

Ордена Трудового Красного Знамени
Академия коммунального хозяйства им. К.Д.Нарzikова

У т в е р ж д а ю
Зам. председателя совета
Росжилкомунсоюза
Б. И. Г о р о л о в
19 декабря 1990 г.

Т Е Х Н И Ч Е С К И Е Р Е Ш Е Н И Я
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ УТИЛИЗАТОРОВ
В КОТЕЛЫХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Сектор научно-технической информации
М о с к в а 1 9 9 2

Приведены основные технические решения по утилизации теплоты дымовых газов котельных, работающих на газообразном, жидком и твердом топливе. Рассмотрены экономические и экологические вопросы применения теплоутилизаторов.

Технические решения разработаны отделом коммунальной энергетики АКХ им. К.Д.Памфилова (кандидаты техн. наук З.В.Короткова и В.В.Пономарева, инж. Н.Г.Эжнева) и предназначены для инженерно-технических работников коммунальных теплоэнергетических предприятий и проектантов.

Замечания и предложения по настоящему техническому решению просьба направлять по адресу: 123371, Москва, Волоколамское шоссе, 116. АКХ им. К.Д.Памфилова, отдел коммунальной энергетики.

В настоящее время одним из основных путей экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в коммунальной энергетике является повышение эффективности их использования путем утилизации тепла уходящих газов.

В системе местных Советов около 14 тыс. котельных, из которых 10 тыс. котельных мощностью менее 3,5 МВт. Суммарная мощность установленных котлов около 99 МВт, в том числе чугунных 16,3 МВт. Потери тепловой энергии с уходящими газами со средней температурой газов 150⁰С составляют 4-5%, т.е. около 29 тыс. ГДж, что равноценно потере 800 т у.т /ч или около 2,7 млн. т у.т/год.

В решение энергетической программы в нашей стране значительный вклад может внести применение теплоутилизационных установок, работающих на дымовых газах котельных.

В настоящее время теплоэнергетические предприятия не заинтересованы в экономии топливно-энергетических ресурсов в связи с низкой их стоимостью и отсутствием системы материального стимулирования за экономию ТЭР. Вопрос экономного расходования топлива стоит на повестке дня как в нашей стране, так и за рубежом, поэтому работы по выбору и проектированию теплоутилизационных установок находят все большее распространение.

Задачей настоящей работы является определение возможности и целесообразности использования утилизаторов теплоты дымовых газов котельных, работающих на различных видах топлива.

ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Температура уходящих газов из котельных агрегатов при номинальной нагрузке составляет около 120–130°C, котлы мощностью менее 0,7 кВт выбрасывают дымовые газы с температурой выше 200°C.

Установка в конвективной шахте котлов воздушных экономайзеров и воздухонагревателей для ряда котлов не позволяет максимально снизить потери тепла с уходящими газами. При современном уровне эксплуатации котельных температура выбрасываемых газов ограничивается по соображениям возможной конденсации влаги в дымовой трубе. При конденсации резко возрастают коррозионные процессы в связи с высокой агрессивностью конденсата, причем для серосодержащих топлив температура точки росы составляет 120–130°C. Следовательно, повышение эффективности утилизации теплоты дымовых газов в значительной степени зависит от технического уровня применяемого оборудования, в частности, применения антикоррозионных материалов.

Решение об установке утилизаторов теплоты должно предусматривать определение возможных потребителей потенциальной теплоты утилизаторов. Для этого предварительно необходимо определить конкретные потоки воды и воздуха, их расходы, температуры, до которых могут быть подогреты теплоносители в утилизаторах.

В качестве потребителей могут рассматриваться котельные, система теплоснабжения и сторонние потребители.

Правильный выбор вида и требуемой производительности утилизатора определяется не установленной мощностью котлоагрегатов, а наличием реальных потребителей утилизируемой теплоты.

Потребителями могут быть: подогрев исходной и химически очищенной воды, подогрев дутьевого воздуха, система горячего водоснабжения, подогрев обратной сетевой воды, технологические нужды предприятий, подогрев воды для систем теплоснабжения тепличных и парниковых хозяйств, открытых и

закрытых плавательных бассейнов, мойки улиц и транспортных средств, подогрев воздуха для отопления помещений складов, для тепловых завес и размораживания твердого топлива.

Одним из вариантов решения является использование нагретого воздуха с температурой 60–70°C и выше для обогрева открытых площадок, обогрева наружных лестниц. Недостатком системы воздушного подогрева является недопустимость большой механической нагрузки на подогреваемую площадку и большой расход электроэнергии [14].

Принципиальная схема установки с воздушным подогревом площадок приведена на рис. 1. Подогретый воздух поступает в воздушные каналы, расположенные под площадкой, – подающие А, затем – в обратные Б, образуя замкнутый контур. Охлажденный воздух снова подается в систему подогрева.

Такая схема обеспечивает равномерное плавление снега на площадке только при длине каналов до 50 м. При большей их длине целесообразно применять схему 1,б, обеспечивающую возможность периодического изменения направления воздуха в каналах, для этого закрывают установленные в воздуховодах шиберы 1 и 4 и открывают шиберы 2 и 3. Непременным условием является близость обогреваемой площадки к котельной, иначе будут велики потери тепла и электроэнергии на транспортирование теплоносителя. На рис. 1,в приведена принципиальная схема подогрева наружной лестницы.

Экономическую эффективность использования вторичных тепловых ресурсов для плавления снега на открытых площадках определяют путем сопоставления приведенных затрат при таком решении с затратами на уборку и вывозку снега и наледи.

Расход тепла, затрачиваемый на удаление снега, Вт/м², определяют:

$$q = q_{пл} + q_{гр} + q_{взм} + q_{всп} \quad (1)$$

где $q_{пл}$ – скрытая теплота плавления снега, кДж/кг ($q_{пл} = 335$ кДж/кг); $q_{гр}$ – потери теплоты в грунт, находящим-

оя под площадкой, в среднем 20–40% $q_{пл}$; $q_{атм}$ - потери
теплоты в атмосферу конвекцией и радиацией, составляющие
при плавлении снега около 10% $q_{пл}$; $q_{исп}$ - потери тепло-
ты на испарение слоя снега, принимаемые равными 0.1 $q_{пл}$.

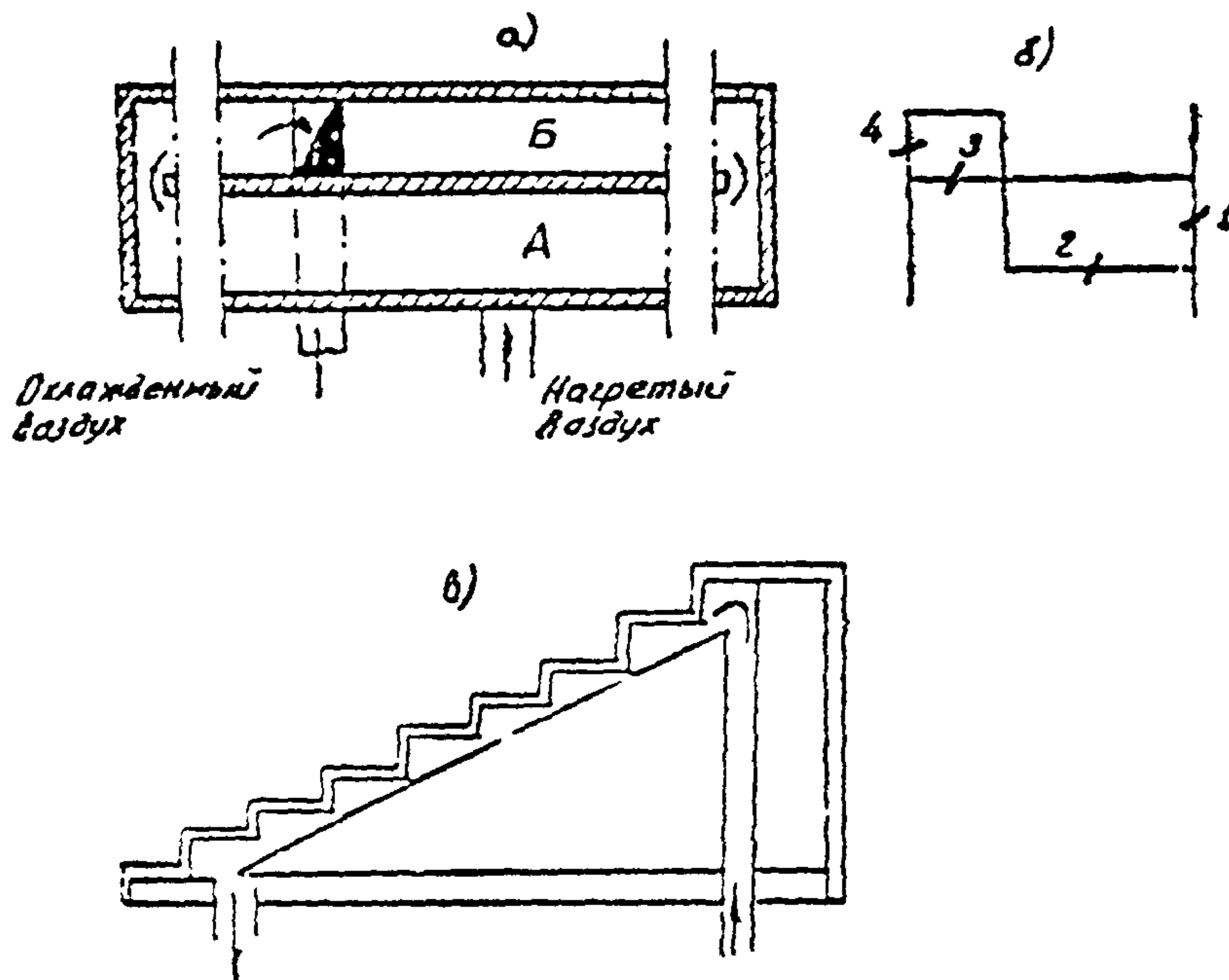


Рис. I. Схема подогрева наружных площадок и ступеней
лестниц нагретым воздухом:

а - подогрев наружных площадок с устройством каналов
длиной до 50 м; б - то же, длиной более 50 м; в -
подогрев ступеней наружных лестниц; 1 - 4 - шиберы

Схемы утилизации теплоты дымовых газов котельных и зданий
применяемых утилизаторов зависят от конкретных источников
теплоты, возможности использования потенциала дымовых га-
зов, потребителей теплоты, вида топлива, состава дымовых
газов, определяющего агрессивность его по отношению к обо-
рудование котельных.

Побудительными мотивами установки утилизаторов является стремление наиболее полно удовлетворить потребности в энергии не путем ввода дополнительных мощностей, а за счет энергосбережения. Вследствие отсутствия последовательной политики в нашей стране вопросы утилизации не решаются на должном уровне. В частности, при большом количестве разработок и авторских свидетельств по конструкциям утилизаторов в серийном производстве находятся отдельные утилизаторы, не позволяющие в широком масштабе использовать рационально потенциальную теплоту уходящих дымовых газов.

УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В ГАЗИФИЦИРОВАННЫХ КОТЕЛЫХ

Газообразное топливо является наиболее перспективным для сжигания в котельных установках по ряду показателей. С точки зрения утилизации теплоты уходящих дымовых газов их преимущество в отсутствии окислов серы, механических примесей и высоком влагосодержании.

Отсутствие соединений серы позволяет охлаждать газы до относительно низкой температуры, поскольку точка росы $40-50^{\circ}\text{C}$. Отсутствие механических примесей отличает выбор теплоутилизаторов и облегчает их эксплуатацию. Относительно высокое влагосодержание дымовых газов дает возможность использовать теплоту конденсации водяных паров, содержащихся в дымовых газах, и тем увеличить эффективность процесса утилизации.

Специфические свойства газов и продуктов сгорания позволяют применять контактные теплообменники, в которых происходит непосредственный теплообмен между дымовыми газами и охлаждающей их водой. Такие теплообменники при достаточно приемлемых габаритах, умеренном расходе металла на их изготовление и сравнительно невысоком расходе электроэнергии при эксплуатации обеспечивают глубокое охлаждение дымовых газов до 40°C и конденсацию 80-90% водяных паров, содержащихся в газах.

Но нагрев воды в контактных теплообменниках возможен только до температуры "мокрого термометра", которая составляет 50–60°C. Температура "мокрого термометра" зависит от влагосодержания дымовых газов и коэффициента избытка воздуха. С уменьшением коэффициента избытка воздуха и увеличением влагосодержания парциальное давление водяных паров в дымовых газах растет, а вместе с ним при прочих равных условиях растет температура "мокрого термометра".

Эффективность контактных экономайзеров снижается с увеличением температуры воды на входе, и применение их рекомендуется при температуре воды на входе не выше 35°C.

Характеристика выпускаемых серийно стальных водяных экономайзеров контактного типа ЭК-БП-1, ЭК-БП-2 приведены ниже.

	Теплопроизводительность, МВт (Гкал/ч)	
	0,37(0,32)	1,22(1,05)
Температура газов на входе, °C, не ниже	140	140
Коэффициент избытка воздуха на входе, не более	1,5	1,5
Количество газов, проходящих через экономайзер, кг/ч	3600	14400
Количество нагреваемой воды, т/ч	8–12	30–40
Температура на выходе, °C, не ниже:		
горячей воды	55–42	55–42
уходящих газов	30–40	30–40
Давление воды перед распределителем, МПа (кг/см ²), не более	0,049 (0,5)	0,049 (0,5)
Аэродинамическое сопротивление при номинальной нагрузке, Па (кг/см ²)	300–500 (30–50)	300–500 (30–50)
Влагосодержание уходящих газов, г/кг	35–55	35–55
Количество свободной углекислоты в нагретой воде, мг/л	50–70	50–70
Габариты, мм:		
длина	1488	2443
ширина	1028	2030
высота	4500	5000
Масса, кг:		
металлической части	6758	2006
керамической насадки	717	2864
общая	1375	4870

Характеристика контактного агрегата АЭ-0,6 приведена ниже [8].

Тепловая мощность, МВт (Гкал/ч) . . .	0,6(0,5)
Температура газов на входе и выходе, °С	140/(40-50)
Коэффициент избытка воздуха в газах, не более	1,4
Расход газов, кг/с (кг/ч)	55(10620)
Расход нагреваемой воды, т/ч	20
Температура нагрева воды, °С:	
в контактной камере	45-55
водопроводной	35-45
Аэродинамическое сопротивление, Па	300
Габариты, мм:	
длина	2800
ширина	2150
высота	5570
Масса, кг:	
металлоконструкция	3100
керамической насадки	2200

Вода, нагретая контактным способом в СК-БМ1, содержит свободную углекислоту в количестве до 0,08-0,1 г/м³. При определенных условиях эта вода становится коррозионно-активной, что ставит ограничение для использования воды. Для снижения содержания свободной углекислоты установка контактных экономизеров дополняется декарбонизационной колонкой. Основные характеристики декарбонизационных колонок приведены ниже.

	Тип колонки	
	КД-06	КД-08
Производительность по воде, кг/с (т/ч)	4,15(15)	8,3(30)
Расход продуваемого воздуха на 1 т воды, м ³	0,15	0,15
Снижение содержания свободной углекислоты, кг/м ³	0,075	0,075
Аэродинамическое сопротивление, Па (мм вод.ст.)	150(15)	150(15)
Габариты, м:		
диаметр	0,574	0,816
длина	0,748	0,99
высота	1,28	1,434

	<u>Тип колонки</u>	
	<u>КД-06</u>	<u>КД-08</u>
Масса, кг:		
металлической части	95,6	136,6
керамических колец	70	140
общая	165,5	276,6

Установка декарбонизаторов ведет к снижению температуры нагрева воды на 1,5–2°C. Поэтому для снижения потерь теплоты в декарбонизационную колонку рекомендуется подавать теплый воздух для продувки из верхней зоны котельной.

При повышенных требованиях к нагреваемой воде устанавливается промежуточный теплообменник в контур циркуляции охлаждающей воды. При этом соотношение расходов воды циркуляционного контура контактного экономайзера и воды, поступающей к потребителю, принимается равным 1,2–1,4.

Конструкция экономайзерного агрегата АЭ-06, разработанного Киевским НИИ Санитарной техники и оборудования зданий, обеспечивает нагрев воды до 40–45°C. Конструкция агрегата содержит поверхностный водоподогреватель, предназначенный для подогрева воды, декарбонизатор для снижения содержания углекислоты в конденсате водяного пара, две обогревательные камеры для предотвращения замерзания воды промежуточного циркуляционного контура в случае выключения агрегата, особенно при установке его на открытом воздухе.

Ожидаемый годовой экономический эффект от использования контактных аппаратов составляет, тыс. руб.: для ЭК-БМ-1 около 8–10, ЭК-БМ-2 около 27–30, АЭ-06 – 12–13*.

Схема установки контактных экономайзеров предпочтительна автономная для каждого котлоагрегата, что предотвращает приток холодного воздуха в экономайзер при отключении одного из котлов. Групповая схема подключения может быть принята только в существующих котельных как вынужденное решение.

Преимущественные области применения контактных экономайзеров: нагрев исходной воды, подпиточной воды для тепловых сетей, питательной воды для котлов, нагрев воды для систем горячего водоснабжения, а также подогрев воздуха для отопления и кондиционирования.

Распространенным видом контактных теплообменников скрубберного типа являются насадочные аппараты, в которых в качестве насадки преимущественно используют кольца Рашига.

Приведенные типы контактных экономайзеров устанавливают за котлами мощностью свыше 2,5 т/ч (1,5 Гкал/ч). Для котлов малой производительности контактные экономайзеры могут

* Величины экономического эффекта приведены в ценах 1989 г.

быть изготовлены в индивидуальном порядке в качестве нестандартного оборудования либо могут быть использованы блоки экономайзера ЭК-Б.И для установки в качестве группового экономайзера.

Одним из преимуществ использования скрытой теплоты парообразования дымовых газов является возможность использования получаемого конденсата, т.е. экономия воды.

Количество сконденсировавшейся из дымовых газов воды можно определить по соотношению:

$$G_k = G_R^c B (d_R' - d_R''). \quad (2)$$

где G_R — количество конденсата, кг/ч; G_R^c — расход сухих дымовых газов, кг/м³; B — расход топлива на котел, м³/ч; d_R' , d_R'' — влагосодержание дымовых газов соответственно на входе и выходе из утилизатора, кг/кг с.г. (сухих газов).

Анализ воды на действующих контактных экономайзерах показал, что содержание свободного углекислого газа на выходе из контактной камеры может достигать 100 мг/л при температуре воды 30–50°C [2]. В связи с этим уменьшается концентрация водородных ионов в результате pH становится ниже 7, а вода приобретает ярко выраженные кислотные свойства. Для использования конденсата в качестве питательной воды необходима установка декарбонизатора. Опасность коррозионной активности воды при пониженном значении pH существует, особенно при малой жесткости и небольшой бикарбонатной щелочности исходной воды.

Использование воды, находящейся в непосредственном контакте с дымовыми газами, для бытовых целей запрещено, поэтому необходимо использование промежуточного теплообменника.

Схема утилизации теплоты дымовых газов за котлом паропроизводительностью 1 т/ч представлена на рис. 2. Для подачи газов через экономайзер за ним установлен вентилятор ЦЗ-50 № 3. Для возможности переключения дымовых газов по нужной установке имеются переключающие заслонки. Применение

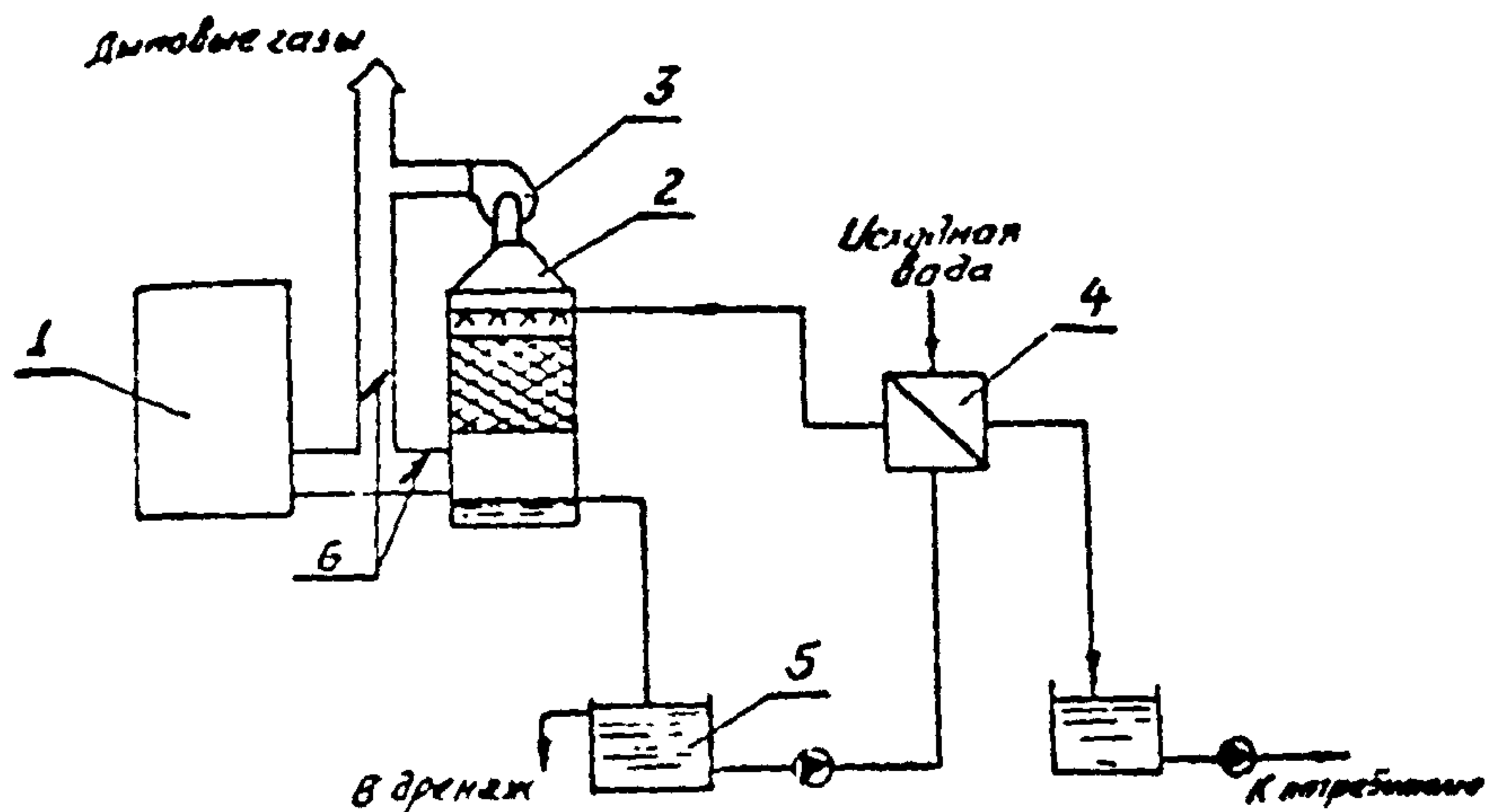


Рис. 2. Схема утилизации дымовых газов парового котла:
1 — котел; 2 — контактный экономайзер; 3 — вентилятор; 4 — теплообменник; 5 — бак орошающей воды; 6 — бак горячего водоснабжения

такой установки позволило повысить КПД с 82 до 93% (по высшей теплоте сгорания). Температура уходящих газов снижалась с 160–160 до 45–38⁰С, подогрев воды в теплообменнике производился от 10 до 34–30⁰С. Годовой экономический эффект составлял 7 тыс.руб. [4] .

Схема котельной с контактным теплоутилизатором без годоумягчительной установки, разработанная Киевским НИИ Санитарной техники и оборудования зданий [1], представлена на рис.3.

Практическое применение такой схемы в котельной Челябинского завода оргстекла показало, что в результате конденсационных процессов в утилизаторах может быть получено количество конденсата, способное полностью возместить потребность котельной, при этом она может эксплуатироваться без жемводоочистки (при возврате из системы теплоснабжения 66% конденсата).

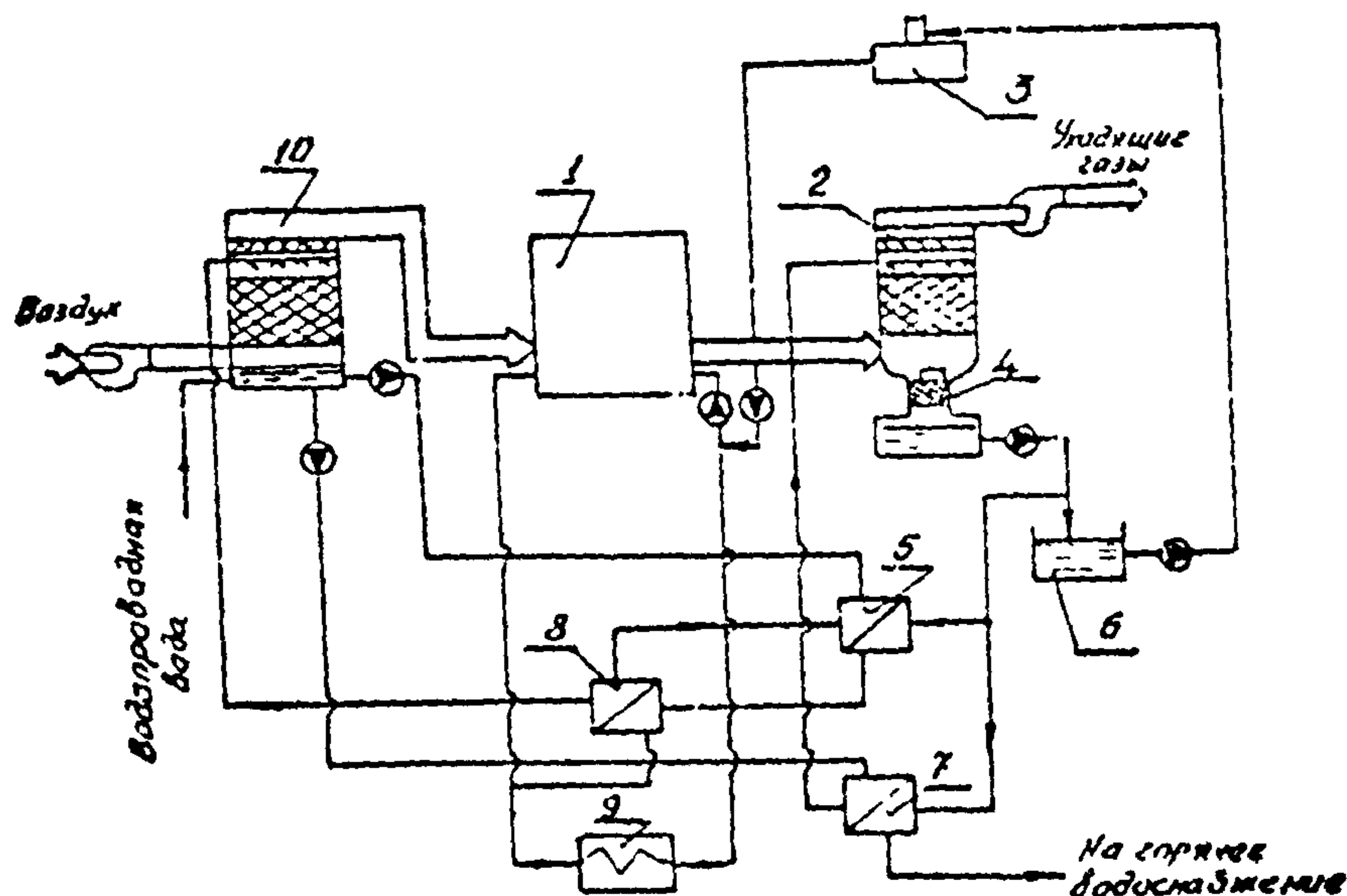


Рис. 3. Схема котельной с контактным теплоутилизатором без водоумягчительной установки:

1 - котел; 2 - контактный экономайзер; 3 - деаэратор; 4 - декарбонизатор; 5 - теплообменник горячего водоснабжения; 6 - бак; 7 - промежуточный теплообменник; 8 - теплообменник; 9 - система теплоснабжения; 10 - воздухоподогреватель

Нагретая в экономайзере вода стекает в декарбонизатор и с помощью насоса направляется в промежуточный теплообменник системы горячего водоснабжения, а затем возвращается она в экономайзер [2]. Часть воды подается в бак, откуда насосом - в деаэратор и идет на подпитку системы теплоснабжения. Вода, циркулирующая в воздухоподогревателе 10, омывается с водопроводной водой, часть которой возмещает ее потери за счет испарения в воздухоподогревателе, а ее остаток удаляется в канализацию. В теплообменнике 8 вода, поступившая из подогревателя 10, нагревается и вновь поступает в этот подогреватель.

Эксплуатация такой установки позволила снизить на 10% удельные капитальные вложения и на 15% себестоимость вырабатываемой тепловой энергии.

Максимальная температура, до которой можно нагреть воду при прямом теплообмене в контактном теплообменнике, обычно составляет 50-70°C. Для существенного повышения температуры нагреваемой жидкости возможно использование в качестве промежуточного теплоносителя жидкостей с более высокой температурой кипения (следовательно, и с более высокой температурой "мокрого термометра"). В качестве такого теплоносителя могут быть использованы высококипящие органические теплоносители, минеральные масла, которые нагреют воду в промежуточном теплообменнике. При этом необходима за контактами экономайзером по ходу газа установка водяного экономайзера, охлаждающего дополнительно уходящие газы до температур, исключающих существование в уходящих газах паров промежуточного теплоносителя и одновременно утилизирующего дополнительное количество теплоты.

Латгипропроект и Рижским политехническим институтом разработана конструкция контактных орошаемых теплообменников с активной насадкой (КТАН) [13].

КТАН является теплообменником рекуперативно-смесительного типа. В нем организуются автономные потоки воды, нагреваемой при непосредственном контакте с дымовыми газами и чистой воды, подогреваемой в поверхностном теплообменнике. Поток орошаемой воды интенсифицирует процесс теплопередачи от дымовых газов к чистой воде в поверхностном теплообменнике.

Температура воды на выходе из насадки ограничивается температурой мокрого термометра дымовых газов, которая составляет 55-65°C. Поэтому температура воды на выходе из активной насадки принимается равной 50°C.

Разработан ряд типов КТАНов для газифицированных котлов, теплопроизводительность которых 0,23-116,3 МВт (0,2-100 Гкал/ч).

Основные типы и характеристики КТАНов, марки котлоагрегатов, для которых рекомендуется установка утилизаторов, и рекомендации по контактированию КТАНами котлов для различных условий работы котельных приведены в табл. 1-3.

Особенностью схемы с применением КТАНов по сравнению с традиционной схемой скруббера с промежуточным теплообменником является то, что процесс теплообмена газа с орошающей и нагреваемой водой происходит одновременно на одной поверхности теплообмена. Практически невозможно в КТАНе осуществить противоток для обоих теплоносителей. Соблюдается противоток только при теплообмене между орошающей водой и нагреваемой, а между газом и орошающей водой существует проток, что снижает интенсивность теплообмена.

Достоинством КТАН является большая интенсивность процессов тепло- и массообмена газов и орошающей воды за счет повышения (до 6-8 м/с) скорости газов, а также компактность, поскольку все теплообменные поверхности сосредоточены на одном месте. Однако в эксплуатации КТАН не очень удобен, так как ремонт трубчатых поверхностей требует остановки котла.

Следует отметить, что если для традиционной схемы обычного контактного экономайзера с выносным теплообменником имеется большое количество экспериментальных данных, то КТАНЫ проверены недостаточно в условиях практической эксплуатации и, видимо, должны быть внесены коррективы в их характеристики по мере накопления данных.

Если при установке КТАНа на номинальную теплопроизводительность тепловая нагрузка потребителей ниже номинальной, следует изменить количество дымовых газов, перепускаемых по обводному газоподу. При этом изменяется температура дымовых газов за КТАНом, а теплопроизводительность КТАНа остается неизменной.

Если требуемая поверхность теплообмена больше фактической поверхности КТАНа, коэффициент обвода увеличивают, увеличивая расход дымовых газов через КТАН и уменьшая расчетную поверхность нагрева. В случае же, когда расчетная

Т а б л и ц а 1

Основные технические характеристики типового ряда КТМов-утилизаторов

[illegible]

Т а б л и ц а 2
Рекомендации по комплектации КТАНами котлов для различных условий
работы котельных

Условие работы котельной	Марка котлов							
	Е-2,5- 0,9ГМ; ДКВР-2,5- 13; ДЕ-4- 14ГМ	КВГМ-4; ДКВР-4- 13; ДГ-0,5- 14ГМ	КВГМ-6,5; ДКВР-6,5- 13; ДЕ-10- 14ГМ	КВГМ-10; ДКВР-10- 13; ДЕ-16- 14ГМ	Е-25- 40ГМ; ДВГМ-20; ДКВР-20- 13; ДЕ-25- 14ГМ	ДВГМ-30; ТВГМ-30; ДКВР-35- 13; Е-50- 14/40ГМ; Е-100- 14/24	ДВГМ-50; ДТКМ-30; ДТВМ-50; Е-75- 14/40ГМ; Е-100- 14/24	КВГМ-100; ДТВМ-100; Е-150-24
I	2	3	4	5	6	7	8	9
Водогрейные или па- роводогрейные ко- тельные теплоснаб- жения или с цент- рализованым горя- чим водоснабжени- ем из котельной: в открытой сис- теме при $Q_{\text{пар}}/Q_{\text{в}}=2,5$, паровые котель- ные с возвра- том конденсата мечее 20-25%	КТАН- 0,25Г	КТАН- 0,5Г	КТАН- 0,8Г	КТАН- 1,5Г	КТАН- 2,3Г	КТАН- 4,5Г	КТАН- 6Г	КТАН- 12Г

Продолжение табл. 2								
I	2	3	4	5	6	7	8	9
в закрытой системе при $Q_{\text{пар}}/Q_{\text{в}} > 2,5$, паровые котельные с возвратом конденсата более 25%	КТАН- 0,1УГ	КТАН- 0,25УГ	КТАН- 0,5УГ	КТАН- 0,8УГ	КТАН- 1,5УГ	КТАН- 2,3УГ	КТАН- 4,5УГ	КТАН- 6УГ

Т а б л и ц а 3

Технические характеристики КТАНов-утилизаторов

Показатель	Марка КТАНа									
	КТАН-12УТ	КТАН-6УТ	КТАН-4,5УТ	КТАН-2,3УТ	КТАН-1,5УТ	КТАН-0,8УТ	КТАН-0,5УТ	КТАН-0,25УТ	КТАН-0,1УТ	КТАН-0,05УТ
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Теплопроизводительность, МВт (Гкал/ч)	12 (10,32)	6 (5,16)	4,5 (3,87)	2,3 (1,98)	1,5 (1,29)	0,8 (0,68)	0,5 (0,43)	0,25 (0,21)	0,1 (0,085)	0,05 (0,043)
Расход дымовых газов, м ³ /с	35,9	17,96	13,44	6,88	4,5	2,2	1,38	0,69	0,23	0,13
Температура нагреваемой воды, °С:										
на входе в КТАН	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
на выходе из КТАНа	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Температура дымовых газов, °С:										
на входе в КТАН	140	140	140	140	140	150	160	160	250	250
на выходе из КТАНа	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Расход орошающей воды, кг/с (м ³ /ч)	18,8 (67,7)	9,4 (33,8)	5,7 (24,1)	4,5 (16,2)	3,5 (12,5)	1,75 (6,3)	1,2 (4,3)	0,6 (2,16)	0,17 (0,6)	0,08 (0,3)
Расход нагреваемой воды, кг/с (м ³ /ч)	54,2 (231)	32,1 (115)	23,9 (85,5)	12,3 (44)	8 (28,8)	4,3 (15,5)	2,7 (9,6)	1,35 (1,9)	0,56 (2)	0,28 (1)

Продолжение табл. 3

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Размеры КГАН, м:										
длина	3,785	3,785	3,785	3,785	2,662	2,57	1,704	1,305	0,92	0,79
ширина	5,792	3,478	2,404	1,824	1,75	0,994	1,344	1,344	0,48	0,48
высота	5,52	5,52	5,21	4,74	4,158	4,113	3,3	2,595	2,194	1,882
Проходные сечения для теплоносителей, м ² :										
по воде	1,93х х10 ⁻²	2,46х х10 ⁻²	1,86х х10 ⁻²	1,34х х10 ⁻²	1,11х х10 ⁻²	0,55х х10 ⁻²	0,31х х10 ⁻²	1,54х х10 ⁻³	0,55х х10 ⁻³	0,39х х10 ⁻³
по газам	4,61	2,3	1,73	1,15	0,78	0,39	0,36	0,18	0,0425	0,0304
Поверхность теплообмена, м ²	362	181	135,8	90,5	52,4	31,2	25	12,5	2,59	1,84
Аэродинамическое сопротивление, Па	675	657	569	448	493	454	206	270	490	293
Гидравлическое сопротивление, МПа	0,025	0,025	0,024	0,013	0,009	0,01	0,018	0,019	0,022	0,01'
Масса, кг	12636	6675	4990	3236	2556	1458	1141	682	170	119

поверхность меньше фактической, уменьшают коэффициент сгорания, что приводит к уменьшению расхода дымовых газов через КТАН и увеличению расчетной поверхности нагрева.

В том случае, когда теплопроизводительность котла уменьшается за счет покрытия части нагрузки котла КТАНом, теплопроизводительность КТАНа оценивается по формуле

$$Q_{\text{кт}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{Р}} \eta_{\text{к}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Р}} \eta_{\text{к}} + \eta_{\text{об}}(J' - J'') G_{\text{г}}^{\text{с}}} B \eta_{\text{об}}(J' - J'') G_{\text{г}}^{\text{с}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{Р}}$ — низшая теплотворная способность топлива, кДж/м³; $\eta_{\text{к}}$ — КПД котла; $\eta_{\text{об}}$ — коэффициент, учитывающий долю расхода дымовых газов, перепускаемых помимо КТАНа по обводному газопроводу для подсушки дымовых газов, проходящих через КТАН; J', J'' — соответственно энтальпии дымовых газов перед КТАНом и после него, кДж/кг; $G_{\text{г}}^{\text{с}}$ — удельный массовый расход сухих дымовых газов, кг/м³; B — расход топлива на котел при работе без КТАНов-утилизаторов, м³/ч.

Если теплопроизводительность котла при установке КТАНа не меняется, тогда теплопроизводительность определяется по формуле

$$Q_{\text{кт}} = G_{\text{г}}^{\text{с}} (J' - J'') B \eta_{\text{об}}. \quad (4)$$

Теплобалансовые расчеты по возможным потребителям теплоты в паровых и водогрейных котельных, проведенные Латгипропромом, представлены в табл. 4–6.

Анализ теплобалансовых расчетов показал, что в открытых системах теплоснабжения и в системах с централизованным горячим водоснабжением КТАНЫ, установленные в водогрейных и пароводогрейных котельных, при соотношении нагрузок 50%/50%, имеют полную загрузку при всех режимах работы. В пароводогрейных котельных в среднеотопительном режиме КТАНЫ имеют полную загрузку и при меньшей чем 50%-ной доле водогрейной загрузки из общей нагрузки котельной.

Т а б л и ц а 4

Теплобалаисный расчет по возможным потребителям тепла КТАИа
в Водогрейной котельной при расчетном режиме

Показатель	Тип котла						
	КВГМ-4	КВГМ-6,5	КВГМ-10	КВГМ-20	КВГМ-30	КВГМ-50	КВГМ-100
I	2	3	4	5	6	7	8
Теплопроизводительность котла, МВт (Гкал/ч)	4,65 (4)	7,56 (6,5)	11,6 (10)	23,2 (20)	35 (30)	56 (50)	116,3 (100)
Возможная теплопроизводительность КТАИа, МВт (Гкал/ч)	0,54 (0,493)	0,94 (0,805)	1,64 (1,41)	3,33 (2,86)	4,93 (4,24)	6,7 (5,76)	13,4 (11,52)

Потребители котельной
для закрытой системы теплоснабжения

Расход теплоты на подогрев подпиточной воды							
МВт (Гкал/ч)	0,09 (0,08)	0,15 (0,13)	0,23 (0,02)	0,46 (0,4)	0,67 (0,6)	1,2 (1)	2,3 (2)
%	16	16	14	14	14	17	17
душевого воздуха:							
МВт (Гкал/ч)	0,135 (0,116)	0,206 (0,117)	0,343 (0,295)	0,64 (0,55)	0,96 (0,826)	1,56 (1,34)	3 (2,57)
%	23	22	20	19	19	23	23
Итого . . .							
МВт (Гкал/ч)	0,23 (0,196)	0,357 (0,307)	0,552 (0,475)	1,1 (0,95)	1,66 (1,426)	2,72 (2,34)	5,31 (4,57)
	39	39	34	33	33	40	40

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

Потребители котельной для открытой системы
теплоснабжения или котельной с централизованным горячим водоснабжением

Расход теплоты на подогрев
 подпиточной воды или воды
 для централизованного го-
 рячего водоснабжения:

МВт (Гкал/ч)

0,65 (0,558)	0,36 (0,31)	1,63 (1,4)	3,26 (2,8)	4,66 (4,2)	8,14 (7)	16,3 (14)
113	114	100	99	100	121	121

Т а б л и ц а 5

Теплобалансовый расчет по возможным потребителям теплоты КТАИв
в котельной с паровой и водогрейной нагрузкой при расчетном режиме (% от возможной
нагрузки КТАИв)

Расход теплоты, %	Возврат кон-денсата, %	Соотношение нагрузок котельной. $\sim/\sim$		
		75/25	50/50	25/75
В закрытой системе				
На подпитку тепловых сетей и питание котлов	80	11	13	14
	50	25	22	19
	25	35	30	22
На подогрев дутьевого воздуха	-	20	20	20
И т о г о	80	31	33	34
	50	45	42	39
	25	55	50	36
В открытой системе				
На подпитку тепловой сети	-	27	54	81
На подогрев дутьевого воздуха	-	20	20	-
На питание паровых котлов	80	9	6	3
	50	22,5	15	7,5
	25	34	23	11,5
И т о г о	80	56	80	84
	50	69,5	89	88,5
	25	81	97	92,5

Т а б л и ц а 6

Теплобалансовый расчет по возможным потребителям теплоты КТАПа в котельной
с чисто паровой нагрузкой при расчетном режиме

Показатель	Возврат конден- сата, %	Тип котла ДКВР					
		2,5-13	4-13	6,5-13	10-13	20-13	35-13
1	2	3	4	5	6	7	8
Теплопроизводитель- ность котла, МВт (Гкал/ч)	-	2,49 (2,14)	3,99 (3,43)	6,46 (5,57)	9,69 (8,5)	18,6 (16)	34,9 (30)
Возможная теплопроиз- водительность КТАПа, МВт (Гкал/ч)	-	0,32 (0,275)	0,51 (0,44)	0,81 (0,7)	1,29 (1,11)	2,27 (1,95)	5,1 (4,39)
Расход теплоты на по- догрев, Гкал/ч или % от $Q_{кт}$ питательной воды:							
МВт (Гкал/ч)	80	0,04 (0,034)	0,063 (0,054)	0,102 (0,088)	0,15 (0,13)	0,29 (0,252)	0,52 (0,45)
%		12	12	12,5	12	15	10
МВт (Гкал/ч)	50	0,097 (0,084)	0,157 (0,135)	0,256 (0,22)	0,387 (0,333)	0,733 (0,63)	1,31 (1,125)
%		30	30	30	30	32	25
МВт (Гкал/ч)	25	0,149 (0,128)	0,235 (0,202)	0,35 (0,33)	0,59 (0,51)	1,1 (0,945)	1,97 (1,65)
%		45	46	47	45	48	36

Продолжение табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8
Дутьевого воздуха:							
МВт (Гкал/ч)	-	0,07 (0,06) 22	0,11 (0,095) 22	0,18 (0,151) 22	0,27 (0,236) 21	0,57 (0,44) 22	0,98 (0,845) 19
%							
И т о г о:							
МВт (Гкал/ч)	60	0,11 (0,094) 34	0,173 (0,149) 34	0,281 (0,242) 34,5	0,426 (0,336) 33	0,805 (0,692) 35	1,51 (1,295) 25
%							
МВт (Гкал/ч)	50	0,167 (0,144) 52	0,267 (0,23) 52	0,435 (0,374) 52	0,66 (0,569) 51	1,24 (1,07) 54	2,29 (1,97) 44
%							
МВт (Гкал/ч)	25	0,216 (0,186) 69	0,345 (0,297) 69	0,56 (0,484) 69	1,1 (0,946) 57	1,61 (1,385) 70	2,95 (2,535) 57
%							

В водогрейных и пароводогрейных котельных, работающих в закрытых системах теплоснабжения, а также в чисто паровых котельных, КТАНы недогружены. Процент недогрузки колеблется в широких пределах в зависимости от условий работы котельной и лежит в пределах от 20 до 70%. В подобных случаях рекомендуется устанавливать КТАНы меньшего типоразмера, соответствующие имеющейся тепловой нагрузке, или установку КТАНов не за всеми котлами с возможностью переключения с одного котла на другой.

Возможные схемы подключения КТАНов по воде представлены на рис. 4.

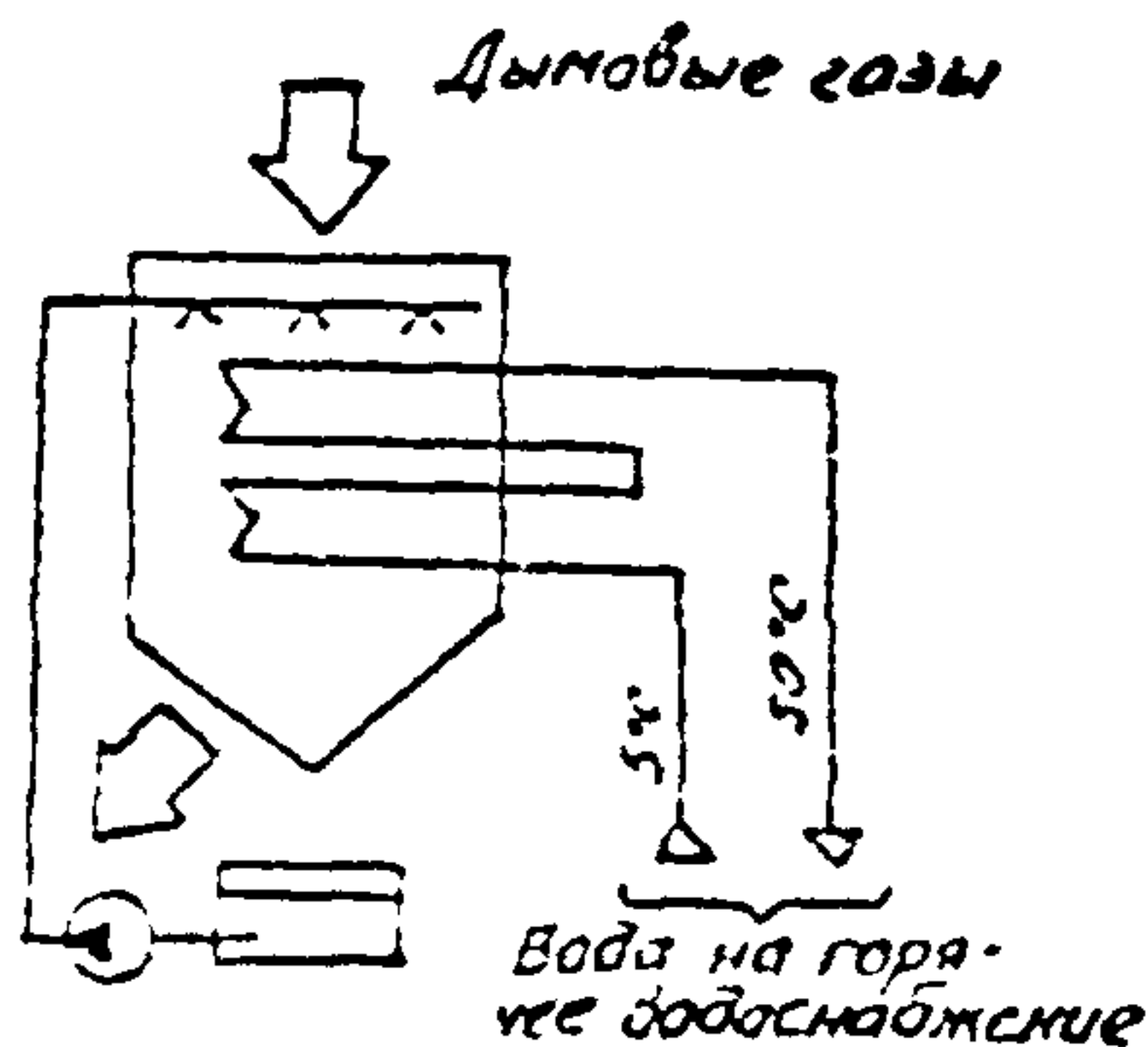
Принципиальная схема котельной с установленным КТАНом и контактным подогревателем дутьевого воздуха приведена на рис. 5.

Горючие газы от котла поступают в КТАНы, где подогреваются химочищенная и исходная вода в трубах активной насадки. Охлажденные дымовые газы дымососом направляются в дымовую трубу. Для исключения образования конденсата в дымовой трубе и подводящем борове имеется частичный перепуск газов по обводному газоходу. Подогретая орошающая вода из КТАНа направляется в контактный воздухоподогреватель для подогрева дутьевого воздуха котла. Охлажденная в воздухоподогревателе орошающая вода направляется насосом на орошение в КТАН. Избыток воды за счет конденсации влаги из дымовых газов направляется в сборный бак.

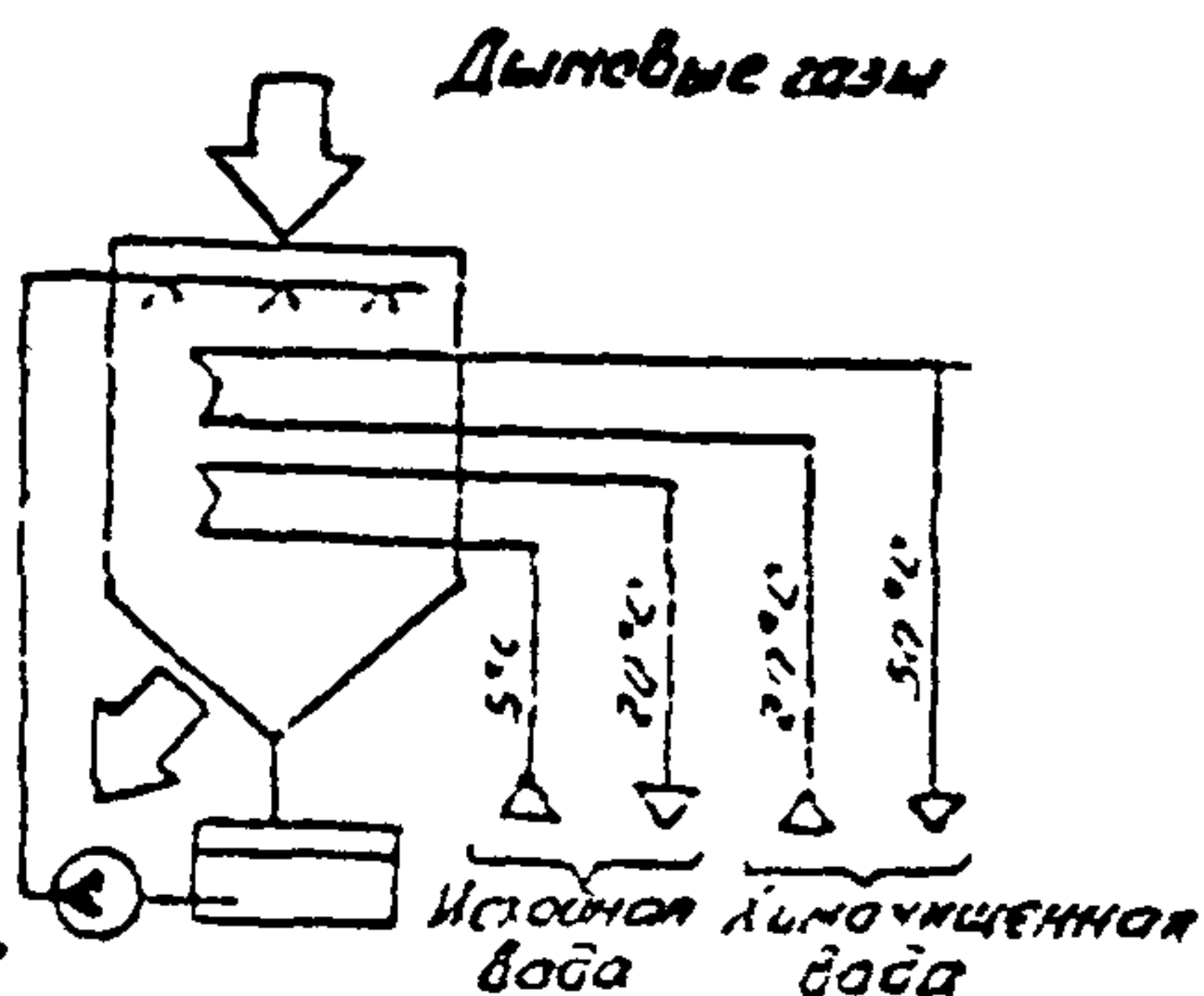
По требованиям водоподготовительного цикла котельной подогрев исходной воды перед водоподготовительной установкой производится до 20°C . В нижней части насадки КТАНа осуществляется подогрев исходной воды от 5 до 20°C , а в верхней части подогрев химочищенной воды от 20 до 50°C .

В водогрейных котельных, работающих в закрытых системах теплоснабжения, расход теплоты на подогрев подпиточной воды составляет около 30% от возможной теплопроизводительности КТАНа в среднесотопительном режиме и всего 14-17% в расчетном режиме. Для этих котельных целесообразна установка

а)



б)



в)

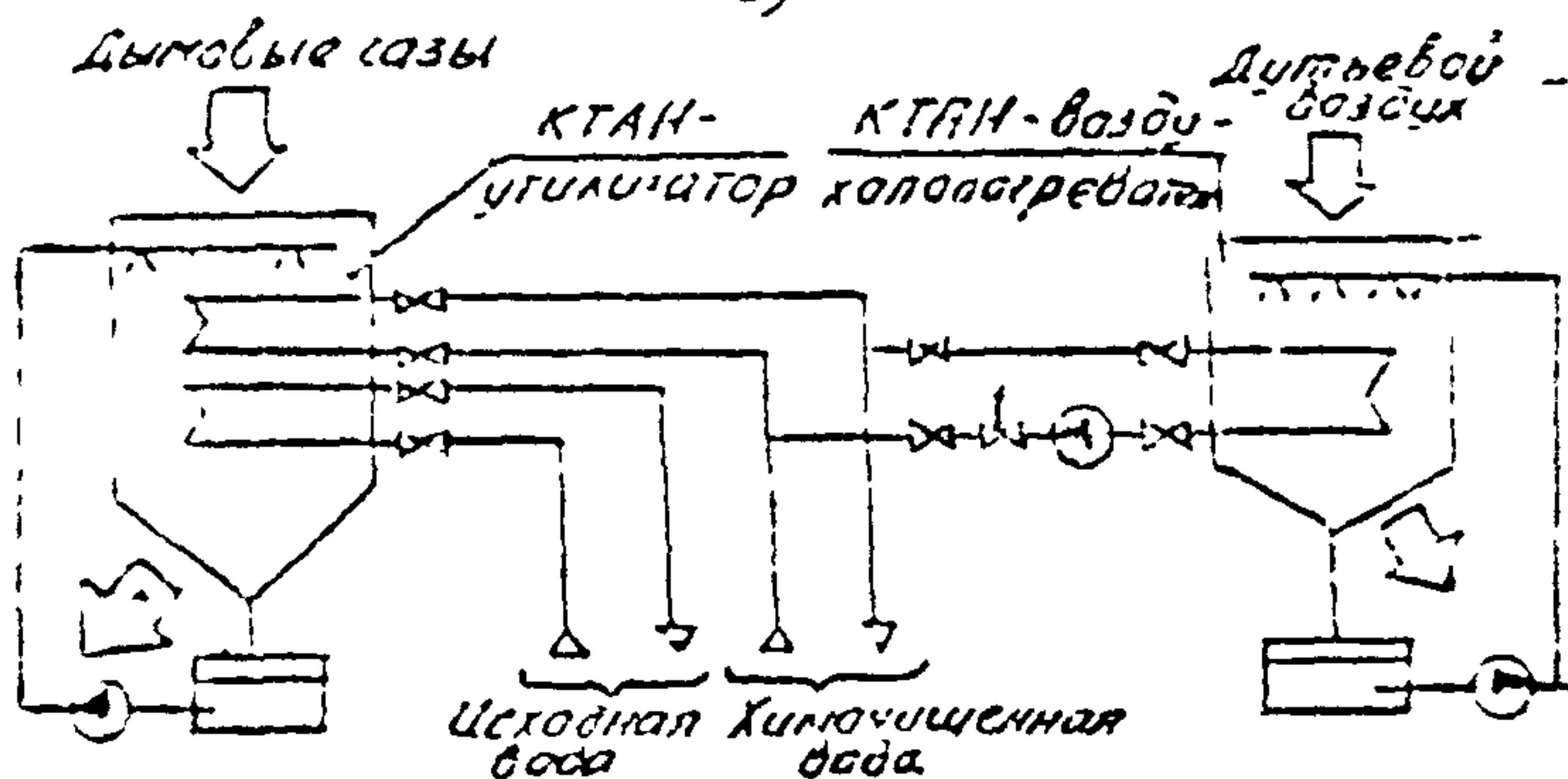


Рис. 4. Схемы включения КТМНов:

а - в котельной с централизованной системой горячего водоснабжения; б - в котельной для открытой или закрытой систем теплоснабжения; в - подключение воздушного подогревателя

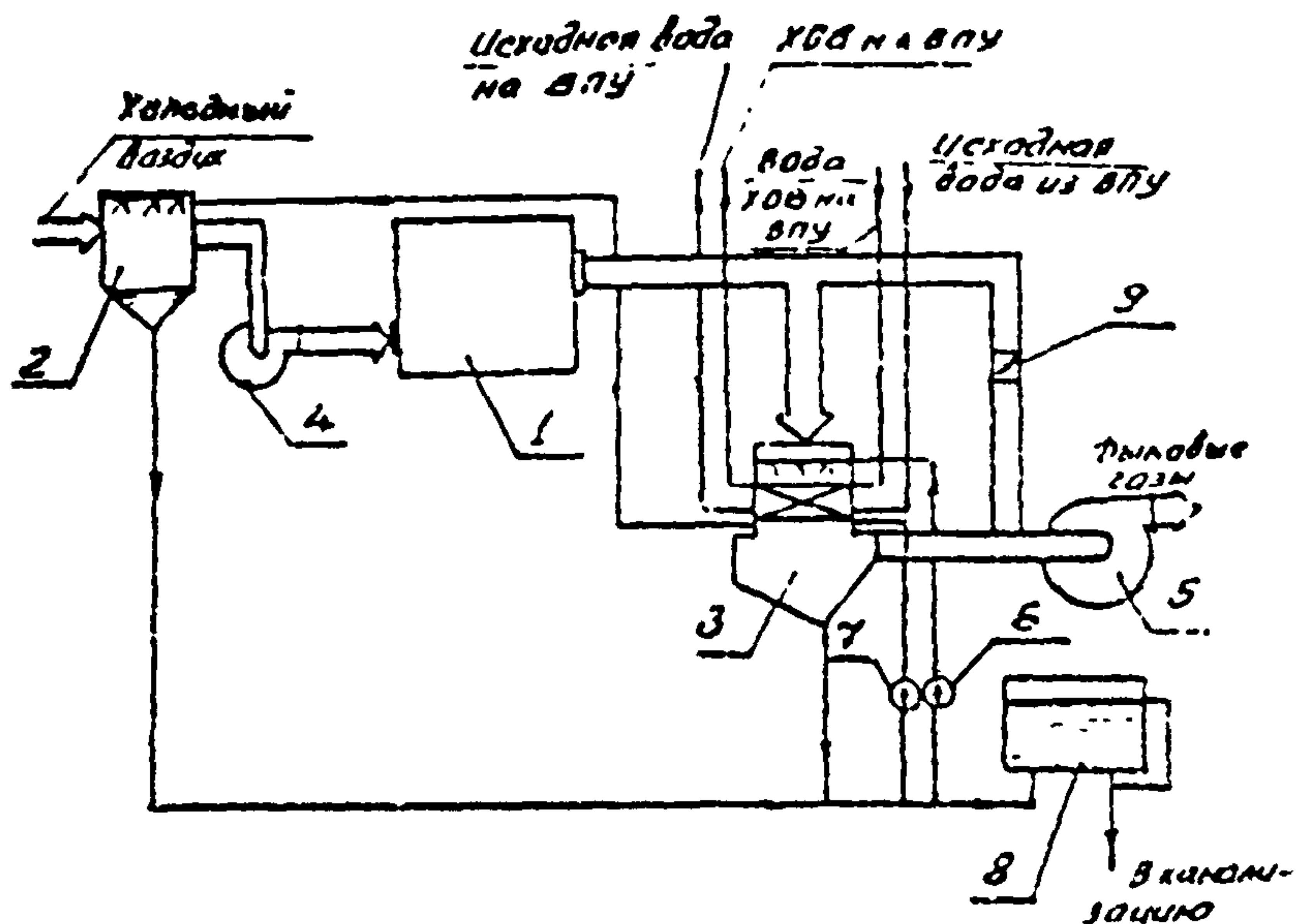


Рис. 5. Принципиальная схема установки КТАНов в котельной:
 1 – котел; 2 – контактный воздухоподогреватель; 3 – КТАН;
 4 – вентилятор; 5 – дымосос; 6 – насос орошения КТАНа; 7 –
 насос орошения воздухоподогревателя; 8 – бак орошающей во-
 ды; 9 – регулирующий клапан

воздухоподогревателей для нагрева дутьевого воздуха котлов. Подогрев в расчетном режиме дутьевого воздуха до 30°C позволяет использовать около 20% теплоты, получаемой в КТАНе-утилизаторе. В среднеотопительном режиме этот процент снижается до 15%.

Суммарная нагрузка КТАНов в вологрейных котельных, работающих в закрытых системах теплоснабжения, составляет 35–50% от возможной теплопроизводительности в зависимости от режима работы котельной.

В котельных, работающих в закрытых системах теплоснабжения, часть утилизированного тепла может быть использована для подогрева обратной сетевой воды в системе теплоснабжения.

Однако в КТАНх подогрев обратной сетевой воды являлся бы, так как в течение отопительного сезона температура ее выше или сравнима с максимально возможной температурой подогрева воды в КТАНе.

Разработанная типоряд КТАНов позволяет использовать эту конструкцию в широком диапазоне мощностей за котлами теплопроизводительностью 0,23–116,3 МВт, но эта конструкция нуждается в дополнительной экспериментальной проверке.

Расчетные данные по годовой экономической эффективности для КТАНов, устанавливаемых за водогрейными и паровыми котлами, приведены в табл. 7. Согласно расчетам, окупаемость капиталовложений находится в пределах 1–3 лет в зависимости от мощности котла. Себестоимость тепловой энергии в 5–10 раз ниже, чем при выработке на котельной. Годовой экономический эффект выше для паровых котельных вследствие большой продолжительности работы котлов в течение года.

В последнее время значительное внимание уделяется разработке мероприятий по утилизации теплоты дымовых газов для котельных мощностью свыше 116,3 МВт. Для средних мощностей преимущественно предлагается использовать подогреватели воды и воздуха. Разработка проектно-конструкторских решений проводилась ВНИИэнергостроения (Украинское, Бакинское отделения), МНХ им. Г.В.Плеханова.

В рассматриваемых решениях в зависимости от конкретных условий может быть увеличен коэффициент использования топлива на 4–12% по сравнению с установками без утилизации теплоты уходящих газов.

В основном, технические решения основаны на применении контактных охладителей уходящих газов и контактных воздухоподогревателей.

Схема утилизации теплоты уходящих дымовых газов для открытой и закрытой систем теплоснабжения с котлами ЧБМ-180 приведена на рис. 6. На рис. 6,а уходящие дымовые газы охлаждаются в контактном теплообменнике 3 до 52°C. Охлаждающая вода циркулирует в замкнутом контуре, отдавая теплоту в воздухоподогревателе 5 и охлаждаясь от 67,2 до 10°C.

Т а б л и ц а 7

Расчетная годовая экономическая эффективность установки КТАНОВ
(данные Латгипропрома)

Тип кот- лоагре- гатов	Капиталь- ные вло- же- ния	Годовая экономи- ческая услов- ного топли- ва, т у.т./ год	Годовая выработ- ка теп- лоты за счет утили- зации, ГДж (1 ккал)	Годовая потреб- ность в электро- энергии, кВт·ч	Эконо- мия топ- лива, тис. руб.	Годовые эксплуатацион- ные расходы, тис. руб.				Самосто- ятель- ность, руб./ГДж (руб./ 1 ккал)	Годовая экономи- ческая эффек- т, тис. руб.	Окупа- емость, лет
						на электро- энер- гию	на эксплу- атацию	на теку- щий ре- монт	Зас- го			
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<u>Водогрейные котлы</u>												
КВГМ-4- -150	9,58	190	5573 (1330)	17250	4,6	0,52	0,73	0,15	1,4	0,25 (1,05)	1,91	2,7
КВГМ-6,5- -150	10,28	260	7623 (1820)	25000	6,29	0,75	0,87	0,17	1,79	0,23 (0,96)	2,90	2,3
КВГМ-10- -150	13,5	415	12172 (2905)	31464	10,04	0,94	1,15	0,23	2,32	0,19 (0,79)	5,7	1,7
КВГМ-20- -150	16,08	765	22437 (5355)	50430	18,51	1,51	1,37	0,27	31,5	0,14 (0,58)	12,95	1
КВГМ-30- -150	19,63	1290	37835 (9020)	84125	31,21	2,52	1,67	0,33	4,52	0,12 (0,5)	23,75	0,7
КВГМ-50- -150	29,23	2300	67459 (15100)	101896	55,65	3,06	2,48	0,50	6,04	0,09 (0,37)	45,23	0,6

Продолжение табл. 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
КЭГ.1-100- -150	66,25	4560	133745 (31920)	183260	110,33	5,5	5,63	1,13	12,26	0,09 (0,38)	66,13	6,7
Паровые котлы												
ДК-4-14ГМ	6,15	162,8	4775 (1139,6)	9810	3,94	0,29	0,52	0,1	0,91	0,19 (0,79)	2,11	1,6
ДК-6,5- -14ГМ	6,51	425,1	12468 (2975,7)	23040	10,29	0,67	0,55	0,11	1,53	0,12 (0,51)	7,78	0,7
ДК-10- -14ГМ	9,08	540	15838 (3780)	31073	13,07	0,93	0,77	0,15	1,85	0,11 (0,48)	9,66	0,6
ДК-16- -14ГМ	11,92	1002,8	29412 (7019,6)	37470	24,26	1,12	1,01	0,2	2,33	0,08 (0,33)	20,14	0,5
ДК-25- -14ГМ	15,01	1080	31676 (7560)	51735	26,13	1,55	1,28	0,26	3,09	0,09 (0,4)	20,79	0,6

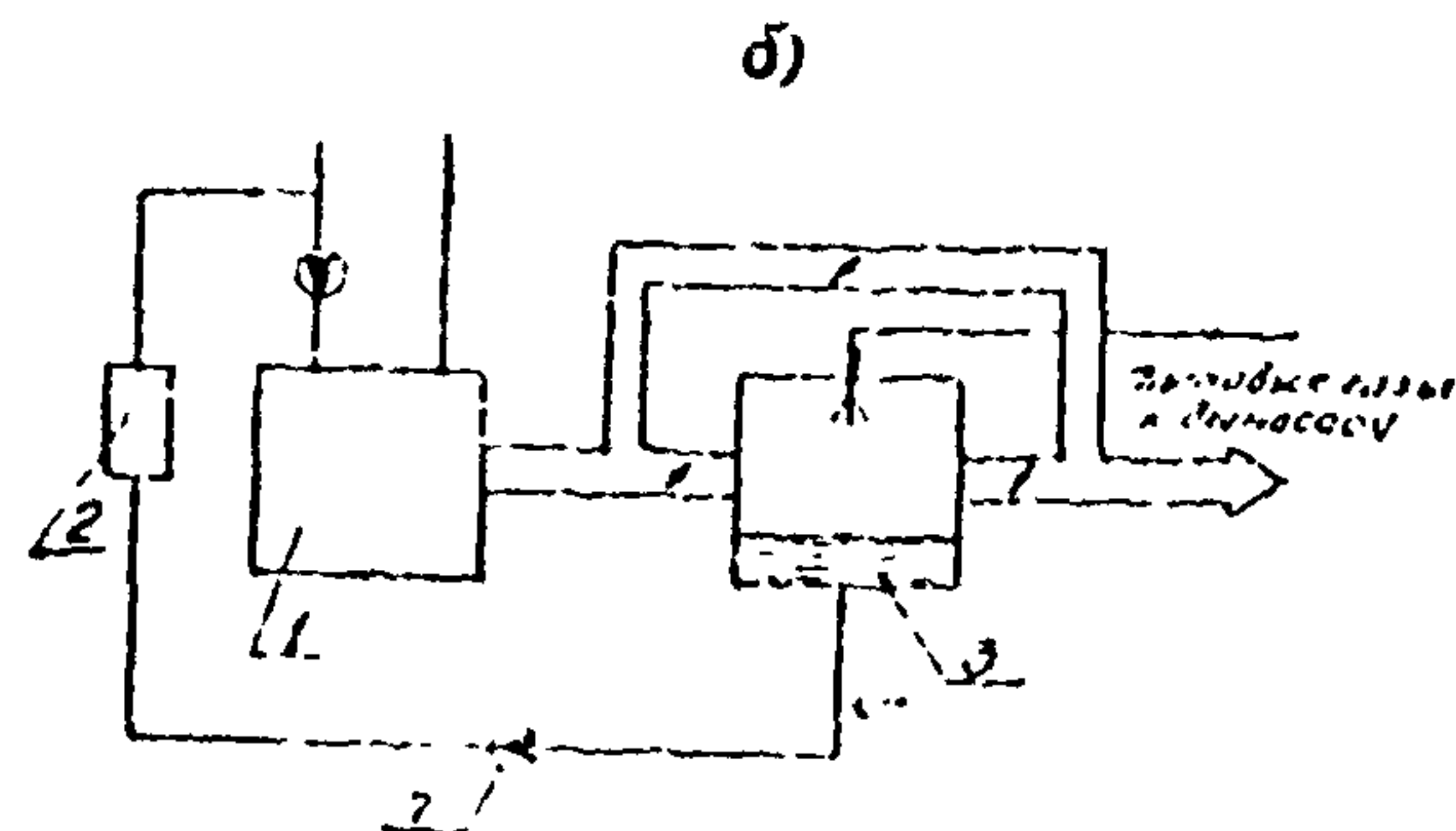
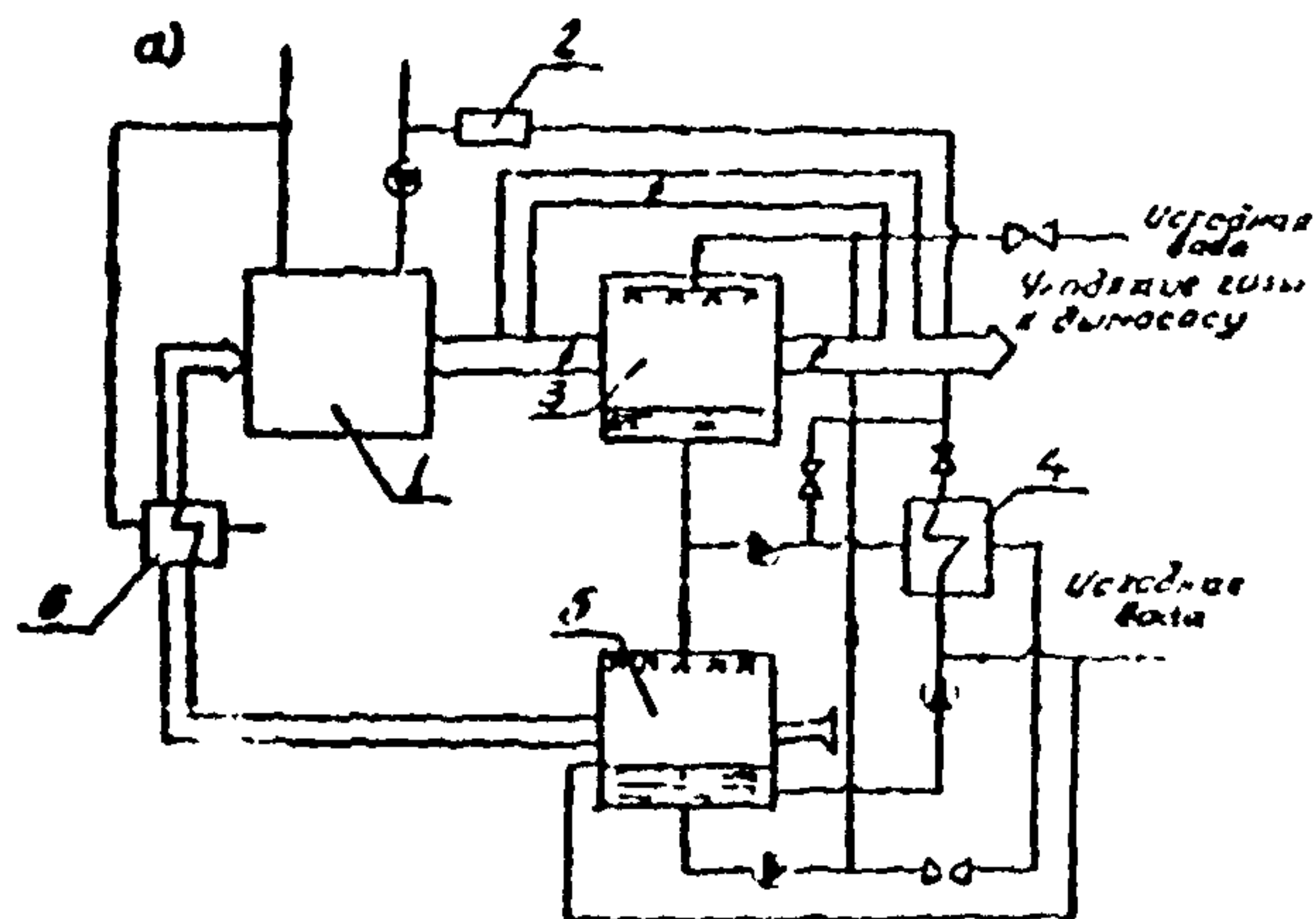
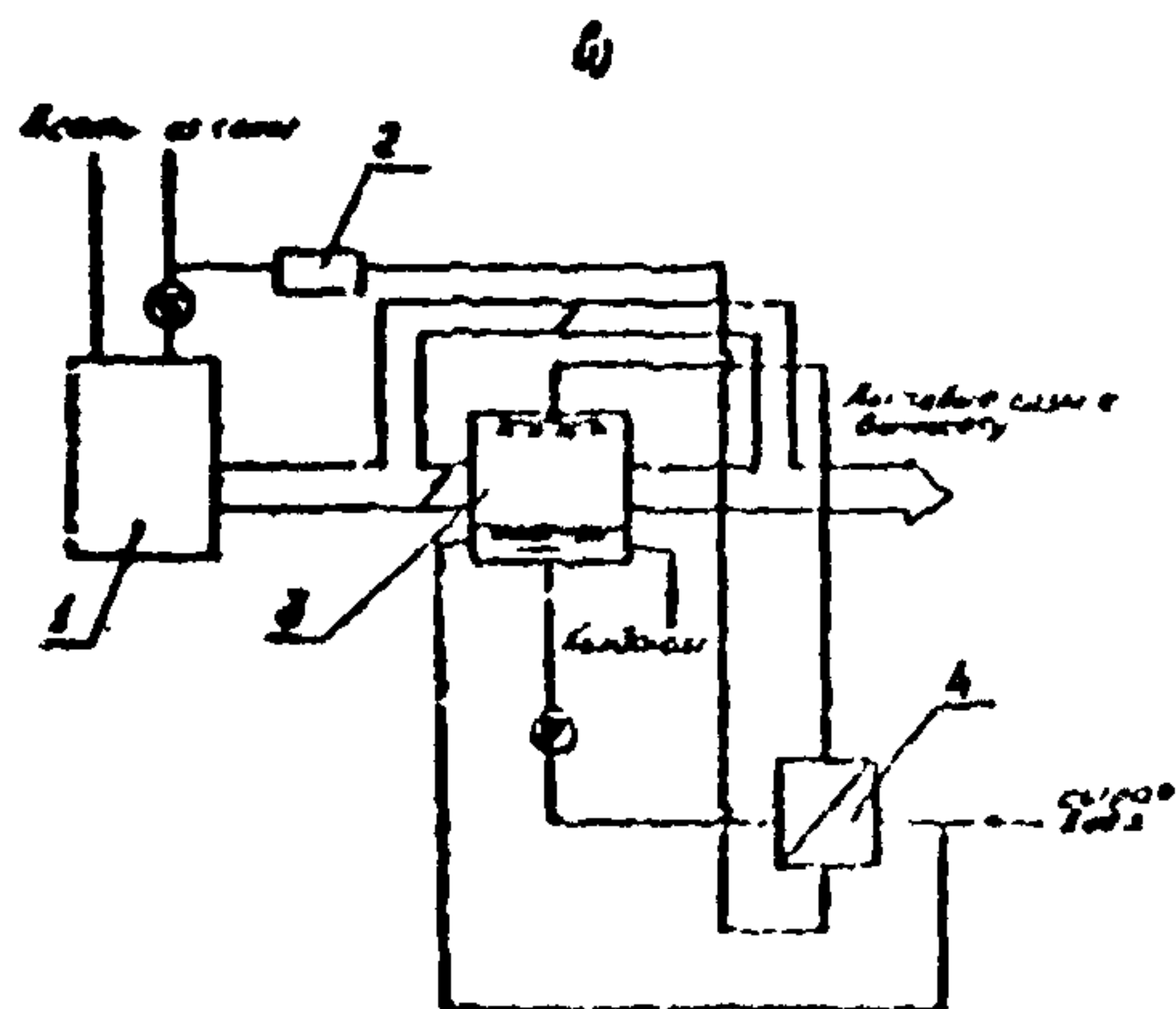


Рис. 6. Схема утилизации теплоты уходящих газов:

а - для закрытой тепловой сети; б - для открытой тепловой сети; в - для открытой тепловой сети с использованием промежуточного теплообменника; 1 - водогрейный котел; 2 - оборудование химической очистки и деаэрации тепловой сети; 3 - контактный охладитель газов; 4 - теплообменник подогрева подпиточной воды; 5 - контактный воздухоподогреватель; 6 - калорифер подогрева воздуха; 7 - насос подпиточной воды



В калорифере 6 производится подогрев воздуха на $3-5^{\circ}\text{C}$ выше точки росы. С целью более полной утилизации теплоты уходящих газов часть воды из циркуляционного контура проходит через водоводяной теплообменник 4, в котором осуществляется подогрев подпиточной воды с 5 до 52°C .

В случае работы установки без теплообменника 4 сырая вода после скруббера-охлаждителя газов 3 отбирается из циркуляционного контура и подается непосредственно на химодочистку (ХВО) и деаэрацию 2 тепловой сети.

В летнем режиме воздухоподогреватель отключается вместе с циркуляционным контуром и насосом циркуляции, а вся подпиточная вода после охлаждения газов из скруббера 3 подается на ХВО и деаэрацию.

При максимальной нагрузке, когда выпаривается вода из циркуляционного контура, последний пополняется сырой водой, а при средних нагрузках, когда происходит конденсация водяных паров из продуктов сгорания, они используются для подпитки тепловой сети, что составляет около 6,75% от расхода подпиточной воды.

Утилизация теплоты уходящих газов котла, работающего на открытой системе теплоснабжения, предусматривает подогрев только подпиточной воды.

Схема утилизации теплоты дымовых газов для открытой тепловой сети показана на рис. 6,б, где нагрев подпиточной воды осуществляется непосредственно в скруббере и при температуре около 80°C подается в ХВО и деаэрацию тепловой сети.

При необходимости в циркуляционный контур может быть введен промежуточный теплообменник, в котором нагрев подпиточной воды будет производиться с помощью орошающей воды, т.е. подпиточная вода не будет иметь прямого контакта с продуктами сгорания (рис. 6,в).

В схеме для открытой системы теплоснабжения вся подпиточная вода подогревается в контактом охладителе газов до температуры около 30°C и подается на ХВО и деаэрацию. Включение в контур утилизации воздухоподогревателя для открытой

тепловой сети нецелесообразно вследствие наличия большого количества воды, достаточного для эффективного охлаждения продуктов сгорания. В случае закрытой системы теплоснабжения ввиду недостаточного количества охлаждающей воды в контур утилизации включен воздухоподогреватель. Опыт работы системы теплоснабжения показал, что при обработке воды на фильтрах с катионитом КУ-2 и вакуумной деаэрацией практически полностью уходит из воды продукты неполного сгорания топлива, растворенные в процессе прохождения воды и газа в контактом экономайзере.

Для снижения коррозионных повреждений в дымовой трубе часть газов по байпасной линии перепускается мимо охладителя газов.

Утилизационное оборудование разрабатывалось как нестандартное применительно к конкретным объектам.

Технико-экономические показатели системы приведены в табл. 8.

Т а б л и ц а 8

Технико-экономические показатели систем утилизации
теплоты уходящих газов котла КВГМ-180 [11]

Система утилизации теплоты уходящих газов	Средне- годовая экономия газа, %	Годовой эконо- мический эффект от применения утилизации, руб./год
Подогрев воздуха и подпиточной воды (для закрытой системы теплоснабже- ния)	5,2	224,19
Подогрев подпиточной воды (для откры- той системы теплоснабжения):		
в промежуточном теплообменнике	11,4	629,61
непосредственно в охладителе газов	12,3	583,78

Недостатком использования контактных теплообменников является наличие подогретой органической воды, насыщенной углекислотой, нагрев воздуха в отдельном контактном воздухо-

подогревателе и подача сильно увлажненного воздуха в топку котла, что приводит к снижению температуры дымовых газов в топке и снижению производительности котла. Для устранения этих недостатков предложены схемы утилизации теплоты, в которые включены контактные подогреватели со встроенными декарбонизаторами.

Принципиальная схема утилизации теплоты дымовых газов с применением поверхностного воздухоподогревателя представлена на рис. 7,а. Охлаждающая вода подается сверху в контактный теплообменник навстречу восходящему потоку газов. Нагреваясь, вода поступает в декарбонизатор 2 через гидрозатвор 3. В декарбонизаторе вода продувается воздухом и подается в теплообменник 4, где нагревает сырую или химически очищенную воду, затем снова по замкнутому контуру направляется в контактный теплообменник. Воздух в декарбонизаторе 2 нагревается, увлажняется и подается в поверхностный воздухоподогреватель, где за счет конденсации паров нагревает воздух, поступающий из атмосферы, при этом сам осушается. После смешения оба потока воздуха подается в топку котла.

Подобная установка имеет сложное аппаратное оформление и ее использование целесообразно с целью увеличения тепловой мощности котельной. В этом случае необходимо использовать весь объем газов, а для предотвращения конденсации водяных паров следует сметывать их с высокотемпературными дымовыми газами, образующимися при сжигании дополнительного количества топлива. Для этой цели перед дымсососом предусмотрена смешительная камера 7 в виде с патрубком, в котором расположены горелки 8, благодаря которым осуществляется подогрев уходящих газов на $25-50^{\circ}\text{C}$.

В том случае, когда утилизация теплоты дымовых газов имеет целью снижение расхода топлива, может быть использована установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 7,б.

Увлажненный воздух засасывается из декарбонизатора в контактный теплообменник и выбрасывается вместе с дымовыми газами через дымовую трубу в атмосферу, а для предотвращения конденсации водяных паров производится байпасирование дымовых газов.

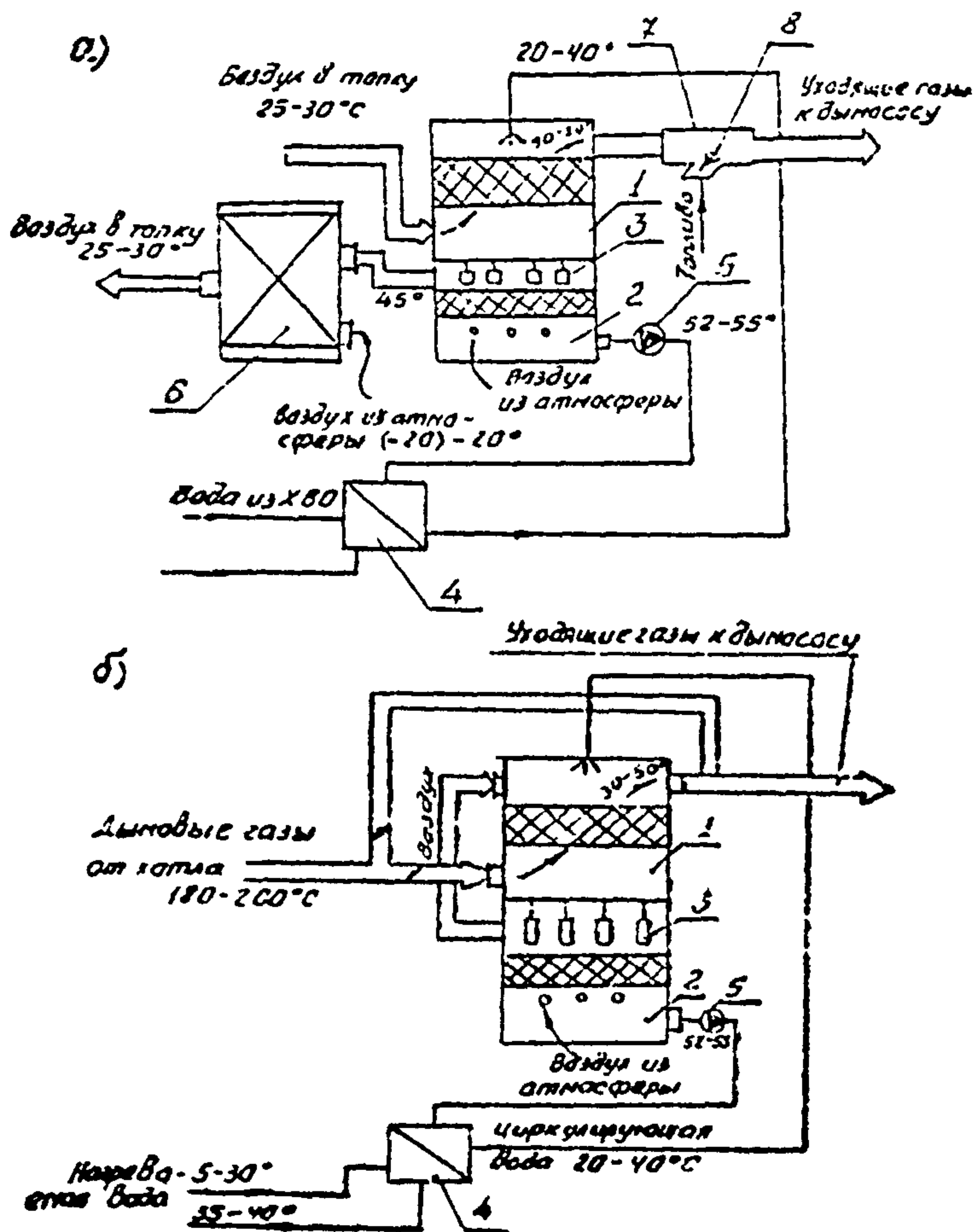


Рис. 7. Схема утилизации теплоты дымовых газов котла КВГМ-180:

а - утилизация с воздухоподогревателем; б - утилизация с обволным газоходом; 1 - контактный подогреватель циркулирующей воды; 2 - декарбонизатор; 3 - гидрозатворы; 4 - теплообменник; 5 - насос; 6 - воздухоподогреватель; 7 - смешительный газоход; 8 - горелка

Имеются разработки контактно-декарбонизирующего экономайзера пропускной способностью по дымовым газам 70–85 и 140–165 тыс. м³/ч.

Для котлов теплопроизводительностью свыше 100 Гкал/ч конструкции теплоутилизаторов дымовых газов находятся на стадии опытных разработок и дальнейшее развитие могут получить только при стимулировании за экономией топливно-экономических ресурсов.

При всей привлекательности использования контактных теплообменников при утилизации теплоты уходящих газов котлов основной недостаток установок – поглощение водой из продуктов сгорания углекислоты и кислорода и приобретение ею таким образом коррозионно-агрессивных свойств – сдерживает широкое применение таких теплообменников. Для нормальной работы установок необходимо проводить декарбонизацию, деаэрацию воды, что в ряде случаев затрудняет использование очищенной воды.

В связи с этим внимание обращается на использование конденсационных поверхностей нагрева. Поверхность теплообмена конденсационных поверхностей нагрева значительно более развита по сравнению с обычными экономайзерами. Конденсационные теплообменники имеют также высокий КПД, как и контактные теплообменники, но являются более металлоемкими конструкциями. В то же время отсутствие непосредственного контакта между продуктами сгорания и нагреваемой водой делает их предпочтительными с точки зрения качества нагреваемой воды.

В настоящее время для целей утилизации теплоты в процессах регенерации и кондиционирования разработаны и выпускаются промышленностью биметаллические теплообменники, представляющие собой ряд труб с насаженными на них ребрами из сплава алюминия. Алюминий имеет высокую теплопроизводительность и антикоррозионные свойства, что позволяет использовать его в конденсационных процессах теплообмена.

Для обеспечения бескоррозионной работы газоходов и дымовой трубы необходимо обеспечить подсушку уходящих дымовых.

газов. Для этой цели часть дымовых газов по байпасному газоходу перепускается мимо утилизаторов.

Схема с подогревом дымовых газов после утилизатора приведена на рис. 8,а.

Дымовые газы проходят через утилизаторы, в которых охлаждаются омываемой водой со 190 до 40°C. При этом по расчету конденсируется около 1,13 кг/м³ газа. Конденсат отводится из газохода через гидрозатвор. Около 20% капель конденсата будет унесено потоком газа. По ходу дымовых газов устанавливается калорифер II ступени, осуществляющий подогрев дымовых газов до 70°C, т.е. выше точки росы для предотвращения процессов конденсации в дымовой трубе и подводящих газоходах.

Теплой средой является вода внутреннего контура циркуляции.

Схема утилизации теплоты дымовых газов с частичным перепуском дымовых газов по байпасу приведена на рис. 8,б.

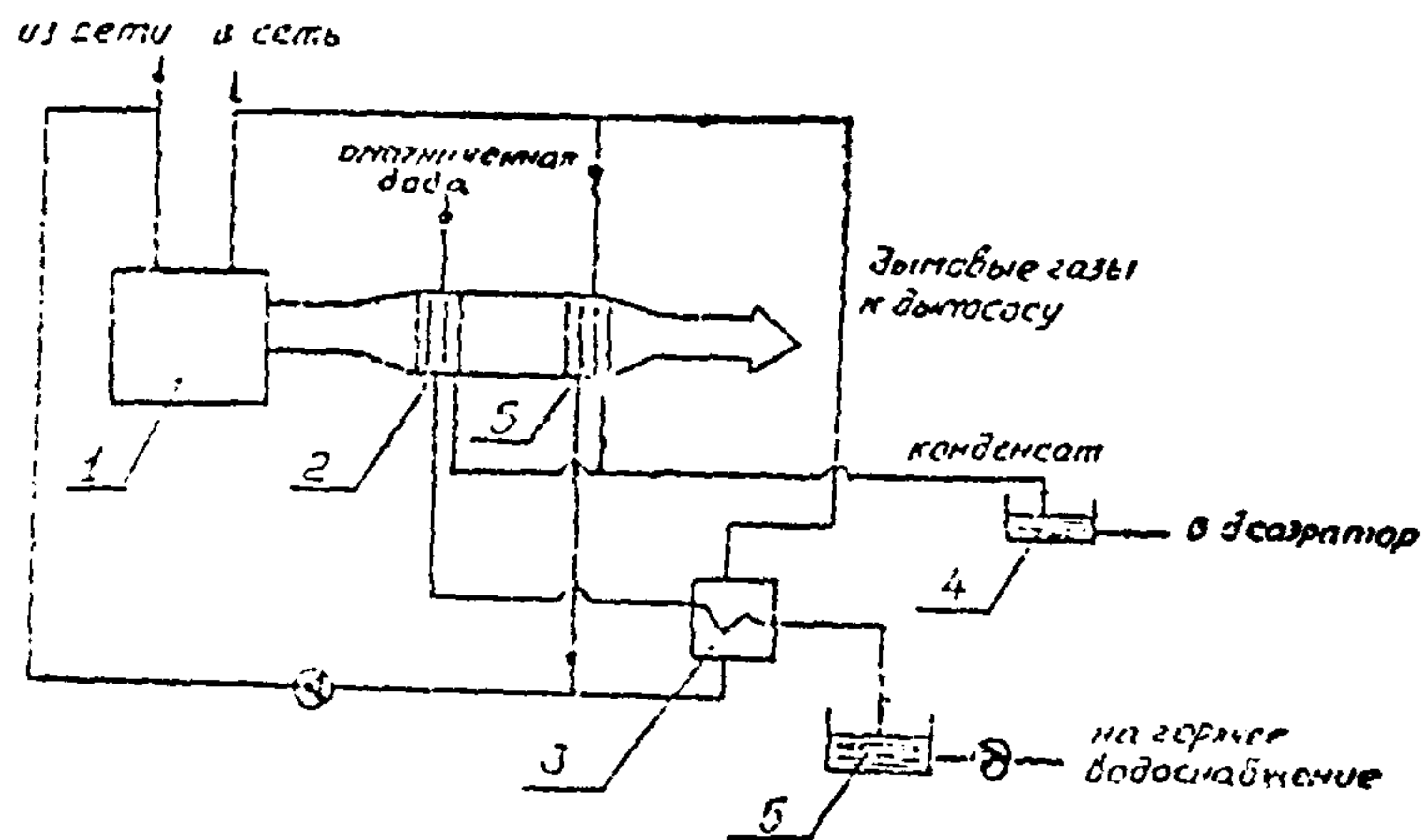
По схеме часть потока газов (примерно 70%) проходит через утилизаторы, где охлаждается до температуры 40°C, т.е. "ниже точки росы", при этом происходит конденсация части водяных паров, содержащихся в дымовых газах. Около 30% газов перепускается по обводному газоходу и, смешиваясь с газом, прошедшим через утилизатор, охлаждается до 70-80°C.

Конденсат, образовавшийся в теплоутилизаторе, отводится через гидрозатвор в бак. Поскольку конденсат является обессоленной водой, в отопительный период его используют для приготовления подпиточной воды, летом сбрасывают в продуктовый колодец, так как использование его на виды потребления, где требуется вода питьевого качества, недопустимо.

Количество конденсата может достигать около 1 кг/м³ газа, что создает дополнительный резерв для экономии воды в котельных.

Технические характеристики конденсационных теплоутилизаторов, которые могут применяться в котельных для нагрева воды [III], приведены в табл. 9,10.

а)



б)

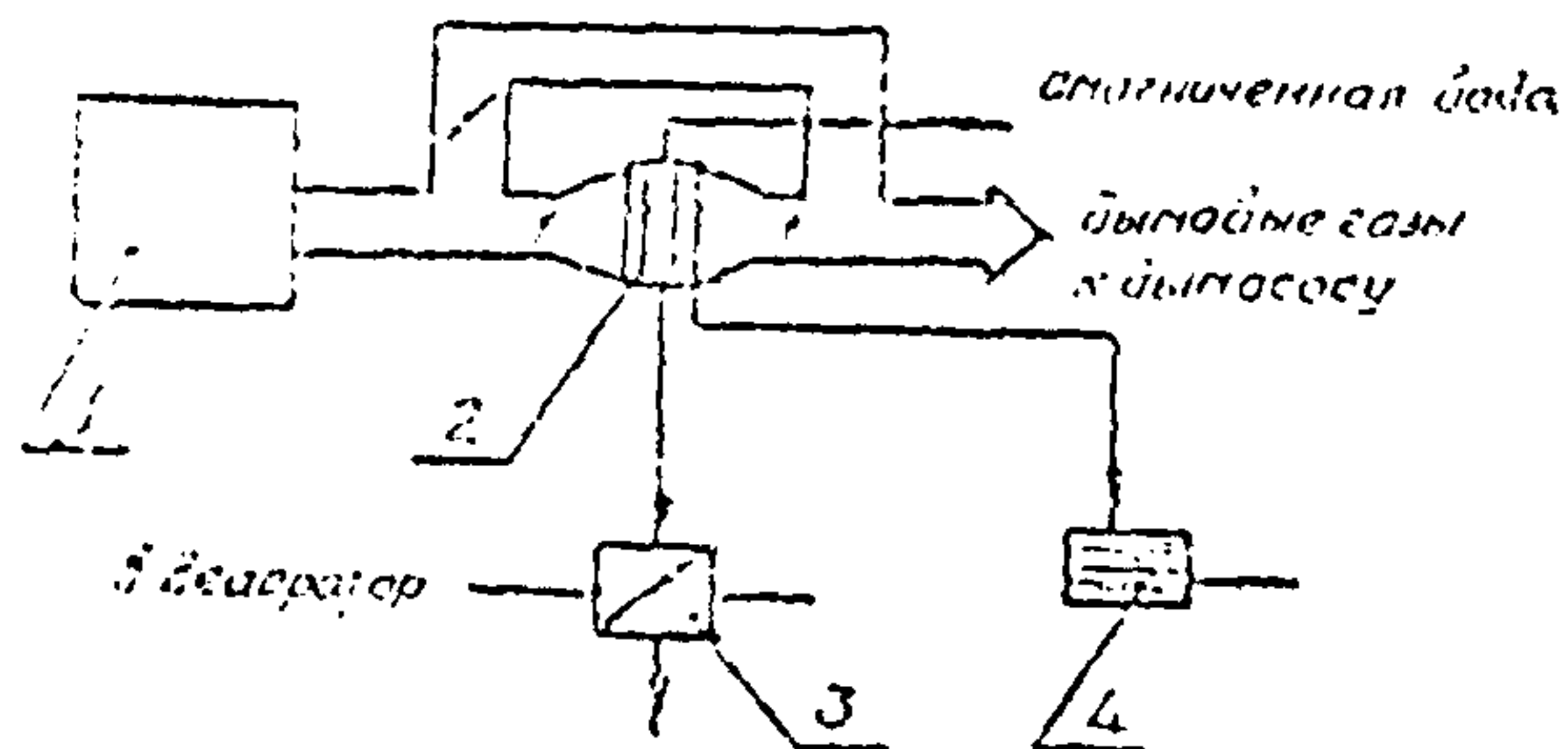


Рис. 3. Схема подключения конденсационных утилизаторов теплоты дымовых газов :

а - с подогревом газов; б - с балластированием газов; 1 - котел; 2 - конденсационный утилизатор; 3 - теплообменник; 4 - бак для сбора конденсата; 5 - бак системы горячего водоснабжения

Т а б л и ц а 9

Техническая характеристика калориферов КСКЗ-02хЛЗА и КСК4-02хЛЗА

Марка калорифера	Площадь поверх- ности теплооб- мена со стороны воздуха, м ²	Площадь фрон- тально- го се- чения, м ²	Площадь сечения для прохо- да тепло- носителя, м ²	Площадь сечения патрубки, м ³	Площадь сечения распреде- лительно- сборных коллекто- ров, м ²	Число ходов для движе- ния тепло- носителя	Длина тепло- передаю- щей трубки, м	Масса, кг, не более
КСКЗ-6-02	13,26	0,267	0,000846	0,001006	0,00172	6	0,53	38
КСКЗ-7-02	16,34	0,329	0,000846	0,001006	0,00172	6	0,655	44
КСКЗ-8-02	19,42	0,392	0,000846	0,001006	0,00172	6	0,78	50
КСКЗ-9-02	22,5	0,455	0,000846	0,001006	0,00172	6	0,905	56
КСКЗ-10-02	28,66	0,581	0,000846	0,001006	0,00172	6	1,155	68
КСКЗ-11-02	83,12	1,66	0,002576	0,002205	0,00172	6	1,655	176
КСКЗ-12-02	125,27	2,488	0,003881	0,002205	0,00172	6	1,655	259
КСК4-6-02	17,42	0,267	0,001112	0,001006	0,0022	6	0,53	45
КСК4-7-02	21,47	0,329	0,001112	0,001006	0,0022	6	0,655	53
КСК4-8-02	25,52	0,392	0,001112	0,001006	0,0022	6	0,78	61
КСК4-9-02	29,57	0,455	0,001112	0,001006	0,0022	6	0,905	68
КСК4-10-02	37,66	0,581	0,001112	0,001006	0,0022	6	1,155	85
КСК4-11-02	110,05	1,66	0,00341	0,002205	0,0022	6	1,655	223
КСК4-12-02	166,25	2,488	0,005151	0,002205	0,0022	6	1,655	331

Кафедрой теплотгазоснабжения ЭЭПИ предложены решения по применению конденсационных утилизаторов для утилизации теплоты продуктов сгорания и нагрева подпиточной воды для централизованного горячего водоснабжения. Схема с непосредственным нагревом сырой воды в конденсационном теплообменнике приведена на рис. 9,а. Вода нагревается до $50-55^{\circ}\text{C}$, затем окончательно догревается в водоводяном теплообменнике, откуда поступает в бак-аккумулятор и далее в систему горячего водоснабжения. Подпиточная сырая вода нагревается в первой секции калорифера до $30-35^{\circ}\text{C}$, затем направляется на ХВО, после которой умягченная вода догревается во второй секции калорифера.

Схема подогрева обратной воды, предварительно охлажденной в водоводяном теплообменнике 5, представлена на рис.9,б. В этом случае тепловой эффект ниже, чем в случае подогрева воды на горячее водоснабжение, так как температура обратной воды выше, что снижает конденсационный эффект.

Горьковский ГИИСаптехпроект рекомендует для утилизации теплоты уходящих газов использовать рекуперативные теплоутилизаторы типа ТН-ТГРК. В котельных малой мощности, работающих на природном газе, теплоту димовых газов рекомендуют использовать на нагрев холодной воды при наличии централизованного горячего водоснабжения, на подогрев обратной сетевой воды — в случае отсутствия централизованного горячего водоснабжения.

При образовании кислого конденсата в канализацию необходимо предусмотреть меры по его нейтрализации или разбавлению для предотвращения коррозии канализационных трубопроводов.

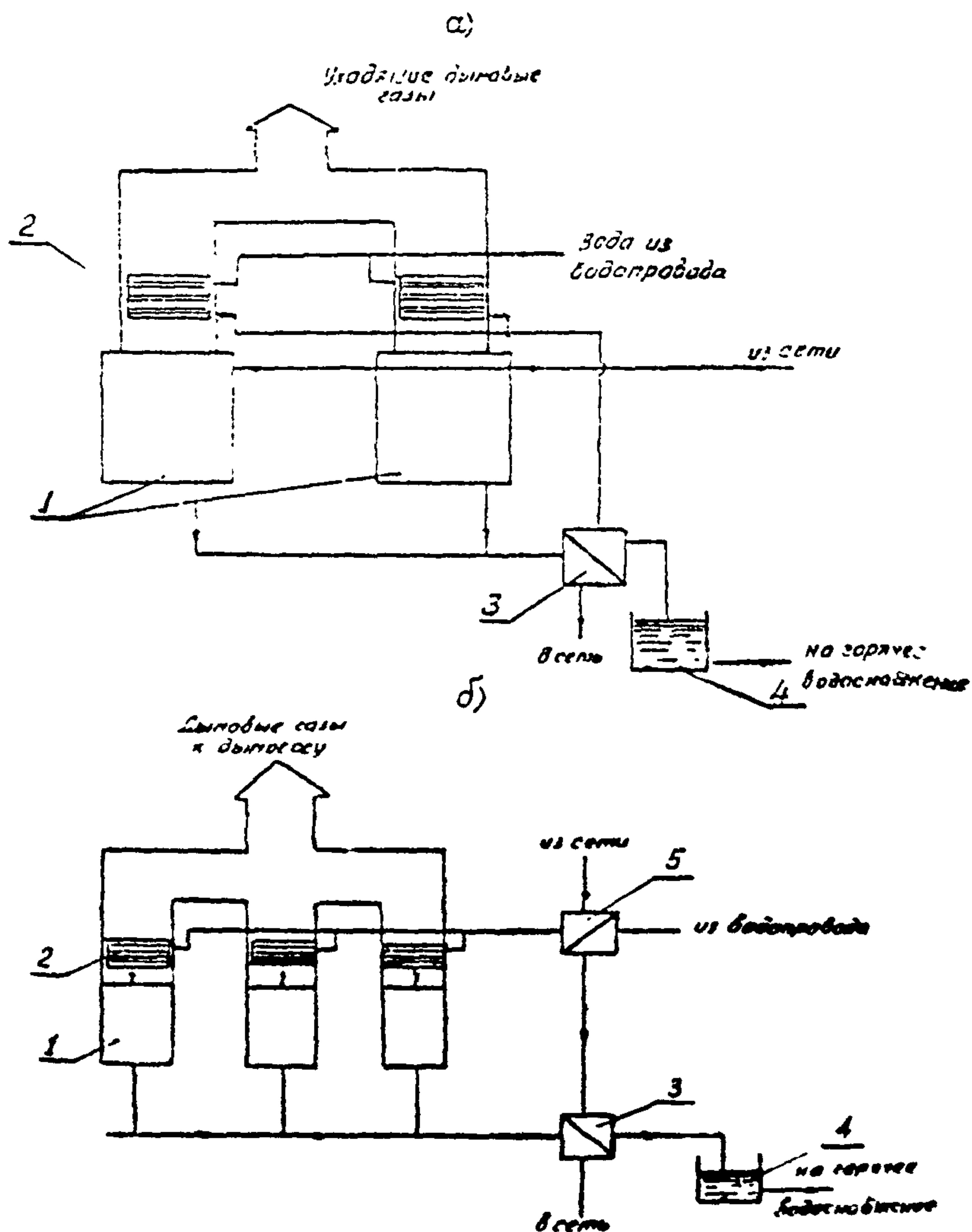


Рис. 9. Схема подогрева:

а - воды для системы горючего водоснабжения; б - обратной воды; 1 - котел; 2 - калориферы-утилизаторы; 3 - теплообменник подогрева воды; 4 - бак системы горячего водоснабжения; 5 - теплообменник подогрева воды

Т а б л и ц а 10

Технические характеристики рекуперативных теплоутилизаторов
для систем с промежуточным теплоносителем

Показатель	Типоразмер					
	П105- П1РК03	П105- П1РК04	П116- П1РК03	П116- П1РК04	П125- П1РК03	П125- П1РК04
Производитель- ность по воз- духу, тыс. м ³ /ч	5	5	16	16	25	25
Число ходов по воздуху	3	4	3	4	3	4
Площадь тепло- обменной по- верхности, м ²	23,45	30,32	68,01	90,04	102,5	136,02
Площадь фронт- ального сече- ния, м ²	0,585	0,585	1,668	1,668	2,499	2,499
Число ходов по теплоносителю	2	2	2	2	2	2
Площадь сече- ния пода, м ²	0,00261	0,00348	0,00522	0,00698	0,00783	0,01044
Площадь сече- ния коллекто- ра, м ²	0,0031	0,0036	0,0031	0,0036	0,0031	0,0036
Площадь сече- ния патрубка, м ²	0,00221	0,00358	0,00358	0,00521	0,00521	0,00521
Масса, кг	76,3	98,3	195,3	251	286	370
Габариты, мм:						
длина	1227	1227	1727	1727	1727	1727
ширина	160	180	180	180	180	180
высота	575	575	1075	1075	1575	1575

Применение конденсационных утилизаторов теплоты для ко-
тельных позволяет повысить КПД котельных на 6-8%, снизить
себестоимость тепловой энергии на 9-11%.

Расчеты годовой экономической эффективности для водогрей-
ных котлов КВГМ приведены в табл. II. В основу расчета по-

Т а б л и ц а II
Расчетная годовая экономическая эффективность установки калориферов КСК

Тип котлоагре- гата	Капи- тальные вложе- ния, тыс.руб	Годовая экономи- я уо- ловного топлива у.т/год	Годовая выработ- ка теп- лоты за счет утилиза- ции, ГДж (Гкал)	Годо- вая по- треб- ность в элект- ро- энер- гии, кВт.ч	Эконо- мия топли- ва, тыс. руб.	Годовые эксплуата- ционные расходы, руб.			Себе- стои- мость, руб./ ГДж (руб./ Гкал)	Годо- вой эко- номи- чес- кий эф- фект, тыс. руб.	Окупа- емость, лет
						на элект- ро- энер- гию	на амор- тиза- цию и те- кущий ре- монт	Всего			
КВГМ-4-150	426,7	182	4971 (1186,5)	1690	4,3	50,7	43,5	94,2	0,02 (0,08)	4,19	0,1
КВГМ-6,5-150	621,3	305,9	8462 (2019,5)	2964	7,3	88,9	63,4	152,3	0,02 (0,08)	7,06	0,09
КВГМ-10-150	1281,7	482,3	13037 (3111,5)	2552	11,5	76,6	130,7	207,3	0,02 (0,07)	11,13	0,11
КВГМ-20-150	2485,5	1036	28010 (6585)	4494	24,8	134,8	253,5	388,3	0,015 (0,06)	23,99	0,1
КВГМ-30-150	3334,6	1595,3	42235 (10030)	2380	38,1	71,4	340	482,8	0,012 (0,05)	37,13	0,09
КВГМ-50-150	3334,6	2695	74352 (17745)	6370	64,4	191,1	340	531,1	0,007 (0,03)	63,34	0,05
КВГМ-100-150	10001	4403	119813 (28535)	73605	105,2	2208,2	1000	3208,2	0,03 (0,11)	100,51	0,1

ложены условия, для которых рассчитывались данные для теплообменников КТАН (см. табл. 7).

При проведении расчетов проводился выбор утилизаторов типа КСК с учетом минимальных затрат электроэнергии с целью использования установленной мощности электродвигателей насосов и дымососов.

В расчетах стоимость электроэнергии принята 30 руб. за 1000 кВт·ч, газа — 29,38 руб. за 1000 м³. Стоимость дополнительного строительного объема для установки утилизаторов составляла около 3% капиталовложений в утилизаторы.

Сравнение расчетных данных, полученных для конденсационных теплообменников типа КСК (см. табл. II) и контактных КТАН (см. табл. 7), показывает, что при меньших капитальных затратах и потребности в дополнительной электроэнергии практически можно получить такую же экономию топлива при установке калориферов КСК, что и для КТАНов. При этом себестоимость тепловой энергии, получаемой в котлоагрегате, значительно ниже, а срок окупаемости составляет около 2 мес, тогда как для КТАНов — 2 года. Действительные показатели могут быть уточнены в процессе эксплуатации теплоутилизаторов как калориферов КСК, так и контактных типа КТАН.

В качестве перспективных утилизаторов теплоты для котельных малой мощности, работающих на закрытую систему теплоснабжения, могут быть рассмотрены разработанные ЦНИИЭП инженерного оборудования поверхностные теплоутилизаторы типа ТКГ, предназначенные для тепловой обработки воздуха. Конструкция теплоутилизатора предусматривает работу в конденсационном режиме, что существенно увеличивает коэффициент теплопередачи. Рекомендуемая область применения теплоутилизаторов находится в пределах пропускной способности от 2,5 до 125 тыс. м³/ч. Наиболее эффективно их использование при повышенной влажности удаляемого газа и повышенных температурах наружного воздуха. Теплоутилизаторы типа ТКГ могут быть выполнены из антикоррозионных материалов и со стеклянными трубками. Теплоутилизаторы с алюминиевыми трубками, имеющими внутреннее оребрение с пропускной способностью

10-160 тыс.м³/ч, изготавливаются объединением Моссантехпромом.

В теплоутилизаторах наружный воздух движется внутри труб, дымовые газы - в межтрубном пространстве по перекрестной схеме. Разработчики гарантируют надежную работу теплоутилизаторов до температур наружного воздуха -30°C. Теплоутилизаторы оборудованы поддоном для сбора и отвода сконденсировавшихся водяных паров и байпасным каналом по тракту наружного воздуха. При возникновении обледенения (о чем свидетельствуют отрицательные температуры поверхности труб) по команде реле давления или термореле открывается заслонка байпасного канала, что приводит к сокращению расхода наружного воздуха по трубам. В результате снижения скорости движения наружного воздуха в трубках теплоутилизатора повышается температура поверхности труб и наледь ликвидируется.

Применять теплоутилизаторы типа ТК рекомендуется при запыленности дымовых газов не более 20 мг/м³.

Для применения этих типов теплоутилизаторов в котельных необходима доработка конструкции с учетом специфики использования дымовых газов и проверка работы их в практических условиях.

Одним из перспективных направлений, обеспечивающих сокращение расхода на пути теплоснабжения, а также снижение загрязнения окружающей среды, является применение теплонасосных установок (ТНУ). Энергетическая эффективность ТНУ оценивается коэффициентом трансформации теплоты, представляющим отношение теплопроизводительности к затраченной извне механической работе. Обычно этот коэффициент равен 3-5 (т.е. на 1 кВт затрачиваемой электрической мощности может быть получено 3-5 кВт теплоты за счет использования низкопотенциальных источников). На практике этот коэффициент не превышает 2,2, что не позволяет конкурировать с централизованным теплоснабжением.

В настоящее время в нашей стране тепловые насосы не получили широкого распространения в связи с низкой стоимостью органического топлива для котельных и высокой стоимостью оборудования ТНУ. Однако в связи с изменением значимых

затрат на органическое топливо и обострением экологических проблем, связанных с загрязнением окружающей среды продуктами сгорания топлива, вопрос применения ТНУ приобретает особое значение. Специального оборудования для тепловых насосов в стране не выпускается, отдельные установки, работающие в настоящее время, базируются на оборудовании серийно выпускаемых холодильных машин.

Для решения вопроса о целесообразности создания теплонасосной станции должен быть проведен технико-экономический расчет сопоставлений вариантов котельной с ТНУ и без него с учетом стоимостных показателей, степени дефицитности топлива и электроэнергии и экологических факторов в каждом конкретном случае.

На экономичность ТНУ наибольшее влияние оказывают следующие факторы: вид системы теплоснабжения (открытая, закрытая); температура низкопотенциального источника; температура нагреваемой среды (сетевой воды) после ТНУ; для горячего водоснабжения в суммарной тепловой нагрузке; продолжительность отопительного периода; вид замещающего органического топлива; местные условия и ограничения (условия электроснабжения, затраты на использование низкопотенциального теплоисточника и т.д.).

При открытой системе теплоснабжения ТНУ преимущественно может работать на подогрев подпиточной воды от 5 до 70°C в устойчивом экономичном режиме.

При открытой системе удовлетворительная работа ТНУ может быть достигнута лишь при решении проблемы суточного выравнивания температуры обратной воды.

Схема утилизации теплоты дымовых газов с применением теплового насоса для котлов КНГМ-180 и КВТК-100-150, работающих в закрытой системе теплоснабжения с ограниченным количеством нагреваемой воды за счет утилизации, представлена на рис. 10. Предложен тепловой насос на базе бромисто-литиевой абсорбционной холодильной машины, работающей от тепловой сети, позволяющей избежать больших расходов электроэнергии на привод по сравнению с компрессорной машиной.

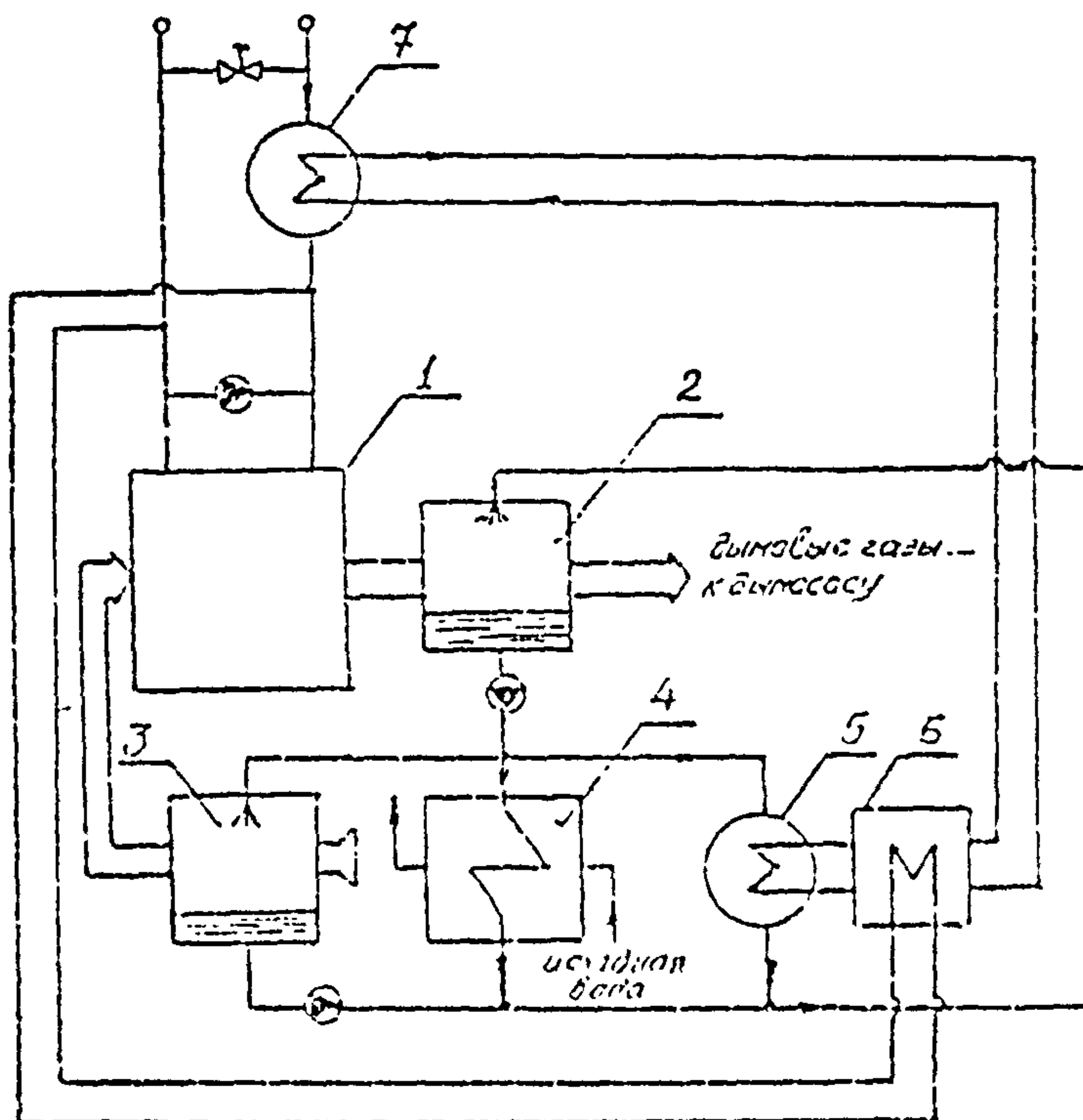


Рис. 10. Схема утилизации теплоты дымовых газов
с использованием теплового насоса:
1 - котел; 2 - контактный теплообменник; 3 - воздухопод-
греватель; 4 - теплообменник; 5 - испаритель; 6 - тепловой
насос; 7 - конденсатор

Продукты сгорания из котла поступают в контактный теплообменник 2, где охлаждаются орошающей водой из замкнутого циркуляционного контура. Вода, нагретая в скруббере до $60-70^{\circ}\text{C}$, подается в параллельно включенные воздухоподогреватель 3, теплообменник подогрева подпиточной воды 4 и испаритель теплового насоса 1, а затем общим потоком возвращается в скруббер-охладитель газов 2.

Теплота, отобранная у воды циркуляционного контура в сумме с теплотой, использованной на работу генератора, передается в обратную магистраль тепловой сети через теплообменник 4.

Оптимальная работа теплового насоса 6 на базе холодильной абсорбционной машины типа АБХМ-3000Т с тепловой нагрузкой испарителя около 3,9 МВт обеспечивается при подаче в генератор сетевой воды с температурой около 150°C , для чего котлоагрегат работает на переменном расходе воды в сети. В этом случае минимальная температура воды на входе в котел (около 70°C) будет иметь место при максимальной нагрузке котла, а при снижении нагрузки она будет возрастать, обеспечивая одновременно и надежную защиту хвостовых поверхностей нагрева от коррозии. В тепловой сети при этом поддерживается постоянный расход сетевой воды по графику качественного регулирования.

По данным разработчика схемы, система утилизации теплоты продуктов сгорания для котлов на газе, включая только подогрев воздуха и подпиточной воды, дает возможность экономить в отопительный период и в летнем режиме горячего водоснабжения соответственно 4,3 и 8,1% топлива. Для котлов на твердом топливе эти величины составляют соответственно 2,5 и 11,2%.

При дополнительной установке одной серийной бромисто-литиевой абсорбционной машины типа АБХМ-3000Т с тепловой нагрузкой испарителя 3,9 МВт, температурой воды на выходе из испарителя 28°C соответственно 150 и 65°C дополнительная экономия газообразного топлива в отопительный период составит 0,85-3,2% в зависимости от схемы регулирования нагрузки КВГМ-180, а летом 1,2-1,9%.

Суммарная экономия топлива при работе воздухоподогревателя, подогревателя подпиточной воды и теплового насоса составит в отопительный период 5,1–7,5, а в летний – 9,3–10%.

Для котлоагрегата на твердом топливе установка теплового насоса дает дополнительно экономию топлива 5,8%, а суммарная экономия с подогревом воздуха и воды составит 8,3%.

Годовой расход электроэнергии на одну машину типа ЛБМ-3000Г составляет около 635 тыс. кВт·ч. Годовой экономический эффект от применения двух тепловых насосов данного типа для КВГМ-180 вместе с подогревом воздуха и подпиточной воды составляет около 360 тыс. руб.

Для котлоагрегата КВТК-100-150, работающего на бурых углях, суммарный экономический эффект при дополнительной установке одной машины вместе с подогревом воды и воздуха составляет около 16 тыс. руб./год.

Схема утилизации теплоты дымовых газов, потребителем для которого является установка для выработки электрического тока [15], приведена на рис. II.

Дымовые газы с температурой 200–270°C и объемом 15–20 тыс. м³/ч поступают от дымососа в подогреватель I, затем испаритель 2, и, охладившись, сбрасываются в дымовую трубу. Полученный в испарителе пар с давлением 13–25 бар и температурой 140–160°C поступает на турбину 6, приводящую в движение электрогенератор 5, вырабатывающий 70–120 кВт мощности.

В качестве рабочей среды используется газообразный углеводород Р II. Рабочая среда, пройдя через турбину, поступает в основной конденсатор 7, подогревая подпиточную воду. Избыток теплоты реализуется в дополнительном конденсаторе для подогрева исходной воды. После этого рабочая среда проходит через фильтры, где подвергается осушке и подается снова в подогреватель.

Основные технические и стоимостные данные установки ОЭС приведены ниже.

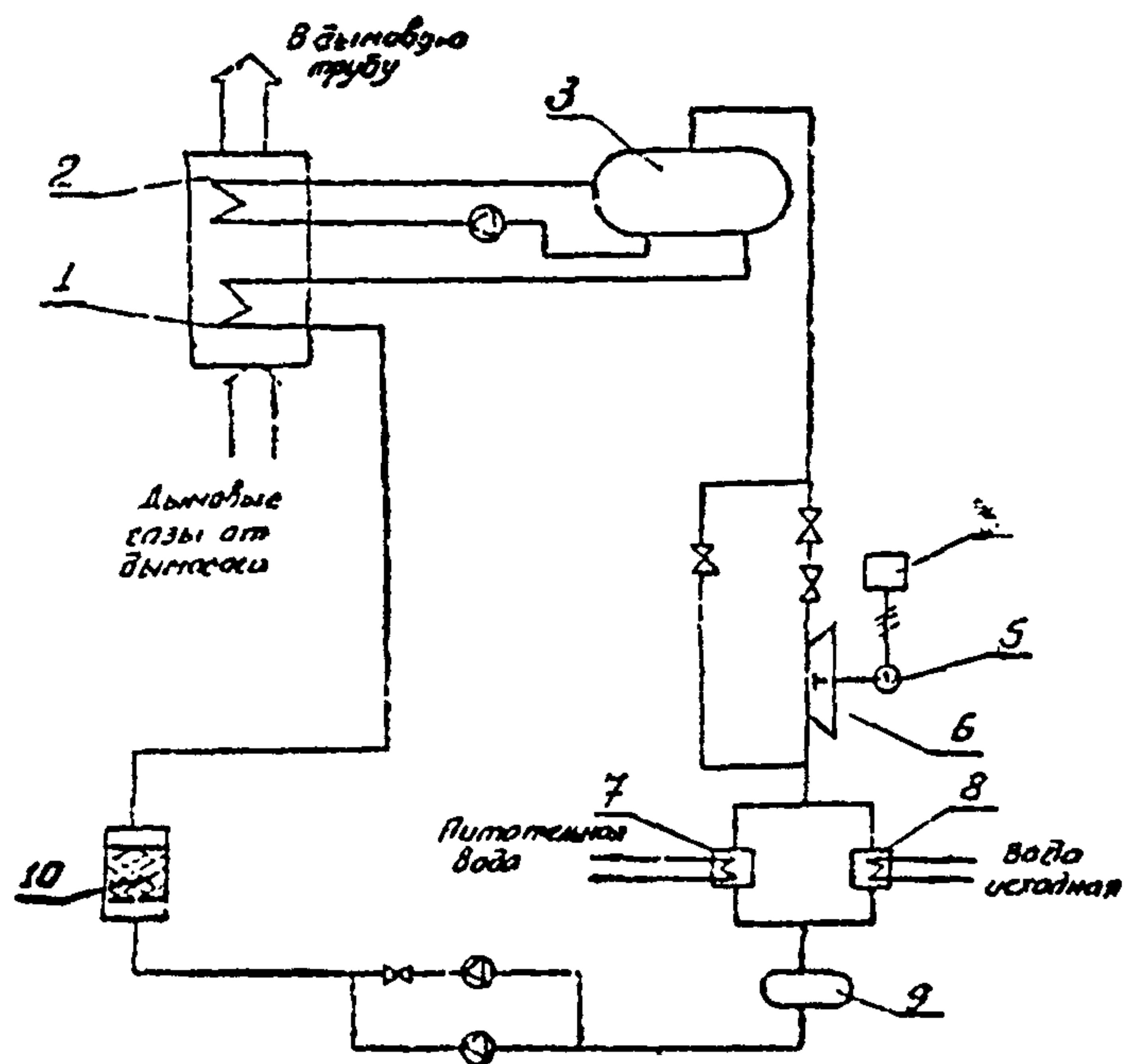


Рис. II. Схема утилизации теплоты дымовых газов для выработки электроэнергии:

1 - подогреватель; 2 - испаритель; 3 - сборник; 4 - распределительная панель; 5 - генератор; 6 - турбина; 7 - основной конденсатор; 8 - дополнительный конденсатор; 9 - бак; 10 - фильтр

Рабочая среда	Р II
Источник тепловой энергии	Дымовые газы с температурой максимум 270°C, минимально 200°C, объемом 15-20 тыс. м³/ч
Температура уходящих газов, °C	110
Максимальная мощность на валу турбины, кВт	140
Мощность электрогенератора, кВт	120/70

Параметры турбины:	
на входе	Давление пара 18-25 бар, $t = 140-160^{\circ}\text{C}$
на выходе	Давление пара 3-6 бар, $t = 60-85^{\circ}\text{C}$
Охлаждающая среда в конденса- торе	Подпиточная вода (нагревается при $t = 20-80^{\circ}\text{C}$) и исходная
Капитальные вложения*, тыс. марок ФРГ	
Удельная стоимость вырабаты- ваемой мощности, марок ФРГ на 1 кВт	367 2625

*Без подогревателя, испарителя, конденсаторов и трубопроводов.

Эта установка позволяет часть собственных нужд в электроэнергии покрывать за счет вырабатываемой электроэнергии на тепловой энергии дымовых газов.

Стоимость установки достаточно высока и ее использование может быть оправдано только высокой стоимостью топливно-энергетических ресурсов.

ОСОБЕННОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В КОТЕЛЬНЫХ, РАБОТАЮЩИХ НА ЖИДКОМ ТОПЛИВЕ

Большая часть котельных работает на газовом топливе, однако в соответствии с действующими нормами и правилами подающее большинство котельных, работающих на газе, имеет резервный вид топлива — мазут. Длительность работы котельных на мазуте зависит от выделяемого лимита природного газа и колеблется в широких пределах от нескольких дней до нескольких месяцев.

В разрабатываемой конструкции КТМ-утилизатора отсутствуют элементы, необходимые для работы на дымовых газах, образующихся при сжигании мазута, отсутствуют антикоррозионные покрытия активной засадки и корпуса КТАНа, не решен вопрос

удаления из контура орошения тяжелого конденсата дымовых газов. Поэтому при переходе котельной на работу на резервном виде топлива — мазуте — установленные в котельной КТАП-утилизаторы необходимо плотно отключить от газового тракта и пропустить газы по обводному газоходу непосредственно в дымовую трубу. Необходимо иметь в виду, что точка росы для дымовых газов, содержащих сернистый ангидрид, около 140°C при сжигании мазута.

Целесообразно котельные небольшой мощности обеспечить полностью газовым топливом, увеличив количество сжигаемого мазута на более крупных источниках. В этом случае экономически оправданными будут мероприятия по очистке дымовых газов от сернистого ангидрида. Одним из элементов этих устройств может быть КТАП соответствующей конструкции, который наряду с очисткой дымовых газов будет выполнять и свои функции теплоутилизатора.

В принципе, для работы на жидком топливе могут быть использованы те же утилизаторы, что и для газовых котельных, но специфика продуктов сгорания требует особого подхода к использованию утилизационного оборудования.

Вопрос утилизации теплоты дымовых газов котлов малой мощности 20–1000 кВт наиболее рационально решен в Западной Европе, где большая доля топлива приходится на мазут. Как правило, для целей отопления и горячего водоснабжения применяют конденсационные котлы, в которых используют теплоту как явную, так и тепло конденсации водяных паров, содержащихся в дымовых газах. Коэффициент полезного действия таких установок свыше 100% (по нижней теплоте сгорания). Для утилизации теплоты используют теплообменники из специальных коррозионных сталей. Модульная система "Calson", предназначенная для котельных установок промышленного и бытового назначения, имеет три ступени. В первой ступени продукты сгорания охлаждаются до температуры, близкой к температуре "точки росы", отдавая теплоту в систему отопления; во второй ступени температура продуктов сгорания понижается до 25°C , выделяющаяся теплота используется для горячего водо-

снабжения или для подогрева воздуха; в третьей ступени осуществляется нейтрализация вредных веществ и удаление конденсата. Очистка продуктов сгорания по сернистым соединениям достигает 90%, КПД установки достигает 108% [16].

Фирмой "Bopimat" [19] предложен конвективный теплообменник, изготавливаемый из медного литья со специальным легированием для применения в котлах, работающих на жидком топливе. Теплообменник снижает температуру до 150°C , затем продукты сгорания поступают в конденсатор водяных паров, выполненный из керамических материалов, в котором температура уходящих газов снижается до $35-55^{\circ}\text{C}$. Образующийся жидкий конденсат стекает в конденсаторную ванну нейтрализатора, снабженную абсорбционными кубиками для очистки его от масляных образований, затем во второй сборник с керамическим гранулятором, в котором pH повышается до 6,3-7. Для связывания углеводородов в третьем сборнике находится активированный уголь. Такая технология позволяет повысить КПД котлов, работающих на жидком топливе, до 108% (по высшей теплоте сгорания). При этом дымовая труба может изготавливаться из полимерного материала.

Для утилизации теплоты продуктов сгорания используют также встроенные в котельный агрегат контактные экономайзеры "Recitex", изготовленные из высококачественной стали. Активная насадка изготавливается из хромоникельмолибденовой стали. Система автоматики и регулирования обеспечивает стабильный режим работы экономайзера. Для предотвращения разрушения дымовой трубы при конденсации водяных паров из продуктов сгорания выброс уходящих газов производится через дымовую трубу из легированной стали. Получаемый конденсат отводится в систему канализации. Подобные типы утилизаторов применяются в котельных установках теплопроизводительностью 0,1-10 МВт.

Потеря давления в утилизаторе "Recitex" зависит от конструкции поверхности нагрева (гладкотрубчатая или с оребрением трубы) и колеблется от 0,15 до 0,6 мПа. Эти потери следует учитывать при выборе дымососов. Экономия тепловой

энергии при использовании явной теплоты 8–10% и скрытой 7–10%, т.е. практически на 15–20% можно увеличить коэффициент использования топлива. Температура уходящих газов при использовании жидкого топлива и наличия регулирующей системы составляет 70–120°C без использования скрытой теплоты и 35–60°C при использовании скрытой теплоты.

Применение утилизаторов из коррозионно-стойких сталей в ЛРГ оправдано высокой стоимостью топлива, в результате чего капитальные затраты окупаются за 1–4 года при эксплуатации установок 1500–2000 ч в год, при более длительной эксплуатации на промышленных предприятиях срок окупаемости снижается [12].

Реализация перечисленных зарубежных решений возможна при достаточно высокой стоимости топлива и жестких требованиях к охране окружающей среды. Эти два фактора позволили разработать наиболее эффективные и экологически чистые технологии использования теплоты продуктов сгорания отопительных котлов, работающих на жидком топливе.

Принципиальная схема утилизации теплоты дымовых газов в жидкотопливных котельных представлена на рис. 12. В основе схемы – использование КТАНа. Для повышения долговечности утилизационного оборудования применяются коррозионно-стойкие материалы из алюминиевых сплавов, нержавеющей стали, антикоррозионные покрытия, а также методы нейтрализации серной кислоты, образующейся в процессе сгорания жидкого топлива. Последний вариант экспериментально проверен в промышленных условиях на паровом котле производительностью 50 т/ч [6]. Орошаемая вода вместе с конденсатом из КТАНа поступает в резервуар 3, состоящий из трех камер, соединенных между собой переливными. В камеру I поступает 25%-ный раствор NH_4OH из бака 2 и добавляется в орошающую воду. Через перелив вода поступает в среднюю камеру II, куда может дополнительно добавляться вода при необходимости. Твердые частицы оседают на дно I и II. Оветленная вода поступает в камеру III, откуда подается снова на орошение. В зависимости от сте-

пены насыщенной сульфатом остаток отойдет в специальный объем. Дозирование аммиачной воды осуществляется с помощью насоса-дозатора по величине pH, которая поддерживается на уровне 7. Твердый остаток периодически подается в сепаратор 4, где отделяется твердая фаза, которая представляет интерес для дальнейшего использования.

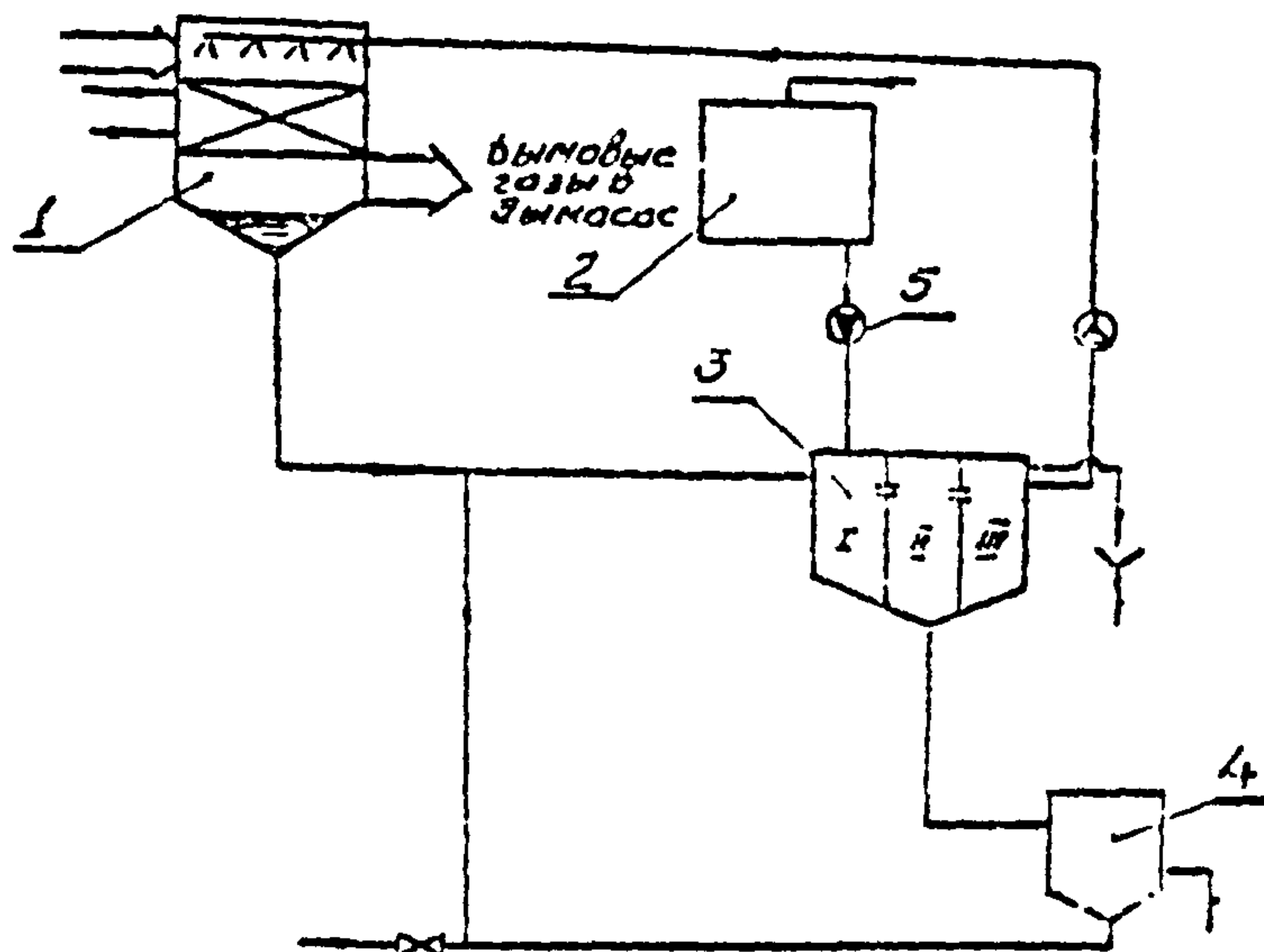


Рис. 12. Схема использования теплоты дымовых газов котельных, работающих на жидком топливе :

1 — контактный теплообменник; 2 — бак с аммиачной водой; 3 — бак орошающей воды; 4 — сепаратор вредных отложений; 5 — насос-дозатор

Использование контактного теплообменника за котлами в такой схеме дает возможность утилизировать теплоту конденсации водяных паров, в то же время орошение поверхности котла химическим раствором позволяет снизить коррозионные процессы, извлечь из дымовых газов ценный продукт для промышленности (сульфат аммония) и сократить выброс вредных веществ в окружающую среду.

В нашей стране имеется опыт применения утилизационных установок из стеклянных труб для подогрева воздуха за счет теплоты продуктов сгорания котлов, работающих на жидком топливе. Воздухоподогреватель выполнен из стеклянных труб в виде горизонтального пучка труб [7]. Воздух пропускается внутри трубок, дымовые газы — в межтрубном пространстве. Имеется опыт эксплуатации 70 воздухоподогревателей для котлов производительностью 10–950 т/ч. Расход труб при повышении КПД на 2% составляет: для котла производительностью 10 т/ч — 750 м, 210 т/ч — 12 км, 950 т/ч — 70 км. Общая стоимость воздухоподогревателей из стеклянных труб составляет: для котла производительностью 10 т/ч — 4300 руб., 210 т/ч — 35000 руб. Экономия условного топлива около 70 кг у.т./год на 1 м² стеклянной поверхности.

Как показали расчеты, для повышения КПД водогрейных котлов КВГМ производительностью 4,65–39 МВт, работающих на мазуте, достаточно установить пучок стеклянных труб диаметром 45х4 мм длиной 23 м на каждый 1 МВт производительности. Пучок выбирается с коридорным расположением труб с зазорами $S_1 = 100$ мм и $S_2 = 67$ мм. Коэффициент использования поверхности при этом составляет 0,7.

Технико-экономические показатели воздухоподогревателей со стеклянными трубами за котлами КВГМ приведены ниже.

	<u>Теплопроизводительность</u> <u>котла, МВт</u>				
	4.65	7.55	11.63	23.26	35
Температура дымовых газов, °С:					
перед воздухоподогревателем . . .	245	245	230	242	250
после воздухоподогревателя . . .	200	200	200	200	200
Температура воздуха, °С:					
перед воздухоподогревателем . . .	20	20	20	20	20
после воздухоподогревателя . . .	68	68	54	65	76
Увеличение КПД . . .	1,84	1,84	1,22	1,71	2,03
Экономия условного топлива, т у.т./год	54	86	88	243	434

Установка воздухоподогревателей со стеклянными трубами окупается за 1,5–2 года. Практика эксплуатации показала целесообразность применения воздухоподогревателей и надежность их работы.

Достаточно большой интерес вызывает использование теплообменников на тепловых трубах для утилизации теплоты продуктов сгорания жидкого топлива, особенно за котлами малой мощности, за которыми температура уходящих газов составляет 300–320°C. Традиционные решения для нагрева воды с помощью теплоты дымовых газов требуют значительных капитальных вложений для защиты от сернистой коррозии. Теплообменники на тепловых трубах помогают поддерживать температуру стенки труб 140°C, что позволяет избежать точки росы, а следовательно, конденсации водяных паров и растворения в них окислов серы. Подобный опыт использования теплообменника на тепловых трубах приведен в работе [9].

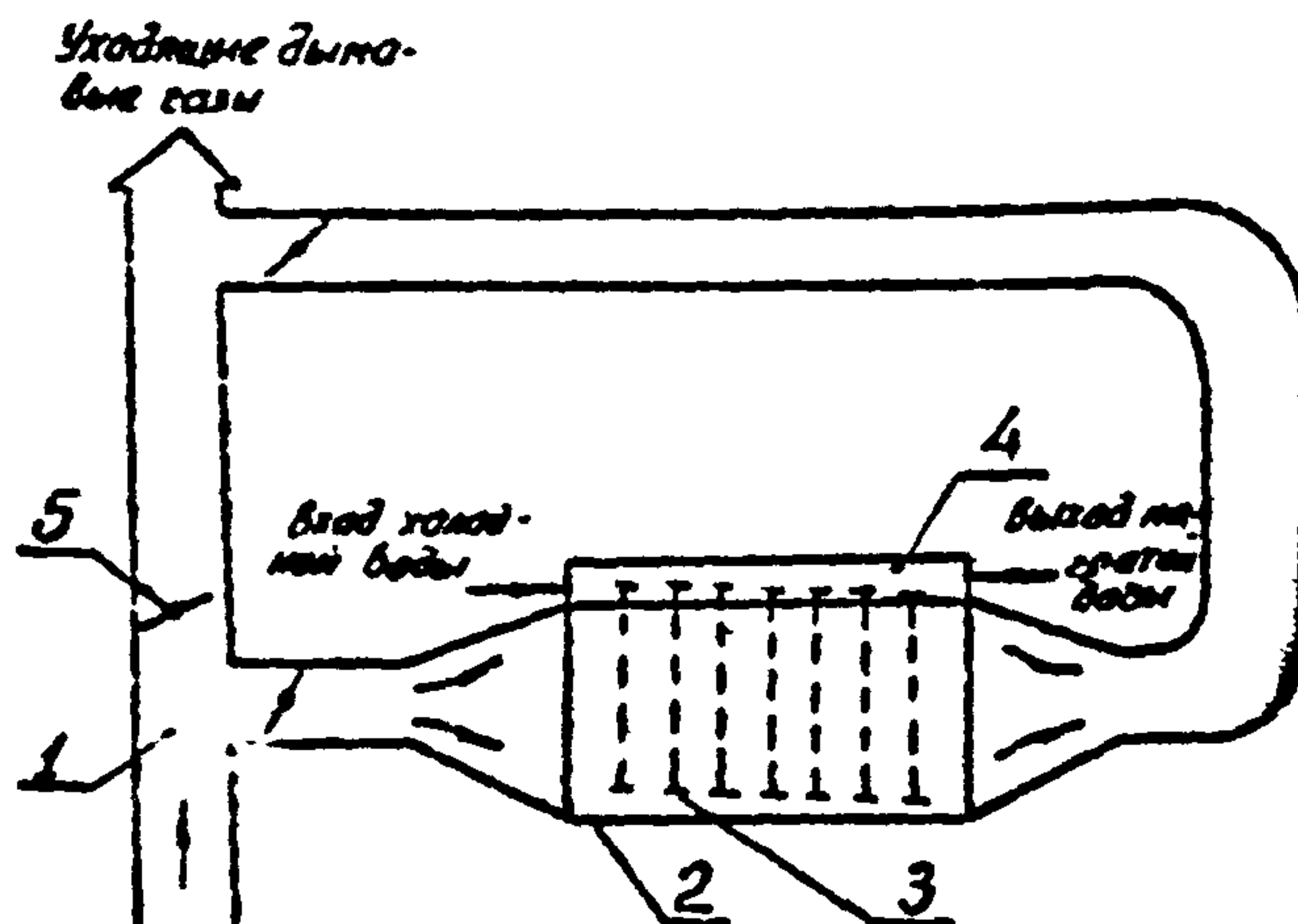


Рис. 13. Схема утилизационной установки на тепловых трубах:

1 – дымоход; 2 – теплообменник; 3 – тепловые трубы; 4 – фланцы с холодной водой; 5 – заслонка

В установке (рис. 13) температура дымовых газов на входе в теплообменник 280, на выходе 246°C. Подогрев воды производится при этом от 50 до 55°C при расходе ее от 345 до 21713 кг/ч. Мощность установки 20 кВт. Теплообменники компакты, имеют объем 0,3 м³ на 10 т/ч газа. Удельная экономия теплоты около 17 ГДж/кВт (~ 4 Гкал/кВт). Срок окупаемости установки 11 мес.

В процессе работы установки температура стенки трубы поддерживается около 170°C. Малое гидродинамическое сопротивление не требует дополнительной установки тягосутьяжных устройств.

Возможную схему использования теплоты дымовых газов для котла, работающего на природном газе с резервным жидким топливом, представляет рис. 14. В схеме предусмотрена промывка дымовых газов и нейтрализация промышленной воды с целью снижения содержания вредных веществ в воде и уходящих газах [1].

Из котла 1 дымовые газы проходят по газоходу, в котором установлено вырывающееся устройство, в которое подается вода из сепаратора пара 2, или конденсат. После экономайзера 4 установлены разбрызгивающие сопла 5. Промывочная вода собирается в поддон газохода, откуда через теплообменник 6 подается в бак-накопитель 7, из которого выделившийся SO₂ подается к сборнику SO₂, а промывочная вода далее поступает в нейтрализатор 8 и шламоотделитель 9. После нейтрализации вода может быть включена в контур котельной для приготовления подпиточной воды.

Эта схема требует практической проработки для определения экономической и технологической целесообразности как для периодического, так и постоянного использования ее при работе котла на жидком топливе.

Утилизация теплоты продуктов сгорания жидкого топлива требует применения коррозионно-стойких материалов для конструкций утилизаторов, но это недостаточно для нормальной эксплуатации, поскольку происходит эрозия поверхностей продуктами сгорания, что требует специальных мероприятий для

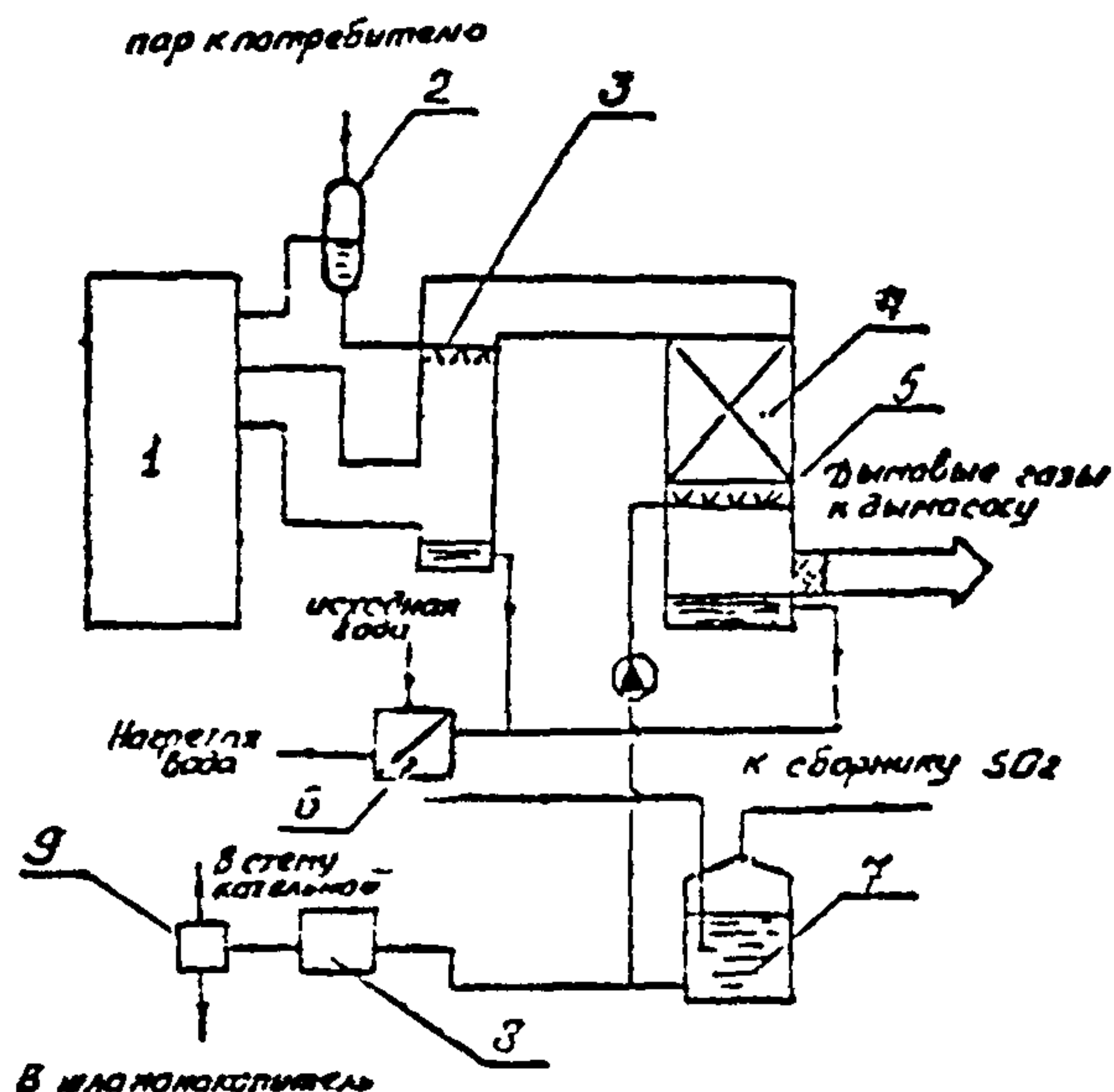


Рис. 14. Схема утилизации теплоты дымовых газов с промежутой газом:

1 — котел; 2 — сепаратор газа; 3 — впрыскивающее устройство; 4 — экономайзер; 5 — разбрызгивающие сопла; 6 — теплообменник; 7 — бак-накопитель; 8 — нейтрализатор; 9 — плазмоотделитель

очистки поверхностей. Поэтому наиболее рационально применение очистных сооружений в котельных установках на жидком топливе, с помощью которых можно комплексно решить вопросы долговечности оборудования, высокого уровня эксплуатации и охраны окружающей среды.

ОСОБЕННОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В КОТЕЛЬНЫХ, РАБОТАЮЩИХ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Для утилизации теплоты уходящих газов котлов, работающих на твердом топливе, в принципе также могут быть использованы те же утилизационные установки для подогрева воздуха и воды, что в котельных, работающих на газе, но при этом должны быть предусмотрены мероприятия по удалению твердых частиц, а при высокой сернистости топлива — по защите оборудования от коррозии.

Принципиальная схема утилизации теплоты дымовых газов для котла КВТК-100-150, работающего для закрытой системы теплоснабжения, приведена на рис. 15, а. В качестве топлива принят уголь Ирша-Бородинского месторождения, содержание в котором серы 0,2%, окислов кальция до 26%. Предусматривается золоулавливание в типовых электрофильтрах до степени очистки 0,97-0,98 с последующим улавливанием остатка золы в скрубберном охладителе газов при форсуночном разбрызгивании орошающей воды охлаждающего контура в поток газов.

Продукты сгорания из котла поступают в электрофильтры, затем в охладитель газов 3, в котором орошающая вода подогревается до температуры 35-55°C в зависимости от режима работы установки и схемы ее работы, при этом продукты сгорания охлаждаются до 25-50°C. С целью предотвращения конденсации в дымовой трубе часть газов через байпасную линию перепускается мимо скрубберного охладителя. Из охладителя 3 вода циркуляционного контура с температурой 64-67°C насосом прокачивается через грязеулавливающие фильтры 4 конструкции СКБ ВТИ им. Ф.Э.Дзержинского, в которых она очищается от золы и шлама, выносимых из охладителя. Для более полной очистки воды добавляется сернокислый алюминий в размере 5 мг/л. После фильтров вода подается в форсунки скруббера-подогревателя воздуха, а часть — в параллельно включенный водоводяной теплообменник 5, в котором подпиточная вода подогревается до 50°C и подается далее в химводочистку.

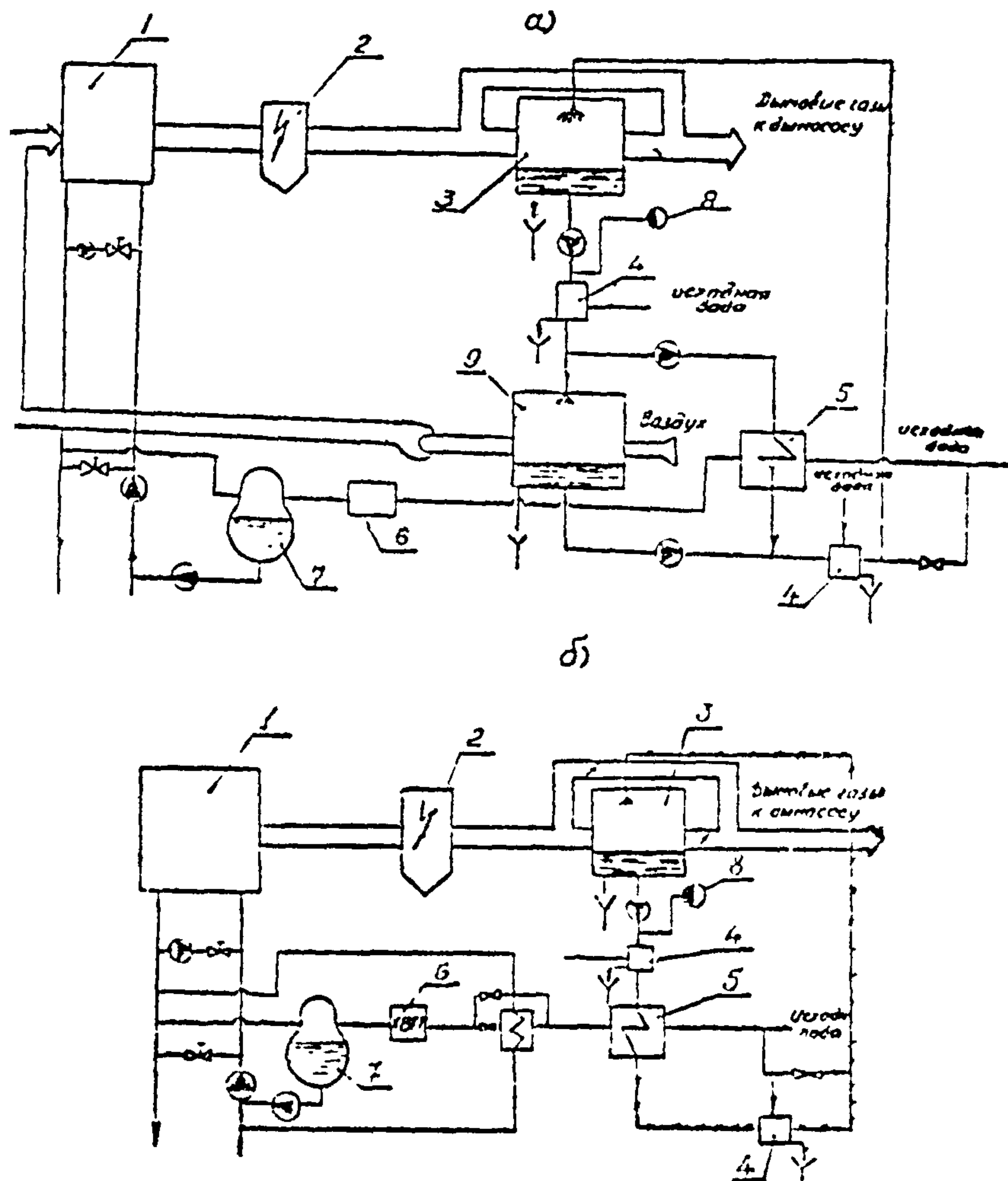


Рис. 15. Схема утилизации теплоты дымовых газов котла КВТК-100-150:

а - в закрытой тепловой сети; б - в открытой тепловой сети; 1 - котел; 2 - электрофильтр; 3 - контактный охладитель газов; 4 - фильтр; 5 - теплообменник; 6 - оборудование химической очистки; 7 - деаэрактор; 8 - ввод коагулянта; 9 - воздухоподогреватель

В целях защиты от загрязнений форсунок скрубберов из нижних точек аппаратов осуществляется дренаж пульпы в количестве около $0,03 \text{ м}^3/\text{ч}$, что компенсируется конденсируемой из газов водой. Кроме того, перед охладителем газов орошающая вода прокачивается снова через напорные фильтры 4.

Для нормальной работы системы утилизации необходимо обеспечить водно-химический режим работы циркуляционного контура, исключаящий коррозию оборудования, отложение шлама и карбонатов на форсунках и поверхностях теплообменника. Отсутствие такого опыта в практике эксплуатации требует проведения специальных исследований.

В данной схеме не предусматривается специальной сероочистки в связи с низким содержанием серы в принятом виде топлива. Нейтрализации этих соединений обеспечивается щелочными элементами улавливаемой в охладителе газов зола.

Для защиты от коррозии теплоутилизационного оборудования рекомендуется применение силиката лития, периодически дозируемого в воду циркуляционного контура, в количестве 3–5 мг/л.

Для открытой тепловой сети предлагается принципиальная схема утилизации, представленная на рис. 15,б.

Охлаждение газов производится в охладителе газов 3 до температур $23\text{--}40^\circ\text{C}$ в зависимости от режима работы установки. Нагретая в скруббере 3 вода до $57\text{--}61^\circ\text{C}$ поступает в напорные фильтры 4, где очищается от твердых частиц и шлама, а затем направляется в водоводящийся теплообменник 5, в котором подогревается подпиточная вода. Охлажденная вода возвращается в охладитель газов при температурах около 12°C . Для открытой тепловой сети расход подпиточной воды значителен, поэтому подогрева воздуха не производится. Конструкция основного оборудования утилизации теплоты дымовых газов должна быть разработана применительно к конкретным условиям.

Охладитель газов скрубберного типа имеет форсуночный разбрызгиватель сверху, а внизу – двойной отстойник шлама обремененный с декарбонизатором. Воздухоподогреватель скрубберного типа также с форсуночным распыливанием воды. Выход-

ное сечение перекрыто каплеуловителем из колец Рашига, в нижней части имеется отстойник шлама.

При оборудовании котлоагрегатов КВТК-100-150 системой утилизации теплоты уходящих газов экономия топлива за год составляет в среднем 3,9% для закрытой и 11,7% для открытой тепловой сети. Годовой экономический эффект при стоимости топлива 22 руб/т у.т. составил по расчетам 5,44 тыс. руб. для закрытой и 104,6 тыс.руб. для открытой тепловой сети.

При температуре уходящих газов выше 150°C может быть предложена схема, представленная на рис. 16. За котлом устанавливают два скруббера, один из которых 2 служит для очистки газов от механических примесей. Примеси выпадают в нижнюю часть и далее поступают в отстойник 5, из которого осветленная вода вновь подается на орошение в скруббер 2. Корпус скруббера покрыт слоем тепловой изоляции, поэтому дымовые газы в нем почти не охлаждаются. Затем дымовые газы поступают в скруббер 3, где отдают свою теплоту орошаемой воде. Нагретая вода насосом подается в промежуточный теплообменник 4, в котором подогревается вода для потребителей (на горячее водоснабжение, подпиточная и др.) [5].

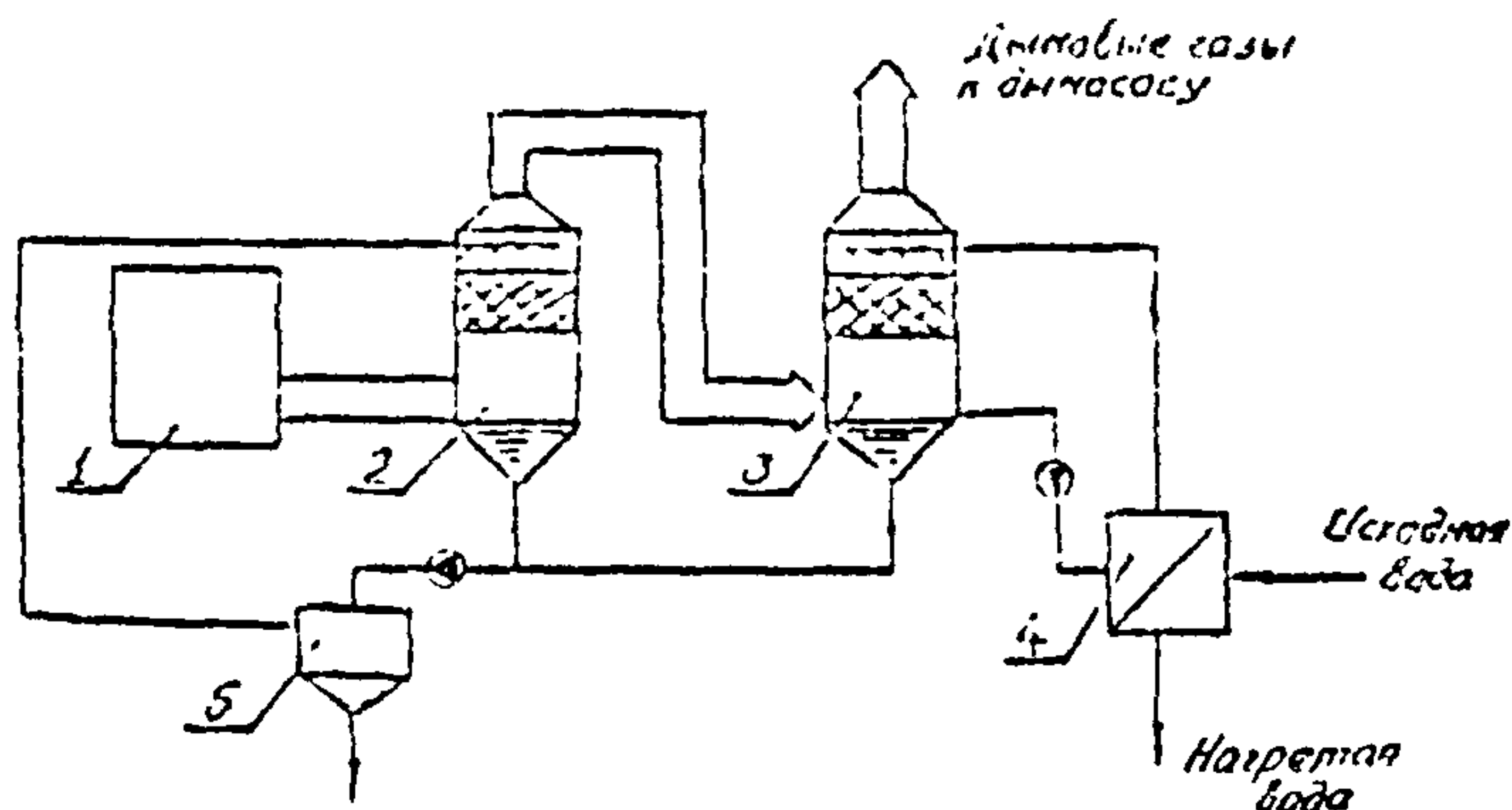


Рис. 16. Схема автоматизации теплоты дымовых газов с механическими примесями:

1 — котел; 2 — скруббер очистки газов; 3 — скруббер-утилизатор; 4 — теплообменник; 5 — отстойник

Эта схема может использоваться при технико-экономическом обосновании для продуктов сгорания с температурой $130-200^{\circ}\text{C}$ в связи с большой металлоемкостью и повышенными капитальными затратами.

Вследствие отсутствия утилизационного оборудования конкретно для котлов малой мощности делается попытка приспособить выпускаемые нашей промышленностью теплообменные аппараты для нужд утилизации теплоты дымовых газов в котельных. Горьковским ГПИ Сантехпроект запроектированы котельные с котлоагрегатами "Братск-М", работающие на твердом топливе (типовые проекты № 903-1-89, 903-1-273-89, 903-1-274-89) для закрытой системы теплоснабжения. В качестве утилизатора на дымовых газах устанавливается рекуперативный компактный теплоутилизатор малой металлоемкости из нагревательных элементов конвекторов "Комфорт-20" КН 20-3,5П с кожухом.

Теплоутилизаторы устанавливаются за каждым блоком котлоагрегатов "Братск-М". Дымовые газы по металлическому газопроводу направляются в золоулавливающую установку, затем в теплоутилизатор, после которого дымовые газы дымососом подаются в дымовую трубу (рис. 17,а).

Вся масса дымовых газов с температурой 180°C при работе на каменном угле и 133°C на буром охлаждаются в теплоутилизаторе соответственно до 130 и 90°C . Теплоутилизаторы имеют замкнутый контур циркуляционной воды: теплоутилизатор-теплообменник-насос-теплоутилизатор. Циркуляционная вода нагревается с 55 до 64°C , затем охлаждается в промежуточном теплообменнике, нагревая исходную воду с 10 до 16°C .

Теплопроизводительность каждой теплоутилизационной установки составляет $0,08\text{ МВт}$ ($0,07\text{ Гкал/ч}$). Применение ее позволяет дополнительно получить около 3% тепловой энергии и соответственно сэкономить около 50 т у.т. в год.

Очистка поверхности нагрева теплоутилизатора как и для котла предусматривается методом обдувки сжатым воздухом, установка обдувки включает в себя компрессор, ресивер и систему трубопроводов.

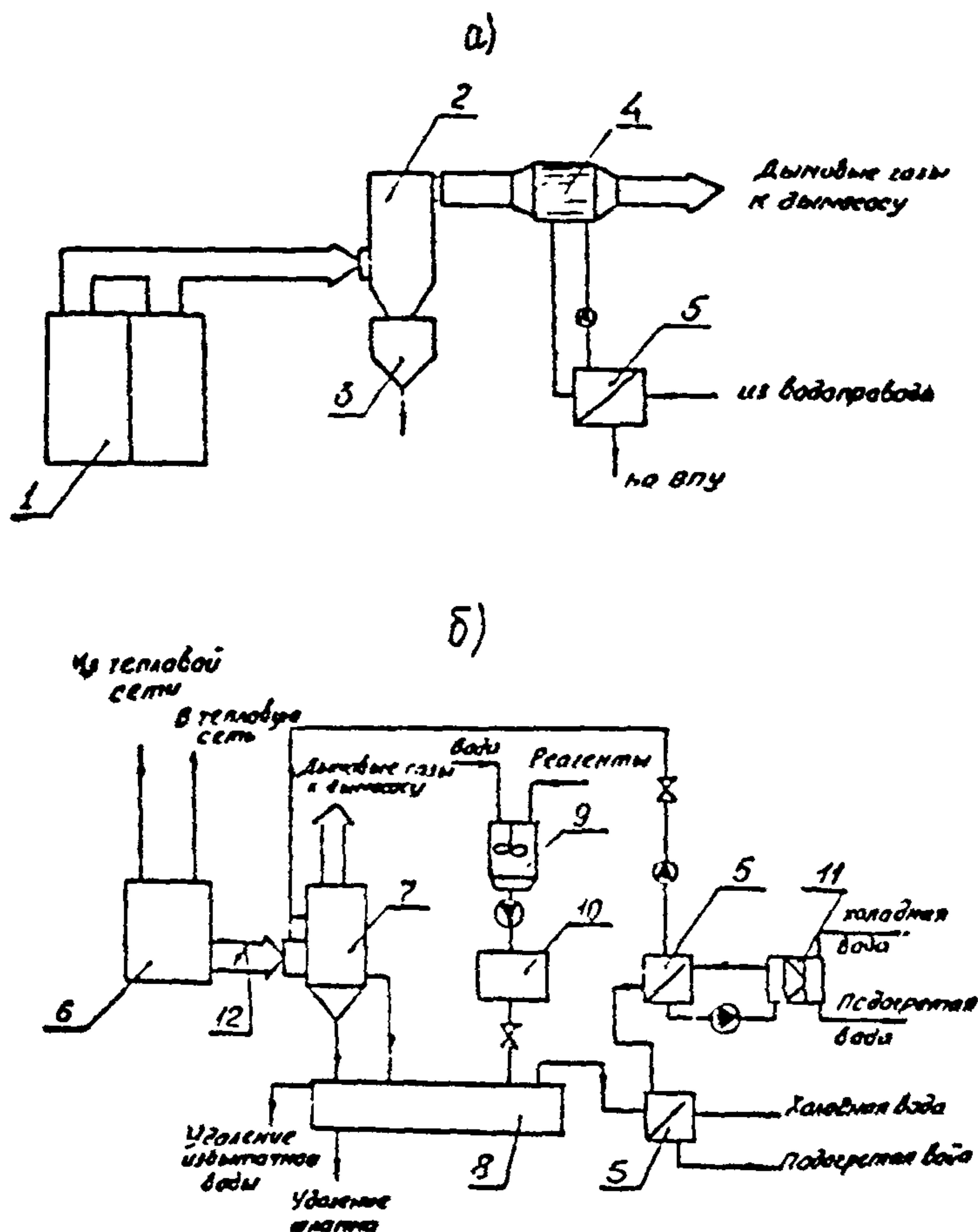


Рис. 17. Схема утилизации теплоты дымовых газов:

1 - котлов "Братск-М"; 6 - котла, работающего на буром угле; 1 - блок из двух котлов; 2 - золоуловитель; 3 - бункер для сбора воды; 4 - утилизатор; 5 - теплообменник; 6 - котла; 7 - вихревой циклон; 8 - отстойник; 9 - смешительный резервуар; 10 - бак; 11 - тепловой насос; 12 - заслонка

Для котла, работающего в режиме 90/70°C на буром угле, предложена установка с утилизацией тепла дымовых газов и очисткой уходящих газов от пыли и окислов серы (рис. 17,б) [18] .

После котла установлен вихревой пылеуловитель 7. Продукты сгорания до поступления в пылеуловитель предварительно охлаждаются за счет впрыскивания воды, которая при контакте с дымовыми газами нагревается до 70-90°C. Затем дымовые газы в корпусе вихревого пылеуловителя смешиваются в турбулентном потоке с водой, содержащей нейтрализующие агенты (CaCO_3 , NaOH , NH_3). На выходе из лопаточных завихрителей в результате резкого изменения давления происходит фазовое разделение смеси. Образующаяся суспензия направляется в отстойник 8, из которого вода после охлаждения до 15-20°C снова поступает в пылеуловитель. Охлаждение производится в теплообменниках с холодной водой, затем с помощью теплового насоса II.

Тепловая мощность котла, работающего по такой схеме, может быть увеличена на 10-60%, теплота пылеулавливания достигает 96-98%, удаление окислов серы 73-97%. С помощью такой установки возможно утилизировать до 50% сбросной теплоты.

Для подогрева дутьевого воздуха в работе [20] использована система из двух теплообменников, установленных в трактах уходящих газов, и подачи воздуха. Теплообменники связаны трубопроводами, по которым с помощью насоса циркулирует масло. Такая система позволяет на отопительном котле мощностью 5 МВт снизить температуру уходящих газов с 200-250 до 110-140°C в зависимости от нагрузки.

Схема установки утилизации теплоты дымовых газов и очистки их для парового котла мощностью 3,2 т/ч [17] представлена на рис. 18. Котел работает на рядовом буром угле, поэтому на установке наряду с утилизацией производится десульфуризация (90%) и обеспыливание (~95%). Расход дымовых газов через установку 7500 м³/ч. Температура газов на входе в установку 200°C. В теплообменнике 2 со стеклянными тру-

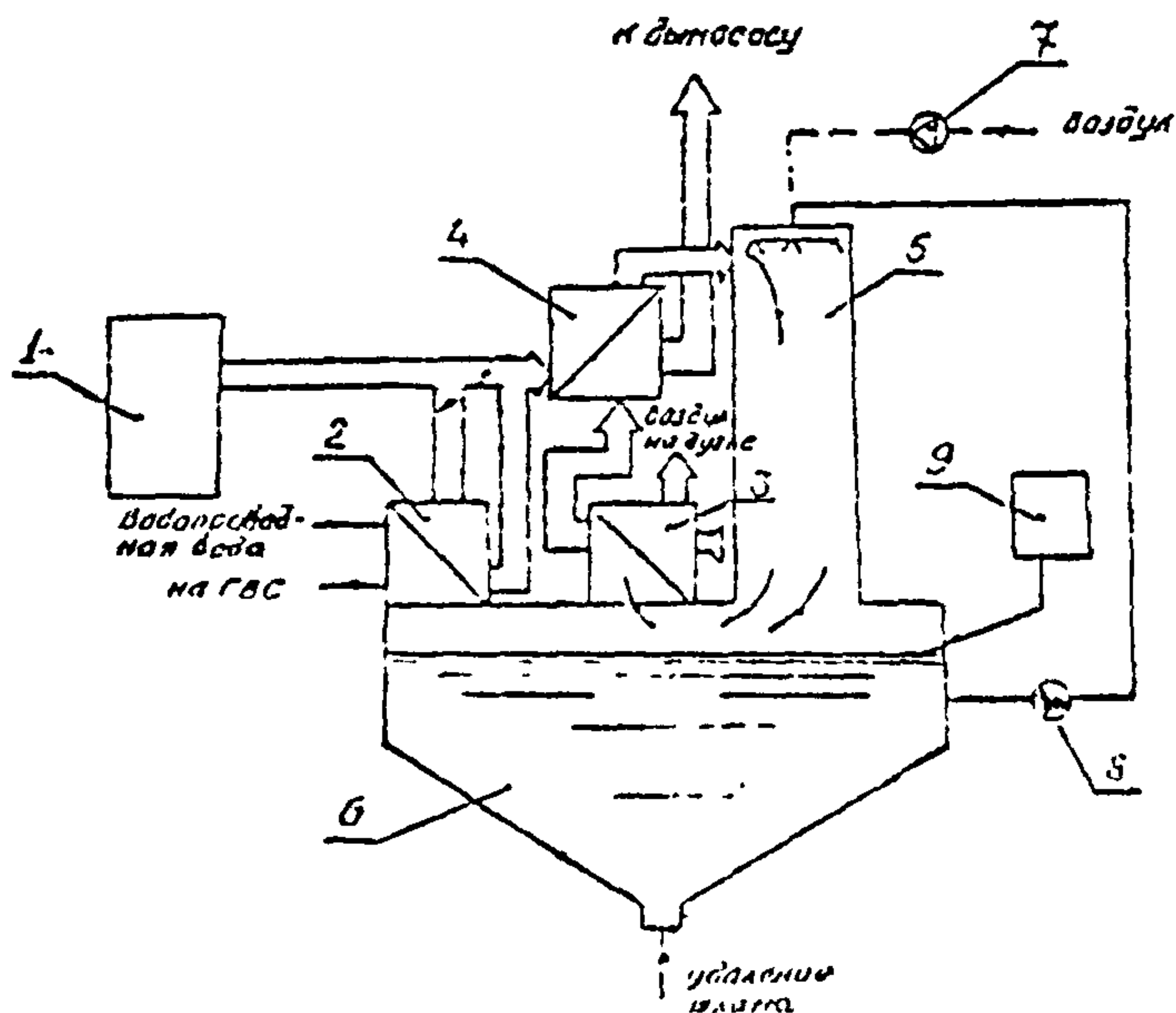


Рис. 13. Схема утилизации теплоты и очистки дымовых газов парового котла:

1 — котел; 2 — теплообменник-охладитель газов; 3 — воздухоподогреватель; 4 — теплообменник-подогреватель газов; 5 — контактный теплообменник; 6 — емкость для промывочной воды; 7 — компрессор; 8 — насос; 9 — нейтрализатор

баны происходит охлаждение газов на $30-60^{\circ}\text{C}$ и нагрев воды для горючего водоснабжения на $10-30^{\circ}\text{C}$ при расходе воды $1,2-2,6 \text{ м}^3/\text{ч}$. Далее газы поступают в скруббер, где производится их промывка золоизвестковой водой через сопла. Через эти же сопла для окисления сульфита кальция в сульфат компрессором подается воздух. Промывочная жидкость нейтрализуется для повышения pH. Шлам вместе с промывочной водой поступает в отстойник системы золоудаления, в который добавляется $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Очищенные дымовые газы проходят через

воздухоподогреватель 3, затем поступают в теплообменник из стеклянных труб 4, где подогреваются до 75–95°С и направляются дымососом в дымовую трубу. Мощность утилизационной установки 160 кВт.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

С точки зрения защиты окружающей среды для производства тепловой энергии предпочтительно использование газа. Это позволяет избежать выбросов твердых частиц и серы, в 3–4 раза уменьшить окислы азота и вдвое окиси углерода по сравнению с сжиганием твердого и жидкого топлива. На добычу и транспортирование газа затраты на 20–30% ниже, чем на добычу и транспортирование угля, что имеет большое экономическое значение.

Средние удельные концентрации основных вредных веществ, выбрасываемых при сжигании различных топлив котельными, приведены ниже.

Зависимость удельных вредностей от вида топлива

<u>Вредное вещество</u>	<u>Удельная вредность, мг/м³, при сжигании сжижаемого топлива</u>		
	<u>Твердое</u>	<u>Газообразное</u>	<u>Жидкое</u>
NO _x	250	150	200
SO _x	2500	—	1500
CO _x	3000	100	140
Твердые час- тицы	3000	—	50
То же	—	—	20

Из приведенных данных видно, что наибольший экономический вред может быть от выбросов котельных, работающих на твердом топливе.

Одним из основных вредных элементов топлива является сера и азотосодержащие элементы соединения. Для отопительных котельных топливо должно содержать минимальное количество

этих соединений, на практике же это часто нарушается. Десульфация угля и жидкого топлива — это дорогостоящий процесс, в результате которого резко возрастает стоимость топлива, полной же очистки достичь невозможно. Очистка дымовых газов также требует больших капитальных вложений.

Применение утилизаторов тепла равносильно повышению КПД котельных, следствием которого является снижение расхода топлива, а пропорционально этому снижается выброс вредных веществ, т.е. практически любые мероприятия, направленные на энергосбережение, способствуют снижению поступления в атмосферу загрязняющих веществ. Защита атмосферы от загрязнения имеет не только технико-экономическое, но и большое социальное значение. Сернистый ангидрид даже в сравнительно малых концентрациях раздражающе действует на слизистые оболочки дыхательных путей человека и животных. В то же время он является ядом для многих растений. Оксид углерода и диоксид азота вступают в соединения с гемоглобином крови, и при больших концентрациях возникает угроза жизни человека. Наличие обычных для промышленных городов аэрозолей диоксида азота в сочетании с повышенной влажностью и запыленностью приводит к снижению видимости, затрудняет проникновение ультрафиолетовых лучей и снижает число солнечных дней. Выброс высокотемпературных газов и углекислого газа увеличивает "парниковый эффект".

Для улавливания золы котельные, работающие на твердом топливе, должны оборудоваться системами газоочистки. Наиболее эффективные способы — электрофильтры с КПД 97,6–99,9% — очень дороги и могут быть использованы только на крупных ТЭЦ и ТЭС.

В котельных малой мощности сухая газоочистка позволяет улавливать частицы размером 3 мкм менее 50%. Частицы меньшего размера представляют наибольшую угрозу для здоровья, а уловить удается только порядка 10%. В котельной малой мощности с 2–3 котлами на практике часто совсем отсутствуют золоуловители.

Применение утилизатора приводит к снижению температуры выброса, что, в свою очередь, вызывает увеличение приземной концентрации вредных веществ. Для обеспечения равнозначной концентрации возникает необходимость снижения количества выбросов или увеличения высоты дымовой трубы, т.е. увеличения капитальных вложений, или увеличения скорости газов в устье дымовой трубы, что потребует дополнительных затрат электроэнергии.

Зависимость количества выбросов вредных от температуры имеет вид:

$$M_2 = M_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)^{1/3}, \quad (5)$$

где M_1 и M_2 — количество вредных веществ соответственно до и после утилизации, г/с; T_1 и T_2 — температура уходящих газов до и после установки утилизаторов, °С; ΔT_1 , ΔT_2 — разность температур между температурами уходящих газов и окружающей средой соответственно до и после установки утилизаторов, °С.

Когда

$$M_2 \leq M_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)^{1/3}, \quad (6)$$

дополнительных затрат на обеспечение приземной концентрации вредных веществ, создаваемой без учета влияния утилизации топлива, не требуется.

В том случае, когда

$$M_2 > M_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

необходимо проведение дополнительных мероприятий:

увеличения высоты дымовой трубы

$$H_2 = H_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)^{1/6}, \quad (8)$$

где H_1, H_2 - высота дымовой трубы до и после утилизации, м;
изменения скорости выброса

$$W_2 = W_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \frac{T_1}{T_2} \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}, \quad (9)$$

где W_1, W_2 - скорость газов в устье дымовой трубы соответственно до и после утилизации, м/с; D_1, D_2 - диаметр дымовой трубы соответственно до и после утилизации, м;
изменения диаметра трубы

$$D_2 = D_1 \left(\frac{W_1}{W_2} \frac{T_1}{T_2} \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)^{1/2}. \quad (10)$$

Расчетные зависимости изменения относительного количества вредных веществ и относительной высоты трубы от изменения температуры выбрасываемых газов со 150 до 40°C и при температурах окружающей среды 20, 0, -20, -40°C приведены на рис. 19.

Из приведенных графиков можно видеть, что снижение вредности на 30% позволяет снизить температуру уходящих газов примерно до 100°C, а снижение вредности на 50% - до 40-50°C без дополнительных капитальных вложений.

Снижение температуры уходящих газов без снижения объемов вредных выбросов требует увеличения высоты дымовой трубы примерно на 12-15% при снижении температуры до 100°C и на 40-50% при снижении до 50°C.

Таким образом, при снижении температуры выбрасываемых газов необходимо предусмотреть мероприятия по снижению приземной концентрации вредных веществ. Если при проектирова-

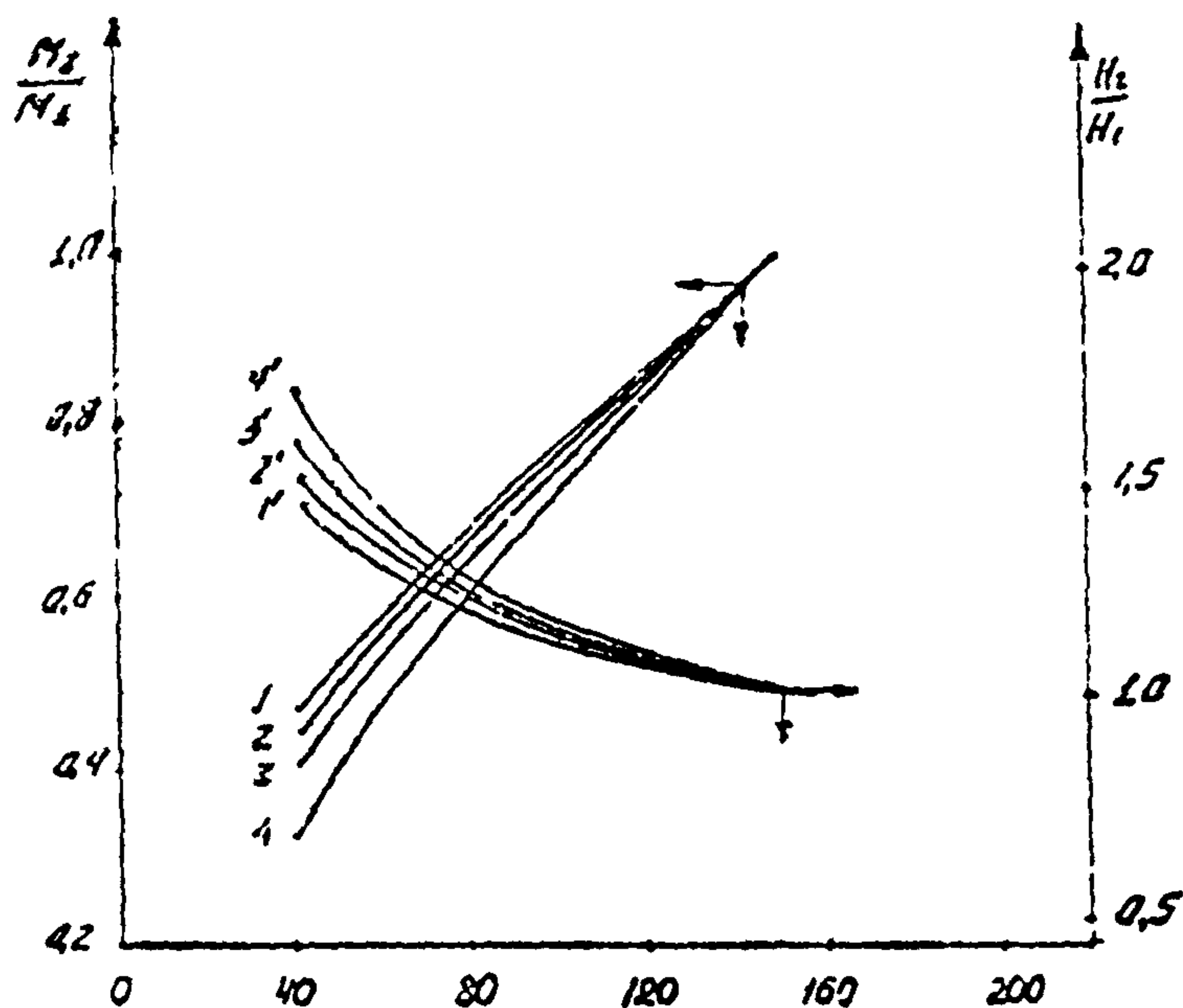


Рис. 19. Зависимость изменения относительного количества вредных веществ $\frac{M_2}{M_1}$ и относительной высоты трубы $\frac{H_2}{H_1}$ от изменения температуры уходящих газов: I и I' — температура окружающей среды 20°C ; 2 и 2' — 0°C ; 3 и 3' — $(-20)^{\circ}\text{C}$; 4 и 4' — $(-40)^{\circ}\text{C}$

При новом объекте это учитывается в расчетах, то при установке теплоутилизаторов на действующих теплоэнергетических предприятиях необходимо провести проверочные расчеты и принять необходимые меры по обеспечению той же величины приземной концентрации, что и до установки утилизатора.

Использование контактных теплообменников с орошением дымовых газов водой позволяет снизить концентрацию вредных веществ, растворенных в воде, и твердых включений.

При сжигании газообразного топлива образуется диоксид NO_2 , монооксид азота NO . Диоксид азота, имеющий в 7,6 раза больше токсичность, чем монооксид, полностью растворим в воде. Монооксид имеет растворимость 7,38 мл/100 г при 0°C , снижается с увеличением температуры и при 100°C его растворимость 2,6 мл/100 г [3].

Исследования, проведенные на контактном экономайзере за котлом ДЭР-10-13, показали, что в номинальном режиме загрузки контактного экономайзера через него проходило 10 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ газов, из которых растворялось до 700 г/г монооксида азота. При содержании оксидов азота в уходящих газах около 160-170 $\text{мг}/\text{м}^3$ содержалось NO_2 и до 150 $\text{мг}/\text{м}^3$ NO . После прохождения через контактный экономайзер концентрация NO_2 в газах была близка к нулю, а монооксида - снижалась до 65-70 $\text{мг}/\text{м}^3$.

Эффективность использования контактного аппарата для очистки выбросов соединений азота может быть определена:

$$\eta_{\text{оч}} = \left[\left(\frac{[\text{NO}]'}{\text{ПДК}_{\text{NO}}^{\text{мр}}} + \frac{[\text{NO}_2]'}{\text{ПДК}_{\text{NO}_2}^{\text{мр}}} \right) \left(\frac{[\text{NO}]}{\text{ПДК}_{\text{NO}}^{\text{мр}}} + \frac{[\text{NO}_2]}{\text{ПДК}_{\text{NO}_2}^{\text{мр}}} \right)^{-1} \right]. \quad (\text{II})$$

Годовой экономический ущерб, предотвращаемый в результате снижения вредных выбросов в окружающую среду источником, можно определить по укрупненным данным [10]:

$$\Delta\Pi = \gamma \cdot G \cdot f \cdot \Delta m, \quad (\text{I2})$$

где γ - константа, численное значение которой для атмосферы равно 2,4 руб/усл.т; G - безразмерный показатель относительной опасности загрязнения; f - коэффициент, учитывающий характер рассеивания загрязняющих выбросов; Δm - снижение приведенной массы выбросов в окружающую среду, усл.т.

Значения показателя β относительной опасности загрязнения атмосферного воздуха над территориями различного функционального назначения приведены ниже.

<u>Функциональное назначение</u> <u>загрязняемой</u> <u>территории</u>	<u>Значение β</u>
Курортов, санаториев, заповедников, заказников, природных зон отдыха, садовых и дачных кооперативов и товариществ, а также населенных пунктов со средней плотностью населения выше 50 чел/Га	8
Промышленных предприятий, промучзлов, включая защитные зоны, а также населенные пункты с плотностью населения ниже 50 чел/Га	4
Лесов и сельскохозяйственных угодий	0,4

Значения коэффициента f в зависимости от высоты источника загрязнения H и среднегодового значения разности температур в устье источника и в окружающей атмосфере ΔT приведены ниже.

<u>$\Delta T, ^\circ C$</u>	<u>Значение коэффициента f</u> <u>при высоте $H, м$</u>			
	<u>до 20</u>	<u>20-100</u>	<u>101-300</u>	<u>выше 300</u>
25-50	0,9 3,7	0,6 2,8	0,3 1,8	0,2 1,3
50-150	0,8 3,5	0,4 2,4	0,2 1,4	0,1 1,1
Свыше 150	0,7 3,3	0,4 2,2	0,1 1,2	0,1 0,9

П р и м е ч а н и е. При выбросе пыли после очистки: с коэффициентом улавливания свыше 90% принимается значение f , стоящее в числителе; с коэффициентом улавливания 70-90% - значения f , стоящие в знаменателе; с коэффициентом улавливания до 70% - значения f , равные 10.

Величину снижения приведенной массы выброса загрязняющего вещества в окружающую среду определяют по формуле

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad (13)$$

где m_1 и m_2 – приведенные массы выброса вещества источником загрязнения до и после ввода в действие сооружения, усл.т.

Величины приведенных масс выброса загрязняющих веществ определяют по формулам:

$$m_1 = \sum_{i=1}^n A_i M_i ; \quad (14)$$

$$m_2 = \sum_{i=1}^n A_i \bar{M}_i ,$$

где A_i – показатель относительной агрессивности сбрасываемого вещества, усл.т/т; M_i , $\bar{M}_i$ – массы сброса загрязняющего вещества до и после ввода в действие сооружения, т/год; i – количество видов загрязняющих веществ.

Значения величины A для некоторых веществ, выбрасываемых в атмосферу, приведены ниже.

Вещество	$A_{\text{усл.т/т}}$
Оксид углерода	1
Сернистый ангидрид SO_2	22
Серная кислота, ангидрид SO_3	49
Оксиды азота в пересчете (по массе) на NO_2	41,1
3-4-бенз(в)пирен	$12,6 \times 10^5$
Сажа без примесей	41,5
Пятиокись ванадия	1225

П р и м е ч а н и е. Указанные значения A соответствуют случаю выброса примесей в зонах с количеством осадков свыше 400 мм в год. В более засушливых районах эти значения следует увеличить в 1,2 раза для всех твердых аэрозолей.

На основе экспериментальных данных [3] и приведенных на стр. 70 и формул (12–14) определены величины снижения

выбросов вредных веществ для газовых котлов типа КВГМ, оснащенных теплоутилизаторами типа КТАП (табл. 12). Учитывая, что при конденсации влаги из дымовых газов образуется около 1 кг/м³ воды, а предельная растворимость около 0,11 г/л, можно полагать, что при тех же условиях для конденсационных теплоутилизаторов на базе биметаллических калориферов типа КСК результаты будут близки к данным, полученным для контактных теплоутилизаторов. Более точные данные могут быть получены экспериментальным путем.

Т а б л и ц а 12

Экологические показатели контактных
утилизаторов

Марка котло- агрегата	Масса выброса вещества, усл. т/год		Сниже- ние мас- сы вы- броса ΔM , усл. т/год	Предотвращенный го- довой эко- номический ущерб, руб.
	до установ- ки утилиза- тора M_1	после уста- новки утили- затора M_2		
КВГМ-4-150	18,15	8,2	9,95	76,4
КВГМ-6,5-150	28,4	13	15,4	118,3
КВГМ-10-150	44,8	20,6	24,2	185,9
КВГМ-20-150	89,1	41,2	47,9	367,9
КВГМ-30-150	137,4	63,1	74,3	570,6
КВГМ-50-150	236,6	108,2	128,4	986,1
КВГМ-100-150	449	181,5	267,5	2054,4

Отношение M_2/M_1 составляет в среднем 0,7, что согласно рис. 19 позволяет снизить температуру уходящих газов до 90°C без увеличения приземной концентрации.

Средняя величина относительного снижения головной массы выбросов составила 0,056 т/МВт мощности котлоагрегата, величина предотвращенного годового экономического ущерба 16,4 руб/МВт.

Анализ взаимозависимости процессов утилизации тепловой энергии и выбросов вредных веществ показывает необходимость в каждом конкретном случае обоснования применения утилизаторов как с экономической, так и экологической точки зрения.

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УТИЛИЗАТОРОВ ТЕПЛОТЫ

Максимальное количество теплоты, которое может быть утилизировано при работе теплоутилизационных установок на уходящих газах, примерно равно энтальпии уходящих газов.

Действительное количество использованной теплоты всегда меньше энтальпии газов, что объясняется преимущественно невозможностью охлаждения газов ниже температуры поступающего в теплоутилизатор нагреваемого теплоносителя и ограничением по соображениям надежности утилизационного оборудования из-за коррозионных процессов.

Коэффициент полезного действия утилизаторов может быть оценен:

$$\eta_{\text{ут}} = \frac{I' - I'' - q_{\text{п}}}{I'}, \quad (15)$$

где I' и I'' — соответственно значения энтальпии дымовых газов на входе и выходе из утилизатора, ккал/кг; $q_{\text{п}}$ — удельные потери теплоты на 1 кг сухих газов, могут быть приняты не более 1% от энтальпии отходящих газов.

Если принять, что массовая теплоемкость меняется незначительно в пределах утилизируемых температур газа, тогда

$$\eta_{\text{ут}} = \frac{0,99(t' - t'')}{t'} = 0,99\left(1 - \frac{t''}{t'}\right), \quad (16)$$

где t' , t'' — температуры газов соответственно на входе и выходе из утилизатора.

Выбор утилизационного оборудования производится по технико-экономическим расчетам с учетом целесообразности и возможности использования утилизированной теплоты.

Однако могут быть случаи, когда оптимальный по экономии теплоты вариант энергосберегающего решения осуществить невозможно по ряду причин:

оптимальная по расчетам величина утилизированной теплоты невозможна в связи с отсутствием необходимого по параметрам утилизационного оборудования в унифицированном ряду;

конструктивно невозможна установка утилизатора при оптимальном варианте;

экономически наиболее целесообразный вариант недопустим по гигиеническим или экологическим соображениям;

при эксплуатации выбранного оптимального варианта утилизатора срок службы может быть значительно сокращен за счет агрессивного воздействия сред.

Кроме того, приведенные затраты на стадии проектирования могут отличаться от фактических при осуществлении или эксплуатации установки (например, могут изменяться цены на оборудование и материалы, топливо, условия выполнения монтажных работ и др.). Поэтому при проведении технико-экономических расчетов целесообразно выявить не только оптимальные решения, но и определить интервал экономически допустимых вариантов, что позволит принять правильное с экономической точки зрения решение при несовпадении практических условий с оптимальными.

Технико-экономические расчеты для выбора теплоутилизационного оборудования проводят по минимуму приведенных затрат:

$$Э = \Delta П - E_H K, \quad (17)$$

где $Э$ — годовой экономический эффект, руб.; $\Delta П$ — годовая экономия затрат, руб.; E_H — нормативный коэффициент экономической эффективности ($E_H = 0,15$); K — дополнительные капитальные вложения, руб.;

$$П = П_{\text{э}} - П_{\text{год}}, \quad (18)$$

где $П_{\text{э}}$ — экономия топлива, руб.; $П_{\text{год}}$ — сумма дополнительных затрат на электроэнергию, амортизацию, текущий ремонт

$$\Pi_B = \Delta B \Pi_T . \quad (19)$$

где ΔB — годовая экономия топлива, $\text{м}^3/\text{т}$; Π_T — стоимость топлива, руб/ м^3 (т).

Амортизационные отчисления определяются в соответствии с нормами Госплана СССР, %: здания и сооружения — 2,6, оборудование с монтажом для котельных, работающих на малокалорийном твердом топливе, — 8,5, при сжигании высокосернистого мазута — 11,9, при работе на газе — 6,8.

Затраты на текущий ремонт принимают в размере 20% суммы амортизационных отчислений.

Окупаемость дополнительных капитальных вложений определяют по соотношению

$$T_{\text{ок}} = K / \Delta \Pi . \quad (20)$$

Экономия топлива определяют по формуле

$$B = 0,00194 Q_u / \eta_{\text{ут}} = 0,00194 Q_{\text{ут}}, \quad (21)$$

где Q_u — возможное использование теплоты уходящих газов, ГДж; $Q_{\text{ут}}$ — количество утилизированной теплоты, ГДж; $\eta_{\text{ут}}$ — КПД утилизационной установки; 0,00194 — коэффициент эквивалентного перевода (т.е. 1 ГДж эквивалентен 0,00194 т усл.т.).

Количество нагреваемой воды в утилизационной установке

$$G_B = \frac{V_T (T' - T'')}{(t_b'' - t_b') C_B} \eta_{\text{ок}}, \quad (22)$$

где V_T — расход газа, $\text{м}^3/\text{ч}$; t_b' и t_b'' — соответственно начальная и конечная температуры воды, $^{\circ}\text{C}$; C_B — теплоемкость воды, $\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$; $\eta_{\text{ок}}$ — коэффициент потерь теплоты в окружающую среду утилизационной установкой.

Количество воздуха, нагреваемого в утилизационной установке

$$G_{t_3} = \frac{V_r (J' - J'')}{(t_{t_3}'' - t_{t_3}') C_{t_3}} \tau_{ac}, \quad (23)$$

где t_{t_3}' , t_{t_3}'' — соответственно начальная и конечная температуры воздуха, °С; C_{t_3} — теплоемкость воздуха, кДж/кг·°С.

Основные затраты на установку утилизатора в год:

$$Z = K (E_H + m_d + m_{т.р.}), \quad (24)$$

где K — капитальные вложения, включающие стоимость утилизатора, стоимость монтажных работ, дополнительных строительных работ и заработной платы (при необходимости дополнительного обслуживающего персонала).

Расход электроэнергии на эксплуатацию установленного теплоутилизатора

$$Z_3 = \Delta N_3 \tau \quad \text{Ц}_3, \quad (25)$$

где ΔN_3 — дополнительная мощность на перекачку теплоносителя и преодоление аэродинамического сопротивления теплоутилизатора, кВт; τ — число часов работы утилизатора в году, ч; Ц_3 — стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч.

При проектировании утилизационное оборудование обычно выбирается исходя из экономического эффекта или разности затрат для базового и предполагаемого вариантов. За базовый вариант целесообразно принять систему без утилизации теплоты либо один из рассматриваемых вариантов утилизации.

Существенным фактором, определяющим экономичность теплоутилизаторов, является их материалоемкость.

В процессе проектирования котлоагрегатов с теплоутилизаторами определение экономической эффективности капитальных вложений и срока окупаемости может производиться исходя из замыкающих затрат на топливо. В этом случае срок окупаемости может быть значительно ниже нормативной величины.

При проведении мероприятий по энергосбережению на действующем предприятии с помощью установки утилизаторов технико-экономические расчеты основывают на стоимости по действующему прейскуранту, в котором стоимость теплоты значительно ниже замыкающих затрат. Поэтому результаты расчетов при новом строительстве и реконструкции действующих предприятий могут быть различными.

В условиях хозрасчета предприятию выгодно внедрять только те энергосберегающие мероприятия, которые обеспечат повышение рентабельности на ближайшую перспективу.

В связи с нестабильностью цен на топливо и оборудование, связанной с изменениями в экономике, целесообразно в качестве критерия эффективности применения утилизаторов использовать удельные годовые расходы электроэнергии, удельные капитальные вложения и удельную экономическую эффективность. Проведено технико-экономическое сравнение вариантов применения КТАНов и конденсационных теплообменников с биметаллическими трубками типа КСК.

Графики изменения удельных величин затрат на топку сэкономленного условного топлива в зависимости от мощности теплоисточника представлены на рис. 20. Как видно из графиков, все расчетные кривые удельных расходов электроэнергии, эксплуатационных расходов, капитальных вложений для мощностей котельных 4,65–116,3 МВт лежат ниже для конденсационных теплообменников, чем для КТАНов, только кривая удельной экономической эффективности идет выше. Из этого следует, что применение конденсационных теплообменников более эффективно для котлов малой мощности, чем установок с КТАНами. Причем надежность при эксплуатации утилизационного оборудования также будет выше вследствие отсутствия дополнительных контуров циркуляции с насосами и арматурой.

Следует иметь в виду, что все расчеты по конденсационным теплообменникам были сделаны ориентировочно, в каждом конкретном случае должны быть учтены местные условия, температура нагреваемой воды, теплотворная способность газа, КПД котла, возможности размещения оборудования за котлами и другие особенности.

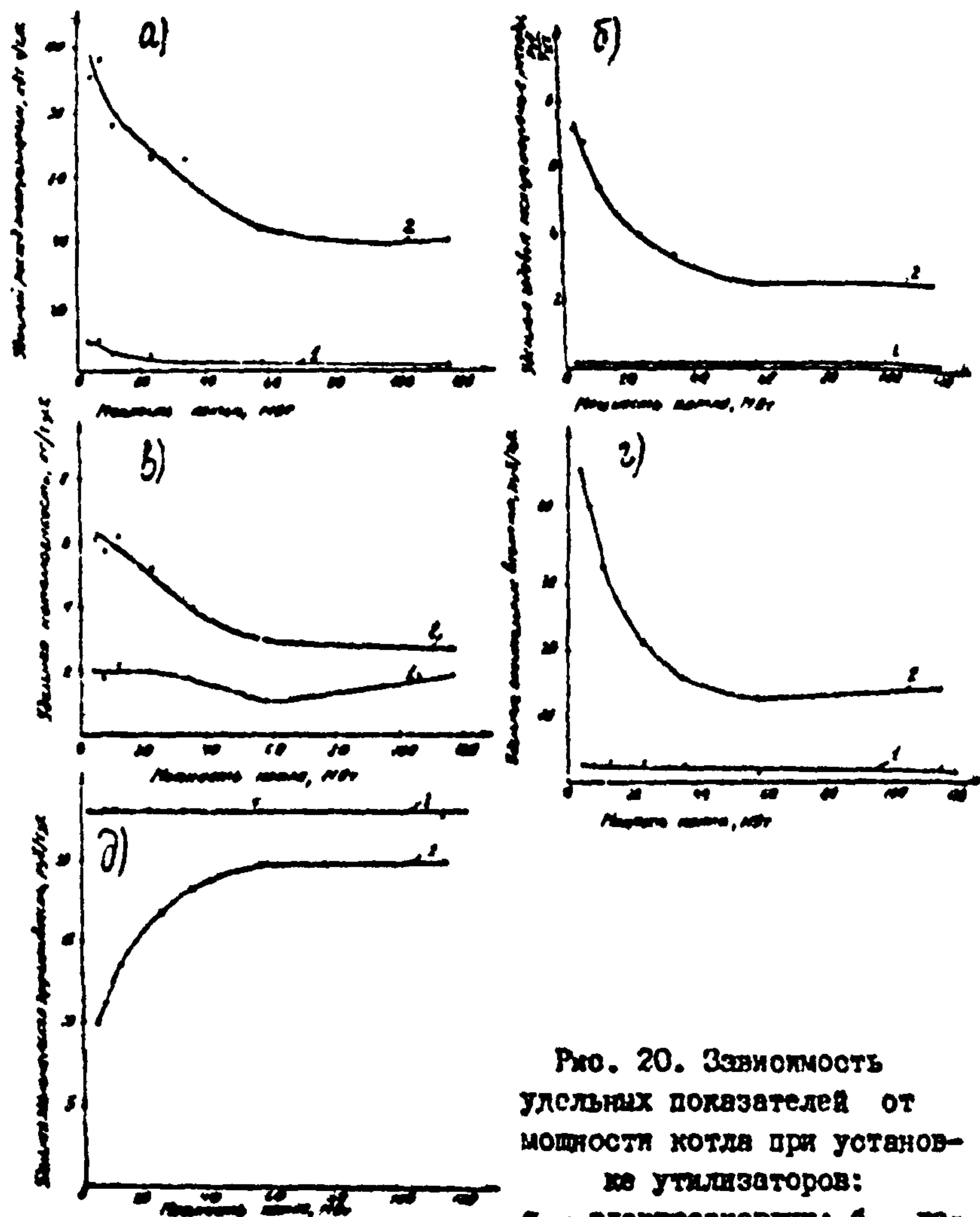


Рис. 20. Зависимость
удельных показателей от
мощности котла при установ-
ке утилизаторов:

а - электроэнергия; б - го-
довых эксплуатационных расходов; в - металлоемкости ути-
лизаторов; г - капитальных вложений в установку утилиза-
торов; д - экономической эффективности утилизаторов; 1 -
тип РСК; 2 - тип КТАН

Сопоставление различных вариантов может быть проведено по удельным показателям энерго- и материалоемкости. С учетом того, что для выработки электроэнергии и производства металла также расходуется топливо, любое снижение показателей прежде всего приведет к снижению затрат на добычу топлива и производства электроэнергии.

Опыт свидетельствует, что в условиях нормальной экономической деятельности мероприятия, проводимые на существующем оборудовании в целях рационального использования топливно-энергетических ресурсов, окупятся примерно в течение двух лет, тогда как капиталовложения в добывающую промышленность и в энергетику – за 15–17 лет. Хотя мероприятия по энергосбережению со временем становятся все дороже, тем не менее они являются более рентабельными, чем дополнительное производство теплоносителей.

Достаточно сказать, что в нашей стране единовременные затраты предприятий топливодобычи и его транспорта находятся на уровне 170–200 руб., тогда как капиталовложения в утилизацию – около 30 руб./т у.т. Приведение в соответствие цен на топливо и тепловую энергию резко повысит экономичность применения теплоутилизаторов в котельных.

Необходимым условием широкого внедрения мероприятий по утилизации тепла дымовых газов на котельных является разработка типовых схем использования утилизационной теплоты, особенно на котельных, работающих на закрытую систему теплоснабжения, разработка компактных теплоутилизаторов для всех мощностей котлов, создание предприятий по выпуску энергосберегающего оборудования, рынка этого оборудования и специализированных организаций по оказанию услуг в энергосбережении.

Во всех случаях большое значение должно придаваться экологическим факторам как при разработке нового, так и при установке существующего утилизационного оборудования. Наряду с критериями экономическими и материальными при выборе утилизационного оборудования следует руководствоваться экологическим критерием, в качестве которого может выступать

относительная величина снижения годовой массы вредных выбросов

$$\Delta \bar{M} = \Delta M / Q_K \quad (26)$$

и относительная величина годового экономического ущерба, предотвращаемого в результате снижения выброса вредных веществ в окружающую среду

$$\bar{\Pi} = \Pi / Q_K \quad (27)$$

где Q_K — количество теплоты, кВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. № 1208409, МКИ Г 22В 37/54 Г 28с 3/08. Котельная установка / Друцкий А.В., Головач К.Г., Родин Ю.Г., Митин А.И. (СССР). Заявл. 16.08.84 № 3781437/24-06. Бюл. № 4 // Открытия. Изобретения.- 1986.
2. Аронов И. З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа.- Л.: Наука, 1978.
3. Аронов И. З., Сигал А. И. Установки контактных экономайзеров с целью снижения выбросов оксидов азота с дымовыми газами // Химическая технология.- 1988.- № 1.- С. 68-70.
4. Баранов Е. П., Бухаркин Е. Н., Кушнирюк В. В. Опыт использования вторичных энергоресурсов в производственной котельной // Промышленная энергетика.- 1988.- № 1.- С. 21-22.
5. Богуславский Л. Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления и вентиляции.- М.: Стройиздат, 1985.
6. Имен Н., Царс А. и др. Использование теплоты конденсации водяных паров в мазутных отопительных котлах // Энергетика.- 1987, 38.- № 4.- С. 14-16.
7. Корняков А. Б., Цермяков А. Б. Применение воздухоподогревателей из стеклянных труб с целью экономии топлива в котельных / В сб. "Повышение эффективности теплоэнергетических установок".- Калинин, 1987.
8. Методические рекомендации по проектированию контактно-экономайзерных установок в газифицированных котельных.- Киев: ГИИСТ, 1985.
9. Печев П., Друкнов И., Милачков Л. Утилизация на отпадаа топлина от хлебопекарни печи через теплообменник с топливни тръби // Энергетика.- 1987, 38.- № 4.- С. 24-25.
10. Пособие по составлению раздела проекта (рабочего проекта "Охрана окружающей природной среды" к СНиП 1.02.01-85). М.: ЦНИИпроект, 1988.

11. Строительный каталог СК-8. Инженерное оборудование зданий и сооружений. - М., 1990.

12. Строительство и архитектура: Экспресс-информация. Вып. 6. - Сер. 3. Инженерное обеспечение объектов строительства. Зарубежный опыт. - М., 1982.

13. Теплообменники контактные с активной засадкой (КТМ) для котлов теплопроизводительностью 0,2-116 МВт, работающих на природном газе: Каталог. - Рига, 1987.

14. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: Справочное пособие. Под ред. Л.Д. Горуславского и В.И. Ливчака. - М.: Стройиздат, 1990. - 624 с.

15. Erfahrungen bei der Abwärmenutzung mit KRC-Strahlen. H.P. Ziegler, Butzbach. Brennstoff - Wärme - Kraft 1983, 40. - N 3 - P. 334-335

16. CALCOND reduziert die Heizkosten und entlastet die Umwelt. Rüdiger K. Int-Angrüst-Mag. 1980. N 5, 6, 62.

17. Rauchgasreinigung und Wärmerückgewinnung an 3,2 t/h - Kesselanlagen. Becker GfH/Energietechnik - 1983, 38 - N 1 - P. 28-29.

18. Rauchgaswertschöpfung und Abwärmenutzung in landwirtschaftlichen Betriebsanlagen // Energietechnik. - 1981, 36. - N 2. - P. 51-55.

19. Vario-Brennwertkessel für ein Jahr zum Umweltschutz. Langmayer M. // Energie und Umwelt Feuersteintechnik. - 1985, 26. - N 2 - P. 54-55

20. Überverwärmte Verbrennungsprodukte von Land bei Zijn Lokers. J. Verwarming en Verlies. - 1986. - N 3. - P. 631-643