

УДК 621.577.536

М. Н. Чепурной, к. т. н.; доц., Н. В. Резидент, к. т. н.**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ ОТХОДЯЩИХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВКАХ**

Проанализирована энергетическая эффективность применения теплоты отходящих газов от энергетических котлов в теплонасосных установках.

Ключевые слова: *испаритель, компрессор, конденсатор, котел, контактный утилизатор теплоты.*

Введение

Одним из эффективных средств экономии топлива и защиты окружающей среды является использование низкотемпературных вторичных источников энергии. В развитых странах много внимания уделяют созданию и внедрению теплонасосных установок (ТНУ), предназначенных для отопления, горячего водоснабжения, сушки и пр. Как отмечено в [1], положительный опыт зарубежных стран по применению ТНУ в системах отопления и горячего водоснабжения не срабатывает в природно-климатических условиях Украины. Современное состояние, перспективы и проблемы использования теплонасосных технологий для систем теплоснабжения изложены в [2]. Внедрение ТНУ в системах теплоснабжения зависит прежде всего от наличия источников низкотемпературной теплоты. Для природно-климатических условий Украины использование низкотемпературных источников теплоты в виде атмосферного воздуха и поверхностных вод водоемов довольно ограничено и возможно отчасти лишь в южных регионах. В других регионах Украины низкотемпературными источниками теплоты могут быть сточные воды, почва и грунтовые воды [1, 2]. Расход сточных вод ограничен и требует их очистки. По опыту [1], затраты на создание грунтовых теплообменников составляют до 70% суммарных капиталовложений в теплонасосные системы. В этих условиях актуальным является поиск других источников низкотемпературной теплоты.

Во многих городах Украины работают многочисленные котельные с котлами небольшой мощности, построенные в 60 – 80 годах прошлого века. Такие котельные работают на природном газе, не имеют развитых хвостовых поверхностей и характеризуются относительно высокой для наших условий температурой отходящих газов ($t_{ог} \geq 130$ °С). В продуктах сгорания природного газа (дымовых газах) содержится повышенная концентрация водяного пара, на образование которого потрачена определенная часть теплоты сгорания топлива. Используя контактные утилизаторы (КУ), температуру газов за ними $t_{ку}$ можно снизить до температуры, которая меньше температуры точки росы t_R , т. е. $t_{ку} < t_R$. Это позволяет использовать как физическую, так и конденсационную составляющие отходящих газов. В [1] указано, что температура охлажденных газов имеет определенное оптимальное значение, поскольку в случае уменьшения $t_{ку}$ уменьшается температура охлаждающей воды и растут расходы на привод компрессора ТНУ. Но в [1] не осуществлен анализ изменения показателей эффективности работы комбинированных установок, в состав которых входят котлы, КУ и ТНУ.

Исходя из вышеизложенного, перед нами стояла задача проанализировать показатели эффективности работы котельных с утилизацией теплоты отходящих газов в контактных утилизаторах и теплонасосных установках.

Основные результаты

Принципиальная схема установки показана на рис. 1.

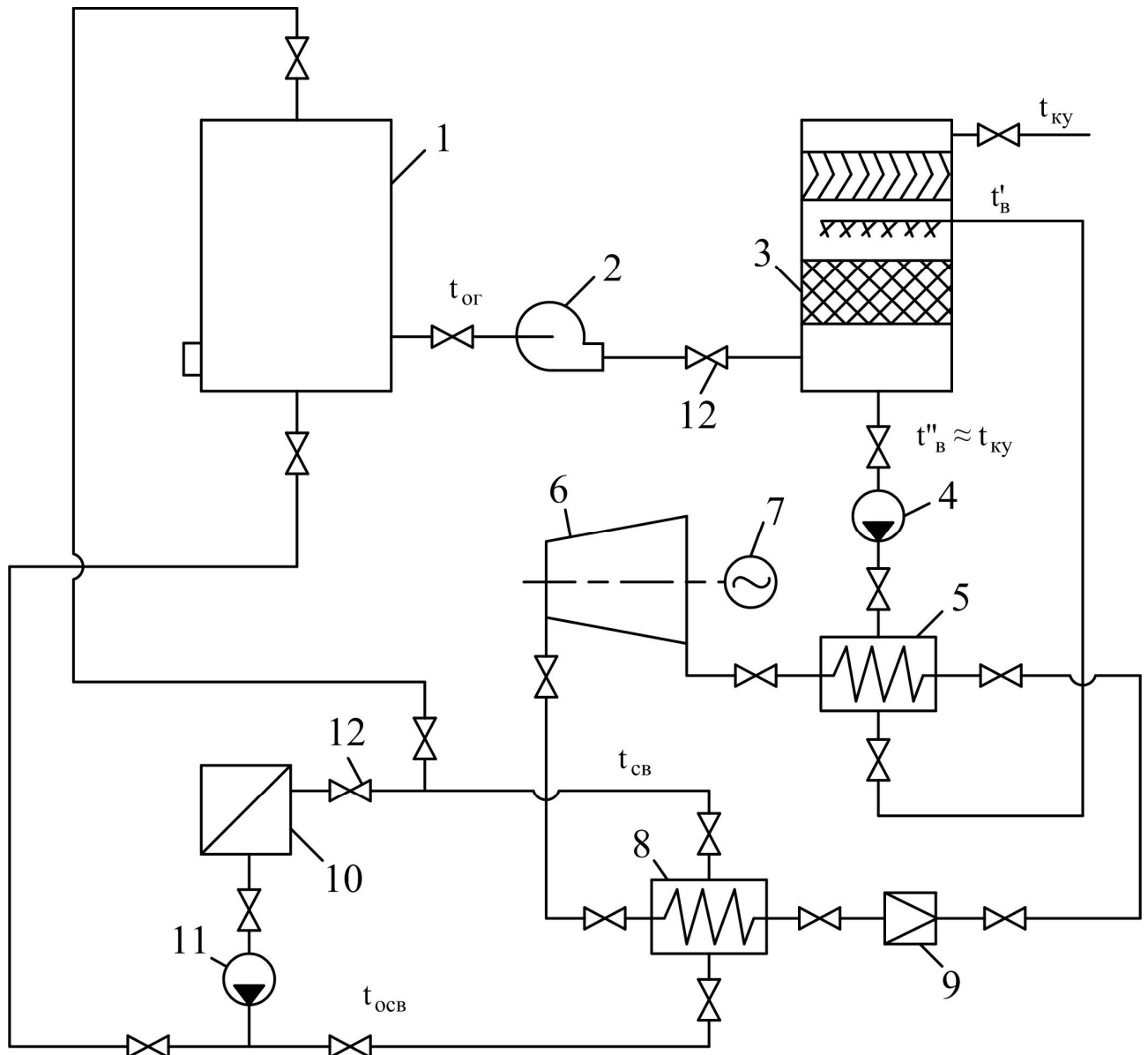


Рис. 1. Принципиальная схема утилизации теплоты отходящих газов из котла с помощью контактного утилизатора и теплонасосной установки: 1 – водогрейный котел; 2 – дымосос; 3 – контактный утилизатор; 4 – циркуляционный насос; 5 – испаритель ТНУ; 6 – компрессор; 7 – электродвигатель; 8 – конденсатор ТНУ; 9 – дроссельное устройство; 10 – тепловой потребитель; 11 – сетевой насос; 12 – арматура

Отходящие газы из котла с температурой $t_{ог}$ поступают в контактный утилизатор и охлаждаются до температуры $t_{ку}$ циркуляционной водой. При этом утилизированная теплота с водой поступает в испаритель ТНУ, где испаряет рабочее тело ТНУ. За счет подведения работы компрессора из конденсатора ТНУ отводится определенная тепловая мощность, поставляемая потребителям.

Для заданной тепловой мощности котла Q_{κ} расход рабочего и условного топлива равен:

$$B_{рк} = \frac{Q_{\kappa}}{Q_n^p \cdot \eta_{\kappa}}; B_{ук} = \frac{Q_{\kappa}}{Q_{ну}^p \cdot \eta_{\kappa}}, \quad (1)$$

где Q_n^p и $Q_{ну}^p$ – теплота сгорания рабочего и условного топлива соответственно; η_{κ} – коэффициент полезного действия (КПД) котла.

Тепловая мощность, которая утилизируется в КУ за счет "сухого" теплообмена

$$Q_c = B_{рк} \cdot Q_n^p \cdot (1 - \eta_{\kappa}) \cdot \psi_c = Q_{мон} (1 - \eta_{\kappa}) \cdot \psi_c, \quad (2)$$

где $Q_{\text{топл}} = B_{\text{рк}} \cdot Q_n^p = B_{\text{ук}} \cdot Q_{\text{нл}}^p$ – тепловая мощность топлива; $\psi_c = (t_{\text{оэ}} - t_{\text{кн}}) / t_{\text{оэ}}$ – коэффициент утилизации теплоты "сухого" теплообмена.

Тепловая мощность, высвобождаемая в КУ за счет конденсации водяного пара [3]

$$Q_{\text{вн}} = B_{\text{рк}} \cdot (Q_g^p - Q_n^p) \cdot \psi_{\text{вн}} = B_{\text{рк}} \cdot Q_n^p \left(\frac{Q_g^p}{Q_n^p} - 1 \right) \cdot \psi_{\text{вн}} = Q_{\text{топл}} \left(\frac{Q_g^p}{Q_n^p} - 1 \right) \cdot \psi_{\text{вн}}, \quad (3)$$

где Q_g^p – высшая теплота сгорания топлива, которая превышает значение Q_n^p на теплоту конденсации водяного пара; $\psi_{\text{вн}} = (t_R - t_{\text{кн}}) / t_R$ – коэффициент утилизации теплоты водяного пара.

Температуру точки росы t_R вычисляют по [4] или [7]. Отношения Q_g^p / Q_n^p для различных видов топлива приведены в [1].

Суммарная тепловая мощность, утилизированная в КУ

$$Q_{\text{ку}} = Q_c + Q_{\text{вн}} = Q_{\text{топл}} \left[(1 - \eta_{\text{к}}) \cdot \psi_c + \left(\frac{Q_g^p}{Q_n^p} - 1 \right) \cdot \psi_{\text{вн}} \right] = Q_{\text{топл}} \cdot A. \quad (4)$$

Эта мощность направляется в испаритель ТНУ, мощность которого будет равна

$$Q_{\text{исп}} = Q_{\text{ку}} \cdot \eta_{\text{то}} = Q_{\text{топл}} \cdot A \cdot \eta_{\text{то}} = Q_{\text{топл}} \cdot A_1, \quad (5)$$

где $\eta_{\text{то}}$ – КПД теплообменника.

Тепловая мощность конденсатора ТНУ

$$Q_{\text{кн}} = \frac{Q_{\text{исп}} \cdot \varphi}{(\varphi - 1)} = \frac{Q_{\text{топл}} \cdot A_1 \cdot \varphi}{(\varphi - 1)} = Q_{\text{топл}} \cdot C \cdot \varphi, \quad (6)$$

где φ – тепловой (отопительный) коэффициент ТНУ, который зависит от температур в испарителе $T_{\text{и}}$, в конденсаторе $T_{\text{кн}}$ и КПД компрессора.

Значение φ определяют либо в результате построения рабочего процесса ТНУ на P-h диаграмме или по соотношениям в [5].

Необходимая мощность электропривода компрессора ТНУ

$$N = \frac{Q_{\text{кн}}}{\varphi \cdot \eta_{\text{эмх}}} = \frac{Q_{\text{топл}} \cdot C \cdot \varphi}{\varphi \cdot \eta_{\text{эмх}}} = Q_{\text{топл}} \cdot C_1, \quad (7)$$

где $C_1 = C / \eta_{\text{эмх}}$; $\eta_{\text{эмх}}$ – электромеханический КПД электропривода.

Эквивалентный расход условного топлива на электропривод компрессора

$$B_{\text{эу}} = \frac{N}{Q_{\text{нл}}^p \cdot \eta_{\text{эст}} \cdot \eta_{\text{эс}}} = \frac{B_{\text{ук}} \cdot C_1}{\eta_{\text{эст}} \cdot \eta_{\text{эс}}}, \quad (8)$$

где $\eta_{\text{эс}}$ и $\eta_{\text{эст}}$ – средние значения КПД электростанций и электросетей в энергосистеме соответственно, которые определяют из статистических ежегодников Украины [6].

Общий расход условного топлива в предложенной установке

$$B_{\text{оу}} = B_{\text{ук}} + B_{\text{эу}} = B_{\text{ук}} \left[1 + \frac{C_1}{\eta_{\text{эст}} \cdot \eta_{\text{эс}}} \right]. \quad (9)$$

Общая тепловая мощность, выработанная в установке

$$Q_o = Q_{\text{к}} + Q_{\text{кн}} = B_{\text{ук}} \cdot Q_{\text{нл}}^p (\eta_{\text{к}} + C \cdot \varphi). \quad (10)$$

Удельный расход условного топлива на выработку тепловой мощности, кг/ГДж

$$b_y = \frac{B_{\text{оу}} \cdot 10^3}{Q_o} = \frac{10^3}{Q_{\text{нл}}^p} \left[\frac{1 + C_1 / (\eta_{\text{эс}} \cdot \eta_{\text{эст}})}{\eta_{\text{к}} + C \cdot \varphi} \right]. \quad (11)$$

В случае выработки общей тепловой мощности в котле удельный расход условного топлива

составлял бы, кг/ГДж

$$b_y^k = \frac{10^3}{Q_{ny}^p \cdot \eta_k} \quad (12)$$

Разница между удельными расходами условного топлива, кг/ГДж

$$\Delta b_y = b_y^k - b_y = \frac{10^3}{Q_{ny}^p} \left[\frac{1}{\eta_k} - \frac{1 + C_1 / (\eta_{эст} \cdot \eta_{эс})}{\eta_k + C\varphi} \right] \quad (13)$$

Экономия условного топлива за счет утилизации теплоты отходящих газов в КУ и ТНУ, т/час

$$\Delta B_y = \Delta b_y \cdot Q_{кн} \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} \quad (14)$$

Расход сетевой воды, кг/с:

– в водогрейном котле

$$G_{вк} = \frac{Q_k \cdot 10^3}{Cp_k (t_{псв} - t_{осв})} \quad (15)$$

– в конденсаторе ТНУ

$$G_{вк} = \frac{Q_{кн} \cdot 10^3}{Cp_{кн} (t_{вк} - t_{осв})} \quad (16)$$

где $t_{псв}$ и $t_{осв}$ – температуры прямой и обратной сетевой воды соответственно; $t_{вк}$ – температура воды на выходе из конденсатора; Cp_k и $Cp_{кн}$ – изобарная теплоемкость воды для определенных температур.

Температура сетевой воды в системе теплофикации, °С

$$t_{св} = \frac{G_{вк} \cdot Cp_k \cdot t_{псв} + G_{кн} \cdot Cp_{кн} \cdot t_{кн}}{G_{вк} + G_{кн}} \quad (17)$$

С помощью вариантных расчетов исследуют эффективность работы комбинированной установки с КУ и ТНУ на базе водогрейного котла ПТВМ-30 мощностью 34,8 МВт с температурой отходящих газов 135 °С и температурным режимом работы тепловой сети 100/50 °С. Рабочее топливо – природный газ с теплотой сгорания $Q_n^p = 33,4$ МДж/м³ и отношением $Q_g^p / Q_n^p = 1,136$. Коэффициент полезного действия котла – 0,915. Коэффициенты полезного действия электростанций и электросети составляли 0,34 и 0,9 соответственно [6]. Рабочее тело ТНУ-R717 (аммиак), КПД компрессора ТНУ – 0,84. Величина недогрева в конденсаторе и испарителе ТНУ – 3 °С.

На рис. 2. показаны характерные изменения мощности конденсатора ТНУ (кривая 1) и отопительного коэффициента φ (кривая 2) в зависимости от температуры хладагента в конденсаторе для $t_R = 65$ °С, $t_{кв} = 42$ °С, $t_{исп} = 30$ °С.

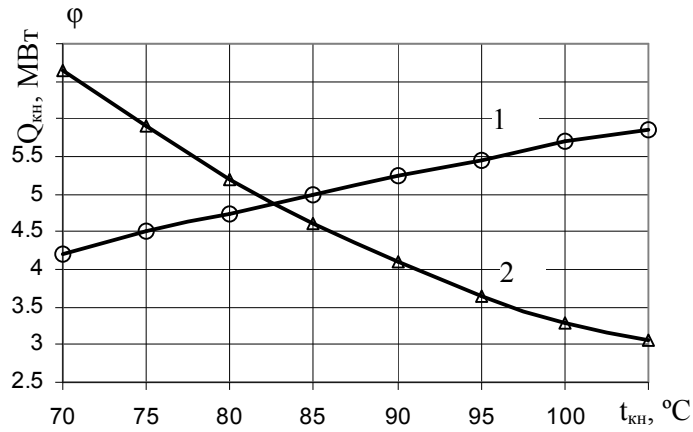


Рис. 2. Характер изменения мощности конденсатора ТНУ и отопительного коэффициента

Для указанных условий наибольшее влияние температура t_{kh} оказывает именно на отопительный коэффициент, уменьшая его значение в 2,2 раза. При этом мощность утилизированной теплоты в ТНУ возрастает лишь на 44%.

Зависимости мощности компрессора ТНУ и относительной мощности сетевого насоса приведены на рис. 3. Здесь безразмерная величина N^* характеризует относительное увеличение мощности сетевого насоса, вследствие дополнительной прокачки сетевой воды через конденсатор ТНУ.

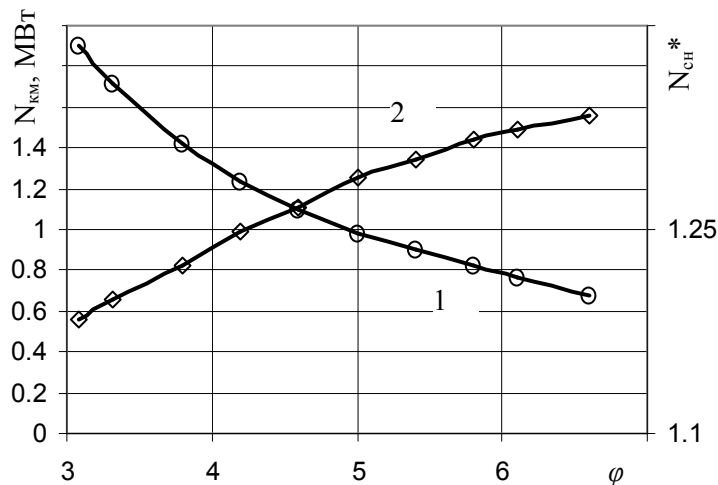


Рис. 3. Текущие значения мощности компрессора ТНУ (кривая 1) и относительной мощности сетевого насоса (кривая 2)

Из рис. 3. видно, что в указанном диапазоне изменения ϕ мощность компрессора ТНУ уменьшается почти втрое, а мощность сетевого насоса возрастает на 33%.

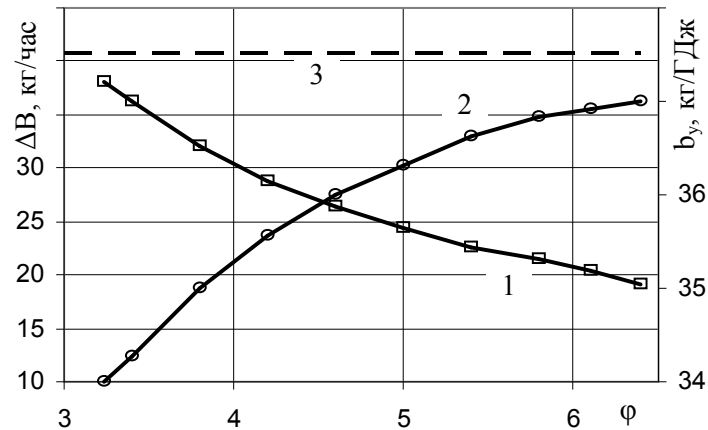


Рис. 4. Зависимости изменения удельного расхода условного топлива на производство теплоты (кривая 1) и величины экономии условного топлива ΔB , кг/час (кривая 2)

На рис. 4. приведены текущие значения удельного расхода условного топлива и экономии условного топлива в предложенной установке. Здесь штриховая линия 3 характеризует удельный расход условного топлива в котле. Величина удельного расхода условного топлива, которая характеризует эффективность использования топлива, благодаря утилизации теплоты отходящих газов в контактном утилизаторе и ТНУ, уменьшается на 7,2%. При этом в указанном интервале изменения ϕ экономия условного топлива может составлять от 10 до 40 кг/час.

Расчеты показали, что температура сетевой воды, которая представляет собой смесь воды из котла и конденсатора ТНУ, уменьшается с уменьшением ϕ и составляет 99 °С при $\phi = 6,1$ и 94 °С при $\phi = 3,2$. В результате расчетов также установлено, что для каждого значения температуры точки росы существует определенный интервал оптимальных значений температур газов за контактными утилизатором. В таблице для примера приведены основные показатели работы предложенной установки для $t_R = 55$ °С и температуры хладагента в конденсаторе $t_{KH} = 80$ °С.

Показатели	Температура газов за контактными утилизатором, °С				
	23	28	33	38	43
Тепловая мощность за счет «сухого» теплообмена в КУ, МВт	2,68	2,56	2,44	2,32	2,2
Тепловая мощность за счет конденсации водяного пара в КУ, МВт	2,98	2,52	2,05	1,58	1,12
Тепловая мощность испарителя ТНУ, МВт	5,55	4,98	4,49	3,83	3,25
Отопительный коэффициент	3,43	3,62	3,95	4,22	5,25
Мощность компрессора ТНУ, МВт	2,28	1,9	1,488	1,19	0,764
Тепловая мощность конденсатора ТНУ, МВт	7,83	6,88	5,976	5,02	4,01
Удельный расход условного топлива, кг/ГДж	36,4	36,2	35,49	35,9	36,3

Величина удельного расхода условного топлива b_y однозначно характеризует эффективность использования топлива в установке [3, 4]. Из приведенной таблицы видно, что для $t_R = 55$ °С оптимальные значения t_{KH} находятся в пределах 32,5 – 33,5 °С. Зависимость оптимальных значений температуры охлаждения газов в контактном утилизаторе от температуры точки росы приведена на рис. 5.

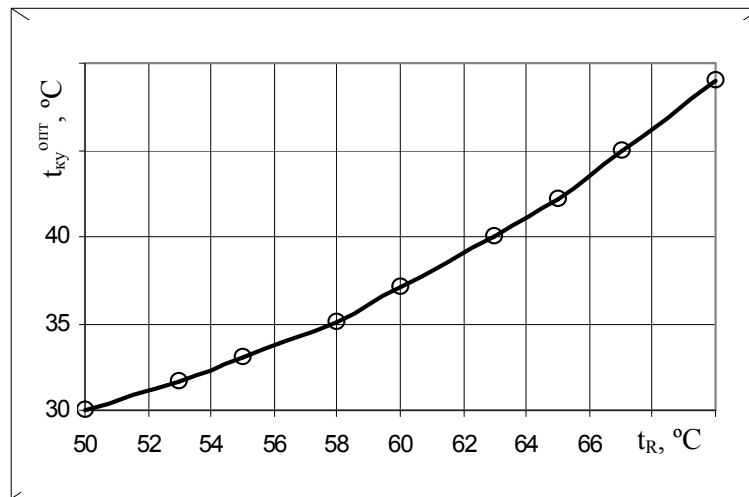


Рис. 5. Значения оптимальной температуры охлаждения отходящих газов в контактном утилизаторе

Полученные результаты являются необходимой предпосылкой для использования теплоты отходящих газов в котельных.

Выводы

1. Получены соотношения для определения показателей работы установки с утилизацией теплоты отходящих продуктов сгорания топлива.
2. Выяснено, что применение контактных утилизаторов теплоты вместе с теплонасосными установками позволяет повысить эффективность использования топлива на 7,2% и экономить расход условного топлива до 40 кг/час.
3. Применение теплонасосных установок обуславливает повышение мощности сетевых насосов от 10 до 30%.
4. Определены оптимальные температуры охлаждения продуктов сгорания топлива в контактных утилизаторах теплоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жовмір М. М. Утилізація низькотемпературної теплоти продуктів згорання палива за допомогою теплових насосів / М. М. Жовмір // Пром. теплотехника, 2008. – т. 30 – № 2. – С. 90 – 97.
2. Кулик М. М. Проблеми і перспективи розвитку в Україні теплонасосних технологій / М. М. Кулик, В. Д. Білодід // Проблеми загальної енергетики, 2006. – № 4. – С. 7 – 12.
3. Клименко В. Н. Некоторые особенности применения парокомпрессионных тепловых насосов для утилизации сбросной теплоты отопительных котлов / В. М. Клименко // Пром. теплотехника, 2011. – Т. 33 – № 5. – С. 43 – 48.
4. Чепурний М. М. Енергозбережні технології в теплоенергетиці / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 114 с.
5. Особливості застосування парокомпресійних теплонасосних установок [Електронний ресурс] / Чепурний М. М., Ткаченко С. Й., Резидент Н. В. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – № 1. – 2013. Режим доступу до журн.: http://archive.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2013_1/2013-1.files/uk/13mmcfhs_ua.pdf.
6. Статистичний щорічний України за 2011 рік – Київ: Інформаційно-аналітичне агентство, 2012. – 586 с.
7. Бакластов А. М. Проектирование, монтаж и эксплуатация теплоиспользующих установок / А. М. Бакластов. – М.: Энергия, 1970. – 568 с.

Чепурной Марк Николаевич – к. т. н., доцент, профессор кафедры теплоэнергетики.

Резидент Наталия Владимировна – к. т. н., старший преподаватель кафедры теплоэнергетики. Винницкий национальный технический университет.