

УДК 662.99:536.7

Редько А.А., Павловский С.В., Загребельный И.Н., Компан А.И., Пивненко Ю.А.

**УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ
С ОРГАНИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**

Введение. В настоящее время экономия топливно-энергетических ресурсов становится одной из важнейших задач повышения энергоэффективности промышленных и отопительных котельных городских систем теплоснабжения, топливоиспользующих агрегатов и промышленных печей. Одним из методов повышения их эффективности является преобразование теплоты уходящих газов в когенерационной установке для производства электроэнергии и использование ее для собственных нужд.

Использование энергетических установок с низкотемпературным циклом Ренкина (The Organic Rankine Cycle – ORC) обеспечивает глубокое охлаждение продуктов сгорания и конденсацию водяных паров. В низкотемпературных ORC различного назначения (геотермальные, когенерационные и утилизационные и др.) используются различные рабочие вещества – органические вещества и озонобезопасные хладоны, потому что выбор рабочего вещества цикла (с учетом эффективности теплообменного оборудования, КПД турбины и насоса) во многом определяет эффективность утилизационной установки в целом.

Применение находят новые озонобезопасные вещества, фреоны не содержащие хлор и бром. Предпочтение отдается природным хладагентам (углекислота (R744), аммиак (R717), углеводы – изобутан (R600a), пропан (R290), пентан (R601) и их смеси). Эффективными в холодильных машинах являются смеси углеводородов с аммиаком и диоксидом углерода.

Цель работы – повышение эффективности утилизационных энергетических установок с органическим теплоносителем.

Постановка проблемы и основные результаты. В производственных и отопительных котельных используются котлы типа ПТВМ, ДКВр, ПТВМ, КВ-ГМ и др. При охлаждении продуктов сгорания от 200 °С до 100 °С и коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,15-1,20$ можно утилизировать значительное количество теплоты (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Тип котла	Расход воздуха Мв, кг/ч	Расход продуктов сгорания Мпр.с, кг/ч	Количество теплоты продуктов сгорания Q, Гкал/кг
КВ-ГМ-10	14 641	175 692	0,45
КВ-НМ-20	29 282	351 384	0,90
ПТВМ-30	43 922	527 064	1,35
КВ-ГМ-50	73 204	878 448	2,25
КВ-ГМ-100	146 408	1 756 896	5,50

В зависимости от теплопроизводительности котла имеется возможность утилизировать от 0,5 до 5 Гкал/час теплоты продуктов сгорания, что составляет 5–6 % мощности котла и тем самым повысить КПД котла.

Экономия топлива (природного газа) составляет 3–3,5 %, что подтверждает целесообразность использования теплоты продуктов сгорания.

В работах [1,2] установлено, что одним из параметров влияющих на величину вырабатываемой мощности является перепад температуры между продуктами сгорания и рабочим теплоносителем в силовом контуре (Δt недорекуперации). При значении $\Delta t = 3;5;10$ °С вырабатываемая мощность существенно снижается (до 25–30 %). Поэтому разработка высокоэффективного теплообменного оборудования системы утилизации теплоты является актуальной проблемой, что требуют применения более совершенных методов анализа и расчета, более эффективных методов оптимизации конструктивных и режимных параметров.

В настоящее время разработаны и исследованы различные типы теплообменников – теплоутилизаторов: контактные аппараты, регенеративные и рекуперативные теплообменники с промежуточным теплоносителем. Каждый тип теплообменников характеризуется определенными преимуществами и недостатками.

ками и в каждом конкретном случае требуется технико-экономическое обоснование, выбор оптимальных конструктивных и режимных параметров[3,4].

Перспективным направлением является создание высокоэффективных систем на тепловых трубах [5,8], в частности с органическим теплоносителем. В настоящее время появились новые экологически чистые органические теплоносители, обеспечивающие высокую термодинамическую эффективность энергетических установок. Однако, теплообменники на тепловых трубах с этими теплоносителями исследованы недостаточно. Задача усложняется процессами конденсации влаги из продуктов сгорания топливоиспользующего агрегата.

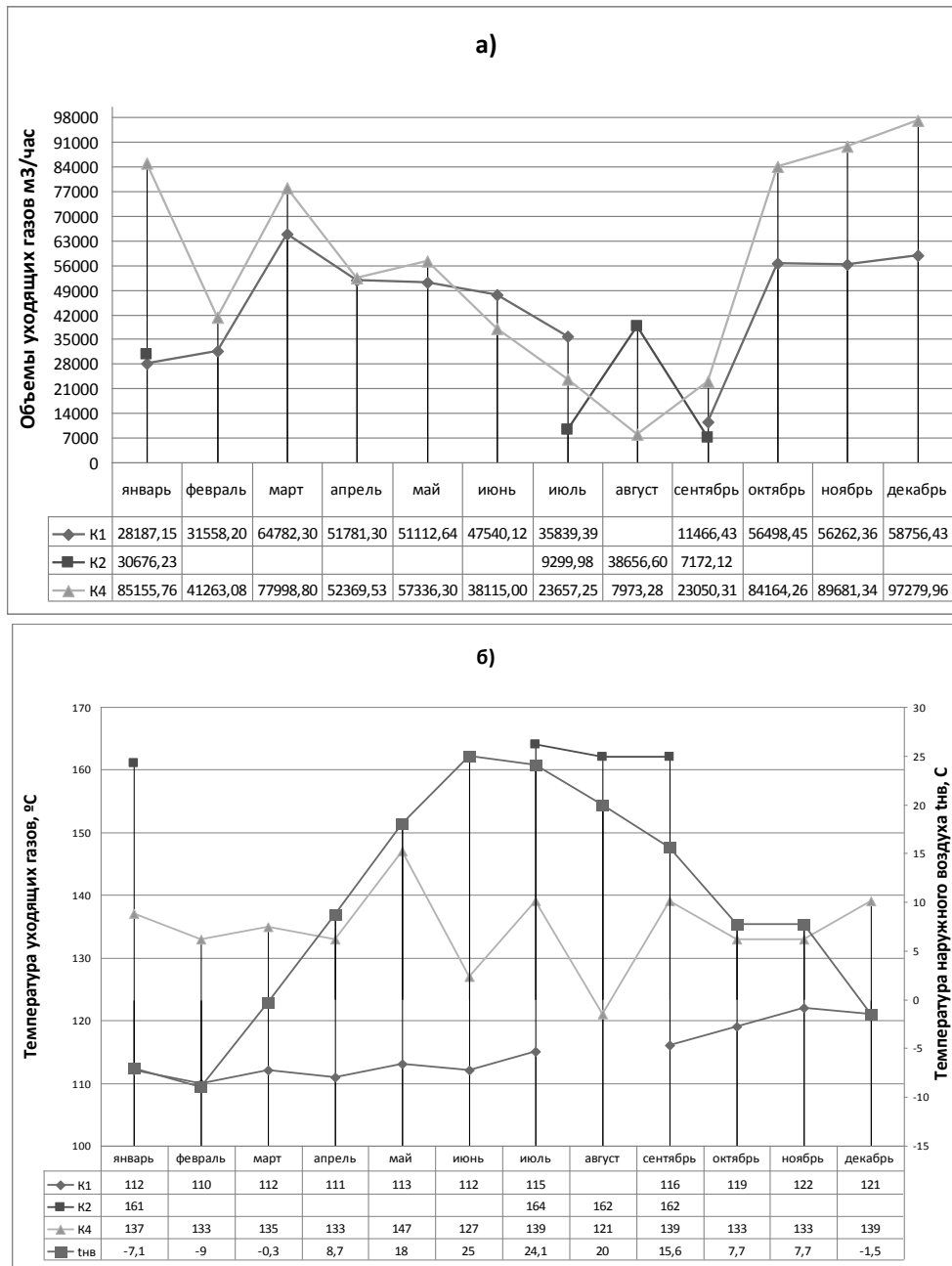


Рисунок 1 – Значение объемов и температуры уходящих газов котлов «МАНН-ТЭМ»: а) объемы уходящих газов; б) температуры уходящих газов (K1,K2,K4 – котлы «МАНН-ТЭМ», $t_{н.в.}$ – значение атмосферного воздуха)

Повышение эффективности утилизации теплоты достигается также путем исследовательской установки двухступенчатой компоновки аппаратов. В промышленности применяют комбинированные утили-

заторы [4], состоящие из аппарата, в котором нагревают воздух, подаваемый в сушильную камеру и аппараты в котором нагревают воду для технологических нужд. В [4] приведено также описание утилизатора с тремя ступенями рекуперации теплоты (первая для подогрева воздуха, подаваемого в сушильную камеру; вторая – подогрева наружного воздуха для системы вентиляции; третья – для подогрева воды технологических нужд).

В [8] приводится конструкция утилизатора на тепловых трубах и предвключенным водяным вихревым промывателем, что обеспечивает очистку продуктов сгорания.

В настоящей работе приводится описание двухсекционного теплоутилизатора на тепловых трубах (рис. 2)

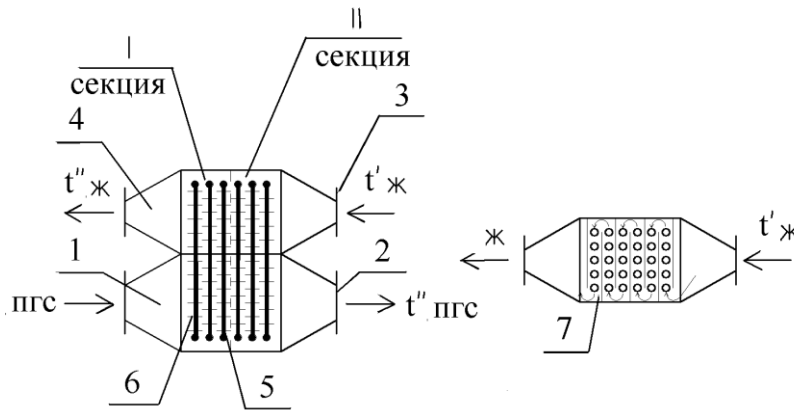


Рисунок 2 – Схема двухсекционного теплоутилизатора на тепловых трубах (1,2 – патрубки входа и выхода продуктов сгорания, 3,4 – патрубки входа и выхода нагреваемой жидкости; 5 – тепловая труба, 6 – оребрение; 7 – разделительные пластины)

Как показано на схеме нагреваемая жидкость движется зигзагообразно по рядам труб, а продукты сгорания – противоточно. Продукты сгорания охлаждаются от 150 °С до 55–60 °С. В I^{оii} секции трубы имеют оребрение, во II^{оii} – тепловые трубы выполнены гладкими. Результаты численных исследований и оптимизации конструктивных и технологических параметров теплоутилизатора – испарителя на тепловых трубах позволили определить тепловую мощность аппарата, количество тепловых труб с органическим теплоносителем (R600a и смесей) и аэродинамическое сопротивление (в канале для продуктов сгорания). Мощность теплоутилизатора 500 кВт. Аэродинамическое сопротивление аппарата – около 300–400 Па. Температурный коэффициент эффективности изменяется от 0,65 до 0,70.

В результате исследования и оптимизации циклов со многими рабочими веществами как в докритическом, так и в сверхкритическом цикле в одноступенчатой энергетической установке было установлено, что максимальная выработка электроэнергии обеспечивается в сверхкритическом цикле при использовании в качестве смесей углеводородов (R600a-iC₄P₁₀, R161, R141в и др.). Вырабатываемая полезная мощность в сверхкритическом цикле увеличивается в 2,5–2,8 раза по сравнению с докритическим.

Более эффективным является каскадные циклы. В табл. 2 приведены результаты расчета утилизационной установки с каскадным циклом и различными рабочими веществами.

Таблица 2

№ п/п	Рабочее вещество	t _{3,6} , °С	t _{4,7} , °С	P _{3,6} , кПа	P _{4,7} , кПа	W, кВт/(кг/с)	$\frac{COP}{\eta_y}$
1	верхний каскад установки						
	iC ₄ H ₁₀ /R161	197	108	6000	531	1657	-
	нижний каскад установки						
	R143a	105	53	4500	1547	403	0,18
2	верхний каскад установки						
	iC ₄ H ₁₀ /R161	197	106	6000	489	1714	-
	нижний каскад установки						
	R13в	103	48	4600	1610	240	0,17

Выводы. Результаты численного исследования показывают возможность применения теплоутилизационных энергетических установок с органическим теплоносителем для выработки электроэнергии.

Литература

1. Редько А.А. Методы повышения эффективности систем геотермального теплоснабжения. – Макевка: ДонНАСА, 2010. – 302 с.
2. Редько А.А., Павловский С.В. Усовершенствованная тепловая схема котельной установки с когенерацией электроэнергии. – Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2011. – №11. – С. 22–28.
3. Богословский В.Н., Поз М.Я. Теплофизика аппаратов утилизации теплоты систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. – Стройиздат, М., 1986. – 320 с.
4. Сотников А.Г. Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции, т. II, ч. I. – С-Петербург, 2006. – 416 с.
5. Безродный М.К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах: теория и практика, 2-е изд. / М.К. Безродный, И.Л. Пиоро, Т.О. Костюк. – К.: изд-во «Факт», 2005. – 704 с.
6. Коба А.А., Притула В.В. Экспериментальное изучение режимов работы петлевого двухфазного термосифона. – тр. II Всероссийской научно-технической конференции., ч. I. – Махачкала, 2011. – С. 142–147.
7. Ферт А.Р., Чеховская Н.И., Гребенюк А.В., Бараз Е.Я. Экспериментальные исследования термосифонного утилизатора на базе теплообменников «Зигзаг» // Водоснабжение и санитарная техника, 1987. – №4. – С. 20–21.
8. Овчаренко С.В. Экспериментальные исследования КПД генераторов тепловой энергии / С.В. Овчаренко // Науковий вісник будівництва: зб. наук. пр. – Харків.: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2009. – №56. – С. 325–332.

УДК 662.99:536.7

Редько А.О., Павловський С.В., Загребельний І.М., Компан А.І., Півненко Ю.О.

УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОТИ В ЕНЕРГЕТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ З ОРГАНІЧНИМ ТЕПЛОНОСІЄМ

Наведені результати чисельного дослідження термодинамічної ефективності циклів енергетичних установок з органічним теплоносителем, теплотехнічні характеристики теплоутилізатора на теплових трубах.

Redko A.A., Pavlovskiy S.V., Zagrebelniy I.N., Kompan A.I., Pivnenko Y.A.

HEAT RECOVERY IN POWER PLANTS WITH ORGANIC COOLANT

Results of numerical studies of the thermodynamic cycle efficiency of power plants with an organic coolant heat exchanger on the thermal performance of heat pipes.