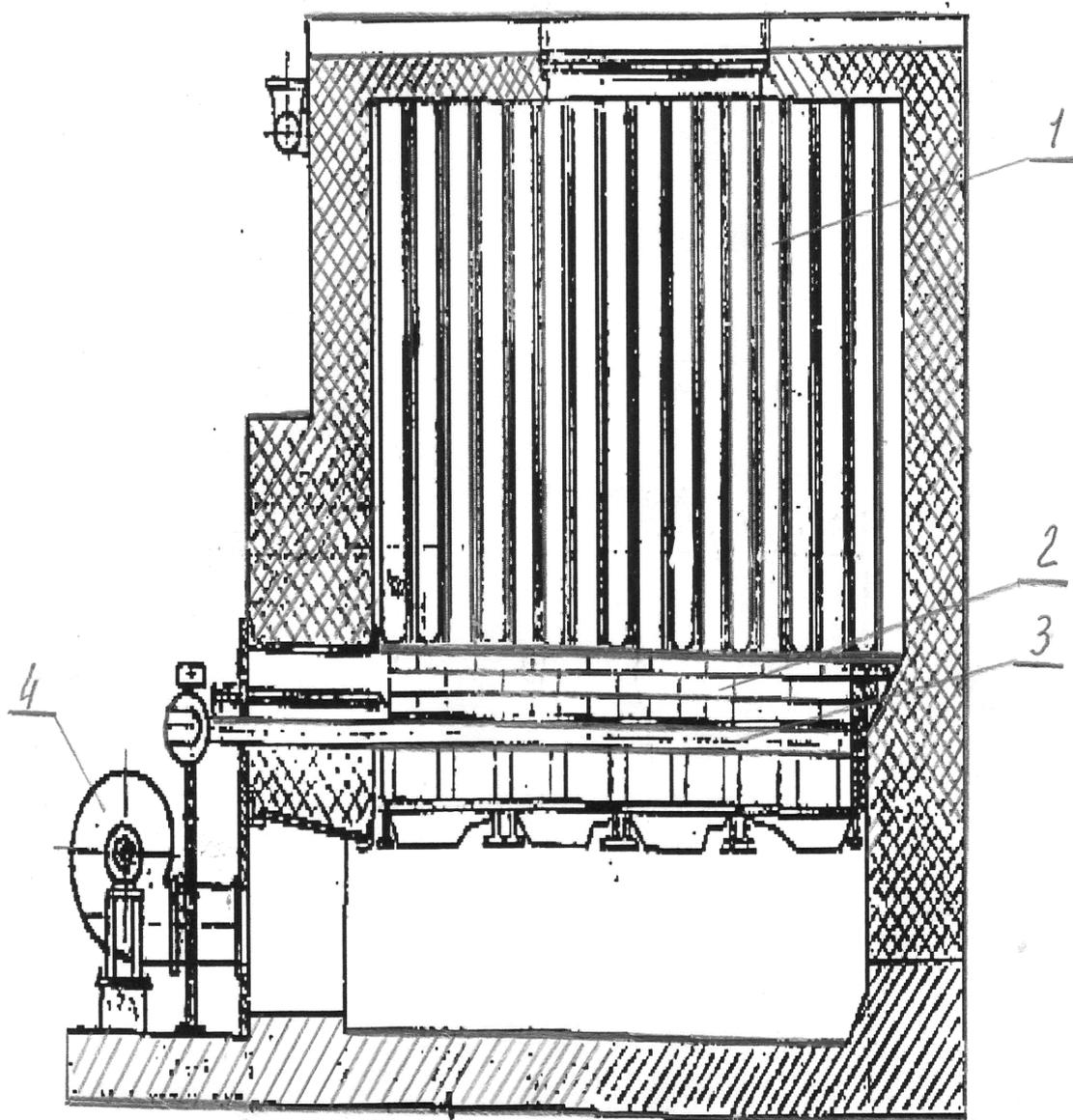


Рис. 29. Схема установки горизонтально-щелевой горелки с принудительным дутьем (вариант 2) на чугунном секционном котле «Энергия-3»:  
 1 – секции котла; 2 – огневая щель; 3 – газовая труба; 4 – вентилятор

Горелка работает следующим образом. Газ низкого давления подается в газовый коллектор 1 и выходит через ряд отверстий 2 в туннель, в который подается воздух при помощи вентилятора 4 через щель воздуховода 3 (во втором варианте – через колосниковую решетку) и омывает газовый коллектор 1, расположенный непосредственно над щелью воздуховода 3 (второй вариант – над колосниковой решеткой). В туннеле происходит перемешивание струек газа с потоком воздуха, и начинается горение. Горелка зажигается запальником. Пламя мгновенно «пробегают» вдоль всего коллектора и устойчиво горит у всех отверстий. Туннель

(состоящий из жаропрочного бетона или шамотного кирпича) раскаляется и обеспечивает надежную стабилизацию факела на всех режимах работы горелки. По всей длине туннеля образуется общий факел, который передает внутренним поверхностям нагрева секций котла теплоту за счет излучения.

Горелка обеспечивает: равномерность распределения температур по длине топки, улучшение смесеобразования, повышение эффективности и качества сжигания газа ( $\alpha=1,10-1,18$ , содержание оксидов азота 90-150 мг/м<sup>3</sup>), уменьшение размеров пламени, простоту в эксплуатации, оснащение автоматикой регулирования и безопасности.

Конструкция горелки защищена патентом №2211403 «Подовая горелка». Сертификационные испытания горелки, установленной на котле «Энергия-3», показали, что она соответствует требованиям ГОСТ 21204-97 и НПБ 252-98. Уровни звукового давления, создаваемые на рабочем месте оператора за столом с телефоном и около щитов управления котлов (на которых установлены новые горелки) соответствуют допустимым по СН 2.2.4/2.1.8.562-96.

Горелки оснащаются отечественной комплексной автоматикой регулирования и безопасности, разработанной и выпускаемой фирмой «Бениш» (г. Санкт-Петербург). Данная система обеспечивает автоматизацию работы котлов путем плавного регулирования тепловой мощности и защиты всех необходимых параметров, согласно требований Ростехнадзора. Она обеспечивает работу котельной в автоматическом режиме без постоянного обслуживающего персонала, с подключением к диспетчерскому пункту.

Опытно-промышленные испытания горелки, установленной на котле «Энергия-3», показали существенные улучшения показателей работы котла (КПД= 91-92 %,  $\alpha=1,10-1,15$ , оксиды азота 90-130 мг/м<sup>3</sup>). Применение такой горелки на чугунных секционных котлах обеспечит повышение КПД на 10-12 % по сравнению с вариантом газооборудования подовыми горелками без дутья.

В институте «Укрниинжпроект» разработаны новые горелки для водогрейных котлов малой и средней мощности. Горелка с полным предварительным смешением (рис.30) представляет собой сварную конструкцию. Газовый коллектор соединен с газовыми патрубками, на которых расположены отверстия для выхода газа. Патрубки проходят через воздушный коллектор, к которому присоединены регистры с соплами. При этом между газовым патрубком и регистром образуется кольцевой зазор.

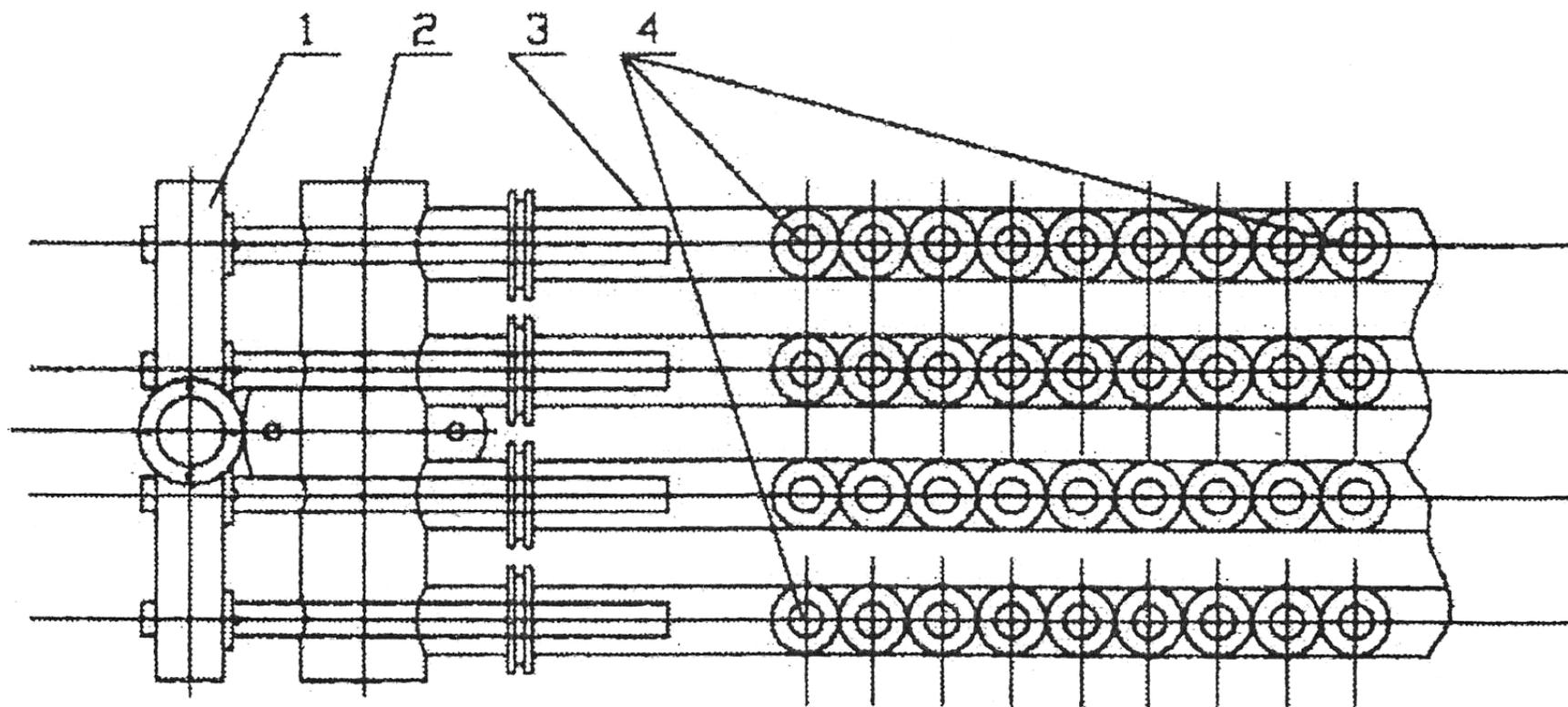


Рис. 30. Горелка газовая подовая с полным предварительным смешением:  
1 – газовый коллектор; 2 – воздушный коллектор; 3 – регистр; 4 – сопла

Природный газ подается в газовый коллектор 1. Воздух подается в воздушный коллектор 2. В начале каждого регистра 3 происходит смешение газа и воздуха, затем газозадушная смесь поступает в зону горения через сопла 4. Горелка создает равномерное поле температур на поду топки. КПД котла повышается примерно на 4 %, благодаря дополнительному излучению поверхности пода. Выход оксидов азота находится на уровне лучших аналогов в мировой практике ( $27 \text{ мг/м}^3$ ).

Горелка прошла государственные испытания и внедрена на ряде теплоснабжающих предприятий Украины.

Горелка частичного предварительного смешения (рис. 31) состоит из следующих основных узлов: воздушной камеры 1; газораспределительной камеры 2; смесителей 3 с отверстиями 6; вставок 7, размещаемых в смесителях, и штуцера для подвода газа 4.

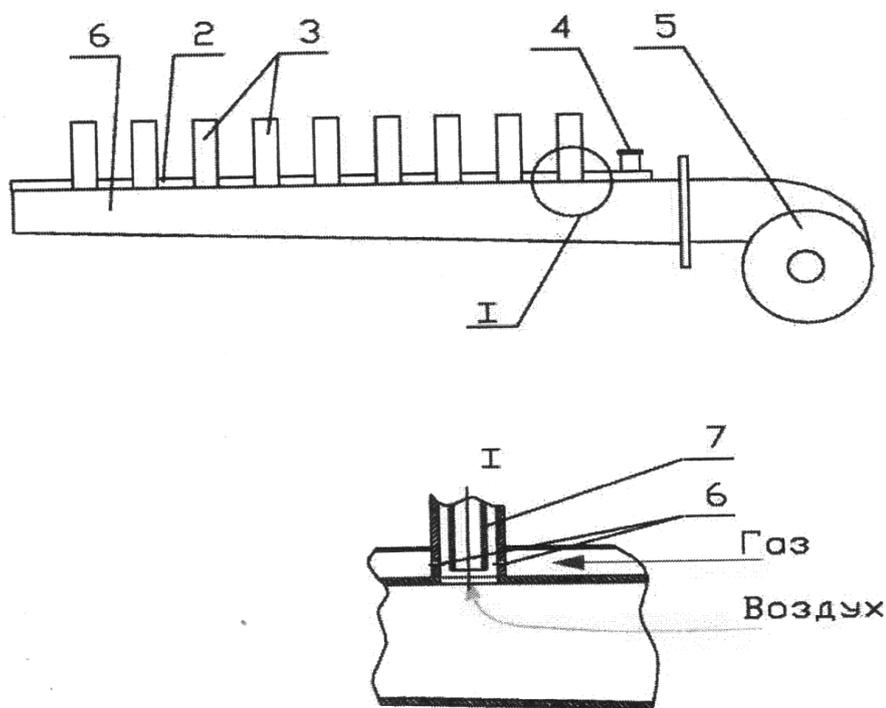


Рис. 31. Горелка газовая многосопловая частичного предварительного смешения:

- 1 – воздушная камера; 2 – газораспределительная камера;
- 3 – смеситель газа и воздуха; 4 – штуцер для подвода газа;
- 5 – вентилятор; 6 – отверстия; 7 – вставка

Горелка работает следующим образом. Природный газ через штуцер поступает в газораспределительную камеру и далее через отверстия в кольцевое пространство, которое создается внутренней поверхностью смесителя и вставкой.

Часть воздуха, необходимого для полного сгорания газа, поступает от вентилятора в кольцевое пространство и смешивается с газом. Другая часть поступает через торцевое отверстие вставки в верхнюю часть смесителя. Оба потока смешиваются в верхней части смесителя. Сгорание газозвушной смеси происходит на выходе из смесителя.

Горелка частичного предварительного смешения прошла государственные испытания и рекомендована для применения на водогрейных котлах малой и средней мощности.

Схема установки блочной горелки стандартного исполнения на чугунном секционном котле приведена на рис. 32. В этом случае наблюдалась значительная тепловая неравномерность по длине топки, что приводило к перегреву отдельных секций и выходу их из строя. Установка дополнительной водоохлаждаемой жаровой трубы позволила снизить тепловую нагрузку секций котла, но надежность и ремонтпригодность данного решения вызывают сомнения.

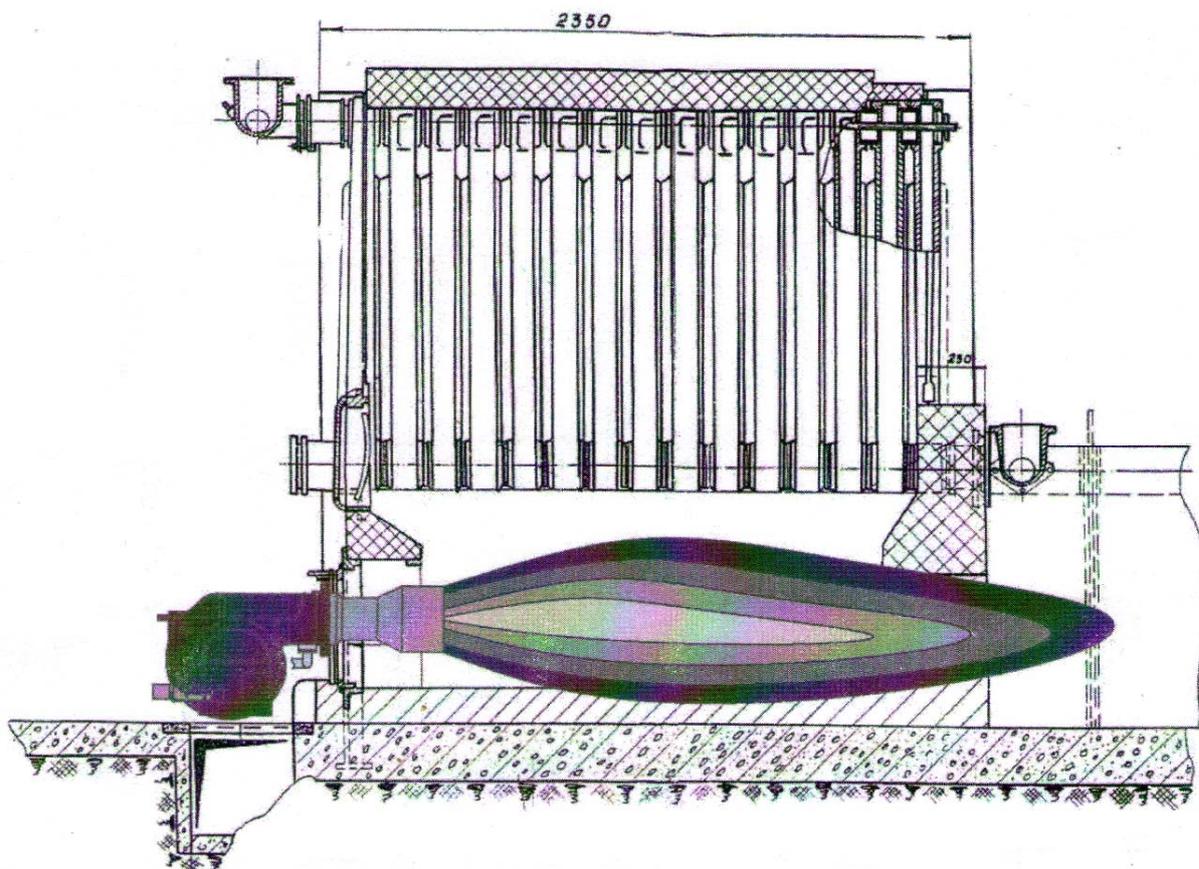


Рис. 32. Схема установки блочной горелки стандартного исполнения на чугунном секционном котле

Компанией «СІВ UNIGAS» (Италия) разработаны горелки типа DRAGO, которые образуют широкое, короткое и равномерно распределенное по объему топки пламя [8]. Установка такой горелки (рис. 33) не

требует проведения серьезных изменений котла, поэтому может быть проведена с минимальными затратами средств и времени. Горелки полностью автоматизированы и имеют два варианта по регулированию: плавно-двухступенчатые и модулирующие. Горелки могут быть укомплектованы системой электронного регулирования процесса горения, что позволит еще больше увеличить КПД котла и максимально автоматизировать процесс работы.

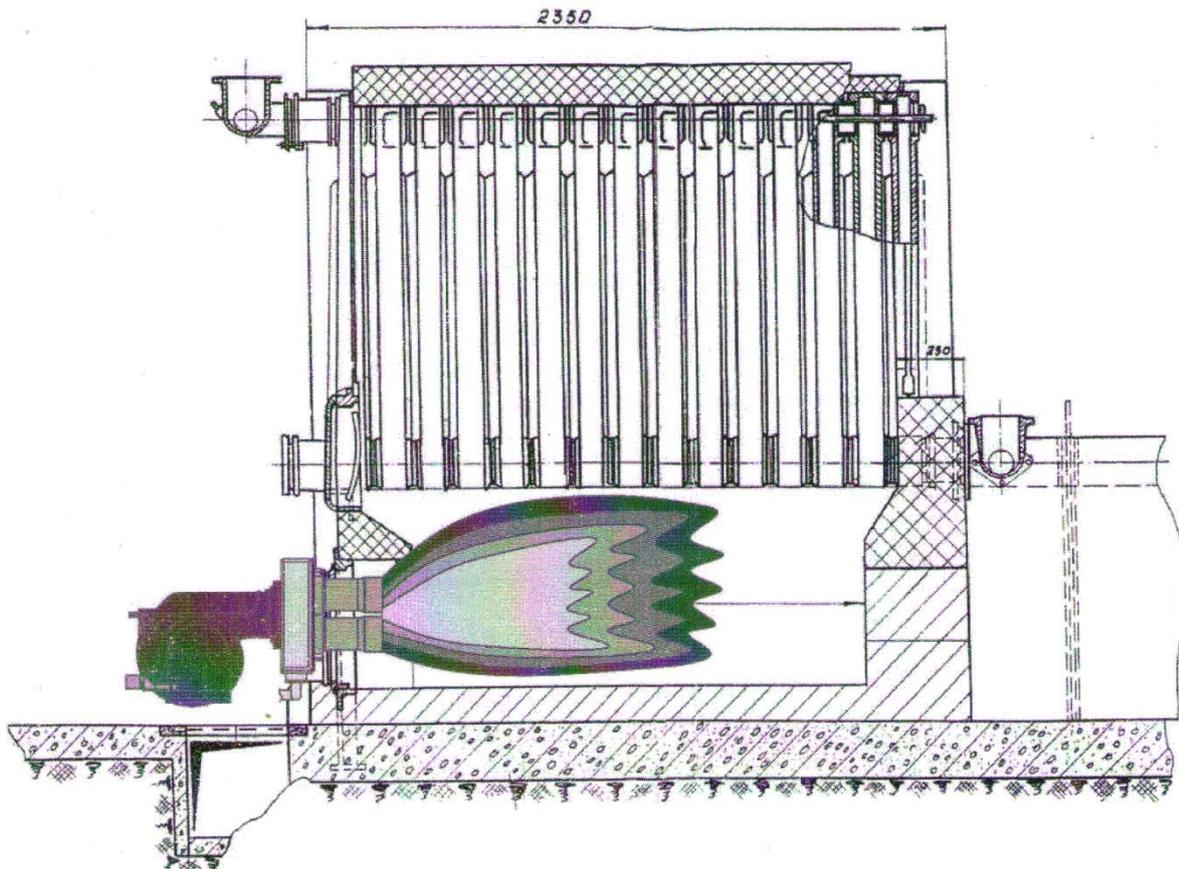


Рис. 33. Схема установки горелки типа DRAGO на чугунном секционном котле

С целью повышения энергоэффективности чугунных секционных котлов в [9] рекомендуется реконструкция топочного пространства с установкой блочной горелки (рис. 34). Реконструкция котла «Универсал-6» с установкой блочной горелки фирмы «Элко» и огнеупорного рассекателя, распределяющего продукты сгорания по объему топки, позволила увеличить КПД почти на 20 % (до реконструкции КПД составлял около 70 %).

Экспертные организации (ЦКТИ им. И.И.Ползунова и ГУ «Петербург-энергонадзор») дали положительно заключение, отметив улучшение экс-

платационных характеристик и соответствие реконструированного котла ГОСТ 10617-83 по энергоэффективности.

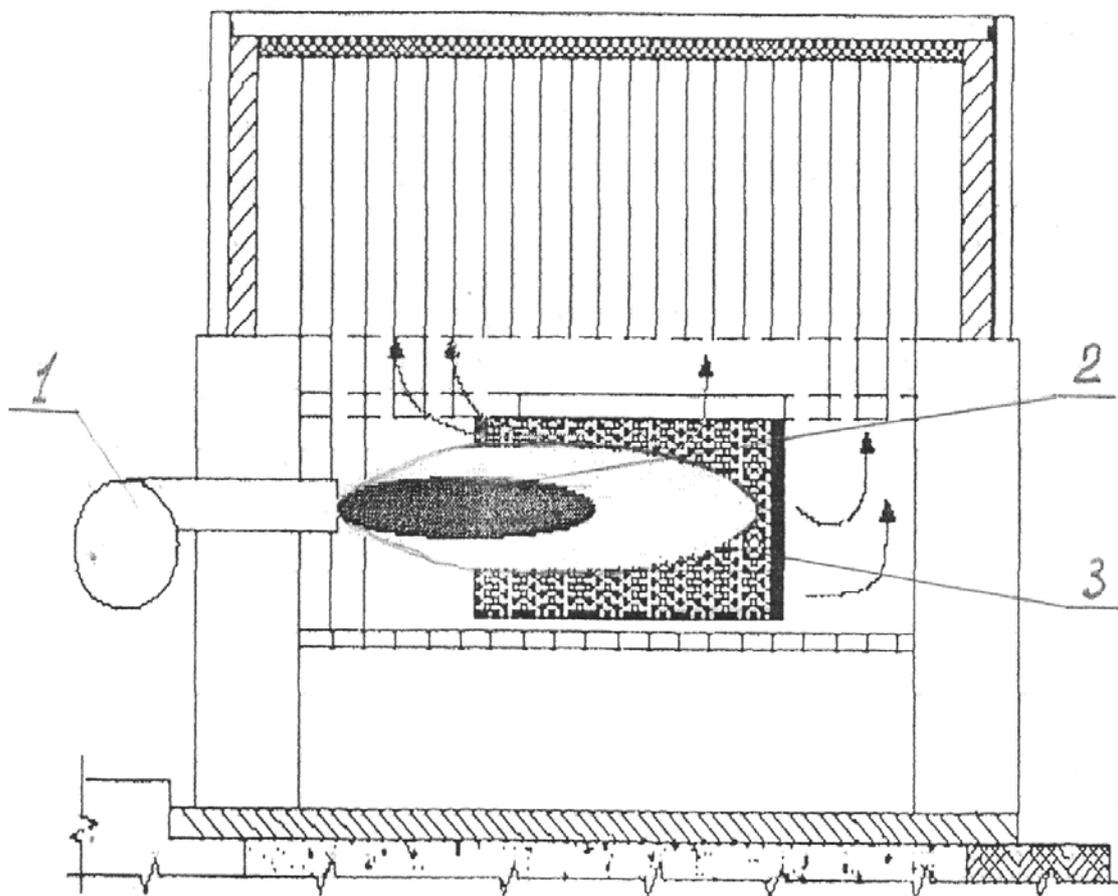


Рис. 34. Схема продольного разреза топки котла «Универсал-6» с реконструированным топочным объемом:  
1 – блочная горелка; 2 – факел; 3 – рассекатель

В институте технической теплофизики НАН Украины были проведены исследования работы котла с вторичным излучателем и без него. Вторичный излучатель в виде оребренного цилиндра устанавливался по оси вентиляторной горелки. Влияние вторичных излучателей на теплообмен в топке было так же выявлено в сравнительных испытаниях котлов ВК-21, ВК-22 и импортных котлов Viessmann и Riello с вентиляторными горелками производства фирмы Weishaupt, Girsh (Германия), Riello (Италия). В качестве вторичных излучателей использовались сплошные и перфорированные металлические цилиндры, расположенные вдоль оси камеры сгорания, стенки которой охлаждались водой.

В результате опытов установлено, что безразмерная температура на выходе из камеры (отношение средней измеренной температуры продуктов сгорания к теоретической) при установке излучателя понизилась на 20 %, а при малых расходах газа даже на 30 % по сравнению с температурой, полученной без излучателя. Установка вторичных излучателей позволяет увеличить теплоотдачу в топке на 10-30 %; уменьшить расход газа в котлах: производительностью до 1 Гкал/ч на 3-5 %; производительность 1-6 Гкал/ч на 1-3 %; снизить температуру уходящих газов на 60-90 °С; снизить образование оксидов азота на 20-30 %; повысить надежность эксплуатации и улучшить срок службы котлов (на 10-20 % или 3-5 лет) за счет снижения максимальных температур в зоне горения на 30-70°. Успешная промышленная эксплуатация водогрейных котлов с вторичными излучателями показала целесообразность подобной модернизации. Окупаемость 1-2 года в зависимости от типа котла.

Чугунные секционные котлы КВа-Г продолжают эксплуатироваться в России. Как правило, они оснащены двухпозиционной горелкой Л1 (большое горение-100 %, малое горение-40 % мощности) и блоком автоматики. Горелочный блок морально устарел и доставляет большие сложности в ремонте и обслуживании.

В одной из котельных с двумя котлами КВа по результатам обследования было принято решение о замене горелок и арматурных групп, а также автоматики управления [10]. В качестве замены была предложена горелка ГБЛ-1,2Д с встроенной автоматикой управления МГ-ГБЛ и арматурной группой. В комплект поставки горелки также входят датчики для контроля котловых параметров: датчик температуры – для контроля и регулирования температуры воды; датчик давления воды – для контроля; датчик разрежения в топке – для контроля и регулирования. Наличие в комплекте поставки всех необходимых датчиков обеспечило быстрый монтаж и наладку всего комплекта оборудования на котле. Демонтаж старого оборудования и установка нового произведены за два дня. Опробование, наладка и настройка горения заняли один рабочий день.

Сравнение режимных карт до и после замены горелки показало увеличение КПД котла более, чем на 10 % и улучшение качества сгорания газового топлива. Использование автоматизированной горелки, соответствующей газовой арматуры с контролем герметичности и датчиков, контролирующих параметры котла, отвечает всех современным требованиям безопасности. Работа в автоматическом режиме регулирования исключила вмешательство в работу операторов, что предотвращает ошибки, связанные с «человеческим фактором». Подтвердилась высокая надежность работы горелки в условиях нестабильного электрического питания и присоединительного давления газа. Замена горелки позволяет продлить эксплуатацию котлов КВа-Г (Факел-Г).

Полученные данные подтвердили положительный опыт применения горелок ГБЛ на котлах «Минск-1».

Одной из конструктивных особенностей котлов КВГ и ТВГ является применение подовых горелок для сжигания газа [11]. К их недостаткам стоит отнести необходимость обеспечения завышенного расхода воздуха ( $\alpha \geq 2,5$ ) и его зависимость от разрежения в топке. Значительная длина факела требует соответствующей высоты топки. При недостаточной высоте факел касается поверхностей нагрева или затягивается в газоходы. Также горелки склонны к переходу в режим работы с повышенным химическим недожогом, что происходит при отсутствии постоянного контроля за чистотой горелок и параметрами их работы.

Для решения вышеуказанных проблем и повышения эффективности работы котла КВГ-6,5 была выполнена его модернизация в следующем составе: конструкция котла не изменилась, дымосос остался тот же, но горелка и автоматика были заменены на современные. Для обеспечения плавного регулирования работы электропривода дымососа был применен частотный преобразователь. В результате стало возможным обеспечить работу котла от момента нажатия кнопки «пуск» до остановки нажатием кнопки «стоп» в полностью автоматическом режиме.

Выбор горелки для узкой топки котла оказался не простой задачей. Применение микродиффузионных горелок с круглым или квадратным раструбом для такой топки оказалось невозможным, поэтому было разработано специальное горелочное устройство на базе горелки МДГГ-250 с вытянутым по высоте и сжатым по ширине топки раструбом. Это позволяет получить факел, не касающийся экранов котла и напоминающий по форме факел подовой горелки. На котле были установлены три горелки новой конструкции. Для снижения теплового напряжения на заднем экране топки перед ним установили стенку из огнеупорного кирпича (толщиной 1/2 кирпича).

Применение новых горелок позволило уменьшить коэффициент избытка воздуха в топке до  $\alpha = 1,08-1,14$ . Как показали испытания, температура поверхности обмуровки котла КВГ-6,5 осталась прежней. Температура уходящих газов составила 87-143 °С в зависимости от нагрузки. По данным эксплуатации модернизированного котла КПД увеличился примерно на 10 %.

В конструкции котла нет системы воздухоподогрева. Предлагается организовать забор воздуха и подачу его в воздухоподогреватель на всасе дымососа. Подогретый воздух следует направить в три существующих канала под топкой котла для дальнейшего подогрева и охлаждения пода. Движение воздуха в предлагаемой схеме воздухоподогрева обеспечат вентиляторы горелок за счет разрежения на всасывающей патрубке. Это не

только обеспечит дополнительную экономию, но и повысит температуру горения, устойчивость и качество сжигания газового топлива.

Струйно-нишевая технология сжигания испытана на котлах «Надточия», НИИСТУ-5, ТВГ, КВГ и других [12]. Она обеспечивает:

- равномерность температурного поля топочного пространства, соответственно, равномерность тепловосприятия экранными поверхностями, что ведет к недопущению локальных перегревов и пережогов;

- автоматичность к изменению тепловой мощности температурного поля продуктов сгорания. Данное требование обусловлено необходимостью длительной работы котла на нагрузках существенно меньших номинальных, с сохранением на номинальном или даже большем уровне основных теплотехнических показателей работы;

- автоматичность к изменению давления продуктов сгорания в топочном пространстве. Выполнение данного требования делает возможным существенное повышение эффективности работы котла на малых нагрузках путем полного отключения тягодутьевых средств;

- возможность изменения в широком диапазоне коэффициента избытка воздуха, а также соотношения составляющих конвективного и радиационного тепловых потоков от продуктов сгорания к поверхности нагрева.

В струйно-нишевой системе (рис. 35) в широких пределах изменения режимных факторов (скорость газа, воздуха, давления, температуры) реализуются устойчивые и легкоуправляемые вихревые структуры с высокой интенсивностью турбулентности потоков горючего и окислителя, а также зоны обратных токов, обеспечивающие качественное смесеобразование с необходимым уровнем горючей концентрации и надежную аэродинамическую стабилизацию горения. Объем вихрей на несколько порядков меньше, чем у традиционных вихревых горелок. Поэтому их влияние на пульсации в топке котла, а также эрозионное влияние на амбразуру и другие элементы котла относительно мало. Малый объем вихрей позволяет проводить пуск и эксплуатацию горелок (рис.36) с малым расходом газа, что обеспечивает безопасность пуска.

Улучшение смесительных свойств горелок повышает надежность работы при предельно малых коэффициентах избытка воздуха, и, следовательно, при повышенных значениях средней температуры факела в топке. Это позволяет увеличить тепловосприятие радиационной части и приводит к снижению температуры уходящих газов. Повышение среднего уровня температуры, её равномерности в топке вследствие оптимального смесеобразования, сопровождается значительным уменьшением неравномерности тепловых потоков, что приводит к повышению надежности работы котла в целом.

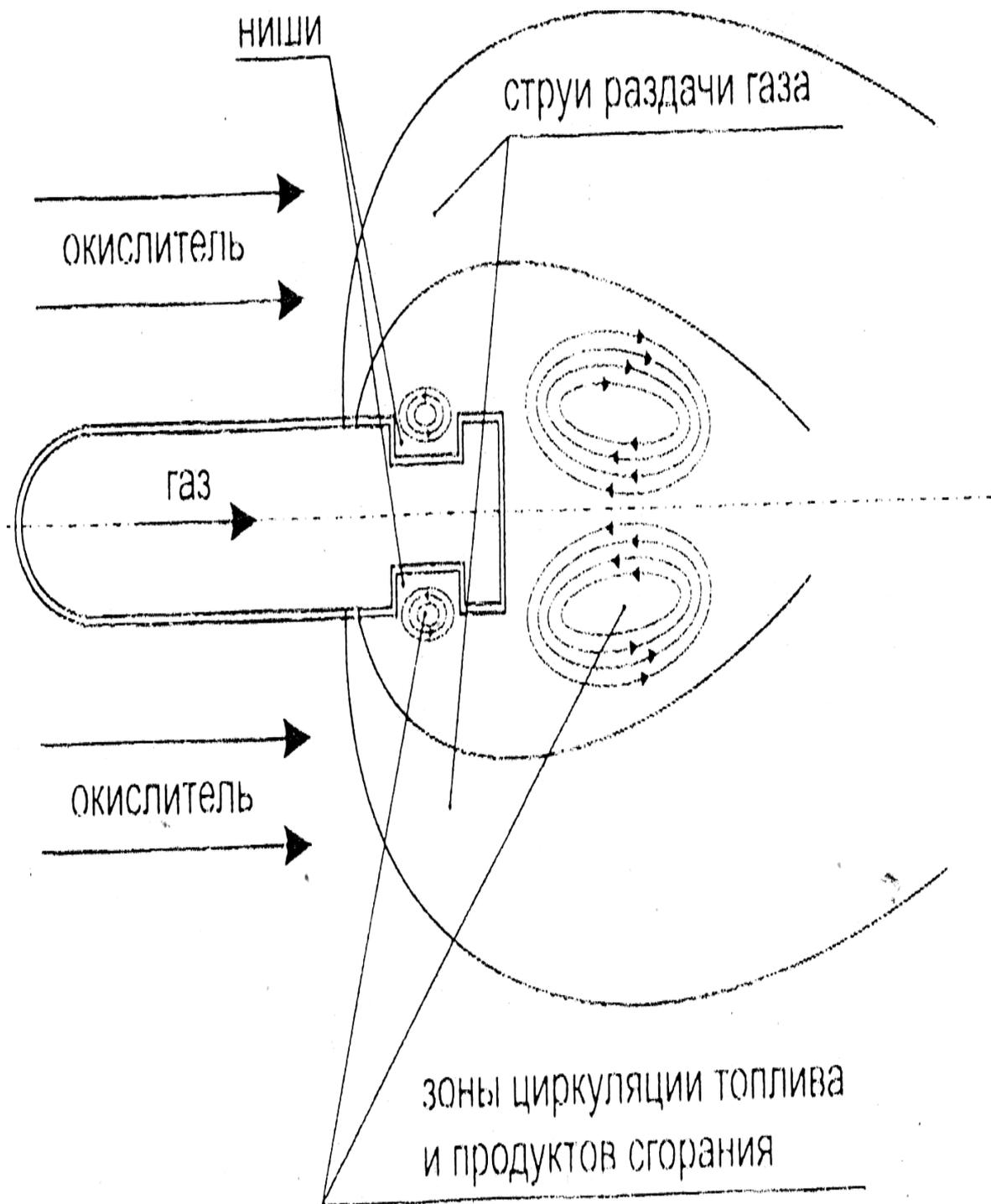


Рис. 35. Струйно-нишевая схема рабочего процесса горелочного устройства

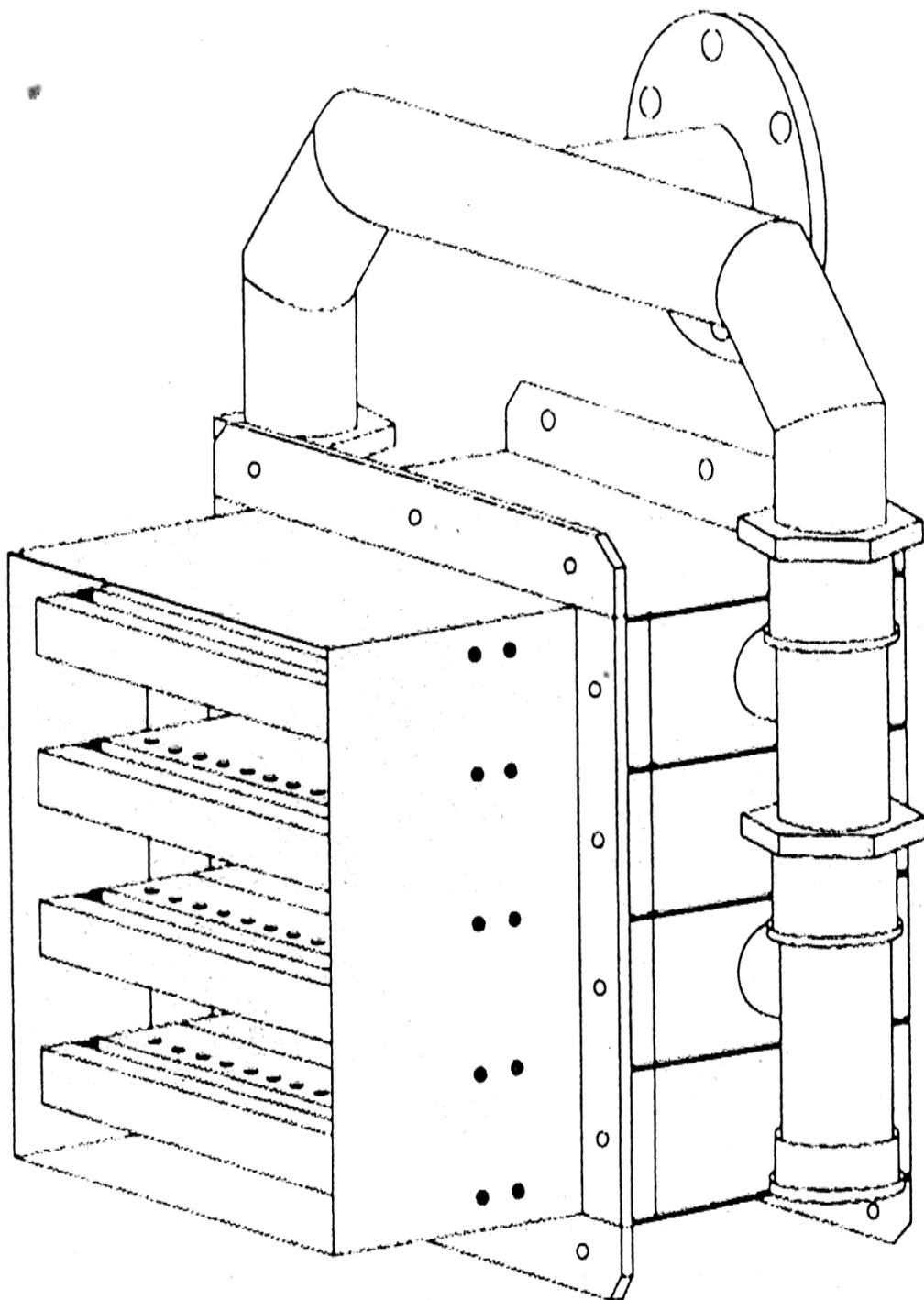


Рис. 36. Струйно-нишевая горелка блочно-модульного типа

Упорядоченная структура течения горючего и окислителя в горелках со струйно-нишевой системой обеспечивает самоохлаждение элементов горелок за счет подогрева воздуха и газа. Малое гидравлическое сопротивление по трактам горючего и окислителя позволяет значительно снизить давление газа и воздуха при эксплуатации горелок.

Таким образом, струйно-нишевая технология сжигания газа позволяет оптимально вписаться в сложную аэротермохимическую схему огнетехнического объекта, в частности, водогрейного котла.

### 1.3. Интенсификация лучистого теплообмена

Одним из мероприятий повышения КПД водогрейных котлов является интенсификация лучистого теплообмена в топке между продуктами сгорания и экранными поверхностями путем нанесения теплопоглощающего покрытия на экранные поверхности. Покрытие должно иметь следующие свойства: большую поглощательную способность, малое термическое сопротивление, коррозионную стойкость, термостойкость.

ОАО «Укрнииинжпроект» в процессе исследований изготовлено и испытано покрытие, в котором в качестве связующего использовался кремнеорганический лак, а в качестве наполнителей – сажа марки К-354, оксид железа с дисперсным составом 10-63 мкм и алюминиевая пудра ПАП-1. Испытания подтвердили, что оптимальным является состав, содержащий кремнеорганический лак КО-075 (80-90 масс. %), а в качестве наполнителя смесь (10-20 масс. %): сажа (43-55 масс. %), оксид железа (37-50 масс. %), алюминиевая пудра (5-10 масс. %).

В результате испытания покрытия температура уходящих газов снижается в среднем на 10 °С, КПД котла повышается на 1 %.

## 2. МОДЕРНИЗАЦИЯ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

### 2.1. Модернизация газооборудования

Информационный поиск показал, что в последние годы наметилась тенденция по замене существующих горелок на котлах ДКВР, ДЕ, Е и др. на современные отечественного и импортного производства. Это объясняется тем, что «родные» горелки не обеспечивают современные требования по энергоэффективности, охране окружающей среды, автоматизации и надежности работы котлов.

Характерной особенностью указанных котлов являются короткие топки. Поэтому установка длиннофакельных горелок может привести к прожиганию задней стенки котла, затягиванию факела в конвективные поверхности нагрева, увеличению уровня химнедожога, неравномерной тепловой нагрузке поверхностей в топке и т.д.

Серийные импортные горелки, как правило, являются длиннофакельными, так как разработаны применительно к наддувным жаротрубным котлам. Поэтому объективно требовалась их модернизация с целью установки на котлах с короткими топками, работающими под разрежением, при равномерном распределении факела по объему.

Компания «Weishaupt» (Германия) совместно с Бийским котельным заводом разработала горелки (исполнение SF) с коротким факелом для всех типов котлов, изготавливаемых заводом [13]. Схема установки горелки G5 на котле Е-1,0-0,9 приведена на рис. 37 [14], а установка горелок G9 на котле ДЕ-4 и G11 на котле ДКВР-10 показана на рис. 38, 39. Подбор горелок к котлам следует производить согласно табл. 2.

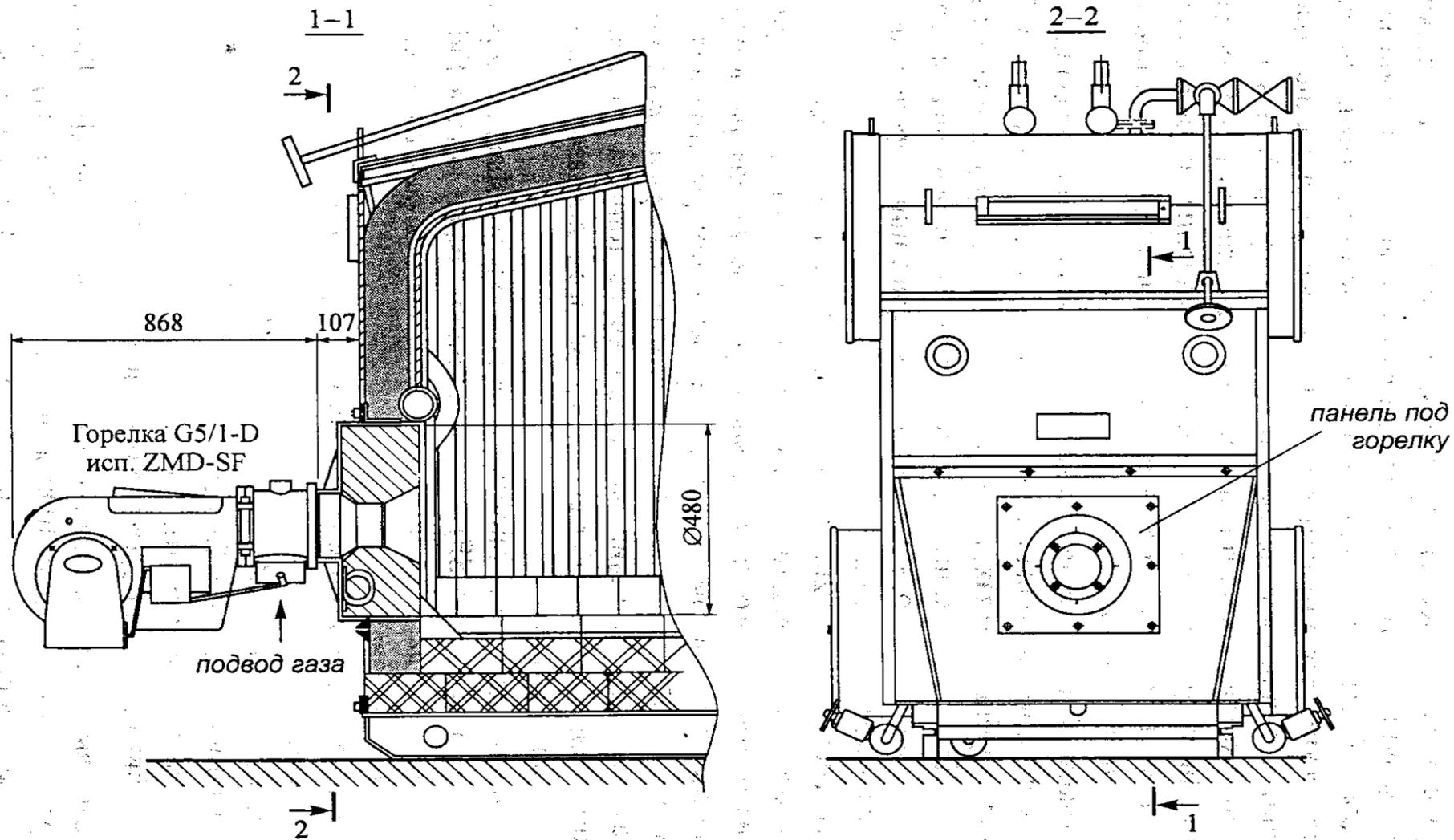


Рис. 37. Схема установки горелки G5 на котле Е-1,0-0,9

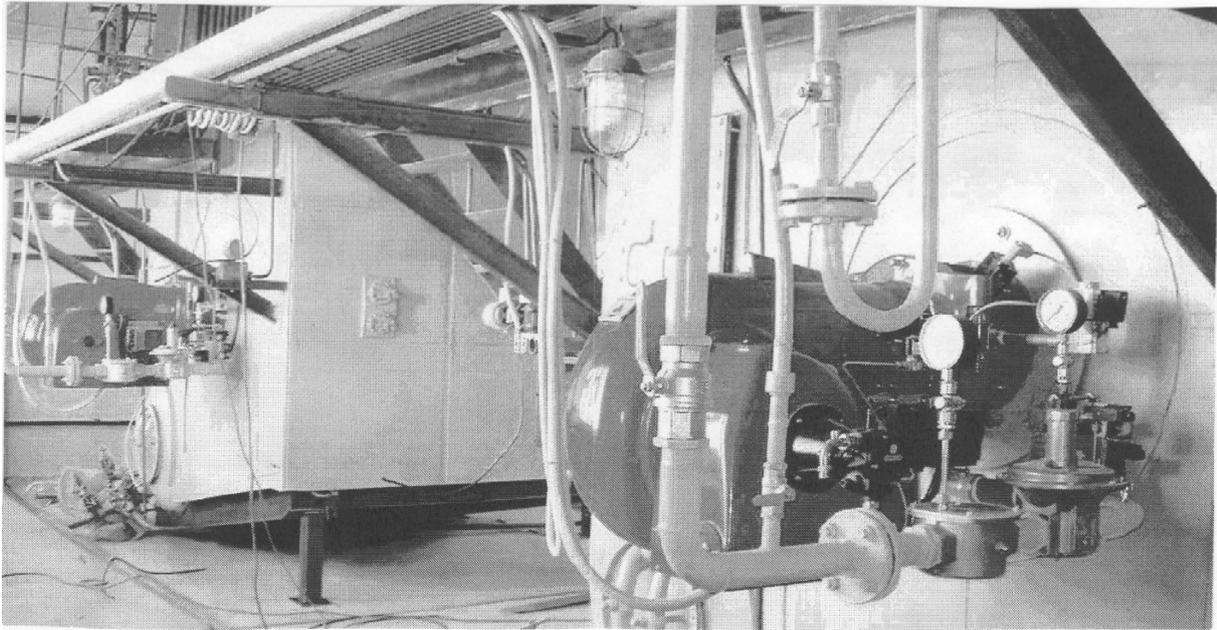


Рис. 38. Установка горелки G9 на котле ДЕ-4

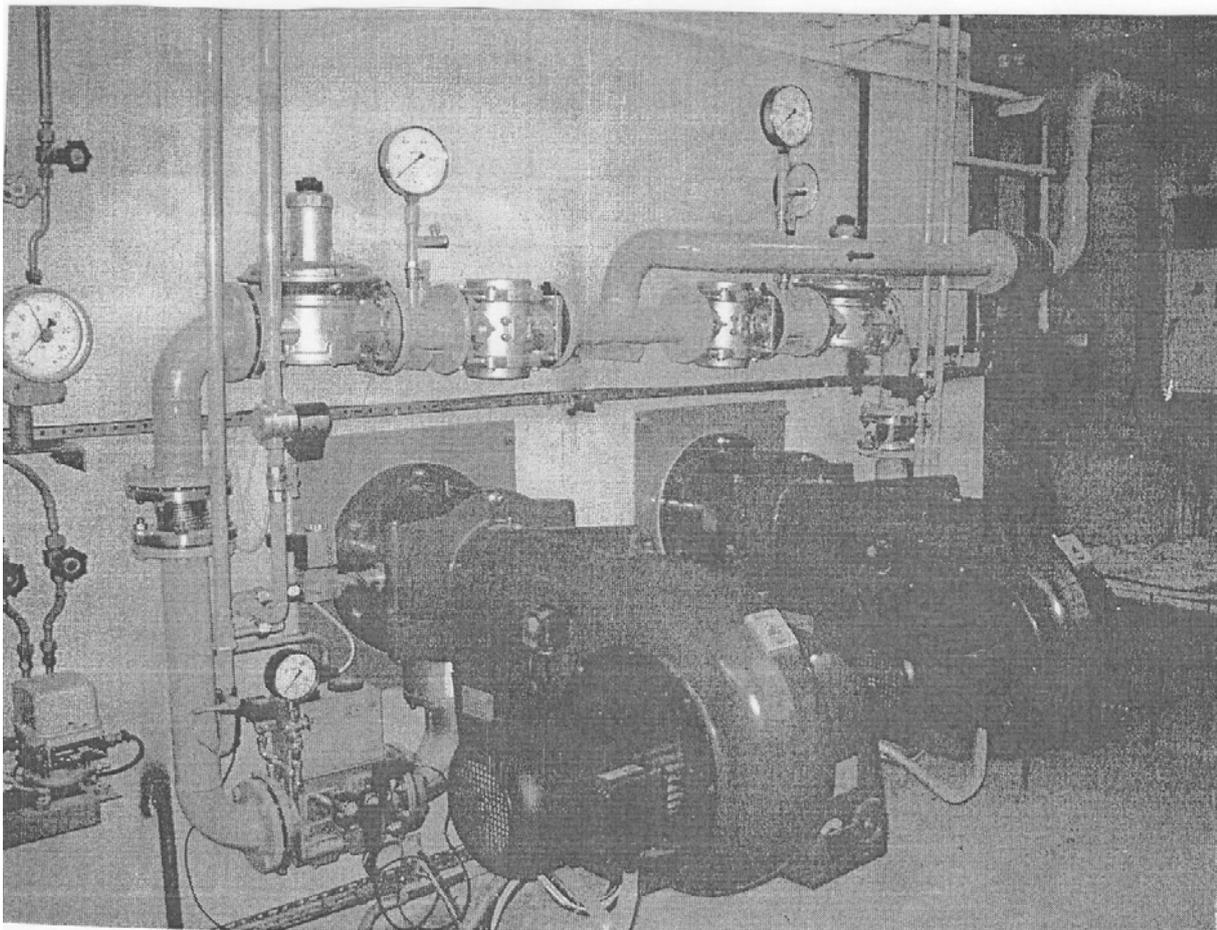


Рис. 39. Установка горелок G11 на котле ДКВР-10

Таблица 2

## Подбор горелок к водотрубным котлам

Котел БИКЗ	Е	ДЕ	ДЕ	ДЕ	ДЕ		ДЕ
Типоразмер котла	1,0-0,9	1,0-1,4	4-14ГМ	6,5-14ГМ	10-14ГМ		16-14ГМ
Мощность котла, кВт	650	650	2600	4425	6500		10400
Кол-во горелок на котле	1	1	1	1	1	1	1
Среда	Насыщенный пар		Насыщенный пар				
КПД, %	90	90	90	90	90		90
Давление в камере сгорания, мбар	-0,2 до -0,5	-0,2 до -0,5	-0,2	-0,2	-0,2		-0,2
Размеры камеры сгорания, мм							
Длина	1250	1720	1930	2700	4130		5420
Ширина	1042	1075	1770	1770	1770		1770
Высота	1320	1470	2400	2400	2400		2400
Тип горелки	G5/1 1SF	G5/1 1SF	G9/1 1SF	G50/2 1SF	G70/1 1SF	G70/2 1SF	WKG70/2 1SF
Мощность горелки, кВт	722	722	2889	4900	7222	7222	11556

Окончание табл. 2

Котел БИКЗ	ДЕ	ДКВр		ДКВр		ДКВр		ДКВр		ДКВр	
Типоразмер котла	25-14ГМ	2,5-13ГМ		4-13ГМ		6,5-13ГМ		10-13ГМ		20-13ГМ	
Мощность котла, кВт	16250	1625		2600		4475		6500		13000	
Кол-во горелок на котле	1	1	2	1	2	2		1	2	2	
Среда	Насыщенный пар	Насыщенный пар		Насыщенный пар		Насыщенный пар		Насыщенный пар		Насыщенный пар	
КПД, %	90	90		90		91		91		92	
Давление в камере сгорания, мбар	-0,2	-0,2		-0,2		-0,2		-0,2		-0,2	
Размеры камеры сгорания, мм											
Длина	6960	1600		2165		2400		2650		3600	
Ширина	1770	2050		2050		2680		2680		2680	
Высота	2400	3250		3250		3250		5200		5200	
Тип горелки	WKG 80/3 1SF	G8 1SF	G5/1 1SF	G9 1 SF	G8 1SF	G9 1SF		G9 1SF	G50/2 1SF	G70/1 1SF	
Мощность горелки, кВт	18000	1806	903	2890	1445	2459		3200	3572	7065	

Применение короткофакельных горелок на котлах Бийского завода дает:

- увеличение КПД на 2,5-3 % за счет снижения потерь теплоты с уходящими газами и с химнедожогом;
- применение систем плавного частотного и кислородного регулирования;
- увеличение диапазона регулирования (в среднем 1:7);
- равномерное распределение факела по всей камере сгорания котла;
- максимум теплового излучения в топке котла составляет 105-110 % от среднего, что существенно снижает требования к циркуляционному контуру котла;
- снижение содержания оксидов азота в продуктах сгорания в 1,5-2 раза, так как максимальная температура в «ядре» горения 1350-1480°C;
- повышение уровня автоматизации за счет применения систем микропроцессорного регулирования, поставки горелок со шкафами управления и безопасности котла, возможности передачи данных по цифровым каналам связи;
- удобство обслуживания и эксплуатации за счет блочного исполнения горелок (в блок входят все элементы, необходимые для подготовки и подачи топлива в зону горения, приборы автоматического регулирования процессом горения и аварийной защиты).

Специалисты компании «СІВ UNIGAS» также решали проблему адаптации своих горелок к котлам российского производства [8]. Отмечалось, что топки водотрубных котлов достаточно короткие для корректной работы горелок стандартного исполнения (рис. 40). Поэтому были разработаны короткофакельные горелки типа DRAGO, которые образуют широкое, короткое и равномерно распределенное по объему топки пламя (рис. 41, 42).

Это обусловлено применением четырех форсунок с целью формирования геометрии факела.

На котле устанавливается одна горелка, независимо от того сколько горелок стояло ранее. Выход на максимальную мощность горелки осуществляется постепенно, чтобы предотвратить напряжение на обмуровку котлов. В электрощите устанавливается автомат горения производства «Siemens», на котором задаются пределы регулирования давления пара или температуры воды, если котел работает в водогрейном режиме, а в котле устанавливается соответствующий датчик, посылающий сигнал на этот прибор. В результате горелка способна автоматически поддерживать заданные при пуско-наладочных работах настройки.

При установке горелки на отечественный котел делается проект привязки горелки к котлу и к котельной автоматике. Работа горелки, имеющей свой вентилятор, должна быть скоординирована с работой дымососа.

Применение горелок согласовано на большинстве котлов российских производителей.

ООО «Энерго Девелопмент» (г. Реутов Московской области) совместно с итальянской фирмой «Industrial Burnes Solutions» реализовала пилотный проект по переводу котла ДКВР-20-13 с мазута на газовое топливо [15]. Две горелки ГМГ были заменены горелками IBSR 6М с изменяемой геометрией факела и горелочной автоматикой фирмы «Siemens» (Германия).

При проведении работ выполнен ряд требований заказчика, в том числе сохранение двухгорелочной компоновки фронта котла. Фронтной экран также не переделывался. Отметим здесь, что проект переоснащения отечественных водотрубных котлов горелками IBS предусматривает и такой вариант – с компоновкой одной горелкой и переделкой фронта котла.

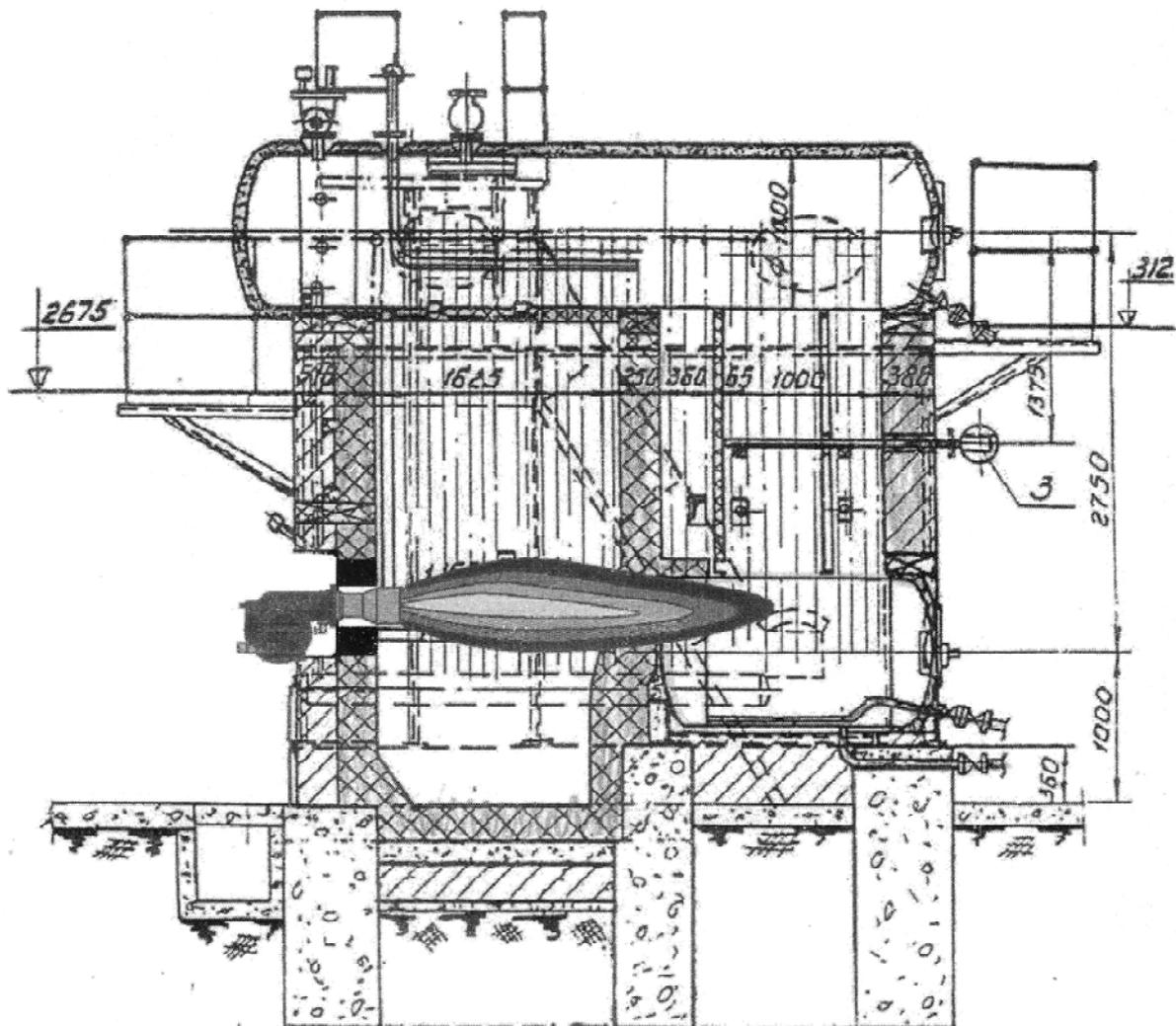


Рис. 40. Схема установки горелки стандартного исполнения на котле ДКВР

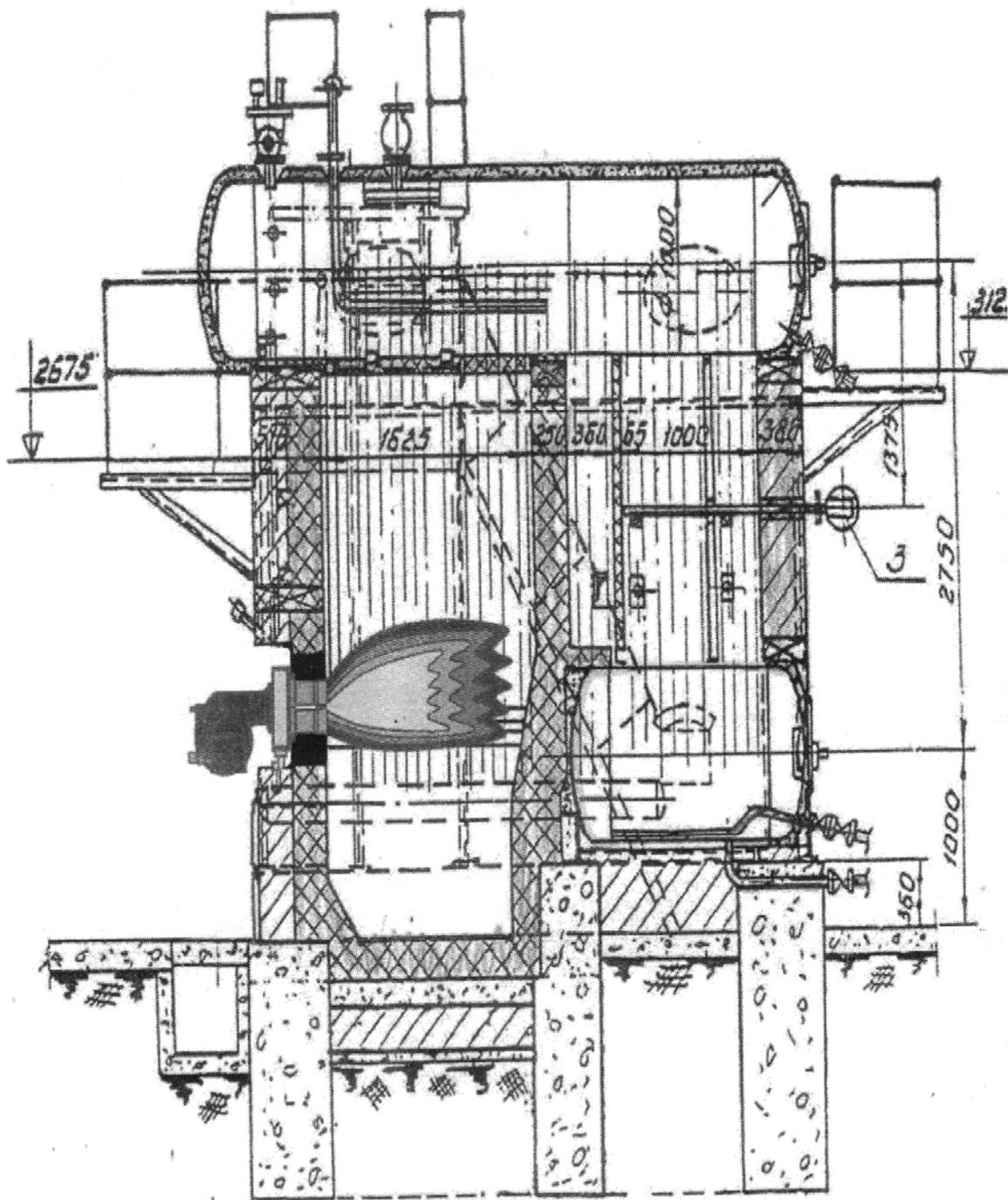


Рис. 41. Схема установки короткофакельной горелки типа DRAGO на котле ДКВР

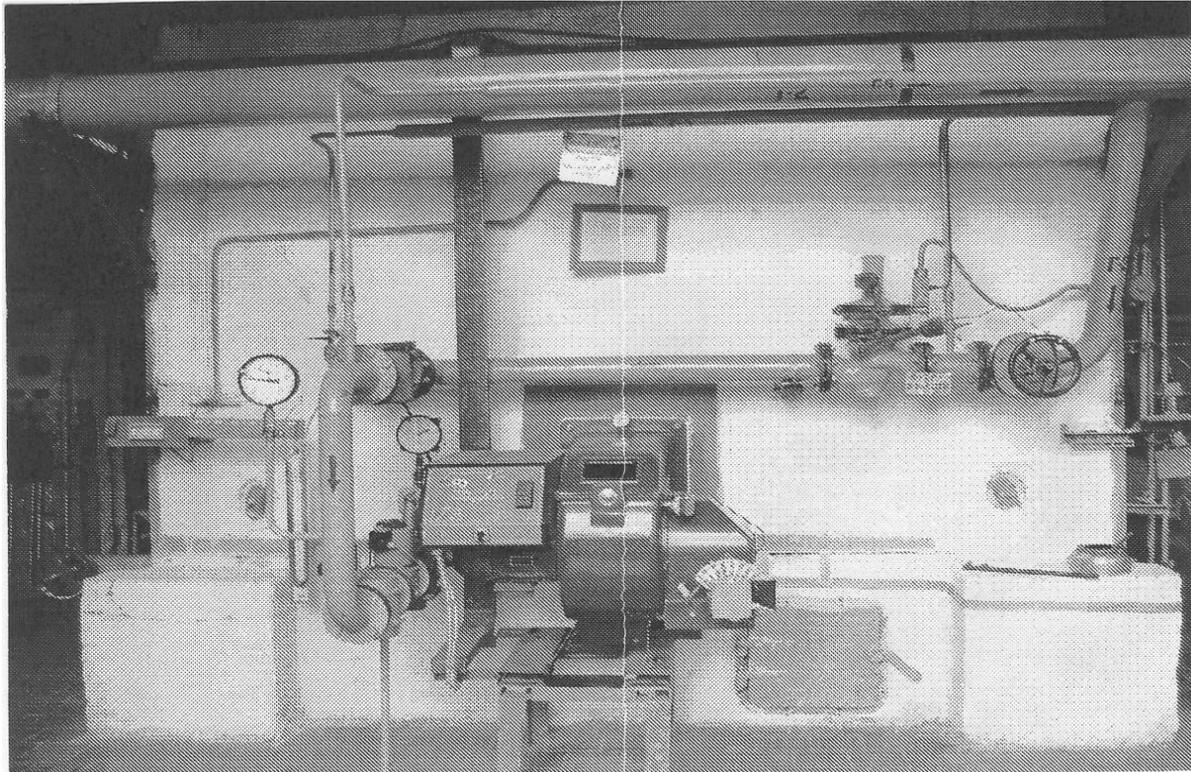


Рис. 42. Установка горелки типа DRAGO на котле ДКВР-10

В результате:

- КПД котла увеличился до 93 %;
- содержание оксида углерода в продуктах сгорания снизилось до 3 ppm;
- содержание оксидов азота снизилось до 63 ppm (при номинальной нагрузке);
- уровень автоматизации работы котла был повышен до максимально возможного;
- эксплуатационные расходы уменьшились приблизительно в 2,5 раза;
- срок окупаемости проекта 1,5-2 года.

ООО «Норд Крафт» (г. Санкт-Петербург) был выполнен проект реконструкции двух котлов ДЕ-16-14ГМ в котельной спиртзавода (г. Буинск, Татарстан) [16]. Вместо горелок ГМ-10 были установлены горелки ВГЕС 1000 фирмы «Ray International» (Германия) в комплекте с автоматикой АСУ ТП «Nordvision», собственной разработки проектировщика. Управление котлоагрегатами выведено в диспетчерскую котельной.

Реконструкция позволила:

- реализовать программу полностью автоматической работы котла, в том числе режима пуска котла из холодного состояния до рабочих пара-

метров и автоматический переход с основного топлива (газ) на резервное (печное топливо);

- работу горелок в диапазоне регулирования 1:10;
- обеспечить экономию средств заказчика за счет сокращения энергопотребления и уменьшения обслуживающего персонала.

ООО «Норд Крафт» имеет большой опыт по модернизации газооборудования котлов ДКВР, ДЕ, ПТВМ, КВГМ как по отдельным проектам, так и в составе полной реконструкции котельной.

## 2.2. Направления совершенствования газооборудования

Отечественные и зарубежные производители разрабатывают и внедряют новые решения по энергосбережению и повышению уровня безопасности газооборудования. Рассмотрим основные из них, применяемые ОАО «Завод «Старорусприбор», фирмами «Weishaupt», «Elco», «CIB UNIGAS» и другими производителями.

Частотное регулирование. С помощью частотного преобразователя можно регулировать скорость вращения двигателя вентилятора (дымососа). Управление частотным преобразователем осуществляется напрямую менеджером горения. В сочетании с частотным управлением на частичной нагрузке электрическая потребляемая мощность двигателя вентилятора (дымососа) значительно снижается (рис. 43).

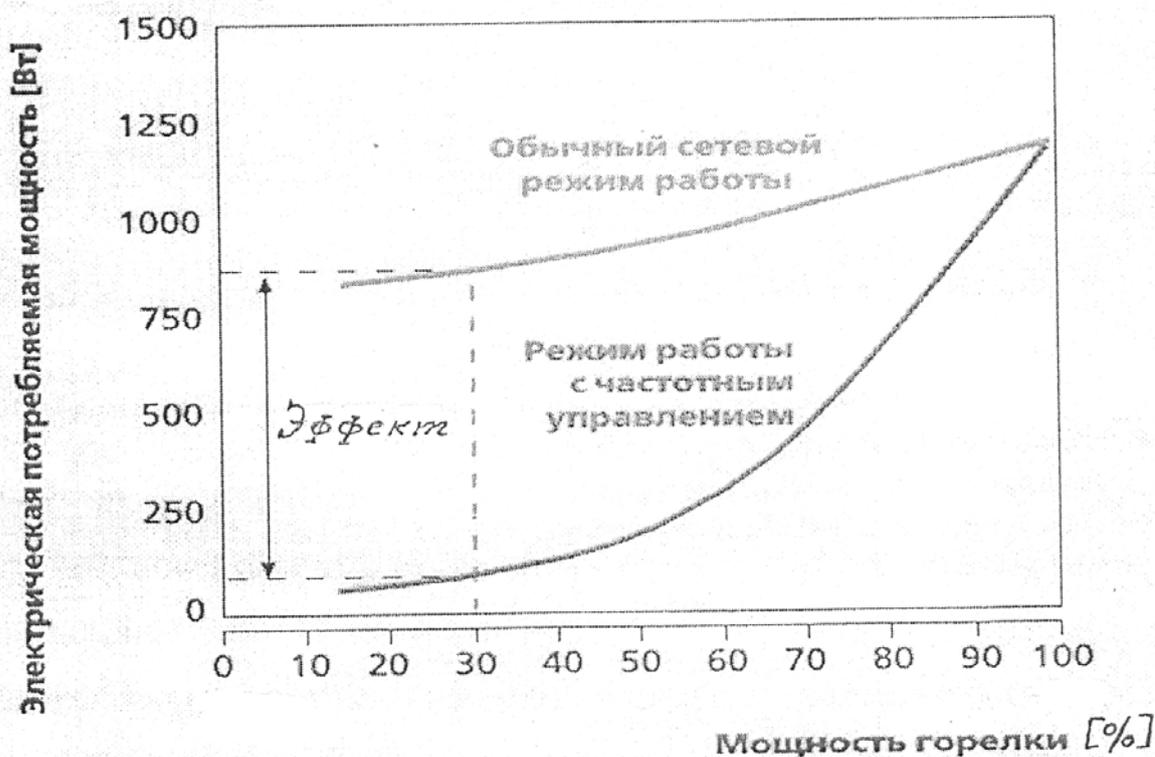


Рис. 43. График зависимости электрической потребляемой мощности от мощности горелки

В диапазоне частичной нагрузки снижение частоты вращения обеспечивает более низкий уровень шума (рис. 44).

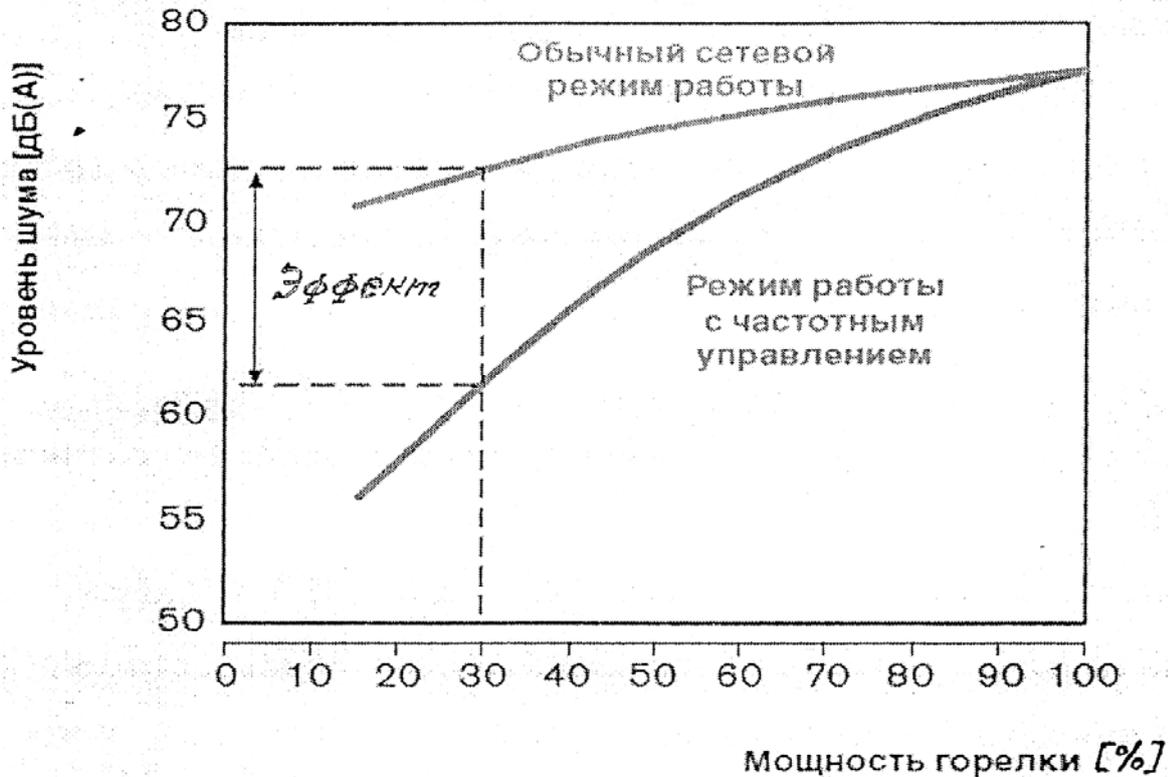


Рис. 44. График зависимости уровня шума от мощности горелки

Кислородное регулирование. Кислородный модуль преобразует сигнал с зонда, сравнивая содержание кислорода в дымовых газах с полученными при вводе в эксплуатацию заданными значениями. В соответствии с допусками по регулированию менеджер горения управляет устройствами регулирования подачи воздуха и корректирует содержание кислорода в дымовых газах (рис. 45). При каждом изменении мощности рассчитывается последующая фактическая мощность. При помощи параметров регулирования можно влиять на характеристику кислородного регулирования, которое позволяет повысить КПД на 3 %.

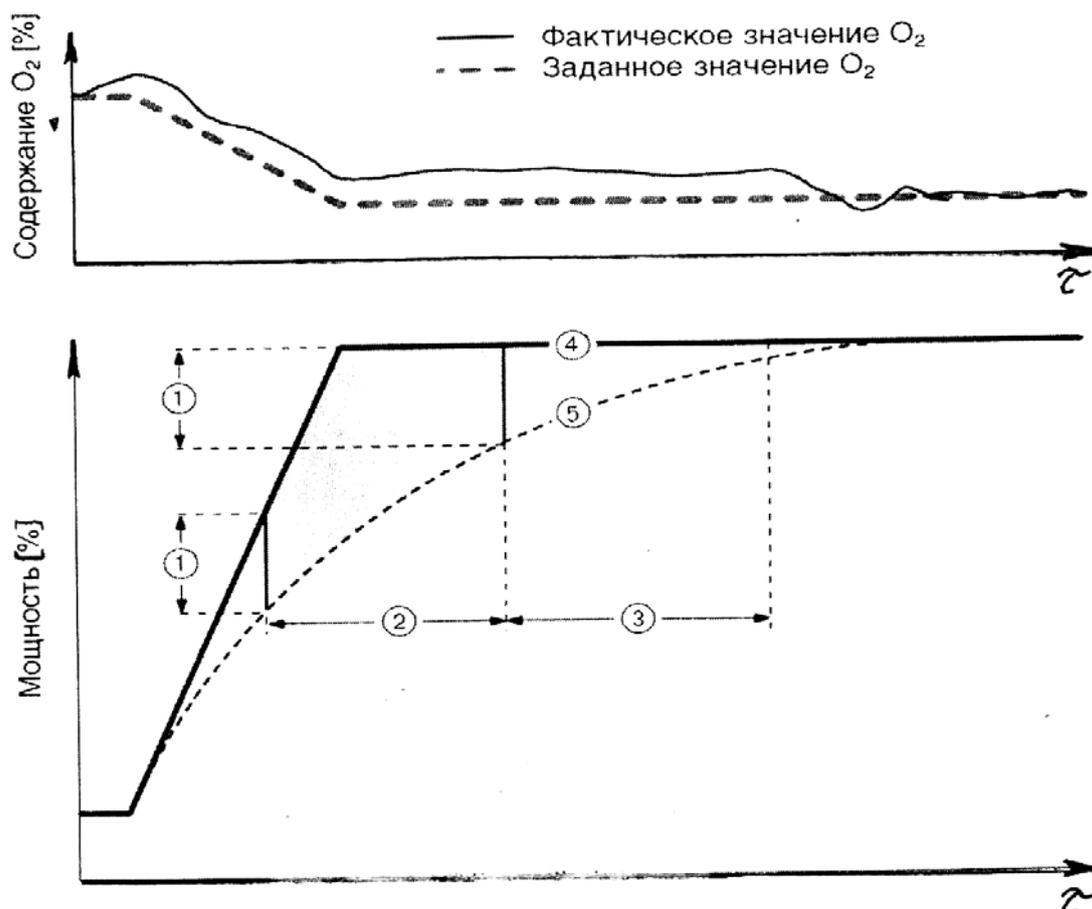


Рис. 45. Характеристика кислородного регулирования:  
 1 – параметр блока регулирования мощности; 2 – заблокированный диапазон;  
 3 – время задержки на большой нагрузке; 4 – мощность горелки;  
 5 – фактическая мощность

## 2.3. Перевод в водогрейный режим работы

### 2.3.1. Общие положения

Существующие отопительно-производственные котельные, как правило, выполнены по типовым проектам на базе котлов ДКВР, ДЕ, КЕ. Тепловые схемы таких котельных предусматривают покрытие тепловой нагрузки на технологические нужды за счет пара, а нагрузки на нужды отопления, вентиляции и горячего водоснабжения – путем подогрева сетевой воды в пароводяных теплообменниках.

За последние годы, в силу ряда причин, паровая нагрузка на технологические нужды резко сократилась или полностью исчезла. В связи с этим становится целесообразным часть или все котлы перевести на водогрейный режим работы, что позволит повысить экономичность работы

котлов, упростить тепловую схему котельной и её эксплуатацию, повысить надежность и безопасность, продлить жизнь котлов на 7-15 лет [17].

Массовый перевод паровых котлов в водогрейный режим породил большое разнообразие конструктивных решений и схем перевода [18]. Первоначально были опробованы схемы с прямоточным движением воды, с естественной циркуляцией, а затем с многократной принудительной циркуляцией путем установки в контурах специальных побудителей-струйных насосов, обеспечивающих повышенные расходы воды, циркулирующей по контурам (в 2-3 раза и более в сравнении с расходом сетевой воды, направляемой в сопла струйных насосов).

Как правило, струйными насосами задействуются более теплонапряженные поверхности нагрева (экраны, первые ряды конвективных пучков), но за счет их действия значительно интенсифицируется циркуляция в остальных незадействованных трубах пучков, обеспечивая в них достаточно надежный температурный режим. При этом не требуется никакого секционирования и установки поперечных перегородок, т.е. сохраняется схема движения потоков воды, характерная для парового режима. Это обеспечивает надежность работы труб и барабанов, благодаря мощным продольным токам циркулирующей воды. Положительным моментом в прямоточной схеме является определенность в значении выбранных скоростей воды, достаточно легко поддающихся расчету. Отрицательные стороны: необходимость секционирования поверхностей нагрева, включая барабаны; использование опускного движения при достаточно высоком обогреве, в связи с чем повышенные гидравлические сопротивления.

Схема с чисто естественной циркуляцией предельно проста (ввод сетевой воды в барабаны открытыми сечениями труб, либо их перфорированными участками). Однако, скорости циркуляции в таких схемах чрезмерно малы (менее 0,1 м/с), а скорости роста внутренних отложений весьма значительны.

Опыт НПО ЦКТИ имени Ползунова показывает, что выбор схемы перевода и вида циркуляции определяется конструктивной схемой котла, а не приверженностью к какому-то одному варианту [18]. При этом необходимо учитывать следующее [17]:

1. Нельзя переводить отдельный котлоагрегат без создания схемы его включения в общую теплофикационную систему.

2. Требования к качеству сетевой воды, даже при переводе котлов на работу по графику 95/70°, остаются общими с теплофикационными котлами из-за высоконапряженных условий работы элементов котлов, особенно в топочном объеме. Это усугубляется низкими скоростями в экранах, сечение которых рассчитано на пароводяную смесь (например, скорость воды в схемах Бийского котельного завода для котлов ДКВР-6,5-13 составляет от 0,12 до 0,8 м/с).

3. Следует осторожно использовать ввод комплексонов и комплексонатов для предотвращения образования отложений на поверхностях нагрева из-за их отмывающей способности. Необходимо применять только те, которые имеют мягкое действие, т.к. скалываемые крупные частицы отложений скапливаются в котлах со всеми неприятными последствиями.

4. Автоматизация работы котлов должна соответствовать требованиям «Правил безопасности» и СНиП.

5. Экономайзеры должны включаться в тепловую схему отдельно от котлов, что позволяет поддерживать температуру уходящих газов выше «точки росы». Нагретая в экономайзерах вода может возвращаться на всас сетевых насосов, работая взамен или параллельно рециркуляционным, или использоваться в водо-водяных подогревателях перед деаэратором.

6. Из-за малых скоростей в экранах и еще меньших в конвективной части нежелательно включать эти котлы в одноконтурную тепловую сеть из-за возможности заноса их отложениями, приносимыми из системы. При двухконтурной сети (работа через ЦТП или ИТП) следует предусматривать возможность компенсации объемов при переходных процессах (регуляторы сброса, мембранные баки в малых системах и т.п.).

7. Перевод должен проводиться по специальному проекту с учетом специфики работы конкретного котла и температурного графика тепловой сети. В проекте должны быть проведены тепловые, прочностные, гидравлические и аэродинамические расчеты котла, определены минимально допустимые расходы воды в котле и экономайзере по условиям надежного охлаждения поверхностей нагрева.

### 2.3.2. Схемы перевода

Анализ известных конструктивных решений по переводу котлов ДКВР в водогрейный режим показал, что их основное различие в схемах движения воды. К общим недостаткам следует отнести низкую скорость движения воды в трубках поверхностей нагрева, что приводит к появлению местных очагов вскипания, отложению накипи, пережогу трубок и значительные конструктивные переделки. В связи с этим рассмотрим схемы перевода, которые показали в эксплуатации высокую надежность и экономичность.

На рис. 46 приведена схема потоков воды после реконструкции котла ДКВР-10-13 на одном из предприятий ПО «Запорожтеплокоммунэнерго» [19]. Многократное пересечение водой поверхностей нагрева обеспечивается за счет установки перегородок в верхнем нижнем барабанах. При расчетной тепловой мощности котла 10,5 МВт и расходе воды через котел 31,1 кг/с скорости воды в экранных поверхностях нагрева составляют: во фронтном экране – 1,019 м/с, передней панели боковых экранов –

1,462 м/с, задней панели боковых экранов – 0,467 м/с, заднем экране – 1,083 м/с.

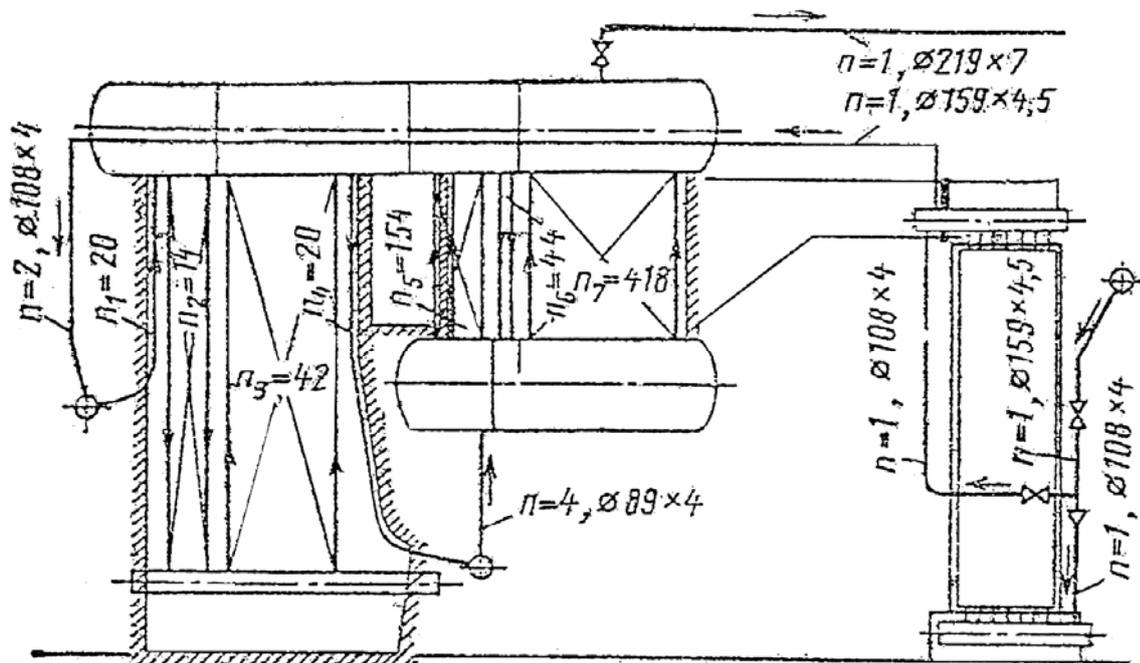


Рис. 46. Схема потоков воды в котле ДКВР-10-13 после реконструкции

При реконструкции все элементы котла остаются в заводском исполнении, за исключением установки двух дополнительных труб, соединяющих коллектор заднего экрана с нижним барабаном.

В табл. 3 приведены результаты теплотехнических испытаний после завершения пусконаладочных работ. Из нее следует, что полученные данные незначительно расходятся с расчетными. Большое сопротивление водяного экономайзера объясняется тем, что в период испытаний все расчетное количество воды пропусклось через экономайзер без использования байпасной линии. Существенно ниже расчетной оказалась температура уходящих газов. Она оказалась ниже расчетной, по данным эксплуатации, и к концу сезона эксплуатации.

Таким образом, после перевода котла в водогрейный режим работы стало возможным значительное увеличение теплопроизводительности при КПД свыше 94 %. Срок окупаемости капиталовложений - не более одного года.

Таблица 3

## Результаты теплотехнических испытаний

Показатель	Режим работы				
	Расчетный	Эксплуатационный			
Тепловая мощность, МВт(Гкал/ч)	10,5(9,05)	8,07(6,96)	8,6(7,42)	9,88(8,52)	10,88(9,30)
Расход топлива при $Q_p=34182 \text{ кДж/м}^3$	-	904,7	963,5	1103,2	1217,2
Расход воды через котел, кг/с(т/ч)	31,1(112)	39,4(142)	38,9(140)	39,4(142)	38,9(140)
Температура сетевой воды, °С:					
Перед экономайзером	70	70	72	72	70
За экономайзером	75	72	75	75	74
За котлом	150	119	125	132	137
Давление воды, кгс/см <sup>2</sup> :					
Перед экономайзером	–	10,6	10,4	10,6	10,4
Перед котлом	–	9,2	9,0	9,2	9,0
За котлом	–	8,3	8,6	8,8	8,6
Гидравлическое сопротивление, кгс/см <sup>2</sup> :					
Котла	–	0,4	0,4	0,4	0,4
Экономайзера	–	1,4	1,4	1,4	1,4
Давление перед горелками, кгс/м <sup>2</sup> :					
Газа	–	150	200	250	300
Воздуха	–	30	41	52	63
Температура уходящих газов, °С:					
За водяным экономайзером	138	92	101	105	108
За котлом	272	208	220	233	245
КПД котла, %	92	94,7	94,4	94,6	94,4

На рис. 47 приведена схема перевода котла ДКВР-10-13 в водогрейный режим работы [20]. При реконструкции по этой схеме котел имеет минимальное гидравлическое сопротивление по сравнению со схемами с перегородками в барабанах.

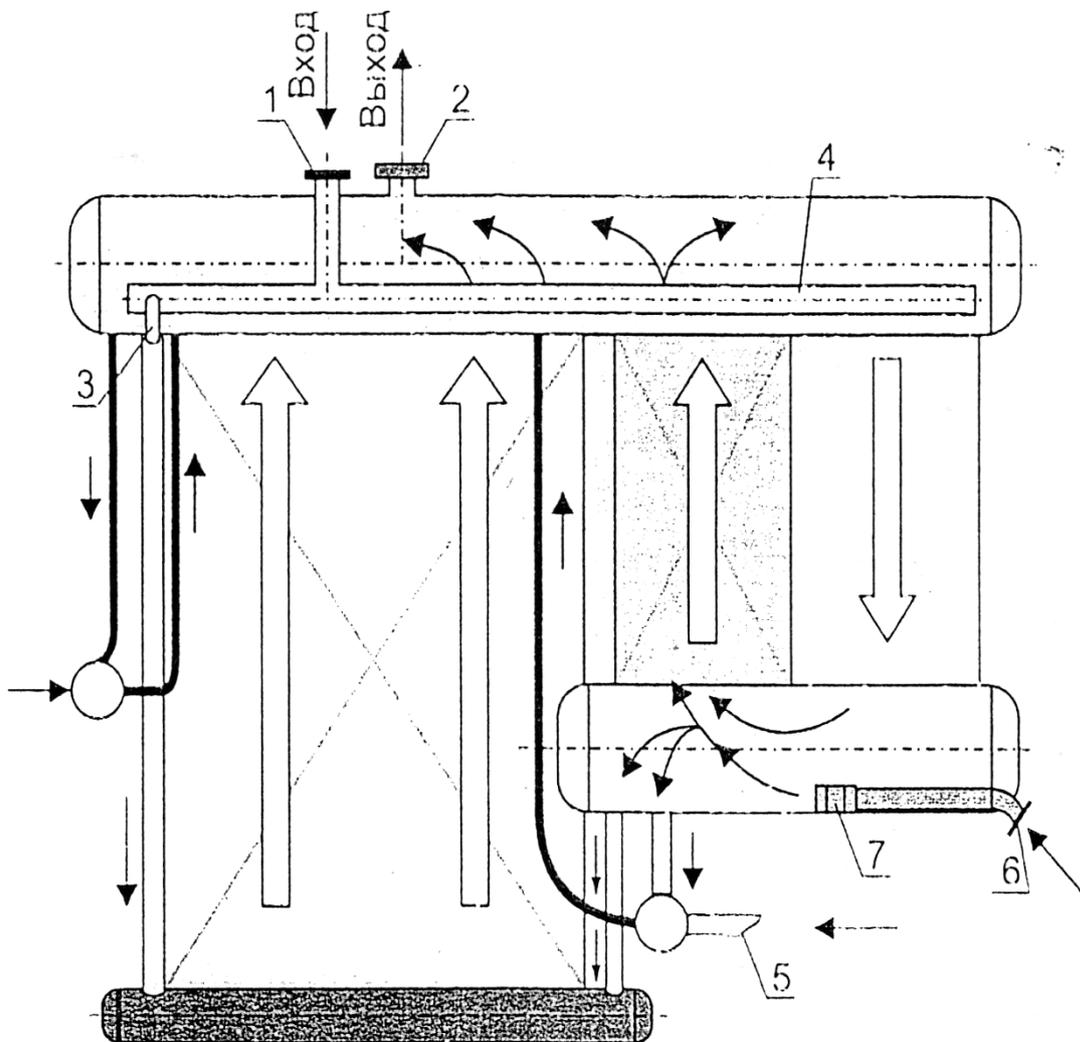


Рис. 47. Принципиальная схема перевода парового котла ДКВР-10-13 в водогрейных режим работы:

- 1 – вход сетевой воды в верхний барабан; 2 – выход сетевой воды из котла;  
 3 – опускные трубы боковых коллекторов; 4 – распределительный коллектор сетевой воды в верхнем барабане; 5 – подача воды в задний экран;  
 6 – ввод сетевой воды в нижний барабан; 7 – распределительный коллектор сетевой воды нижнего барабана

С целью интенсификации процесса циркуляции вся сетевая вода вводится в котел только через сопла специальных побудителей – струйных насосов, располагаемых на вводе во все необогреваемые опускные трубы и частично подъемные (первые три ряда труб конвективного пучка). Это позволило достичь:

- многократную принудительную циркуляцию с расходом в 3-4 раза превышающим расход сетевой воды и повышенные скорости воды в наиболее теплонапряженных поверхностях нагрева;
- интенсивную естественную циркуляцию воды в остальных трубах конвективного пучка, имеющих относительно невысокие тепловые нагрузки;
- сохранение схемы с принудительно-прямоточным движением воды в экономайзере.

Несмотря на сохранение штатных горелок и тягодутьевых машин КПД котла в водогрейном режиме был доведен в среднем до 94,4 %, а теплопроизводительность – до 6,8 Гкал/ч. Режимно-наладочные испытания показали, что возможно и дальнейшее повышение теплопроизводительности котла, при этом КПД котла остается практически неизменным в пределах регулирования тепловой нагрузки 70-120 %.

Успешность перевода по данной схеме подтверждена надежной и экономичной работой котла в течение трех отопительных сезонов.

На рис. 48 приведена схема перевода в водогрейный режим котла ДКВР-4-13 [21].

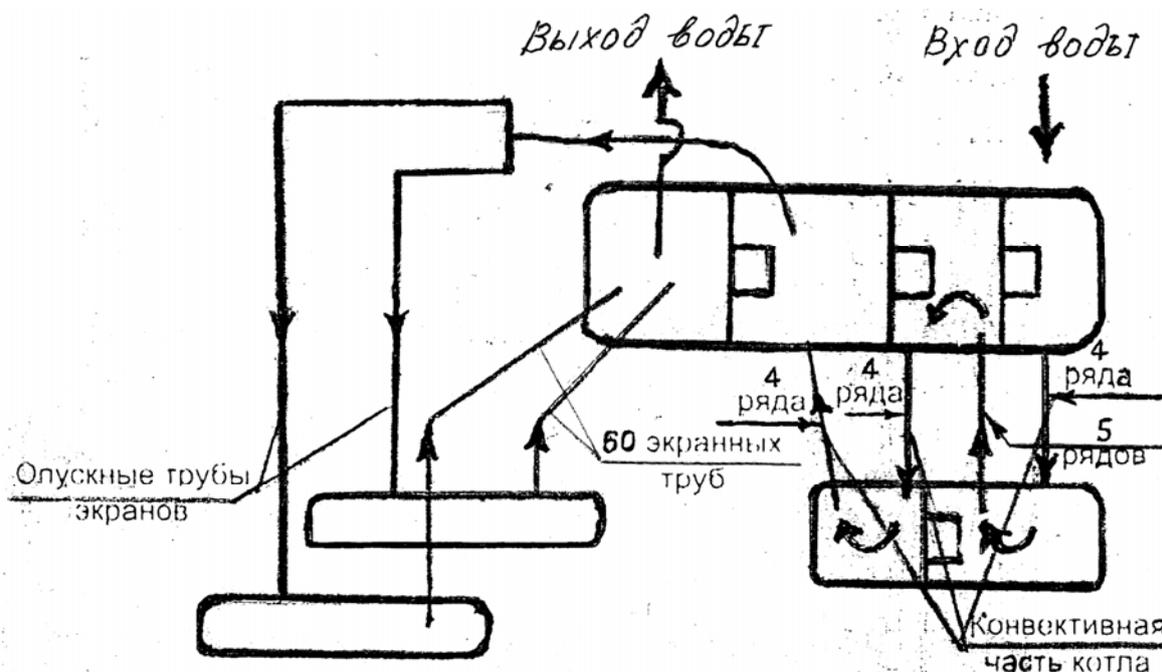


Рис. 48. Схема реконструкции котла ДКВР-4-13

Для увеличения скорости движения сетевой воды в конвективных трубках котла в верхнем барабане монтируются перегородки, делящие его на 4 отсека, а нижний барабан разделяется на 2 отсека. Это снимает проблему малых скоростей движения воды, когда при низких температурах наружного воздуха включается в параллельную работу второй котел.

На рис. 49 приведена схема распределения потоков воды по поверхностям нагрева котла ДКВР-20-13 при его работе в водогрейном режиме [22]. Предусмотрена двухпоточная схема циркуляции воды, когда один поток идет через экономайзер с расходом, обеспечивающим подогрев воды до температуры 90-100, другой поток проходит топочные экраны, нагреваясь до 80-85 °С, затем конвективный пучок труб, где температура поднимается еще на 10-15 °С. Оба потока смешиваются в верхнем барабане котла и направляются в тепловую сеть.

В предложенной схеме гидравлические сопротивления параллельных потоков воды приблизительно одинаковые и не превышают 1 кгс/см<sup>2</sup>, что обеспечивает надежность системы циркуляции котла. Температура уходящих газов снижается со 160 °С (в паровом режиме) до 108 °С (в водогрейном режиме). Внедрение разработки по переводу котла ДКВР-20-13 в одной из котельных «Костроматеплосервис» подтвердила правильность технических решений.

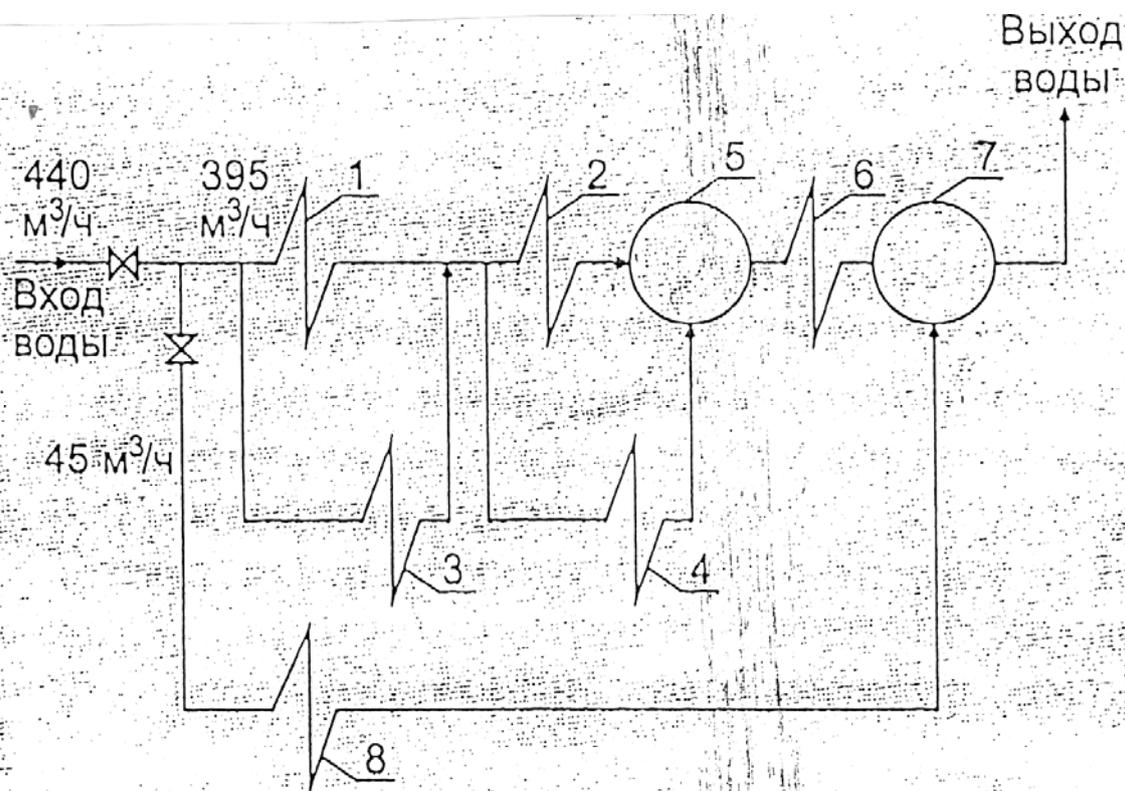


Рис. 49. Схема распределения потоков воды по поверхностям нагрева котла ДКВР-20-13 при его работе в водогрейном режиме:  
1 – фронтной экран; 2 – задний экран; 3, 4 – боковые экраны; 5, 7 – нижний и верхний барабаны котла; 6 – конвективный пучок; 8 – экономайзер

На рис. 50 приведена принципиальная схема движения воды в реконструированном котле ДКВР-6,5-13, реализованная в котельной завода резервуарных металлоконструкций г.Саратова [23]. По мнению разработчиков, данная схема увеличивает надежность работы котла в водогрейном режиме, снижает затраты на проведение реконструкции.

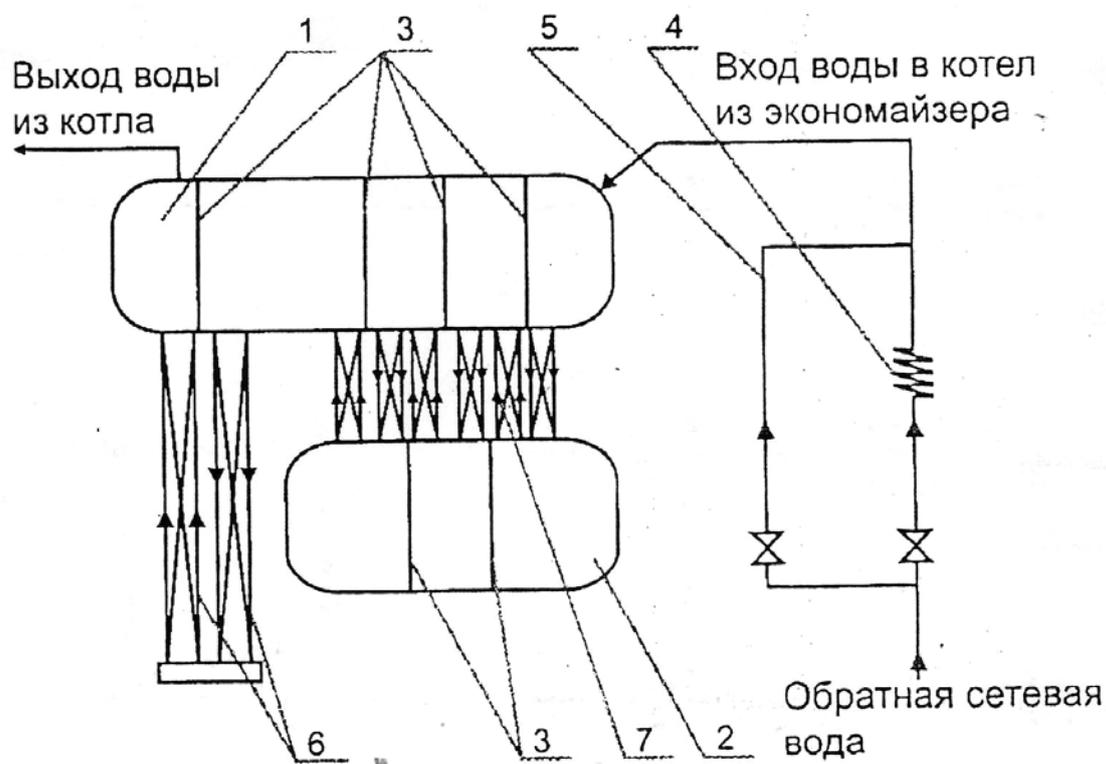


Рис. 50. Принципиальная схема движения воды в реконструированном котле ДКВР-6,5-13:  
 1 – верхний барабан; 2-нижний барабан; 3 – разделительная перегородка с люком; 4 – экономайзер; 5 – байпас; 6 – боковой экран;  
 7 – кипятильный пучок

В предложенной схеме обратная сетевая вода поступает в чугунный экономайзер. При этом часть воды пропускается по байпасному трубопроводу, после чего оба потока смешиваются и направляются в тыльную часть верхнего барабана. Далее вода совершает многократное подъемно-опускное движение в трубах конвективного пучка и экранных трубках. Для организации этого движения в верхнем и нижнем барабанах установлены перегородки. Для удобства монтажа и проведения ремонта перегородки имеют съемные крышки (люки), через которые осуществляется допуск во все отсеки верхнего и нижнего барабанов во время ремонта или осмотра котла.

Проходное сечение для воды в каждом ходе определялось следующим образом. На основе тепловых расчетов были получены средние тепловые потоки поверхностей теплообмена в топке и конвективном пучке. Затем по этим тепловым нагрузкам были определены минимально допустимые значения скоростей воды в опускных и подъемных ходах водяного тракта котла. По этим значениям скоростей были найдены проходные сечения каждого хода и количество рядов труб по оси котла между перегородками внутри верхнего и нижнего барабанов котла.

В результате расчетов было получено, что в конвективном пучке котла должно быть три подъемных и три опускных хода движения воды. По мере увеличения температуры газов скорость движения воды увеличивается как при опускном, так и при подъемном движении. В верхнем барабане устанавливаются 4 перегородки, в нижнем – 2 перегородки. При этом скорость воды в разных отсеках колеблется от 0,174 м/с (второй ход воды) до 0,882 м/с (седьмой ход воды согласно рис. 50). В боковых экранах организуется два хода- один ход с опускным движением воды, другой – с подъемным.

Отвод воды из котла производится из передней части верхнего барабана котла по существующему патрубку отвода пара. Предохранительные клапаны водяного тракта устанавливаются на существующем патрубке предохранительных клапанов верхнего барабана. Подвод воды производится через вновь просверленное в верхнем барабане отверстие  $\varnothing 150$  мм. Между перегородками верхнего барабана в его корпусе устанавливаются воздушники  $\varnothing 30$  мм.

Подпитка теплосети с водогрейными котлами должна производиться химочищенной водой. Для предотвращения коррозии поверхностей нагрева температура воды, поступающей в котел, должна быть выше «точки росы». Это обеспечивается за счет подмешивания прямой сетевой воды в обратную с использованием линии рециркуляции.

Водогрейные котлы очень чувствительны к взвешенным частицам в сетевой воде, которые легко отлагаются в сгибах экранных труб, вызывая перегрев трубы и ее разрушение. Поэтому необходимым условием надежной эксплуатации водогрейных котлов должна быть тщательная промывка тепловых сетей перед началом отопительного сезона, а также установка шламоотделителя в виде грязевика перед сетевым насосом.

Периодически следует удалять воздух из отсеков верхнего барабана через соответствующую арматуру. Нельзя допускать снижения расхода воды через котел ниже расчетного значения. Для увеличения надежности и простоты эксплуатации в перегородках верхнего барабана необходимо в верхней и нижней части оставить отверстия 30-40мм, а в нижнем барабане такие отверстия нужны только в нижней части перегородки. Верхние отверстия служат для удаления воздуха из всего верхнего барабана при по-

мощи одного воздушника, а также для удаления пара через предохранительный клапан, установленный в передней части барабана, при аварийных ситуациях, например, при внезапном отключении электроэнергии или остановке сетевых насосов. Нижние отверстия в перегородках служат для организации периодической продувки и удаления шлама из верхнего и нижнего барабанов.

Для продувки из верхнего барабана можно использовать отключенные опускные трубы в передней части котла. В нижнем барабане используется штатный трубопровод периодической продувки  $\varnothing 32$  мм.

Анализ расчетных теплотехнических показателей работы котла на различных режимах и фактические результаты работы котла позволили сделать следующие выводы:

1. Перевод котла ДКВР-6,5-13 по предложенной схеме позволил при сохранении штатных горелок, дымососа и вентилятора увеличить тепловую мощность котла с 4,5 МВт до 6,2 МВт и обеспечить КПД при максимальной нагрузке 93,5 %.

2. Для избежания кислородной коррозии труб конвективного пучка температура воды на входе в котел должна быть не менее 50 °С. Для этого необходимо предусмотреть насос рециркуляции, обеспечивающий подачу части воды из прямой магистрали на вход в котел при снижении температурного графика сети.

3. Расход воды через экономайзер на всех режимах должен составлять 0,5 кг/с (1,08 т/ч). Для этого на байпасной линии необходимо установить шайбу, размер которой определяется из гидравлического расчета экономайзера и байпасного трубопровода.

4. При работе котла на максимальной нагрузке 6,2 МВт и температуре воды на входе 70 °С, а на выходе 110 °С, коэффициент избытка воздуха в топке должен быть равным 1,1; при температуре воды соответственно равной 50 и 90 °С, коэффициент избытка воздуха в топке должен быть равным 1,2.

5. При работе на минимальной нагрузке 3,1 МВт и температуре воды на входе и выходе из котла, соответственно равной 60 и 80 °С, коэффициент избытка воздуха в топке должен быть равным 1,5 с целью поддерживать температуру уходящих газов не ниже 80-90 °С для избежания интенсивного выпадения конденсата на трубах экономайзера и далее в газоходе до дымовой трубы.

При пусконаладочных испытаниях котла необходимо проводить уточнение необходимых коэффициентов избытка воздуха в топке и на выходе из котла, а также по температурам воды на входе и выходе из котла и на выходе из экономайзера, уточняется расход воды через экономайзер и на линии рециркуляции при минимальных нагрузках котла.

При эксплуатации котла необходимо контролировать давление воды на входе в котел и температуру воды на входе и выходе из котла и на выходе из экономайзера. Температура воды на выходе из экономайзера должна быть на 20-30 °С ниже температуры насыщения при установленном в котле давлении воды. Регулирование этой температуры можно осуществить за счет прикрытия задвижки на байпасном трубопроводе.

Проведенные гидравлические расчеты показали, что из условий надежной работы котла расход через него должен быть постоянным и равным 133,5 т/ч. При этом гидравлическое сопротивление собственно котла составляет 0,05 кгс/см<sup>2</sup>. Гидравлическое сопротивление экономайзера при расходе через него 0,5 кг/с равно 0,03 кгс/см<sup>2</sup>, что меньше сопротивления байпасного трубопровода. Поэтому в водяной тракт экономайзера необходимо ставить дроссельную шайбу диаметром 13 мм.

Общее гидравлическое сопротивление котла с учетом подводящих и отводящих трубопроводов составляет 0,15 кгс/см<sup>2</sup> (сопротивление котлов по другим схемам перевода составляет 1,5-2 кгс/см<sup>2</sup>), что позволяет увеличить расход воды через котел и тем самым повысить надежность работы.

Аэродинамический расчет газовоздушного тракта показал, что существующие дымосос и вентилятор обеспечивают надежную работу котла при увеличении его тепловой мощности на 40 %.

Для обеспечения надежной работы нижней части верхнего барабана в районе топки целесообразно ее торкретировать специальной обмазкой во избежание кипения за счет излучения из топки. Кроме того, необходимо следить за состоянием термоплавких вставок в нижней части верхнего барабана, которые сигнализируют о возможном перегреве нижней части верхнего барабана.

Учитывая, что в экранных трубках котла при низких давлениях воды возможно пристенное кипение, необходимо сохранить двухступенчатое катионирование подпиточной воды как для паровых котлов.

Необходимо уточнить пропускную способность существующего предохранительного клапана и переобвязать его для сброса воды. Следует изменить схему автоматики управления и безопасности котла, приведя ее в соответствие условиям работы водогрейных котлов.

Опыт эксплуатации показал, что данная схема имеет значительные преимущества перед другими схемами перевода. Она позволяет надежно эксплуатировать котел при увеличенной на 40 % тепловой мощности с КПД на уровне 92-93,5 % в зависимости от нагрузки. При осмотре котла после года эксплуатации практически не наблюдалось накипи на стенках барабана и труб и наличия шлама в верхнем барабане. Котел на всех режимах работает «мягко», может быстро набирать и снижать тепловую мощность.

Данную схему перевода разработчики рекомендуют для всех котлов типа ДКВР. Наиболее успешно она реализуется на котлах паропроизводительностью 4; 6,5; 10 т/ч.

На кафедре теплогазоснабжения и вентиляции Пензенского государственного университета архитектуры и строительства разработан и внедрен проект перевода котлов ДКВР-6,5-13 на одной из объектовых котельных г. Пензы (2 котла) и на муниципальной котельной п. Чемодановки Пензенской области (1 котел). Проектом предусмотрены повышение скорости движения воды в наиболее теплонапряженных трубках поверхностей нагрева и упрощение реконструкции котла [24, 25].

Схема движения воды показана на рис. 51. Верхний барабан котла разделен перегородками на четыре отсека, а нижний – на три. Вода подается в нижний барабан котла (задний отсек), откуда по десяти рядам конвективной части (220 трубок) поднимается в задний отсек верхнего барабана. Следующий ход воды – вниз по двум рядам (44 трубки) в нижний барабан. Затем вода направляется опять вверх по восьми рядам конвективного пучка (176 трубок). Четвертый ход воды – вниз по двум рядам трубок и пятый – вверх по двум рядам. Так как эти трубки работают при повышенном тепловом напряжении, скорость течения в них более 1 м/с.

Следующий ход воды из верхнего барабана в нижние коллекторы боковых экранов происходит по 28 трубкам, скорость течения в которых превышает 1,5 м/с. Седьмой ход направлен вверх по 44 трубкам боковых экранов, скорость в них превышает 1 м/с.

Работы по реконструкции котла выполнялись в следующем порядке. Сначала были установлены перегородки в барабанах котла. Коллекторы экранов отключались от нижнего барабана. Патрубок для подвода сетевой воды Ø219 мм был установлен на нижнем барабане котла, а для отвода воды – на верхнем барабане согласно чертежам. Также выполнялся ряд незначительных переделок. Тягодутьевое оборудование осталось прежним, т.к. никаких изменений по газовому тракту не предусматривалось.

Существенной реконструкции подвергся экономайзер, который был включен в водяной контур системы теплоснабжения. Для увеличения пропускной способности он был разделен по высоте на 2 блока, включаемых по воде параллельно. Кроме того, был предусмотрен полный либо частичный пропуск воды по байпасной линии. Расчеты показали, что при расходе воды через котел более 300 м<sup>3</sup>/ч гидравлические потери составили около 3 м вод. ст. При этом увеличился коэффициент теплопередачи, температурный напор (реализуется многократный перекрестный ток теплоносителей) и, следовательно, теплопроизводительность котла, которая повысилась почти до 7 Гкал/ч. Затраты, связанные реконструкцией одного котла, окупились за период менее 6 месяцев.

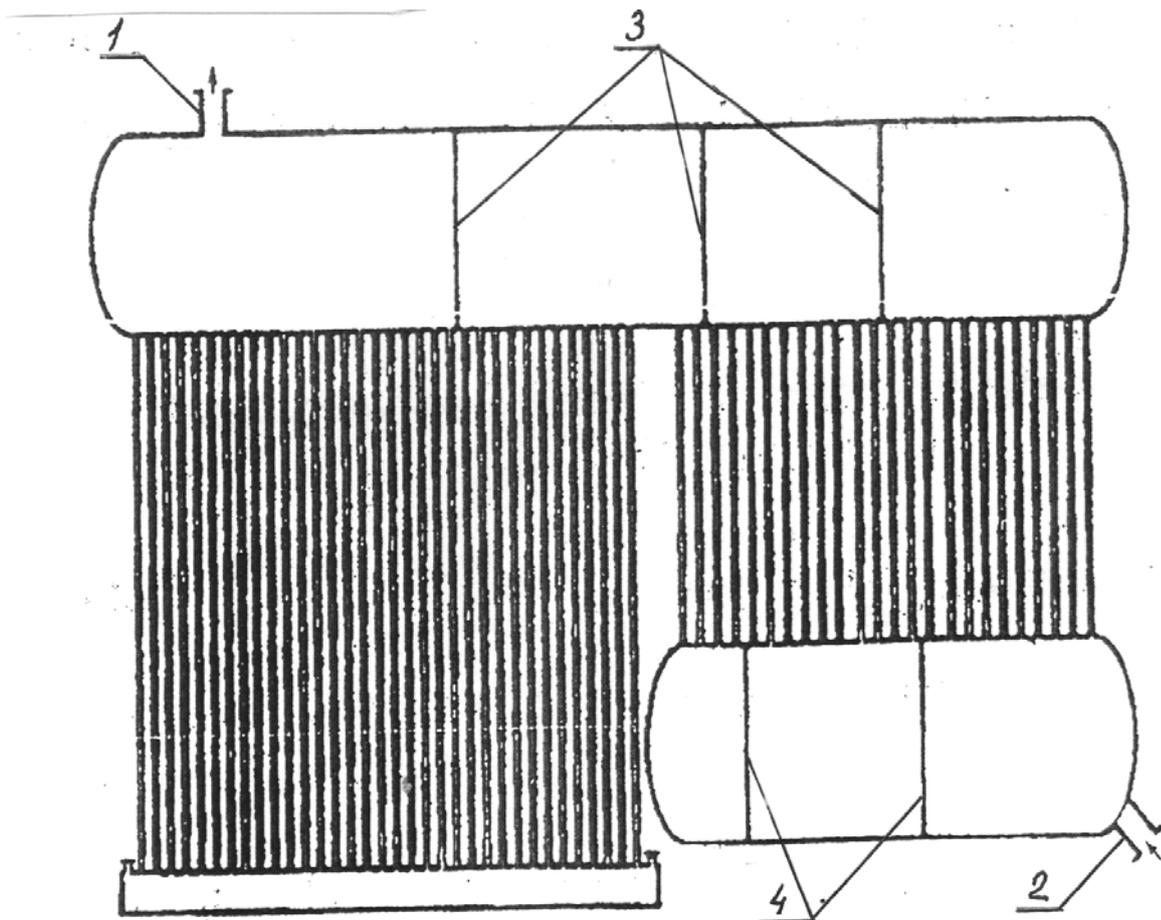


Рис. 51. Схема реконструкции котла ДКВР-6,5-13:  
 1 – патрубок для отвода воды; 2 – патрубок для подвода воды; 3 – перегородки в верхнем барабане котла; 4 – перегородки в нижнем барабане котла

Довольно длительный опыт эксплуатации показал, что котел работает бесшумно, устойчиво и маневренно по режимам. Температура уходящих газов за котлоагрегатом на обследованных режимах не превышала 100-105 °С, чему способствовала работа чугунного экономайзера.

Положительные отзывы работников котельных с реконструированными котлами ДКВР-6,5-13 (3 котла) подтвердили правильность принятых решений.

Особенностью котлов ДЕ является несимметричная компоновка поверхностей нагрева. Это вызывает объективную невозможность организации движения воды путем установки поперечных перегородок в верхнем и нижнем барабанах по аналогии с котлами ДКВР.

Нами предложено и реализовано в муниципальной котельной п. Чемодановки Пензенской области конструктивное решение по переводу котла ДЕ-6,5-14ГМ на водогрейный режим (рис. 52) с использованием перегородок другого типа. Установка двух скорлуп-перегородок в верхнем

барабане и двух скорлуп-перегородок в нижнем барабане котла позволила организовать движение воды с рекомендуемыми в [26] скоростями: 1-1,5 м/с – в экранах с опускающимися трубками, 0,6-0,8 м/с – в экранах с подъемным движением; в конвективных пучках – соответственно 1-1,2 и 0,4-0,6 м/с.

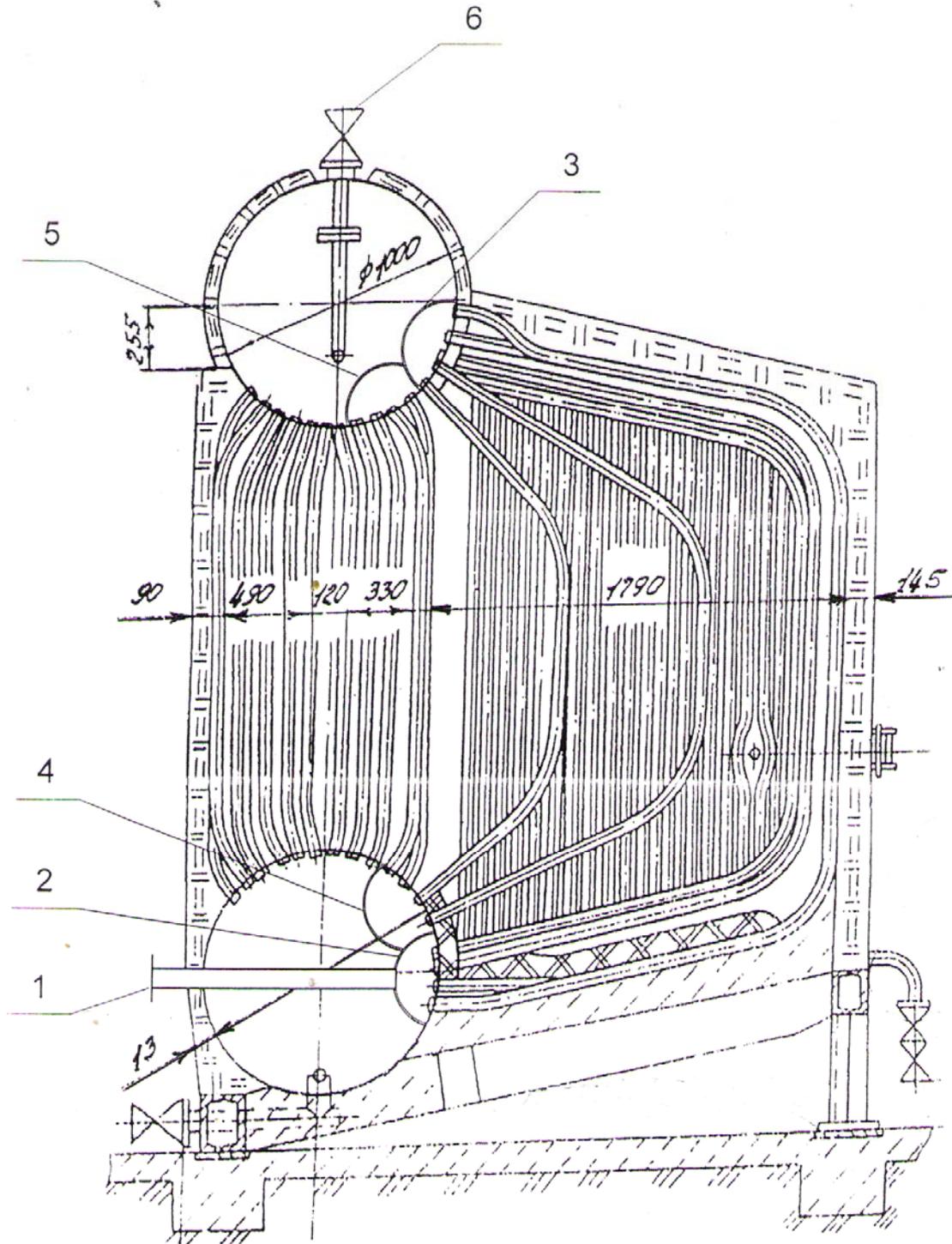


Рис. 52. Схема реконструкции котла ДЕ-6,5-14ГМ:  
 1 – патрубок воды; 2-5 – скорлупы (перегородки);  
 6 – патрубок выхода нагретой воды

Вода после экономайзера подается по патрубку 1 в нижний отсек 2 нижнего барабана котла, откуда по двум трубкам переднего экрана и 49 трубкам правого экрана поднимается в верхний отсек 3 верхнего барабана. Следующий ход воды направлен вниз по двум трубкам переднего экрана, 12 трубкам поворотного экрана и верхнему коллектору, объединяющему трубки заднего экрана и циркуляционную трубу. По нижнему коллектору заднего экрана вода поступает в дополнительный отсек, откуда попадает в верхний отсек 4 нижнего барабана. Затем вода направляется вверх по трубкам левого экрана (47 трубок) в нижний отсек 5 верхнего барабана котла.

Четвертый ход воды направлен вниз по двум рядам трубок конвективного пучка (51 трубка) в общую часть нижнего барабана. Пятый ход – вверх по остальным рядам трубок конвективного пучка (131 трубка) в неотгороженное пространство верхнего барабана. Из верхнего барабана вода направляется по патрубку 6 через узел рециркуляции и корректировки температуры в тепловую сеть.

Скорлупы выполнены из сегментных отрезков трубы  $\varnothing 426$  мм. Диаметры подводящего к нижнему барабану и отводящего от верхнего барабана патрубков приняты  $\varnothing 219$  мм. В верхних точках отсеков верхнего барабана установлены патрубки с вентилями для выпуска воздуха ( $\varnothing 25$  мм); в нижних точках отсеков нижнего барабана предусмотрены патрубки для слива воды в дренаж ( $\varnothing 40$  мм).

Гидравлический расчет показал, что при расходе воды 235 т/ч потери напора в котле не превышают 1 м вод. ст. По результатам теплового расчета, теплопроизводительность котла в водогрейном режиме составит около 5,5 МВт (4,73 Гкал/ч).

Фактическая теплопроизводительность ограничивается возможностями установленной горелки ГМГ-4 (бывшей в эксплуатации).

Реконструированный котел работает надежно, бесшумно, с хорошими динамическими показателями при изменении нагрузки, с КПД не менее 90 %. Сказанное подтверждает эффективность предложенного варианта реконструкции котла ДЕ-6,5-14ГМ, выполненной по чертежам силами владельца котельной под авторским надзором.

Таким образом, упрощается эксплуатация котельных с реконструированными котлами, повышается их безопасность, снижается потребление газового топлива, исходной воды и химреагентов водоподготовки.

### 3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МОДЕРНИЗАЦИИ

#### 3.1. Оценка эффективности сжигания газа

При горении газового топлива его горючие составляющие вступают в химическое взаимодействие с кислородом. В большинстве случаев кислород поступает с воздухом, подаваемым на горение. Азот, содержащийся в воздухе, в горении не участвует и, нагреваясь, уносит значительное количество теплоты.

В воздухе содержится около 21 % об. кислорода и 79 % об. азота и очень небольшое количество других газов. Следовательно, теоретически необходимый для сжигания газа объем воздуха больше требуемого для реакции горения объема кислорода в  $100:21 = 4,76$  раза. При этом на каждую часть кислорода приходится  $79:21 = 3,76$  частей азота.

Однако если в топку подавать только необходимое количество воздуха, то добиться полного сгорания газа невозможно. Объясняется это трудностями процесса смесеобразования газа и воздуха. Поэтому на практике приходится подавать воздуха больше, чем теоретически необходимо, т.е. сжигать газ с избытком воздуха.

Величина избытка определяется коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ , который показывает отношение действительного количества воздуха, подаваемого на горение, к теоретически необходимому. Стремление сжигать газ с  $\alpha$ , близким к 1,0, обусловлено целью обеспечить наиболее экономичную и эффективную работу газосжигающей установки. Чем меньше  $\alpha$ , тем меньше потери теплоты с уходящими газами. Кроме того, увеличение  $\alpha$  снижает температуру в топке – газ горит менее активно и сгорание может стать неполным. Однако, добиваясь сжигания газа с наименьшим  $\alpha$ , нельзя его снижать настолько, чтобы сгорание стало неполным и возникали потери теплоты с химическим недожогом.

Из изложенного следует, что от организации подачи воздуха зависят показатели работы газосжигающих установок.

Если было бы возможно обеспечить в топке полное сгорание газа при подаче только теоретического количества воздуха, то в сухих продуктах сгорания содержалось бы максимальное количество диоксида углерода  $CO_{2max}$ . Соотношение между  $CO_{2max}$  и количеством в продуктах полного сгорания кислорода и диоксида углерода выражается уравнениями

$$CO_{2max} = \frac{CO_2 \cdot 100}{100 - 4,76O_2}, \% \quad (3.1)$$

$$\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}_{2\text{max}}} + \frac{\text{O}_2}{21} = 1. \quad (3.2)$$

Если при анализе продуктов полного сгорания газа при помощи газоанализаторов содержание в них  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  не соответствует значениям, которые удовлетворяют приведенным равенствам, то это означает:

- анализ выполнен неточно, если содержание  $\text{CO}_2$  больше расчетного;
- в продуктах сгорания имеются горючие составляющие (химический недожог), если содержание  $\text{CO}_2$  меньше расчетного.

Для природных и попутных газов  $\text{CO}_{2\text{max}}$  равно соответственно 11,8 и 13 % об. Расчетные соотношения между  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\alpha$  для этих газов приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Состав продуктов полного сгорания и коэффициенты  $\alpha$

Природный газ				Попутный (нефтепромысловый) газ			
$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$	$\alpha$	$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$	$\alpha$
1	2	3	4	5	6	7	8
11,8	0,0	88,2	1,00	13,0	0,0	87,0	1,00
11,6	0,4	88,0	1,02	12,8	0,3	86,9	1,01
11,4	0,7	87,9	1,03	12,6	0,6	86,7	1,03
11,2	1,1	87,7	1,05	12,4	1,0	86,6	1,04
11,0	1,4	87,6	1,06	12,2	1,3	86,5	1,05
				12,0	1,6	86,4	1,07
10,8	1,8	87,4	1,08	11,8	1,9	86,3	1,09
10,6	2,1	87,3	1,10	11,6	2,2	86,2	1,11
10,4	2,5	87,1	1,12	11,4	2,6	86,0	1,13
10,2	2,8	87,0	1,14	11,2	2,9	85,9	1,15
10,0	3,2	86,8	1,16	11,0	3,2	85,8	1,16
9,8	3,6	86,6	1,18	10,8	3,5	85,7	1,18
9,6	3,9	86,5	1,20	10,6	3,9	85,5	1,21
9,4	4,2	86,4	1,22	10,4	4,2	85,4	1,23
9,2	4,6	86,2	1,25	10,2	4,5	85,3	1,25
9,0	5,0	86,0	1,28	10,0	4,8	85,2	1,27
8,8	5,3	85,9	1,30	9,8	5,1	85,1	1,30
8,6	5,7	85,7	1,33	9,6	5,5	84,9	1,32
8,4	6,1	85,5	1,36	9,4	5,8	84,8	1,35
8,2	6,4	85,4	1,40	9,2	6,1	84,7	1,37
8,0	6,8	85,2	1,43	9,0	6,4	84,6	1,40
7,8	7,1	85,1	1,46	8,8	6,8	84,4	1,44

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8
7,6	7,5	84,9	1,50	8,6	7,1	84,3	1,46
7,4	7,8	84,8	1,53	8,4	7,4	84,2	1,50
7,2	8,2	84,6	1,57	8,2	7,7	84,1	1,53
7,0	8,5	84,5	1,61	8,0	8,1	83,9	1,56
6,8	8,9	84,3	1,66	7,8	8,4	83,8	1,61
6,6	9,2	84,2	1,71	7,6	8,7	83,7	1,65
6,4	9,6	84,0	1,76	7,4	9,0	83,6	1,68
6,2	10,0	83,8	1,82	7,2	9,4	83,4	1,74
6,0	10,3	83,7	1,87	7,0	9,7	83,3	1,78
5,8	10,7	83,5	1,94	6,8	10,0	83,2	1,83
5,6	11,0	83,4	2,00	6,6	10,3	83,1	1,88
5,4	11,4	83,2	2,07	6,4	10,7	82,9	1,94
5,2	11,8	83,0	2,15	6,2	11,0	82,8	2,00
5,0	12,1	82,9	2,22	6,0	11,3	82,7	2,06

Коэффициент  $\alpha$  определяют при полном сгорании газа по формуле

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76O_2}. \quad (3.3)$$

При неполном сгорании газа  $\alpha$  определяют по формуле

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76(O_2 - 0,5CO - 0,5H_2 - 2CH_4)}, \quad (3.4)$$

где  $N_2, O_2, CO, H_2, CH_4$  – содержание компонентов в продуктах сгорания, % об.

Если при работе газосжигающей установки отсутствуют специфические условия, то, как правило, стремятся сжигать газ при минимальном  $\alpha$  и без химического недожога, т.е. при максимальном содержании в продуктах сгорания  $CO_2$ , минимальном содержании  $O_2$  и полном отсутствии  $CO, H_2$  и  $CH_4$ .

Состав продуктов сгорания определяют с помощью автоматических и ручных газоанализаторов. При режимной наладке работы газосжигающего агрегата состав продуктов сгорания определяют переносным хроматографом. Более полный и точный газовый анализ производят в химических лабораториях на стационарных хроматографах.

Для этого пробы газа и продуктов сгорания отбирают в стеклянные бюретки и отправляют в лабораторию. Следует иметь в виду, что выводы о

действительном составе продуктов горения могут быть сделаны только в том случае, если имеется уверенность, что отобранная в данной точке проба является усредненной, характеризующей состав дымовых газов по всему сечению газохода. В зависимости от наличия в топке и газоходе местных течений, различием температур и других условий состав продуктов горения в ряде точек топки и газоходов может изменяться. Поэтому при проведении наладочных работ следует установить место, где взятая проба наиболее полно характеризует средний состав продуктов горения в данном сечении.

Эффективность использования газа в агрегатах определяется двумя факторами: полнотой процесса горения газа и глубиной охлаждения продуктов сгорания. Основная часть теплоты, вносимой в агрегат, воспринимается рабочим телом в поверхностях нагрева и т.п. (полезно используемая теплота). Распределение вносимой теплоты на полезно используемую и отдельные виды потерь производится путем составления теплового баланса агрегата. Тепловой баланс составляется для установившегося теплового состояния агрегата, как правило, на  $1 \text{ м}^3$  сжигаемого газа:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_5, \quad (3.5)$$

где  $Q_p^p$  – располагаемая теплота, внесенная в агрегат,  $\text{кДж/м}^3$ ;

$Q_1$  – теплота, полезно использованная,  $\text{кДж/м}^3$ ;

$Q_2$  – потеря теплоты с уходящими (дымовыми) газами,  $\text{кДж/м}^3$ ;

$Q_3$  – потеря теплоты от неполноты сгорания газа,  $\text{кДж/м}^3$ ;

$Q_5$  – потеря теплоты в окружающую среду через наружные поверхности агрегата,  $\text{кДж/м}^3$ .

Располагаемая теплота определяется по формуле

$$Q_p^p = Q_H^c + Q_B + Q_G, \quad (3.6)$$

где  $Q_H^c$  – теплота сгорания газа по нижнему пределу,  $\text{кДж/м}^3$ ;

$Q_B$  – теплота, внесенная с воздухом, подогретым от постороннего источника,  $\text{кДж/м}^3$ ;

$Q_G$  – физическая теплота газа,  $\text{кДж/м}^3$ .

Для большинства случаев при работе агрегатов на «холодном» воздухе принимают  $Q_p^p \approx Q_H^c$ .

Если обе части уравнения (3.5) разделить на  $Q_p^p$ , то получаем уравнение теплового баланса агрегата в относительных величинах

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_5, \quad (3.7)$$

где  $q_1, q_2, q_3, q_5$  – соответствующие составляющие теплового баланса, %.

Тепловой баланс составляют по одному из двух методов – прямому и обратному. Метод обратного баланса требует значительно меньшего числа измерений и позволяет более точно установить условия сжигания газа. Для обратного баланса агрегата измеряют только температуру и состав уходящих газов. Тепловой баланс агрегата составляют для нескольких режимов его работы, как правило, для номинального, минимального и одного-двух промежуточных.

Производительность агрегата может быть определена по количеству и параметрам рабочего тела (пара, горячей воды, нагрев заготовок и т.п.). При отсутствии такой возможности – ориентировочно по расходу газа.

Если агрегат не оборудован необходимыми КИП, то при теплотехнических испытаниях применяют переносные КИП.

Пользуясь данными измерений, определяют, какая часть теплоты, содержащейся в газе, затрачена полезно на выработку пара, горячей воды, нагрев заготовок и другие технологические нужды (в зависимости от назначения агрегата). Эта часть теплоты  $q_1$ , выраженная в процентах, называется КПД агрегата. Чем больше КПД, тем экономичнее агрегат работает, тем меньше тепловые потери.

Потери теплоты с уходящими газами  $q_2$  зависят от их температуры и  $\alpha$ . Согласно методике, разработанной М.Б. Равичем,  $q_2$  можно определить по формуле, %,

$$q_2 = 0,01z(t_{\text{уг}} - t_{\text{в}}), \quad (3.8)$$

где  $z$  – коэффициент, зависящий от температуры продуктов сгорания и степени их разбавления избыточным воздухом, т.е. от содержания в сухих продуктах полного сгорания  $\text{CO}_2$ , а в продуктах неполного сгорания суммы ( $\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4$ ). Значения величины  $z$  для природного газа приведены в табл. 5;

$t_{\text{уг}}, t_{\text{в}}$  – соответственно температура уходящих газов и воздуха, °С.

Т а б л и ц а 5

Значения  $z$  для природного газа

Содержание $\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4$ , %	Температура уходящих газов, °С					
	0–250	250–350	350–500	500–700	700–900	900–1100
1	2	3	4	5	6	7
11,8	4,13	4,16	4,28	4,37	4,47	4,57
11,7	4,15	4,21	4,31	4,40	4,50	4,60
11,6	4,18	4,25	4,33	4,43	4,53	4,63
11,5	4,21	4,28	4,37	4,47	4,57	4,67
11,4	4,24	4,30	4,40	4,50	4,60	4,70
11,3	4,26	4,32	4,43	4,53	4,63	4,73

Продолжение табл. 5

1	2	3	4	5	6	7
11,2	4,28	4,34	4,46	4,56	4,66	4,76
11,1	4,30	4,37	4,48	4,58	4,68	4,78
11,0	4,35	4,40	4,50	4,60	4,70	4,80
10,9	4,40	4,43	4,53	4,63	4,73	4,83
10,8	4,43	4,47	4,57	4,67	4,77	4,87
10,7	4,45	4,50	4,60	4,70	4,80	4,90
10,6	4,48	4,53	4,65	4,75	4,85	4,95
10,5	4,50	4,56	4,67	4,78	4,88	4,98
10,4	4,53	4,60	4,70	4,80	4,90	5,00
10,3	4,57	4,63	4,75	4,85	4,95	5,05
10,2	4,60	4,65	4,78	4,88	4,98	5,08
10,1	4,63	4,70	4,80	4,90	5,00	5,10
10,0	4,67	4,75	4,85	4,95	5,05	5,15
9,9	4,70	4,80	4,90	5,00	5,10	5,20
9,8	4,75	4,83	4,93	5,03	5,13	5,23
9,7	4,80	4,87	4,97	5,07	5,17	5,27
9,6	4,84	4,90	5,00	5,10	5,20	5,30
9,5	4,88	4,95	5,05	5,15	5,25	5,35
9,4	4,93	5,00	5,10	5,20	5,30	5,40
9,3	4,97	5,05	5,15	5,25	5,35	5,45
9,2	5,02	5,07	5,20	5,30	5,40	5,50
9,1	5,07	5,10	5,25	5,35	5,50	5,60
9,0	5,10	5,15	5,30	5,40	5,55	5,65
8,9	5,13	5,22	5,33	5,45	5,60	5,70
8,8	5,17	5,26	5,35	5,50	5,65	5,75
8,7	5,22	5,30	5,40	5,55	5,70	5,80
8,6	5,27	5,35	5,45	5,60	5,75	5,85
8,5	5,30	5,40	5,50	5,65	5,80	5,90
8,4	5,35	5,45	5,55	5,70	5,85	5,95
8,3	5,40	5,50	5,60	5,75	5,90	6,00
8,2	5,45	5,55	5,65	5,80	5,95	6,05
8,1	5,50	5,60	5,70	5,85	6,00	6,10
8,0	5,57	5,67	5,77	5,90	6,05	6,15
7,9	5,62	5,72	5,85	5,95	6,10	6,20
7,8	5,68	5,80	5,90	6,00	6,15	6,25
7,7	5,75	5,85	5,97	6,08	6,25	6,35
7,6	5,80	5,90	6,05	6,15	6,32	6,42
7,5	5,85	6,00	6,10	6,25	6,40	6,50

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7
7,4	5,90	6,05	6,20	6,30	6,45	6,60
7,3	6,00	6,10	6,25	6,35	6,50	6,65
7,2	6,05	6,15	6,30	6,40	6,55	6,70
7,1	6,10	6,25	6,40	6,50	6,65	6,80
7,0	6,22	6,32	6,45	6,60	6,75	6,90

Например, ориентировочно можно считать, что возрастание  $t_{yt}$  только на 10 °С выше нормальной для данной нагрузки котла увеличивает  $q_2$  не менее чем на 0,5 %, а увеличение  $\alpha$  на 0,1 увеличивает  $q_2$  приблизительно на 1 %. Для уменьшения  $q_2$  необходимо вести сжигание газа с наименьшим  $\alpha$  в топке, свести до минимума подсосы воздуха в топку и газоходы, не допускать загрязнения поверхностей нагрева котла накипью и сажей. Установка за котлом экономайзеров и воздухоподогревателей уменьшает  $q_2$ .

Потери теплоты от химического недожога  $q_3$  имеют место, когда в продуктах сгорания обнаруживаются горючие составляющие: оксид углерода, водород, метан. Согласно данным анализа продуктов сгорания природного газа  $q_3$  можно определить по формуле, %,

$$q_3 = \frac{35CO + 30H_2 + 100CH_4}{CO_2 + CO + CH_4}. \quad (3.9)$$

Газ значительно легче, чем другие виды топлива, перемешивается с воздухом. Поэтому при хорошей конструкции горелок и топок, нормальной организации сжигания газа его можно сжигать без потерь от химического недожога  $q_3$ .

Потери теплоты в окружающую среду  $q_5$  включают теплоту, отдаваемую обмуровкой и другими частями агрегата окружающему воздуху.

Значение  $q_5$  зависит от качества обмуровки и изоляции наружных стенок агрегата и от разности температур наружных поверхностей и окружающей среды. Согласно нормативных требований  $q_5$  следует определять по графикам (например, для котлов приведен на рис. 53). Однако для ряда газосжигающих агрегатов такие графики отсутствуют, в связи с чем  $q_5$  определяют методом обратного баланса.

Целесообразно для сравнения работы газосжигающих агрегатов принимать за основу коэффициент использования топлива (КИТ):

$$\text{КИТ} = 100 - (q_2 + q_3), \%. \quad (3.10)$$

В сравнении с твердым топливом при сжигании газа меньше  $q_2$  и  $q_3$ , отсутствуют потери теплоты с механическим недожогом  $q_4$ . Поэтому при переводе тепловых агрегатов с твердого на газообразное топливо их КПД повышается, что должно учитываться при расчетах топливопотребления.

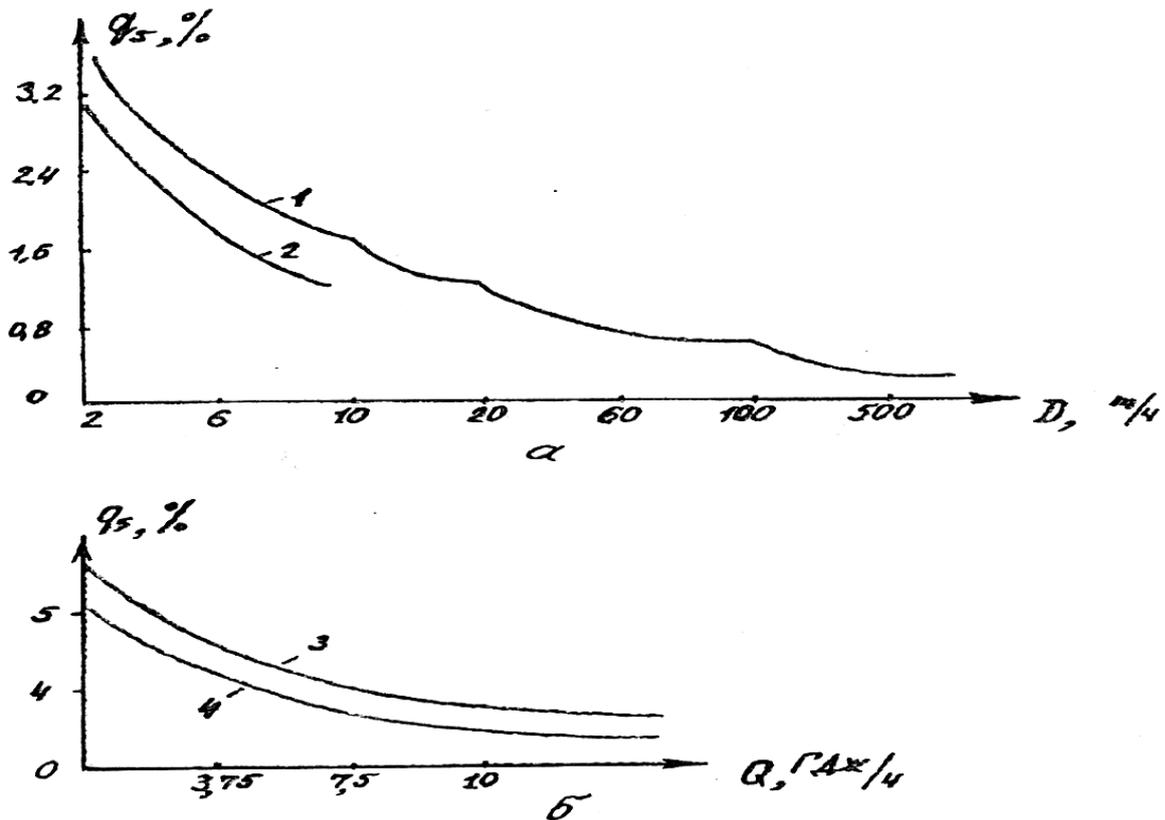


Рис. 53. Потери теплоты  $q_5$  для котлов:  
 а – паровых; б – водогрейных и малых паровых;  
 1 – котел с хвостовыми поверхностями нагрева; 2 – собственно котел;  
 3 – с экономайзером; 4 – без экономайзера

### 3.2. Эффективность модернизации систем автоматики

Перспективное направление модернизации при ограниченных капиталовложениях – усовершенствование штатных систем автоматики управления сжиганием газа, которые на существующее положение морально и физически устаревшие, часто не работоспособные.

Эффективность работы котлов зависит от эффективности работы горелок, поверхностей нагрева, экономайзеров, воздухоподогревателей, тягодутьевых машин и других устройств. В указанном направлении акцент делается на процесс сжигания газа с целью достижения современных показателей по энергоэкологической эффективности котлоагрегатов.

КПД котла при сжигании газа зависит от трех видов тепловых потерь:  $q_2$  (потеря теплоты с уходящими газами);  $q_3$  (потеря теплоты с химической неполнотой сгорания);  $q_5$  (потеря теплоты ограждающими конструкциями в окружающую среду). Потеря теплоты  $q_2$  зависит от температуры и объема уходящих газов, т.е. от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ . Потеря  $q_3$  также зависит от избытка воздуха, но в большей степени от качества

перемешивания газа и воздуха. Потеря  $q_5$  зависит от конструктивных особенностей котла, но главным образом от состояния обмуровки котла. Влияние коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  на концентрацию основных компонентов дымовых газов ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ ) и КПД ( $\eta$ ) при определенной тепловой нагрузке котла показано на рис.54.

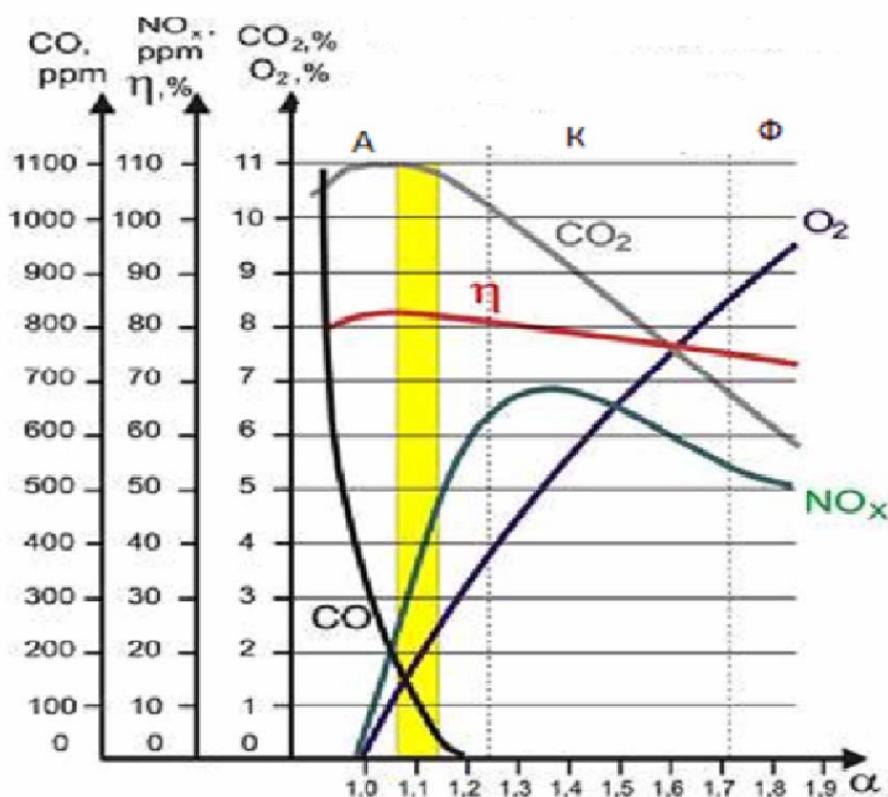


Рис.54. Влияние коэффициента избытка воздуха на концентрацию основных компонентов дымовых газов и КПД при определенной нагрузке котла:  
 А – зона оптимальной работы; К – зона работы по режимной карте;  
 Ф – зона фактической работы

Из приведенных кривых видно, что снижение коэффициента избытка воздуха способствует: снижению содержания кислорода ( $O_2$ ), повышению диоксида углерода ( $CO_2$ ) и КПД ( $\eta$ ). При этом также уменьшается содержание вредных оксидов азота ( $NO_x$ ). Появление химического недожога ( $CO$ ) определяет границу допустимого воздействия на снижение подачи воздуха. Эта граница является гибкой и зависит от характеристик горелок и тепловой нагрузки котла.

Область экономически выгодного режима сжигания газа соответствует малым значениям кислорода (0,5-1,5 %) и появлению “следов”  $q_3$ , т.е. содержанию оксида углерода на уровне 120-600 мг/м<sup>3</sup>. Работа в этой зоне

(А) может быть обеспечена только автоматической коррекцией работы горелок. Здесь же показаны данные, соответствующие работе котла по режимной карте (зона К) и фактическому режиму (зона Ф).

На рис. 55 приведены графики зависимости от теплопроизводительности котла  $Q$ : содержания кислорода в дымовых газах ( $O_2$ ); электрической мощности ( $P_{эл}$ ), потребляемой из сети вентилятором и дымососом; температуры дымовых газов ( $T_{дг}$ ) для различных систем автоматики котла. Новая оптимизированная автоматика котла с автоматической коррекцией коэффициента избытка воздуха на графиках обозначена как (А); существующая автоматика котла с дополнительно установленными приборами контроля сжигания газа и ручной регулировкой коэффициента избытка воздуха по режимной карте – (К); существующая автоматика котла без переделок схемы, которая работает фактически не по режимной карте в результате длительной эксплуатации – (Ф).

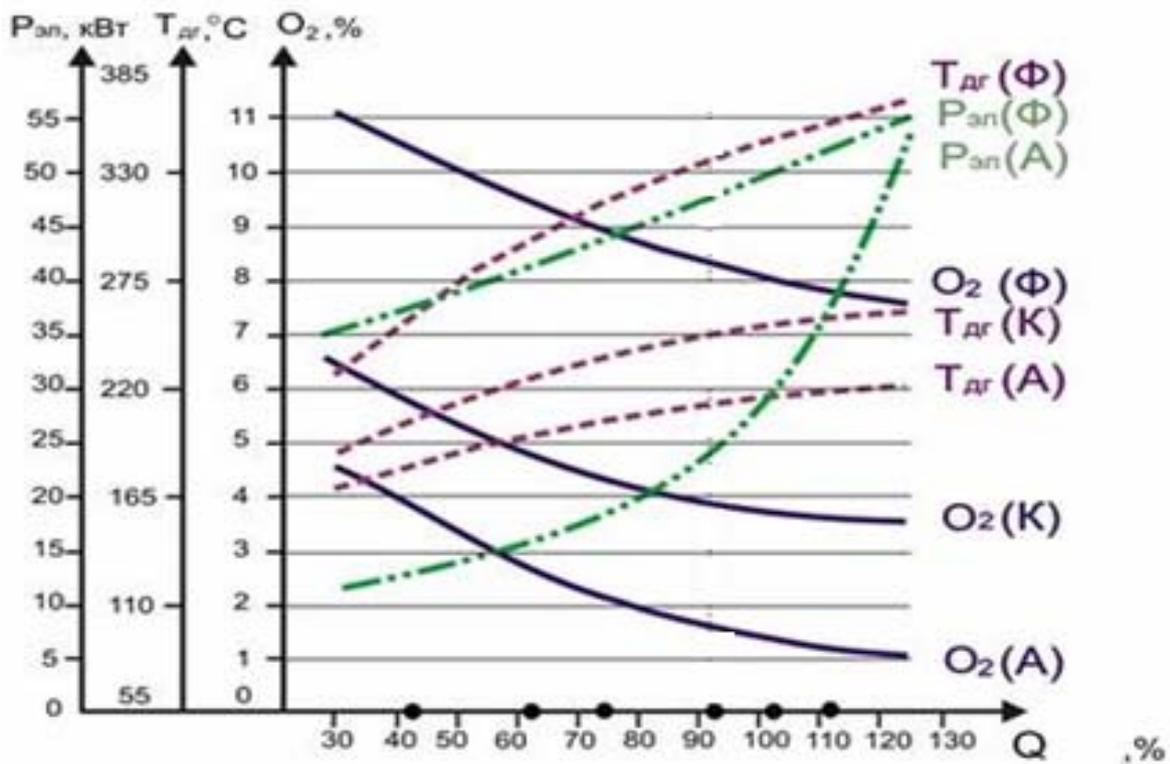


Рис. 55. Графики зависимостей от теплопроизводительности котла: электрической мощности вентилятора и дымососа; содержания кислорода и температуры дымовых газов

Одна из составляющих, влияющих на экономичность работы котлоагрегата – расход электроэнергии двигателями вентиляторов и дымососов. Электрическая мощность двигателей рассчитана на номинальную теплопроизводительность котлов. Фактическая теплопроизводительность котла

может быть 30-110 % от номинальной в зависимости от режима теплопотребления. Регулирование производительности вентилятора и дымососа в сторону уменьшения обычно осуществляется дросселированием с помощью заслонки, которая устанавливается на входе этих машин. Этот способ регулирования крайне неэкономичен. Более экономичным является способ регулирования производительности тягодутьевых машин путем изменения скорости вращения электродвигателя с использованием преобразователя частоты (ЧРП).

На рис. 56 показаны зависимости мощности ( $P$ ), потребляемой из сети центробежным вентилятором (дымососом) от относительной величины расхода ( $L/L_{max}$ ) для двух способов регулирования и зависимость экономии мощности при питании электродвигателя от ЧРП. Видно, что потребляемая мощность при регулировании производительности изменением скорости вращения составляет меньше половины мощности, потребляемой из сети при регулировании дроссельными заслонками. Следовательно, использование ЧРП обеспечивает экономию электроэнергии и позволяет плавное и точное регулирование производительности тягодутьевых машин.



Рис. 56. Зависимость потребляемой мощности от расхода вентилятора (дымососа)

В настоящее время большинство котельных с рассматриваемыми котлами работают без приборов контроля состава уходящих (дымовых) газов. Установка этих приборов позволяет оператору получать непрерывно данные о содержании свободного кислорода и оксида углерода в уходящих газах и обнаруживать своевременное расхождение параметров, заданных в режимной карте и измеренных стационарными газоанализаторами. Возможность оперативного контроля и ручная коррекция повышают энерго-экологическую эффективность и надежность работы котлов.

Малозатратный и эффективный способ экономии газового топлива – внедрение мероприятий, направленных на организацию горения с предельно низким коэффициентом избытка воздуха (в пределах зоны А, рис.54). Высокой эффективности сжигания газа можно достичь даже на существующем газогорелочном оборудовании при использовании систем непрерывного контроля и регулирования соотношения “газ-воздух”. Для получения оптимального регулирующего воздействия необходимо иметь информацию о содержании кислорода и элементов химического недожога ( $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4$ ) в дымовых газах, сумму концентраций которых удобно представить в виде эквивалентной концентрации оксида углерода ( $\text{CO}_2$ ).

Для автоматизации процесса коррекции НПФ “Уран-СПб” (г.Санкт-Петербург) предлагает существующую автоматику котлов оснащать кроме анализаторов кислорода и оксида углерода в дымовых газах дополнительным корректирующим регулятором, воздействующим на штатный регулятор воздуха. Запрограммированные микропроцессорные корректирующие регуляторы легко адаптируются к любой системе автоматики котла.

### 3.3. Оценка экономической эффективности модернизации

Основным слагаемым экономической эффективности модернизации является экономия топлива или тепловой энергии за счет повышения КПД котлов. Изменение КПД на величину  $\Delta\eta$  вызывает относительную экономию топлива на величину:

$$\frac{\Delta\eta}{\eta_2} = \frac{\frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_2}}{\frac{1}{b_2}} = \frac{\Delta b}{b_1}, \quad (3.11)$$

где  $b_1, b_2$  – удельный расход условного топлива до режимно-наладочных работ и после.

При указанном изменении удельного расхода топлива от  $b_1$  до  $b_2$  удельные потери на единицу вырабатываемого тепла изменяются от  $(b_1-1)$  до  $(b_2-1)$ , т.е. в  $\frac{b_2-b_1}{b_1-1}$  раза.

Экономия топлива составляет:

$$\Delta B_H = \frac{\eta_{cp} - \eta_{\phi}}{\eta_{\phi}} \cdot 100, \% \quad (3.12)$$

где  $\eta_{cp}$  – КПД котла после наладки, %;

$\eta_{\phi}$  – КПД котла, полученный при “фотографии” (на существующее положение до мероприятий по модернизации), %.

Экономия топлива в паровых котлах определяется по формуле [28]

$$\Delta B_H = \frac{D_K(i_{\Pi} - i_{\PiВ}) + D_K(i_{\text{КВ}} - i_{\PiВ})p_1}{Q_H^p \cdot \eta_{k1}} - \frac{D_K(i_{\Pi} - i_{\PiВ}) + D_K(i_{\text{КВ}} - i_{\PiВ}) \cdot p_2}{Q_H^p \cdot \eta_{k2}}, \quad (3.13)$$

где  $D_K$  – паропроизводительность котла, кг/ч;

$i_{\Pi}$ ,  $i_{\PiВ}$ ,  $i_{\text{КВ}}$  – теплосодержание пара, питательной и котловой воды, ккал/кг;

$p_1$ ,  $p_2$  – доля продувки котла до и после наладки, %;

$\eta_{k1}$ ,  $\eta_{k2}$  – КПД котла до и после наладки;

$Q_H^p$  – теплота сгорания топлива, ккал/кг.

Критерием оценки экономической эффективности того или иного варианта модернизации является величина затрат и срок их окупаемости. Рассмотрим на примере одной из котельных г. Москвы с установленными 4 котлами марки НР-18[29]. Проект модернизации позволил повысить теплотехнические характеристики путем улучшения теплообмена внутри котлов за счет изменения движения дымовых газов и увеличения поверхности теплопередачи. После проведения модернизации получены следующие результаты:

- снизилась температура уходящих газов с 250 °С до 160 °С;
- фактический КПД увеличился с 78-81 % до 90-91,5 % (что соответствует ГОСТу 10617-83);
- теплопроизводительность котла повысилась с 0,7 до 1,0 Гкал/ч;
- снизилось потребление газа на 1 Гкал со 160 м<sup>3</sup> до 133 м<sup>3</sup> (экономия 27 м<sup>3</sup>).

Работы по модернизации проводились хозяйственным способом в течение 2 месяцев в составе: 1 сварщик, 2 слесаря, 1 каменщик. При внедрении данного проекта возникают затраты только на капитальные вложения, т.к. эксплуатационные затраты остаются без изменений.

Капитальные затраты составили (в ценах 2001 года):

- разработка рабочего проекта для 4 котлов 40000 руб.;

- оплата выполненных работ 50000 руб.;
- материалы для 4 котлов 90000 руб.;
- итого 180000 руб.

Модернизация позволила сократить расход газа на производство 1 Гкал на 27 м<sup>3</sup>, что составляет 13,77 руб./Гкал. При суммарной выработке котельной за год 9312 Гкал экономия составила 128 000 руб. Суммарный расход газа котельной сократился с 1489920 м<sup>3</sup> до 1238496 м<sup>3</sup>. Срок окупаемости затрат:  $180000 / 128000 = 1,4$  года.

Модернизация котлов позволила увеличить теплопроизводительность котельной с 2,8 до 4 Гкал/ч и решить проблему присоединения дополнительной тепловой нагрузки. Если же для увеличения теплопроизводительности котельной произвести ее полную реконструкцию с установкой 4 новых сертифицированных котлов, затраты составят 2 500 000 руб. В этом случае экономия по первоначальным затратам составит  $2500\ 000 - 180\ 000 = 2320000$  руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность проблемы модернизации водогрейных и паровых котлов малой мощности, с нашей точки зрения, не вызывает сомнения. Цель модернизации – повышение эксплуатационной надежности котлов, снижение затрат на топливо, воду, электрическую энергию, повышение теплотехнических и экологических показателей работы, продление сроков эксплуатации котлов.

Модернизация действующих котлов намного дешевле их полной замены, не требует значительных инвестиционных затрат, может быть выполнена в короткие сроки при существенном снижении себестоимости выработки тепловой энергии.

Основные направления модернизации:

- интенсификация топочного теплообмена;
- модернизация оборудования;
- перевод паровых котлов в водогрейный режим работы;
- установка экономайзеров и воздухоподогревателей;
- совершенствование узлов и элементов котла;
- совершенствование автоматизации работы котлов и др.

Информационный поиск показал, что наибольшее количество примеров модернизации связаны с заменой горелок и переводом паровых котлов в водогрейный режим работы. Это объясняется реальным эффектом повышения эффективности и экономичности сжигания топлива, объективно мотивирующим модернизацию в свете удорожания первичных энергоносителей. При этом сравнительно небольшие затраты позволяют доводить котлы до современных энергоэкологических показателей и продлить эксплуатационный ресурс котлов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайцев, П.В. Модернизация водогрейного котла «Универсал» [Текст] / П.В. Зайцев // Информационный листок №369 – 88, ЦНТИ. – Чебоксары, 1988. – 3 с.
2. Сахаров, Е.Н. Модернизация водогрейных чугунных секционных котлов шатрового типа [Текст] / Е.Н. Сахаров // Новости теплоснабжения. – 2002. – №9. – С. 32-34.
3. Звягинцев, В.Л. Реконструкция водогрейного котла НИИСТУ – 5 [Текст] / В.Л. Звягинцев // Информационный листок №88 – 0105, Укрниинти. – Киев, 1988. – 3 с.
4. Сахаров, Е.Н. Модернизация водогрейных стальных котлов малой мощности типа ЗИО и НР [Текст] / Е.Н. Сахаров // Новости теплоснабжения. – 2000. – №2. – С. 19-22.
5. Орутбаев, Р.К. Разработка новых схем циркуляции воды для чугунных секционных котлов [Текст] / Р.К. Орутбаев // Новости теплоснабжения. – 2002. – №9. – С. 36-38.
6. Стаскевич, Н.Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа [Текст]: справ. руководство / Н.Л. Стаскевич, Г.Н. Северинец, Д.Я. Вигдорчик. – Л.: Недра, 1990. – 762 с.
7. Бирюзова, Е.А. Совершенствование сжигания природного газа на отопительных чугунных секционных котлах с горизонтально – щелевыми (подовыми) горелками [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Бирюзова. – СПб.: СПбГАСУ, 2003. – 188 с.
8. Рекламные материалы компании «СІВ UNIGAS».
9. Хлебников, В.И. Реконструкция чугунно – секционных котлов с использованием блочных горелок, работающих на газовом топливе [Текст] / В.И. Хлебников, А.Ф. Васильев, А.М. Моисеев, Л.С. Иоффе // Теплоэнергоэффективные технологии. – 2001. – №4. – С. 64-65.
10. Мазуров, А.А. Модернизация котлов КВа – Г (Факел – Г): повышение уровня надежности и безопасной эксплуатации [Текст] / А.А. Мазуров, А.Г. Верещагин // Новости теплоснабжения. – 2013. – №11. – С. 23-26.
11. Звягинцев, В.Л. Модернизация водогрейных котлов типа КВГ и ТВГ [Текст] / В.Л. Звягинцев // Новости теплоснабжения. – 2010. – №11. – С. 22-24.
12. Абдулин, М.З. Оптимизация топочного пространства – путь к повышению эффективности, экологической безопасности и надежности работы котлов [Текст] / М.З. Абдулин, Г.Р. Дворцин, А.М. Жученко, Ю.А. Кулешов // Новости теплоснабжения. – 2008. – №4. – С. 31-34.

13. Рекламные материалы фирмы «Weishaupt».
14. Ионин, А.А. Газоснабжение [Текст]: учебник / А.А. Ионин, В.А. Жила, В.В. Артихович, М.Г. Пшоник. – М.: АСВ, 2011. – 472 с.
15. Рекламные материалы ООО «ЭнергоДевелопмент».
16. Рекламные материалы ООО «НордКрафт».
17. Смоляницкий, Г.В. О переводе паровых котлов малой и средней мощности в водогрейный режим [Текст] / Г.В. Смоляницкий // Новости теплоснабжения. – 2000. – №1(1). – С. 23-25.
18. Акопьянц, Б.Е. Перевод промышленных паровых котлов в водогрейный режим работы [Текст] / Б.Е. Акопьянц // Новости теплоснабжения. – 2000. – №2(2). – С. 26-28.
19. Крючков, Е.Н. Опыт эксплуатации котлов типа ДКВР в водогрейном режиме [Текст] / Е.Н. Крючков, Н.В. Трикашный, В.К. Михайленко // Промышленная энергетика. – 1989. – №1. – С. 20-21.
20. Гафаров, А.Х. Особенности перевода паровых котлов ДКВР-20-13 и ДКВР-10-13 в водогрейный режим на предприятии тепловых сетей города Набережные Челны [Текст] / А.Х. Гафаров // Новости теплоснабжения. – 2006. – №3. – С. 19-22.
21. Глазырин, А.А. Исследование режимов работы водогрейной котельной при переводе её из паровой [Текст] / А.А. Глазырин, В.А. Глазырин, А.И. Глазырин // Новости теплоснабжения. – 2003. – №5. – С. 23-25.
22. Шелыгин, Б.Л. Реконструкция котла ДКВР-20-13 для работы в водогрейном режиме [Текст] / Б.Л. Шелыгин, С.А. Панков // Новости теплоснабжения. – 2012. – №11. – С. 16-17.
23. Васильев, А.В. Новая схема перевода паровых котлов типа ДКВР в водогрейный режим работы [Текст] / А.В. Васильев, Г.В. Антропов, Ю.И. Акимов // Новости теплоснабжения. – 2002. – №11. – С. 25-28.
24. Прохоров, С.Г. Перевод паровых котлов на водогрейный режим работы [Текст] / С.Г. Прохоров, Б.И. Свинухов, Н.В. Аржаева, А.А. Кожунов // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – №2(11). – С. 124-127.
25. Прохоров, С.Г. Перевод паровых котлов на водогрейный режим работы [Текст] / С.Г. Прохоров, Б.И. Свинухов, Н.В. Аржаева, В.И. Шаврин // Берг-коллегия. – 2011. – №9(84). – С. 13.
26. Роддатис, К.Ф. Котельные установки [Текст]: учеб. пособие / К.Ф. Роддатис. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
27. Чепель, В.М. Сжигание газов в топках котлов и печей и обслуживание газового хозяйства предприятий [Текст]: моногр. / В.М. Чепель, И.А. Шур. – Л.: Недра, 1980. – 591 с.

28. Стриха, И.И. Определение экономии топлива и теплоты при реализации энергосберегающих мероприятий в котельных [Текст] / И.И. Стриха // Новости теплоснабжения. – 2004. – №12. – С. 31-34.

29. Картышев, А.М. Оценка экономической эффективности модернизации котлов НР-18 и ЗИО-60 [Текст] / А.М. Картышев // Новости теплоснабжения. – 2002. – №4(20). – С. 25-27.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Характеристика газовых водогрейных и паровых котлов малой мощности

Тип котла	Номинальная теплопроизводительность, Гкал/ч	КПД, %	Установочный расход топлива, м <sup>3</sup> /ч	Объем уходящих газов, м <sup>3</sup> /с	Температура уходящих газов, °С
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
ТМЗ – 0,4 – 9	0,256	86	35	0,24	260
МЗК – 8АГ	0,256	86	35	0,24	260
КПА – 500Г	0,256	80	37,1	0,26	260
МЗК – 7АГ – 1	0,64	86	86,3	0,6	260
Е – 1 – 9Г	0,64	86	86,3	0,6	260
ДКВР – 2,5-13	1,6	90	204,4	1,41	260
ДКВР – 4-13	2,56	90,8	327	2,55	260
ДКВР -6,5-13	4,16	91,8	525,7	3,62	260
ДКВР – 10-13	6,4	91,8	808,8	5,56	260
ДКВР – 20-13	12,8	90,6	1639	11,3	260
ДЕ – 6,5-14ГМ	5,24	91,2	667	3,75	162
ДЕ – 10 -14ГМ	8,15	92,1	751	3,89	146
ДЕ – 16-14ГМ	11,63	91,9	1167,8	8,0	147
КВГ – 6,5	6,5	92,2	822,6	4,45	146
КВГМ – 10	10	92	1260	6,8	145
ТВГ -4р	4,3	90,5	551,2	3,22	220
ТВГ – 8	8,3	91,5	1052,3	6,16	225
«Универсал-5»	0,18-0,51	85	35-98,6	0,2-0,6	200
«Универсал-6М»	0,34-0,59	85	50,3-81,3	0,24-0,66	170
«Энергия-3»	0,37-0,74	85	71,6-143	0,43-0,86	190
«Энергия-5»	0,72-1,26	85	128,5-224	0,77-1,35	190
«Энергия-6»	0,33-0,63	85	142-267	0,38-0,71	190
«Факел»	0,86	85	109,6	0,67	200
НИИСТУ-5	0,39-0,56	85	69,6-100	0,55	250
ЗИО	1,26	80	243,6	1,5	220
Шухова-Берлина	4,3	80	623,5	3,94	220

**Перевод парового котла ДЕ-6,5-14ГМ в водогрейный режим работы**

Особенностью котлов ДЕ является несимметричная компоновка поверхностей нагрева. Это вызывает объективную невозможность организации движения воды путем установки поперечных перегородок в верхнем и нижнем барабанах по аналогии с котлами ДКВР. Проведенные нами\* расчеты показали, что можно еще более улучшить конструкцию, увеличив скорость движения воды в наиболее опасных теплонапряженных, опускающих экранных трубах до величины 1,0-1,5 м/с, в экранах с подъемным движением – 0,6-0,8 м/с; в конвективных пучках соответственно 1,0-1,2 и 0,4-0,6 м/с. При этом конструктивные переделки оказались менее значительными, а потоки теплоносителя более устойчивыми. Местное вскипание при расходе теплоносителя через котел не менее 230 т/ч практически исключается.

Нами предложен вариант реконструкции, показанный на рис.52, 1П2, 2П2. Верхний и нижний барабаны котла разделены перегородками-скорлупами на три отсека. Скорлупы выполнены из сегментных отрезков трубы Ø426 мм.

Вода после экономайзера подается по патрубку **1** в нижний отсек **3** нижнего барабана котла (рис. 52), откуда по двум трубам переднего экрана и **49** трубам правого экрана поднимается в верхний отсек **2** верхнего барабана. Следующий ход воды направлен вниз по двум трубам переднего экрана, **12** трубам поворотного экрана и верхнему коллектору, объединяющему трубы заднего экрана и дополнительный отсек, откуда попадает в верхний отсек **4** нижнего барабана. Вверху циркуляционной трубы заднего экрана должна быть установлена дроссельная шайба диаметром 38 мм. Затем вода направляется опять вверх по трубам левого экрана (47 трубок) в нижний отсек **5** верхнего барабана котла.

Четвертый ход воды вниз направлен по двум рядам трубок конвективного пучка (51 трубка) в общую часть нижнего барабана и, наконец, **5** – вверх по остальным рядам труб конвективного пучка (131 шт.) в неотгороженное пространство верхнего барабана. Из верхнего барабана вода направляется по патрубку **6** через узел рециркуляции и корректировки температуры в тепловую сеть.

Результаты гидравлического расчета движения теплоносителя внутри котла представлены в табл.1П2. Гидравлические потери в котле не превышают 1 м вод. столба.

---

\* В работе принимали участие Б.И.Свинухов, С.Г.Прохоров, Н.В.Аржаева, А.Б.Свинухов.

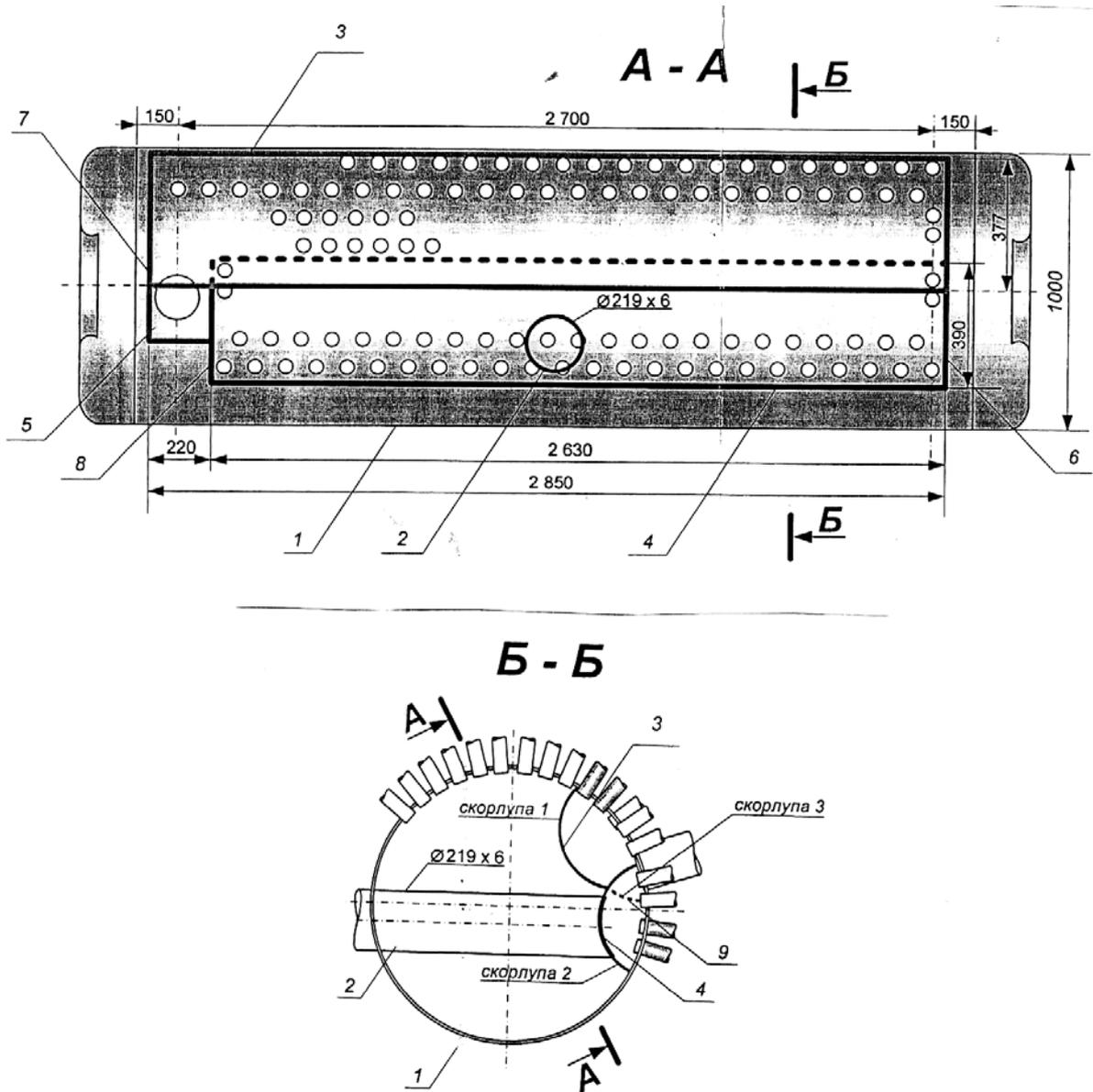


Рис. 1П2. Нижний барабан:  
 1 – барабан; 2 – подводящий патрубкок; 3, 4, 5 – скорлупы; 6, 7, 8 – заглушки

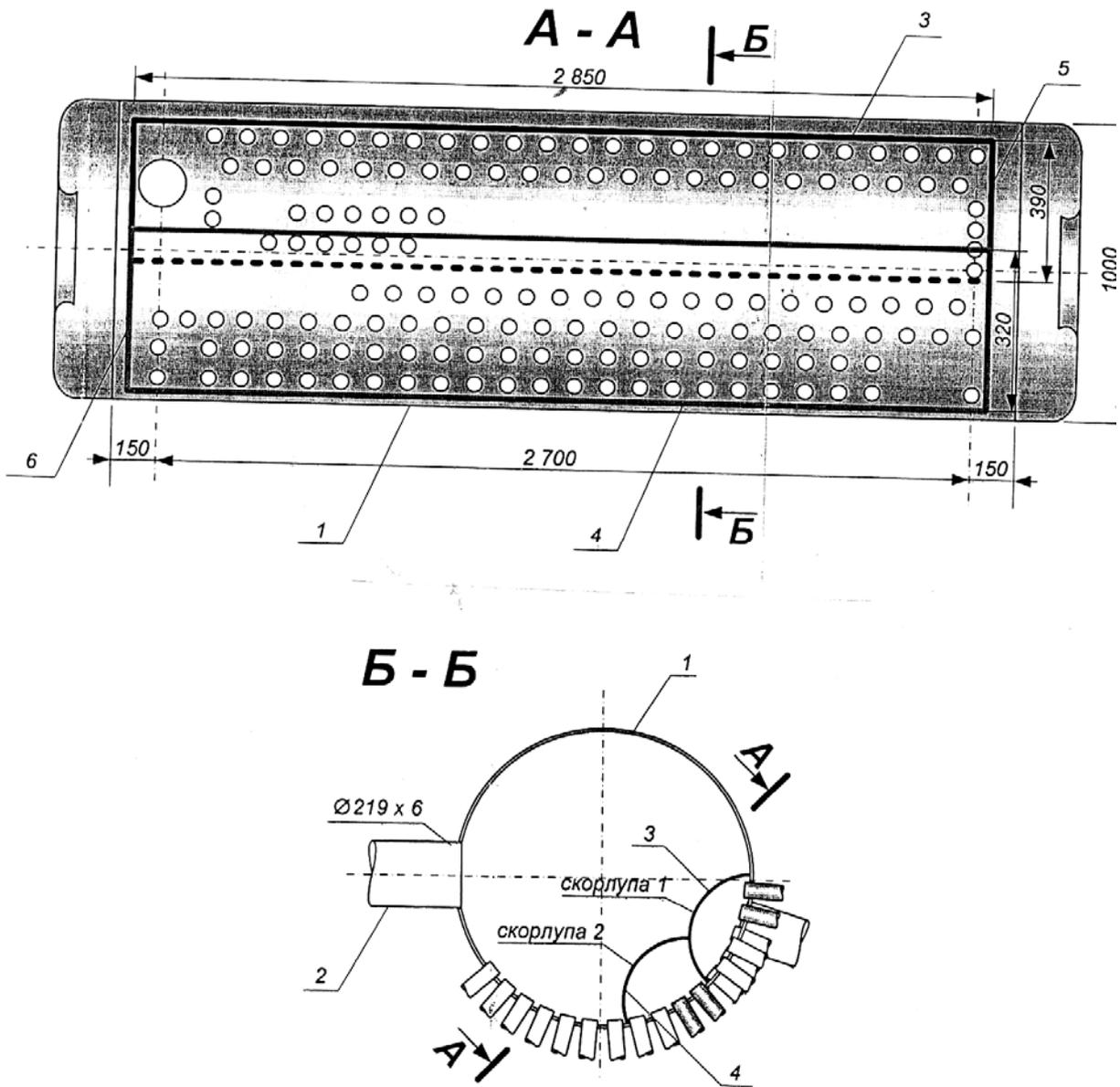


Рис. 2П2. Верхний барабан:  
 1 – барабан; 2 – отводящий патрубок; 3, 4 – скорлупы; 5, 6 – заглушки

Продолжение прил. 2  
Таблица 1П2

Результаты гидравлического расчета движения теплоносителя внутри котла

Номер хода	Длина $l$ , м	Расход, $m^3/ч$	Скорость течения, м/с	Сумма к.м.с. $\zeta$	Потери напора, м	Число трубок	Число Рейнольдса	Число рядов труб	Направление потока
1	5,32	235	0,770	2	0,232	51	96792	2	вверх
2	3	235	1,062	2	0,299	37	133416	2+з.экр.	вниз
3	2	235	0,836	1,5	0,129	47	105030	2	вверх
4	1,9	235	0,770	2	0,121	51	96792	2	вниз
5	1,9	235	0,397	2	0,032	99	49863	6	вверх
<b>Всего:</b>	<b>14,12</b>				<b>0,814</b>	<b>285</b>			

Выполнен поверочный тепловой расчет котла по нормативной методике с целью определения температуры нагрева воды и общей теплопроизводительности котла ДЕ-6,5-14ГМ при работе в водогрейном режиме.

При выполнении расчета теплообмена в котле при предложенных конструктивных изменениях использовались паспортные данные котла, которые приведены в табл. 2П2, а также были учтены данные, показанные в табл. 3П2.

Таблица 2П2  
Конструктивные характеристики котла ДЕ-6,5-14ГМ

Наименование	Количество, шт.	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Длина, м
Барaban верхний	1	1030	13	3000
Барaban нижний	1	1030	13	3000
Труба коллектора заднего экрана	2	147	6	1766
Труба бокового экрана (правого)	49	51	2,5	260,5
Труба бокового экрана (левого)	40	51	4	78,8
Труба конвективного пучка	256	51	2,5	483,5
Труба фронтального экрана	4	51	2,5	13,7
Труба заднего экрана	20	51	2,5	43,5
Труба направляющей лопатки	12	51	2,5	36,8
Труба рециркуляционная заднего экрана	1	76	3,5	1,7

№ хода	Направление движения воды	Площадь поверхности нагрева, м <sup>2</sup>	Живое сечение для прохода воды, м <sup>2</sup>	Скорость движения воды, м/с
1-й	вверх	27,85	0,0848	0,77
2-й	вниз	6,97	0,0615	1,06
3-й	вверх	23,23	0,0781	0,84
4-й	вниз	20,884	0,0848	0,77
5-й	вверх	39,65	0,1645	0,40

Ниже даны основные показатели, полученные в ходе проведенного расчета.

**Расчетный расход воды через котел составляет 235 т/ч.**

**Конечная температура нагрева воды – 93 °С.**

**Температура дымовых газов на выходе из котла – 375 °С.**

**Коэффициент теплопередачи в топке – 42,82 Вт/(м<sup>2</sup>град.).**

**Коэффициент теплопередачи в конвективном пучке – 62,7 Вт/(м<sup>2</sup>град.).**

Теплопроизводительность котла ДЕ-6,5-14ГМ в водогрейном режиме при предложенной схеме движения воды составляет 5500 кВт (4,73 Гкал/ч).

Диаметры подводящего к нижнему барабану и отводящего от верхнего барабана патрубков приняты 219 мм. В верхних точках отсеков верхнего барабана котла следует установить патрубки с вентилями для выпуска воздуха ( $D_y=25$  мм). В нижних точках отсеков нижнего барабана нужно предусмотреть патрубки для слива воды в дренаж диаметром не менее 40 мм.

Таким образом, реконструкция котла приведет к повышению его тепловой производительности, к спокойной бесшумной работе по тракту движения теплоносителя (шумы возникают только в горелках, дутьевом вентиляторе и дымососе), к снижению опасности, так как снижается рабочее давление, к упрощению эксплуатации котельной.

**Результаты пуско-наладочных работ на котле ДКВР-6,5-13,  
переведенного в водогрейный режим работы**

Котел был оборудован инжекционными горелками ИГК-250 (4 штуки на котел), не соответствующих современным требованиям по безопасности, эффективности и экономичности сжигания газа. В результате модернизации газооборудования были установлены две горелки Weishaupt G40, адаптированные к работе с котлом.

После проведения пуско-наладочных работ и сдачи котла в эксплуатацию установлено:

- горелки во всем диапазоне изменения нагрузки работают устойчиво, без химнедожога, полностью в автоматическом режиме;
- средневзвешенный КПД котла вырос на 4 % и составил не менее 94,5 %;
- концентрация оксидов азота в сухих неразбавленных продуктах сгорания, в зависимости от нагрузки, составила 60-72 мг/м<sup>3</sup>. Это позволило снизить их выброс в 6,4 раза по сравнению с исходным вариантом. Ниже приведена режимная карта работы котла на природном газе.

Наименование величины	Размерн.	Значение				
1	2	3				
Теплопроизводительность	Гкал/ч	1,29	1,75	2,3	3,1	3,8
Количество работающих горелок	шт.	2				
Давление газа после регулятора	mbar	100				
Степень открытия газовой заслонки	%	17,5	21	25	30	35
Степень открытия воздушной заслонки	%	6,5	16,2	23	35	60
Разрежение в топке	кгс/м <sup>2</sup>	2,5-5,0				
Содержание в продуктах сгорания за котлом						
CO <sub>2</sub>	%	8,6	8,9	9,1	9,3	9,6
O <sub>2</sub>	%	5,7	5,2	4,8	4,4	3,9
NO <sub>x</sub>	ppm	22	27	28	29	
NO <sub>x</sub> приведенное к α=1	мг/м <sup>3</sup>	60,1	63,6	70,4	71,3	71,5
Содержание в продуктах сгорания за экономайзером						
CO <sub>2</sub>	%	8,2	8,6	8,8	9,0	9,3
O <sub>2</sub>	%	6,4	5,7	5,3	5,0	4,4
Коэффициент избытка воздуха за котлом		1,33	1,29	1,27	1,24	1,2
за экономайзером		1,39	1,33	1,3	1,28	1,24

## Окончание прил. 3

1	2	3				
Температура уходящих газов за котлом	°С	88	99	107	124	149
за экономайзером	°С	74	81	91	103	114
Температура воды до котла	°С	57	59	60	60	62
после котла	°С	67	73	76	82	89
Давление воды до котла	кгс/см <sup>2</sup>	6,6				
после котла	кгс/см <sup>2</sup>	6,0				
Расход воды через котел	м <sup>3</sup> /ч	198				
Расход газа	нм <sup>3</sup> /ч	172	231	307	409	495
Потери тепла с уходящими газами	%	2,9	3,2	3,7	4,2	4,7
Потери тепла в окружающую среду	%	2,3	1,7	1,3	1,0	0,8
КПД котлоагрегата	%	94,8	95,1	95,0	94,8	94,5
Удельный расход условного топлива на выработку 1Гкал тепла	$\frac{\text{кг.у.т}}{\text{Гкал}}$	150,7	150,2	150,4	150,7	151,2

**Применение горелок Weishaupt  
на котлах Бийского котельного завода\***

Котлы Бийского котельного завода являются наиболее распространенными на российском рынке теплоэнергетики. За более чем 70-летний период работы Бийский котельный завод изготовил более 125000 котлов в комплексной поставке, а также поставил запчастями более 25000 котлов. Суммарная мощность изготовленных за этот период котлов равна 936610 тоннам пара в час и составляет 55 % от всех выпущенных для промэнергетики котлов.

В настоящее время в России, по различным оценкам, работает от 50 000 до 70 000 котлов, произведенных Бийским котельным заводом. Несмотря на изменение топливной конъюнктуры в целом, спрос на газомазутные котлы производства ОАО БИКЗ сегодня не уменьшился. Основной объем производства, помимо унифицированных для различных видов топлива котлов ДКВр, приходится на моноблочные паровые котлы ДЕ (ДЕВ), КЕ (КЕВ), ДСЕ, Е и КВЕ.

Все предыдущие годы для сжигания топлива в топках вышеперечисленных котлов применялись российские регистровые горелки ГМГм, ГМ, ГМП и РГМГ. Данные горелки работают по принципу диффузионного смешивания, когда турбулизация и закручивание потока воздуха достигается путем установки в горелки лопаточного регистра.

Практическая многолетняя эксплуатация горелок показала как положительные, так и отрицательные особенности их работы. Приведем некоторые примеры.

- Закручивание потока воздуха резко сокращает подготовительную стадию горения (подогрев и воспламенение топлива) и активно способствует догоранию коксовых частиц. Одновременно с этим возникает значительная неравномерность распределения тепловых потоков по длине факела. При работе горелок ГМ максимум излучения расположен в головной части топки. По мере выгорания топлива тепловые потоки снижаются и в конце топочной камеры в 2-2,5 раза ниже первоначальных потоков. Коэффициент тепловой эффективности экранов в начале топки составляет 0,68-0,64 при среднем значении 0,44-0,576.

- Величина максимальных тепловых потоков и их местоположение определяет требования к параметрам и условиям работы среды в циркуляционном контуре котла.

---

\* Рекламные материалы компании Рационал (Россия).

- Температура в локальной зоне горения превышает пороговый уровень (1550 °С), после которого начинается интенсивное окисление атомарного азота. Содержание NO<sub>x</sub> в уходящих газах превышает 500 мг/м<sup>3</sup> (котел ДЕ-10-14ГМ).

- Несовершенство подвода воздуха в регистровую часть горелки приводит к значительной скоростной и расходной неравномерности на выходе из горелки. Горение затягивается и нарушается симметрия факела относительно оси котла. Коэффициенты избытка воздуха намного превышают расчетные величины, имеет место касание факелом задней стенки котла и затягивание факела в конвективный пучок.

- Для распыления жидкого топлива в регистровых горелках используются паро-механические форсунки, что требует дополнительного расхода пара на собственные нужды. Основным недостатком паромеханических форсунок является изменение внешней формы и внутреннего строения факела с изменением давления подачи топлива. При неизменной эпюре распределения скоростей воздушного потока изменение характеристик топливного факела приводит к качественному ухудшению сжигания топлива.

- Уровень автоматизации управления процессом сжигания топлива ограничивается только защитными и показывающими функциями.

Российские производители горелок последние десятилетия практически не проводили работы по модернизации и автоматизации процессов сжигания на своих горелках. С начала 90-х годов прошлого столетия началось активное продвижение на рынок России современных горелок различных европейских и мировых производителей. Данные горелки были предназначены в основном для импортных и российских жаротрубных котлов, и до кризиса 1998 года внимание европейских производителей горелок к российским водотрубным котлам было незначительное.

Эпизодические попытки применения современных зарубежных горелок на котлах Бийского котельного завода сталкивались с постоянной проблемой несоответствия габаритов факела размерам камеры сгорания котла. В Европе в настоящий момент практически отсутствует производство водотрубных котлов и поэтому все горелки разрабатываются и производятся для работы с наддувными жаротрубными котлами.

По своим техническим характеристикам стандартные европейские горелки являются длиннофакельными, и они не могут работать на водотрубных котлах с короткими топками, работающими под разрежением.

На таких практических примерах подтвердились теоретические предположения, что ни одна европейская горелка, созданная для работы на жаротрубных котлах, не сможет вывести водотрубный котел типа Е, ДЕ, ДКВр на номинальную мощность.

Изменения в экономической ситуации после кризиса 1998 года и значительное увеличение заинтересованности Заказчиков в покупке привычных и доступных котлов Бийского котельного завода потребовало от завода Weishaupt и компании РАЦИОНАЛ оперативных мероприятий по адаптации горелок к водотрубным котлам.

В 2000 году компания РАЦИОНАЛ, эксклюзивный представитель фирмы Weishaupt в России, и институт исследований и развития при заводе Weishaupt утвердили новую программу по адаптации горелок Weishaupt к котлам Бийского котельного завода. В течение нескольких лет необходимо было решить следующие задачи:

- Разработка, испытание и серийное производство нового смесительного устройства для равномерного распределения факела горелок по объему камеры сгорания в коротких топках водотрубных котлов.
- Достигнуть оптимально низких эмиссионных показателей при сжигании различных видов топлива и стабильной автоматизированной работы горелок во всем диапазоне мощности водотрубных котлов.
- Внедрение с 2005 года в серийное производство новых горелок с коротким факелом (исполнение SF) для всех типоразмеров котлов Бийского котельного завода.

В настоящее время данная программа завершена.

К середине 2005 года закончены испытания по адаптации горелок к водотрубным котлам Бийского котельного завода. С 2005 года началось серийное производство горелок исполнения SF для всех основных типоразмеров котлов ДЕ и ДКВр. Рабочей и инженерно-конструкторской группе, которая успешно выполнила задачи, поставленные в программе 2001 года, обозначены следующие задачи по анализу работы адаптированных горелок Weishaupt, мониторинга процессов эксплуатации котлов и, при необходимости, дальнейшей оптимизации работы горелок на водотрубных котлах.

В течение четырехлетней совместной работы специалистов завода Weishaupt, компании РАЦИОНАЛ и Бийского котельного завода было проведено 45 штатных испытаний новых горелок на разных типах водотрубных котлов, разработано и изготовлено 54 варианта пробных смесительных устройств. Бюджет расходов по этим работам за четыре года составил около 1 млн. 200 тыс. Евро.

За прошедший 2006 год проведен мониторинг работы более 20 котельных установок с горелками исполнения SF.

На сегодняшний день накоплен значительный объем практических эксплуатационных результатов, которые позволяют реально ощутить нижеследующие преимущества применения горелок Weishaupt в сравнении с аналогами на котлах Бийского котельного завода.

#### ***Экономия энергоресурсов (топливо и электроэнергия)***

- снижение потерь тепла с уходящими газами и неполнотой сгорания топлива и, как следствие, увеличение КПД на 2,5-3 %;
- применение систем плавного, частотного и кислородного регулирования;
- увеличение диапазона регулирования (в среднем 1:7);
- отсутствие подтекания жидкого топлива за счет конструктивных особенностей форсунок;
- уменьшение расхода пара на собственные нужды (сажеобдувка, распыл жидкого топлива и прочее).

#### ***Повышение уровня автоматизации***

- применение систем микропроцессорного регулирования;
- поставка горелок со шкафами управления и безопасности котла;
- возможность применения кислородного регулирования;
- возможность применения частотного регулирования двигателей горелки и дымососа;
- возможность передачи данных по цифровым каналам связи.

#### ***Увеличение срока службы оборудования***

- максимум теплового излучения в топочной камере котла составляет 105-110 % от среднего, что существенно снижает требования к циркуляционному контуру котла (эффект достигнут впервые в топочной практике);
- равномерное распределение факела по всей камере сгорания котла;
- увеличение межремонтного срока эксплуатации экранов топки, труб котельного пучка и экономайзера в 2,5-3 раза.

#### ***Соответствие требованиям и нормам экологии***

- снижение экологически вредных выбросов в дымовых газах в 1,5-2 раза, максимальное значение температуры в «ядре» горения 1350-1480 °С.

#### ***Удобство обслуживания и эксплуатации***

- обеспечивается блочностью исполнения горелок, в блок входят все элементы, необходимые для подготовки и подачи топлива в зону горения, приборы автоматического регулирования процессом горения и аварийной защиты.

## **Примерная программа режимно-наладочных испытаний парового котла**

### **1. Цель и объем работ**

*Целью испытаний является:*

- наладка режимов работы котлов в диапазоне возможной их производительности;
- определение тепловых потерь и коэффициента полезного действия котлов брутто;
- определение величин удельных расходов топлива;
- составление режимных карт котлов;

*При испытаниях выполняются следующие работы:*

- проводят отдельные прикидочные опыты, определяют присосы воздуха в топку и газоходы котлов;
- определяют оптимальные коэффициенты избытка воздуха (режимно-наладочные опыты) при производительности 40-100 %;
- проводит основные (балансовые) опыты при производительности 40-100 %;
- составляют технический отчет.

### **2. Категория испытаний**

Теплотехнические испытания проводят по второй категории сложности, характеризующейся определением КПД котлов с точностью  $\pm 1,5-2,0$  %.

### **3. Условия проведения испытаний**

Испытания проводят в нормальных эксплуатационных условиях. В период проведения опытов автоматику регулирования отключают.

Отклонение значений отдельных параметров от средних величин при производстве опыта не должно превышать 1,5 %.

### **4. Количество и продолжительность опытов**

Для каждой нагрузки проводят 3-5 режимно-наладочных и 1-2 основных (балансовых) опыта, не считая прикидочных.

Продолжительность режимно-наладочного опыта 1,5-2 часа, основного - 3 часа, прикидочного – до 1 часа.

Длительность перерыва между опытами при нагрузках котла, отличающихся друг от друга более чем на 25 %, должна составлять не менее 3 часов.

Длительность перерыва между опытами при изменении режима горения на заданной нагрузке должна составлять не менее 30 мин.

#### 5. Методика составления теплового баланса

КПД котлов определяют по методу обратного баланса. Определение потерь тепла производят по методике проф. М.Б.Равича.

#### 6. Организационные указания

До проведения испытаний должны быть выполнены работы по плану-заданию, составленному руководителем испытаний и согласованному с «Заказчиком», в т.ч. установлены на котле все необходимые приборы, прошедшие поверку.

Составил: представитель «Подрядчика»

Согласовано: представитель «Заказчика»

Дата:

#### План-задание на подготовку котла к режимно-наладочным испытаниям (РНИ)

№	Наименование работ	Условия исполнения	Срок исполнения
1	Произвести поверку всех стационарных приборов, контролирующих работу котлов с составлением акта о пригодности поверенных приборов и установить их по месту.		До начала РНИ
2	Оборудовать рабочее место бригады, выполняющей режимно-наладочные испытания с устройством необходимого освещения.		—

Составил: представитель «Подрядчика»

Согласовано: представитель «Заказчика»

Дата:

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ  
РЕЖИМНАЯ КАРТА**

парового котла зав.№ 2970 типа ДЕ-25-14 ГМ,  
оборудованного горелкой типа ГМП-16,  
в котельной ОАО «Маяк», г. Пенза

№	Наименование параметров работы котлоагрегата	Ед. изм.	Нагрузка, %			
			45,01	58,96	79,00	86,70
1	Паропроизводительность фактическая	т/ч	11,25	14,74	19,93	21,69
2	Паропроизводительность видимая	т/ч	12,00	16,00	21,00	23,00
3	Давление пара в барабане	кгс/см.кв.	10,00	10,00	11,00	11,50
4	Расход газа (с поправкой на T и P)	м.куб./ч	853,00	1120,00	1520,00	1660,00
5	Расход пара по прибору	т/ч	12,00	16,00	21,00	23,00
6	Давление газа: в коллекторе	кПа	30,00	28,00	23,00	22,00
7	перед горелками щит	кПа	6,40	11,10	18,70	19,90
8	Давление воздуха перед горелкой щит	кПа	0,80	1,40	2,30	2,50
9	Разрежение: в топке	Па	20,00	20,00	20,00	20,00
10	Температура питат. воды	°С	102,00	102,00	102,00	102,00
11	Температура уход. газов за экономайзером	°С	140,00	157,00	180,00	190,00
12	Состав уход. газов за экономайзер:					
	O <sub>2</sub>	%	4,20	3,60	2,50	2,30
	CO <sub>2</sub>	%	9,44	9,78	10,40	10,51
	CO	ppm	0,00	0,00	0,00	0,00
13	Коэффициент избытка воздуха за экономайзером		1,22	1,18	1,12	1,10
14	Удельный расход условного топлива	кгут/Гкал	154,10	154,47	155,06	155,56
15	КПД котлоагрегата	%	92,67	92,45	92,09	91,79

**Примечания:**

1. Режимная карта составлена при теплотворной способности газа 8000 ккал/нм<sup>3</sup>, температуре воздуха перед горелкой +25 °С и температуре газа на узле учета + 5 °С;
2. Рабочее давление пара в барабане котла 9 ÷ 10,5 кгс/см.кв.

Составил: представитель «Подрядчика» \_\_\_\_\_/Лопухов В.П./  
Ознакомлен: представитель «Заказчика» \_\_\_\_\_/Дементьев Е.Е./

### ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ КОТЛА ОТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

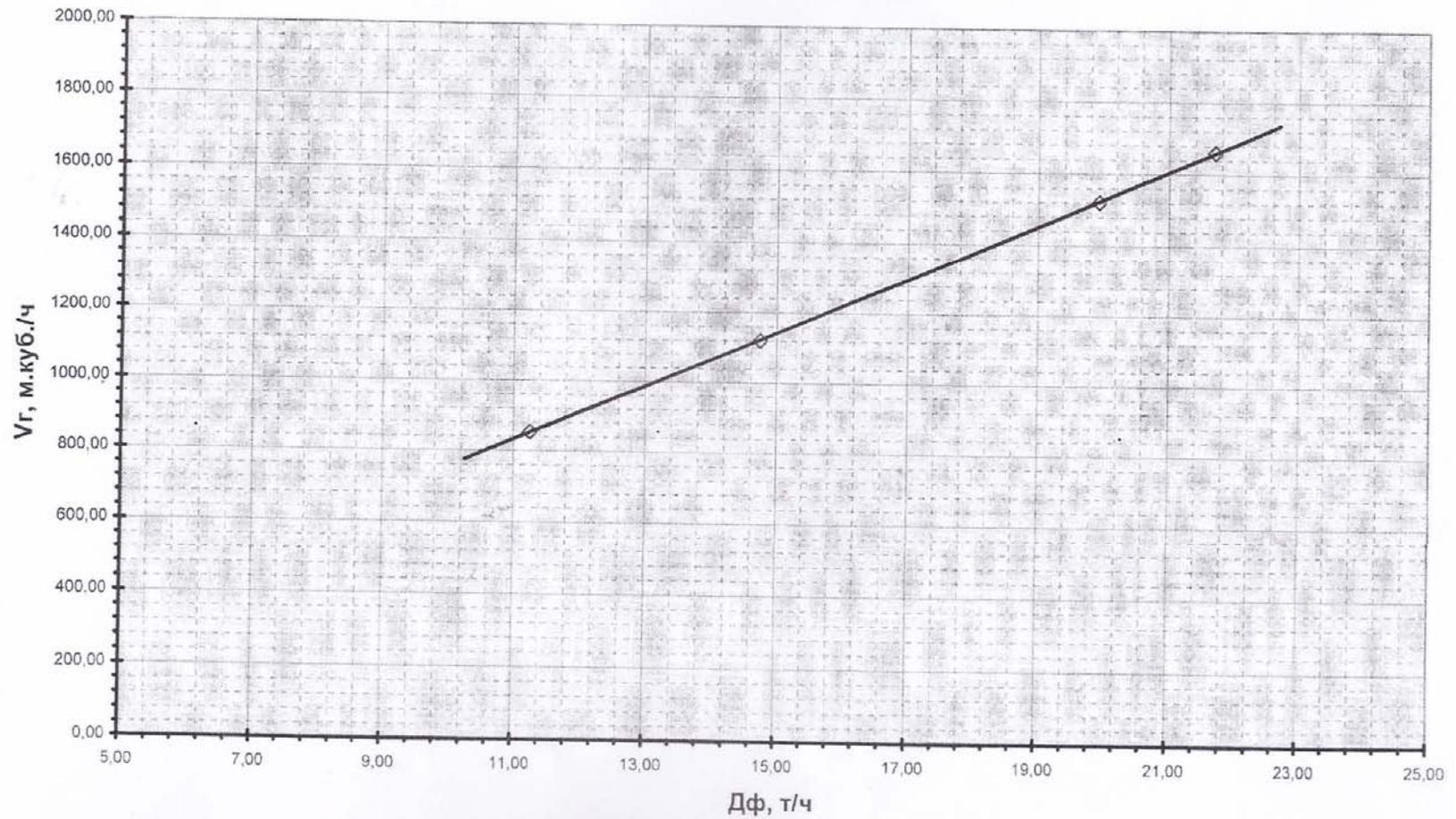


Рис. 1П5. Зависимость расхода газа от производительности котлоагрегата

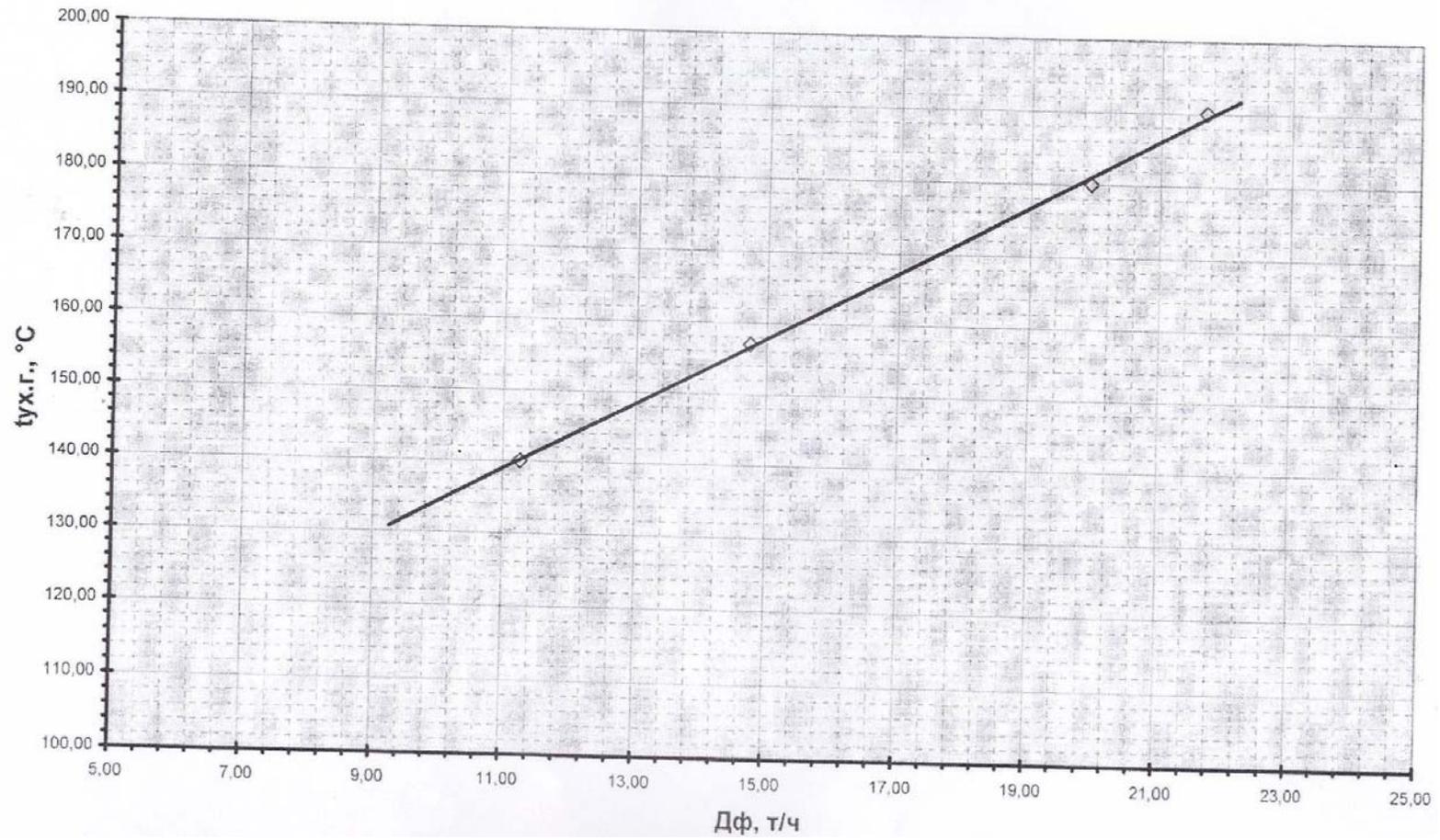


Рис. 2П5. Зависимость температуры уходящих газов от производительности котлоагрегата

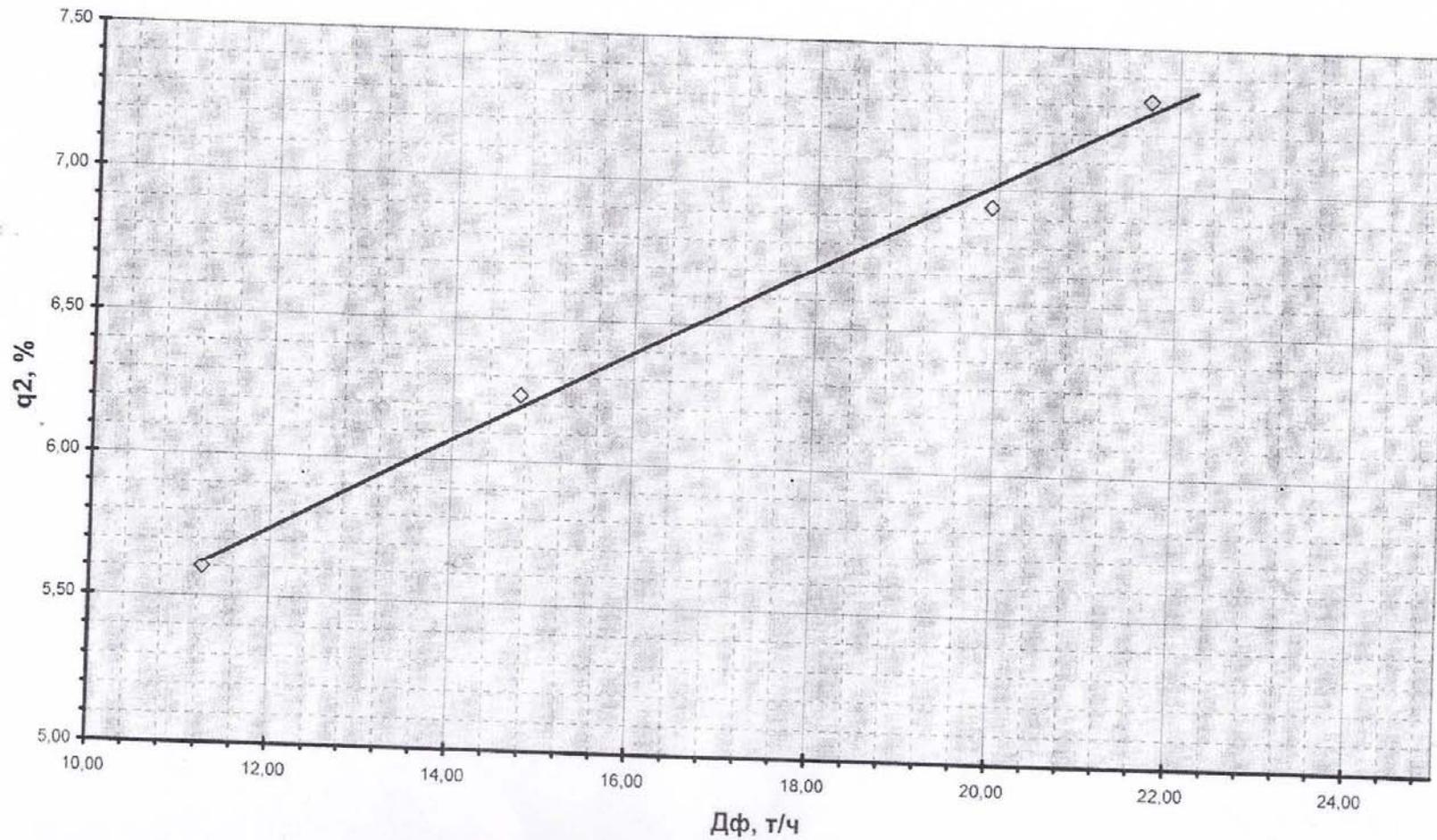


Рис. 3П5. Зависимость потерь тепла с уходящими газами от производительности котлоагрегата

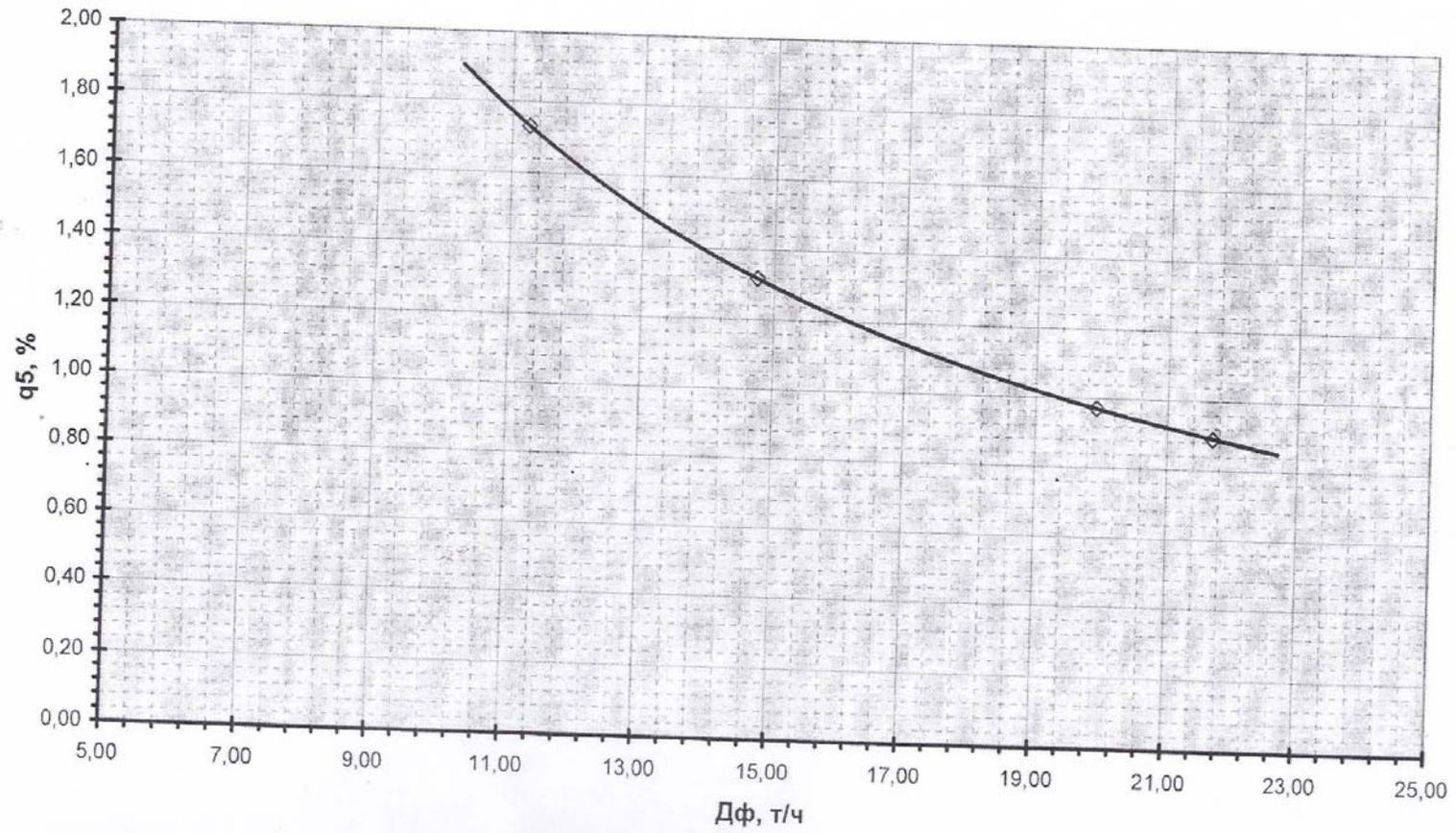


Рис. 4П5. Зависимость потерь тепла в окружающую среду от производительности котлоагрегата

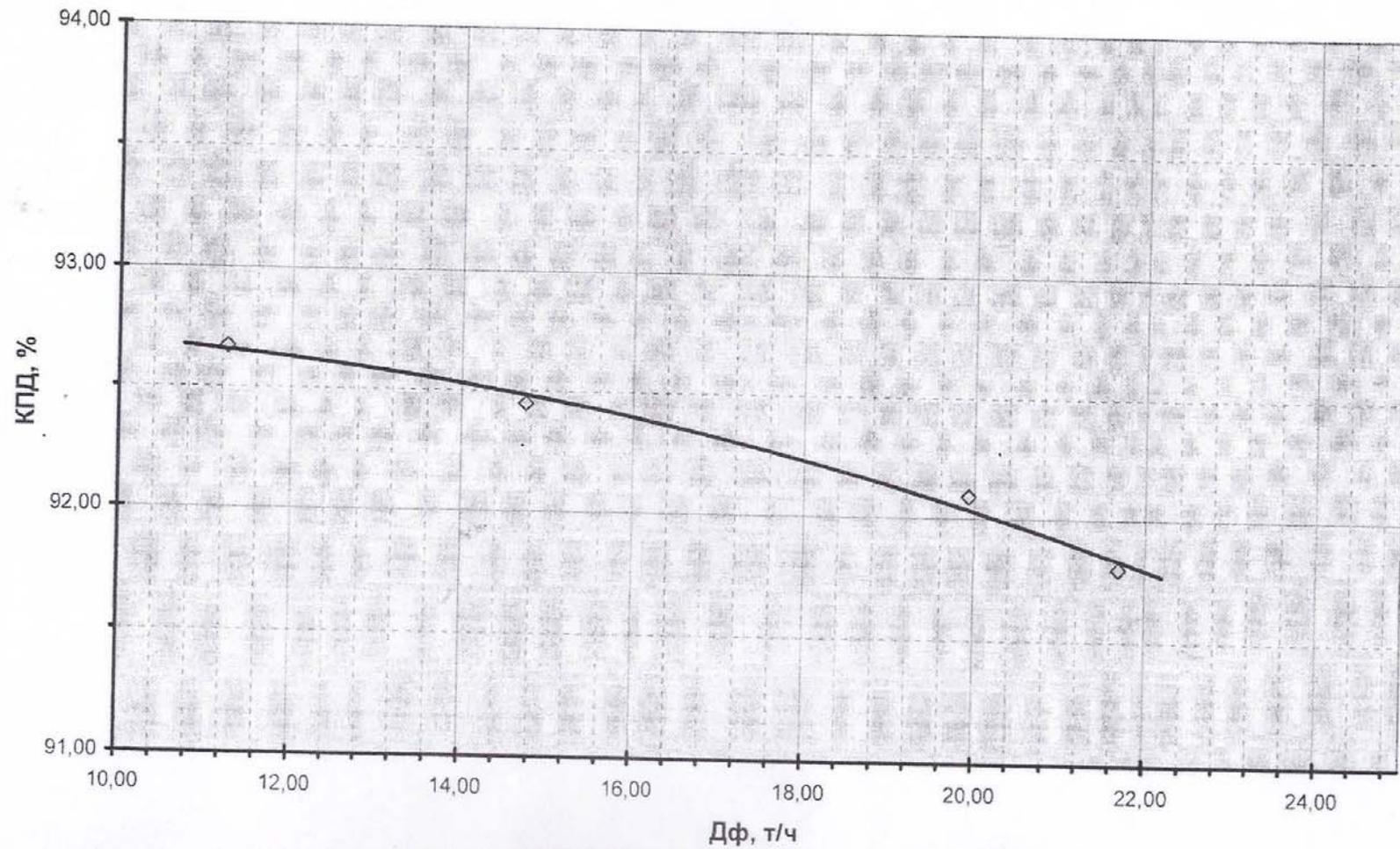


Рис. 5П5. Зависимость КПД от производительности котлоагрегата

## О Г Л А В Л Е Н И Е

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. МОДЕРНИЗАЦИЯ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ .....	5
1.1. Реконструкция котлов .....	5
1.2. Существующее газооборудование .....	18
1.3. Модернизация газооборудования .....	37
1.3. Интенсификация лучистого теплообмена .....	53
2. МОДЕРНИЗАЦИЯ ПАРОВЫХ КОТЛОВ .....	54
2.1. Модернизация газооборудования .....	54
2.2. Направления совершенствования газооборудования .....	63
2.3. Перевод в водогрейный режим работы .....	65
2.3.1. Общие положения .....	65
2.3.2. Схемы перевода .....	67
3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МОДЕРНИЗАЦИИ .....	81
3.1. Оценка эффективности сжигания газа .....	81
3.2. Эффективность модернизации систем автоматики .....	88
3.3. Оценка экономической эффективности модернизации .....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	95
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	96
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	99

Научное издание

Прохоров Сергей Григорьевич

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВОДОГРЕЙНЫХ И ПАРОВЫХ КОТЛОВ  
МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Монография

В авторской редакции

Верстка Н.А. Сазонова

---

Подписано в печать 7.08.15. Формат 60×84/16.

Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.

Усл.печ.л. 7,0. Уч.-изд.л. 7,5. Тираж 500 экз. 1-й завод 100 экз.

Заказ № 303.



---

Издательство ПГУАС.  
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.