

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Валерий Канталинский, Елена Патракеева

**О способах утилизации тепла на эксплуатационных
режимах судовых и стационарных энергетических
установок**

Ключевые слова: судовые энергетические установки, энергетические установки производственных предприятий, утилизация тепла, экономайзер, конденсационный теплообменник

Приведены результаты расчетного исследования эффективности утилизации тепла уходящих газов энергетических котлов тепловой электрической станции производственного предприятия. Предложены рациональные схемы применения теплоиспользующих поверхностей в газовом тракте котла. Показана принципиальная возможность применения низкотемпературных экономайзеров и конденсационных теплообменников в утилизационных трактах судовых энергетических установок.

**Heat Utilization Methods for the Operation of Marine
and Industrial Power Plants**

Key words: marine power plants, industrial power plants, heat utilization, saved heat exchanger, condensation exchanger

The article discusses the results of using waste gas heat from heat power plant boilers. The authors suggest working out rational schemes adaptation for heat-surfaces staying in boiler's air-gas path. There is showed principle possibility of condensation and low-temperature save heat exchangers use on ship power plants.

Введение

Судовые энергетические установки (СЭУ) и стационарные энергетические установки, например тепловые электрические станции (ТЭС), объединяет важное функциональное качество – возможность производства различных видов энергии (электрической и тепловой) в широком диапазоне эксплуатационных режимов.

Такая особенность в значительной мере характерна для ТЭС производственного предприятия с одной стороны, а с другой – для СЭУ транспортных рефрижераторов и рыбообрабатывающих судов, которые по своему назначению являются производственными предприятиями.

Опыт эксплуатации СЭУ разных структурных схем и многочисленные наблюдения за режимными картами энергетических котлов ТЭС производственных предприятий показывают, что возможности утилизации тепла энергетических установок на различных эксплуатационных режимах еще далеко не исчерпаны [3, 4]. В этом смысле технологический опыт, используемый на ТЭС, мог бы быть применен в СЭУ и наоборот.

Объектами конструктивного и технологического совершенствования могут быть газовый и утилизационный тракт главных двигателей и вспомогательных дизельгенераторов СЭУ и газоздушный тракт энергетических котлов ТЭС.

Рассмотрим возможности использования тепла на примере ТЭС производственного, в частности, целлюлозно-бумажного предприятия.

Анализ

Известно, что на эксплуатационных режимах потери тепла с уходящими газами высоки. Особенно это имеет место на станциях производственных предприятий, использующих разные виды топлива и работающих в широком диапазоне нагрузочных режимов.

Многочисленные наблюдения за режимными картами энергетических котлов К-50-40 показывают, что температура уходящих газов близка к 170°C, что, безусловно, не может не вызывать беспокойство работников станции.

Анализ газоздушного тракта котла показывает возможность размещения в нем (за последней „хвостовой” поверхностью по ходу газов) дополнительной теплоиспользующей поверхности.

С другой стороны, для станции проблематичным является некачественное и недостаточное водообеспечение котлов питательной водой.

На химводоподготовку вода подается недостаточно подогретой, а необходимое количество этой воды по эксплуатационным данным оценивается величиной 120 т/ч.

Указанные параметры по уходящим газам котлов, а также по нагреву и количеству питательной воды послужили исходными данными для расчетных изысканий рациональных способов утилизации тепла.

Один из возможных способов – утилизация теплоты уходящих газов в низкотемпературном экономайзере (НЭКО). В котлоагрегатах К-50-40 после хвостовых поверхностей имеется место для НЭКО пропускной способностью 90 т/ч. Нагрев воды в количестве 120 т/ч осуществляется смешиванием нагретой воды с исходной водой. Чтобы не допустить выпадение конденсата на трубках экономайзера, воду, поступающую в НЭКО необходимо нагреть до 60°C. Нагрев воды возможен по схеме с системой рециркуляции, либо по комбинированной схеме с применением воздухо-водяного теплообменника (ВВТО).

Нагрев воды в низкотемпературном экономайзере с рециркуляцией

Исходная вода имеет температуру 40°C. Для предотвращения выпадения агрессивного конденсата водяных паров из уходящих газов, вода на входе в утилизатор должна иметь температуру не ниже 60°C. Нагрев воды до температуры 60°C обеспечивается рециркуляцией воды (рис. 1), нагретой в экономайзере до температуры 75°C (более высокий нагрев может приводить к выпадению солей на внутренней поверхности труб).

Утилизатор устанавливается в газоходе прямоугольного сечения (1263 × 5660 мм) и выполняется из типовых углеродистых труб 32 × 3 мм, Ст.20; расположение труб – горизонтальное, трубы имеют наружное оребрение с параметрами $H \times \delta \times S = 10 \times 1 \times 4,5$ мм при шагах труб $S_1 \times S_2 = 67 \times 60$ мм с шахматной компоновкой. Расчетная поверхность нагрева утилизатора составляет 554 м².

Максимальная пропускная способность низкотемпературного экономайзера составляет $G = 85$ т/ч (23,6 кг/с). Это количество воды получается за счет рециркуляции горячей воды на всасывание насоса в количестве, которое определяется из уравнения смешения:

$$D_p \cdot t_{\text{вых}} + (G - D_p) \cdot t_{\text{хл}} = G \cdot t_{\text{вх}} \Rightarrow D_p = 48,6 \text{ т/ч.}$$

Тепловосприятие низкотемпературного экономайзера составляет:

$$Q = G \cdot c_B (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = 23,6 \cdot 4,19 \cdot (75 - 60) = 1488 \text{ кВт.}$$

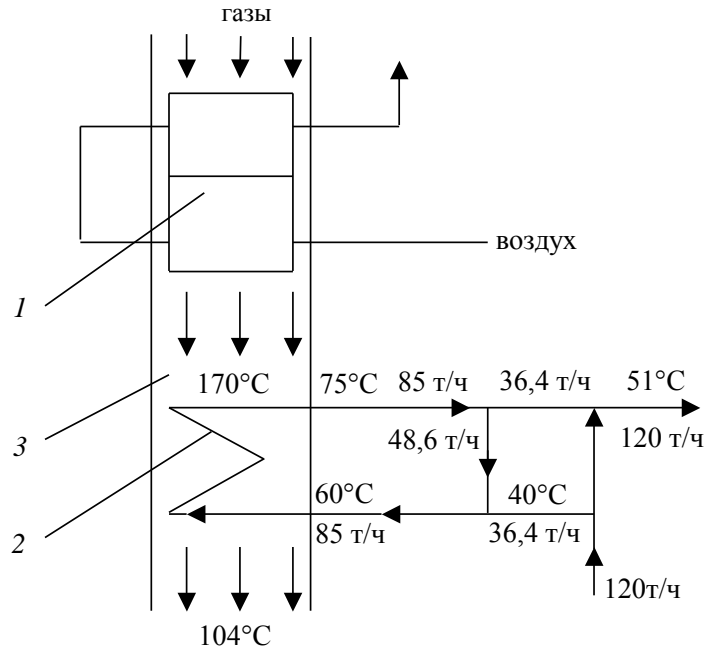


Рис. 1. Схема движения теплоносителя в низкотемпературном экономайзере с системой рециркуляции: 1 – воздухоподогреватель, 2 – низкотемпературный экономайзер, 3 – газоход котла

Fig. 1. The heat-transport medium motion in low-temperature saved heat exchanger with recycling water system

Мимо утилизатора пойдет холодная вода $t'_B = 40^\circ\text{C}$ с расходом:

$$D_M = 120 - 36,4 = 83,4 \text{ т/ч,}$$

а из утилизатора после рециркуляции выйдет вода с температурой 75° в количестве:

$$D_y - D_p = 85 - 48,6 = 36,4 \text{ т/ч,}$$

и в результате смешения станция получит 120 т/ч воды с температурой:

$$t''_B = \frac{36,4 \cdot 75 + 83,6 \cdot 40}{120} = 51^\circ\text{C.}$$

Энтальпия на входе в экономайзер (по Iy-диаграмме) – 3010 кДж/кг.

Энтальпия на выходе из экономайзера:

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{вх}} - \frac{Q}{\phi \cdot B_p} = 3010 - \frac{1488}{0,99 \cdot 1,34} = 1887 \text{ кДж/кг.}$$

Температура газов на выходе из экономайзера (по I_υ-диаграмме) – 104°C. Как показывают расчеты, сэкономленное тепло эквивалентно около 4% от расхода природного газа на котел.

Нагрев воды в комбинированной установке

Эта установка включает в себя низкотемпературный экономайзер и воздухо-водяной теплообменник. В низкотемпературном экономайзере вода нагревается от 60°C до 75°C. Нагрев воды от 40°C до 60°C осуществляется в воздухо-водяном теплообменнике, который должен быть установлен в удобном месте воздуховода горячего воздуха (рис. 2). Целесообразно охлаждать горячий воздух от 280°C до 100°C. Количество тепла необходимое для подогрева воды от 40°C до 60°C в количестве 85 т/ч (23,6 кг/с) составляет:

$$Q_B = G_B \cdot c_B \cdot (t'' - t') = 23,6 \cdot 4,19 \cdot (60 - 40) = 1959 \text{ кВт.}$$

Определим расход дутьевого воздуха:

$$V = \frac{Q_B}{c_B \cdot (t_B'' - t_B') \cdot \eta} = \frac{1959}{1,33 \cdot (280 - 100)} = 8,2 \text{ м}^3/\text{с} \text{ (2970 м}^3/\text{ч)}.$$

Соответственно, 35 т/ч воды останется не нагретой, и при смешении станция получит 120 т/ч нагретой воды при температуре:

$$t_B'' = \frac{85 \cdot 75 + 35 \cdot 40}{120} = 65^\circ\text{C}.$$

Нагрев 120 т/ч воды до температуры 65°C осуществляется частично утилизированным теплом и частично – теплом дополнительно сжигаемого топлива.

Утилизация тепла при таком способе эквивалентна экономии топлива $\Delta B \cong 4\%$, а отбор тепла от воздуха требует увеличения расхода топлива на $\sim 5,2\%$, но последнее обстоятельство сопровождается положительным эффектом – уменьшением выбросов оксидов примерно на 20% за счет уменьшения температуры воздуха до 100°.

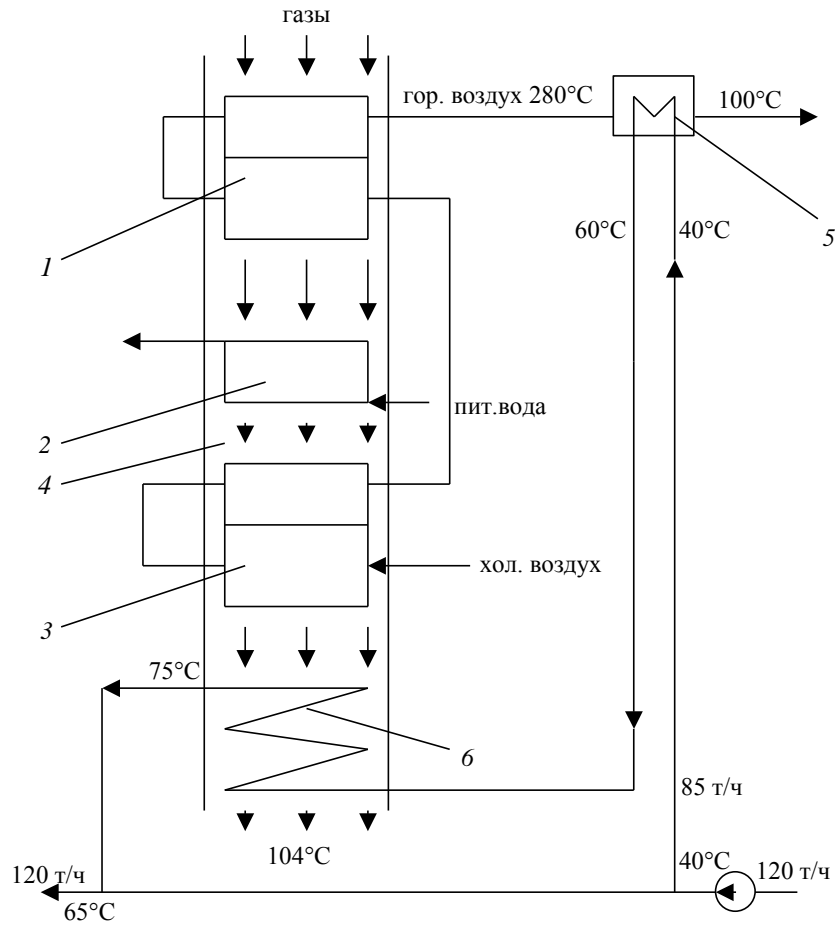


Рис. 2. Схема движения теплоносителя в комбинированной установке: 1 – воздухоподогреватель 2-ой ступени, 2 – экономайзер питательной воды, 3 – воздухоподогреватель 1-ой ступени, 4 – газход котла, 5 – воздуховодяной теплообменник, 6 – НЭКО

Fig. 2. The heat-transport medium flow in a combined unit

Ступенчатый подогрев воды в ВВТО, а затем в газовом утилизационном тракте сопряжен с усложнением схемы и установки в целом. Однако применение такого способа открывает возможности для маневрирования утилизационным котлом на эксплуатационных режимах тепловой станции и СЭУ. Пробные испытания такой схемы на тепловой станции производственного предприятия показали возможности регулирования температуры подогреваемой воды в широких пределах.

Утилизация теплоты уходящих газов в контактном экономайзере

Эффективным средством снижения тепловых потерь с уходящими газами для котлов, работающих на газе, является установка за котлом или за хвостовыми поверхностями нагрева контактных водяных экономайзеров, предназначенных для подогрева воды на производственные нужды.

В контактном экономайзере наибольшая доля тепла от уходящих газов к воде передается не через металлические стенки, как в поверхностном экономайзере, а при непосредственном контакте нагреваемой воды с уходящими газами. При этом газы могут быть охлаждены до температуры 30–35°C, т.е. ниже точки росы, а теплота конденсации водяных паров может быть использована для нагрева воды. Температура воды в контактном экономайзере, устанавливаемом после "хвостовых" поверхностей нагрева, составляет 55–65°C, при температуре газов на входе в контактный экономайзер – 120–180°C.

Установка контактного экономайзера особенно целесообразна с увеличением количества подогреваемой воды и со снижением ее температуры, так как при этом снижаются температура и влагосодержание уходящих газов. В реальных условиях снижение температуры газов при смешивании с водой может быть ограничено до 75–80°C, как показывают эксперименты на котлах низкого давления, эффективность подогрева воды при этом вполне достаточна.

Практика показывает, что при температуре уходящих газов на входе в экономайзер $t = 100\text{--}300^\circ\text{C}$ и температуре исходной воды 15–20°C экономия топлива может составить 10 – 20% [2].

Наибольшее применение в качестве контактных экономайзеров нашли аппараты с орошаемой насадкой. Наиболее распространенными элементами насадки являются кольца Рашига (рис. 3). Распределение воды обычно происходит с помощью перфорированных труб. Вода после контактного экономайзера может поступать в систему ХВО и деаэрактор котельной.

При удовлетворительном сгорании природного газа состав нагретой в контактном экономайзере воды практически не меняется, за исключением увеличения содержания углекислого газа, и как следствие этого, значительного понижения концентрации водородных ионов рН, что может повысить коррозионную активность воды.

Одновременно с этим в воде уменьшается содержание свободного кислорода и взвешенных частиц, что является благоприятным фактором. При схеме водоподготовки, включающей известкование, содержание

углекислого газа может быть доведено до нуля, а вода, нагретая в контактных экономайзерах, может быть использована для питания котлов низкого давления. Контактные экономайзеры в целом увеличивают коэффициент использования тепла топлива на 10 – 20%, что является их основным достоинством [1].

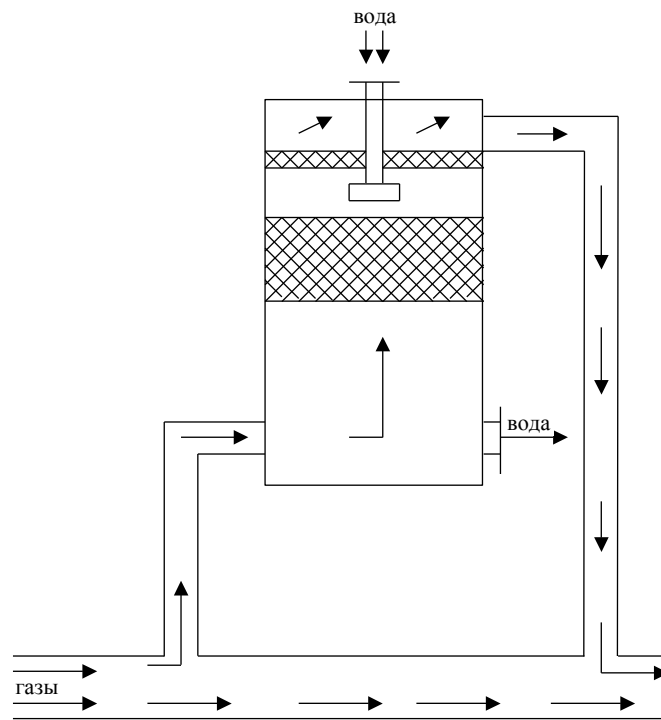


Рис. 3. Схема движения газов в тракте с контактным экономайзером
Fig. 3. Waste gas flow in the path including a contact saved heat exchanger

Утилизация теплоты уходящих газов в конденсационных теплообменниках

Коррозионные и химически стойкие конденсационные теплообменники (ТОК) широко используют в промышленной энергетике для утилизации тепла уходящих газов и скрытой теплоты конденсации, обеспечивая тем самым высокий КПД станции. Полученная энергия используется для подогрева питательной воды или конденсата перед регенеративным подогревателем первой ступени, а также она может использоваться для подогрева

сырой воды перед ХВО. В результате эффективность цикла значительно улучшается, снижается расход топлива или увеличивается производство пара (при использовании ТОК для подогрева питательной воды для питания котлов).

Следует отметить, что ТОК используется не только для утилизации тепла уходящих газов, но и для повышения эффективности улавливания микроэлементов, таких как SO_2 и SO_3 и хлористого водорода. Последнее обстоятельство весьма важно для судовых энергетических установок, использующих нефтяные топлива, содержащие сернистые соединения. Данная установка является автономной системой, способной одновременно снижать удельный расход топлива и очищать уходящие газы.

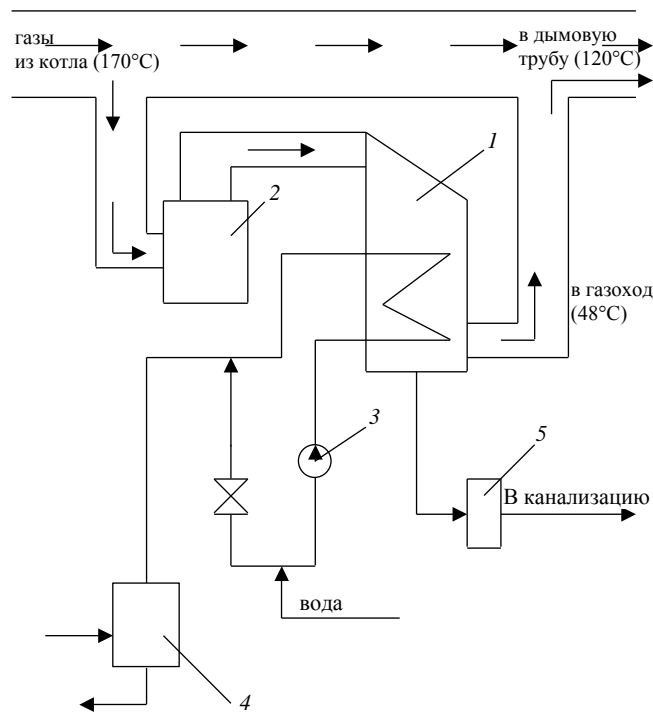


Рис. 4. Схема движения газов в тракте с конденсационным теплообменником:
1 – конденсационный теплообменник, 2 – рециркуляционный дымоход, 3 – водяной насос,
4 – деаэрактор, 5 – нейтрализатор воды

Fig. 4. Waste gas flow in the path including a condensation exchanger

Система состоит из трубчатого теплообменника, размещенного в корпусе, дымохода, трубопроводов, шиберов и устройств управления (рис. 4). Дымовые газы проходят через ТОК сверху вниз, отдавая свое тепло

добавочной воде, движущейся им навстречу по трубкам с тефлоновым покрытием. Когда температура газов опустится ниже точки росы паров воды и других газов, захваченных потоком, по трубам начинает стекать конденсат и выделяется скрытая теплота конденсации. Образовавшаяся жидкость собирается в конденсатосборнике для последующей перекачки на обработку [5].

В зарубежной практике применение конденсационных теплообменников на ТЭС не редкость. Известны случаи более глубокого охлаждения газов в утилизационных трактах (до температуры около 80 – 90°C).

Средства регулирования позволяют осуществить перепуски газов в широком диапазоне расхода газов.

Возможность установки ТОК на ТЭС основывается на следующих критериях:

- высокая температура уходящих газов при работе на природном газе;
- коэффициент использования аппарата;
- экологические соображения.

Результаты теплового расчета ТОК

Исходные данные:

1) Расход воды через ТОК	$G = 33,3$ кг/с
2) Температура воды на входе	$t_{вх} = 40^\circ\text{C}$
3) Температура газов на входе в ТОК	$\nu_{вх} = 170^\circ\text{C}$
4) Температура газов на выходе из ТОК	$\nu_{вых} = 48^\circ\text{C}$
5) Расход топлива	$B_p = 1,34$ м ³ /с
6) Скрытая теплота конденсации	$r = 2500$ кДж/м ³

Энтальпия воды на входе (определяется как функция от температуры)

$$I' = 167,6 \text{ кДж/кг}$$

Энтальпия газов на входе в ТОК определяется по $I\nu$ -диаграмме

$$I_{вх} = 3010 \text{ кДж/м}^3$$

Энтальпия газов на выходе из ТОК

$$I_{вых} = 758 \text{ кДж/м}^3$$

Тепловосприятие ТОК:

$$Q_{\text{ТОК}} = B_p \cdot (I_{вх} + r - I_{вых}) = 1,34 \cdot (3010 + 2500 - 758) = 6368 \text{ кВт}$$

Энтальпия воды на выходе из ТОК:

$$I'' = I' + Q_{\text{ТОК}}/G = 167,6 + 6368/33,3 = 359 \text{ кДж/кг.}$$

Температура воды на выходе из ТОК $t_{\text{вых}} = 85^\circ\text{C}$.

Преимущества от использования ТОК:

- возможность сжигания менее дорогих высокосернистых топлив;
- значительное снижение выбросов сернистых и токсичных соединений;
- возможности использования существующих дымовых труб для газов с высоким содержанием влаги без облицовки их стволов;
- устранение видимого выброса кислотных аэрозолей и полного отсутствия видимого дыма (кроме зимних месяцев).

Можно ожидать, что со временем рассмотренная технология найдет применение в отечественной практике.

Заключение

Сравнение опыта эксплуатации судовых энергетических установок и энергетических установок ТЭС, а также результаты расчетных исследований способов утилизации тепла на ТЭС позволяют предположить, что некоторые способы, в частности, применение низкотемпературных экономайзеров и конденсационных теплообменников, могут быть эффективно применены в СЭУ.

Литература

1. Андреев Е.И. *Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах*. Л.: Энергоатомиздат, 1985, 191 с.
2. Волковыский Е.Г., Шустер А.Г. *Экономия топлива в котельных установках*. М.: Энергия, 1973, 304 с.
3. Канталинский В.П., Патракеева Е.А. *Исследование способов утилизации тепла на производственном предприятии. Повышение эффективности работы энергетических установок* // Международный сборник научных трудов, Калининград, 2002, с. 18 – 25.
4. Коршунов Л.П. *Структурные схемы энергетических установок промысловых судов*. Калининград: Кн. Изд-во, 1995, 199 с.
5. Стивен Коллинз // *Мировая электроэнергетика*, 1994, № 4, с. 15 – 18.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Stefan Żmudzki
dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. AM

Adres Autorów

doc. Valerii Kantalinskii
inżynier aspirant Elena Patrakeeva
Kaliningradskij Gosudarstvennyj Tehničeskij Universitet
Kaliningrad, Sovetskij Prospekt, 1 KGTU