

УДК 62-681

Н. А. СИМОНОВ, Д. В. ВЫБОРНОВ

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК

Аннотация. Авторами в данной статье проанализированы теоретические и эмпирические исследования в области технологий глубокой утилизации тепла уходящих газов. Рассмотрены различные методы определения коэффициента теплоотдачи при использовании конденсационных теплоутилизаторов поверхностного типа. Также рассмотрена зависимость коэффициента теплоотдачи от различных значений скорости движения уходящих продуктов сгорания и плотностей орошения наружной поверхности теплообменника конденсатом водяных паров из дымовых газов. В ходе расчетов выполнена проверка на сходимость полученных значений коэффициентов теплоотдачи по эмпирическим формулам, предлагаемых для расчета, со значениями, полученными при использовании формул классической теории теплообмена. По результатам расчетно-аналитических исследований авторами предложен вывод о целесообразности применения вышеуказанных эмпирических зависимостей при проектировании конденсационных теплообменных аппаратов, утилизирующих теплоту дымовых газов.

Ключевые слова: продукты сгорания, оребренная поверхность, конденсационный теплоутилизатор, коэффициент теплоотдачи.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Теплоэнергетика является одной из основных составляющих энергетики и включает в себя процесс производства тепловой энергии, ее транспортировки, а также рассматривает основные условия производства энергии и негативное влияние отрасли на окружающую среду, организм человека и животных.

По суммарным данным многолетнего мониторинга, теплоэнергетика занимает первое место среди отраслей промышленности по количеству выбрасываемых в атмосферу вредных веществ [1], в связи с чем проблема загрязнения атмосферы продуктами сгорания топлива относится к одной из глобальных проблем современности.

Одним из достаточно эффективных путей решения проблемы энергосбережения является глубокая утилизация теплоты уходящих газов путем их охлаждения до температур, лежащих ниже точки росы, то есть теплотехнология с конденсацией водяных паров из продуктов сгорания топлива.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Одним из первых научных трудов, посвященных вопросам глубокой утилизации тепла дымовых газов, стала книга И. З. Аронова «Использование тепла уходящих газов в газифицированных котельных» [2]. Исследовательские работы по данному направлению велись Киевским научно-исследовательским институтом санитарной техники и оборудования зданий и сооружений (НИИСТ) под руководством Б. Н. Лобаева и И. З. Аронова. В которых основное внимание было уделено разработке контактных теплоутилизаторов [3]. В исследовательской работе профессора А. А. Кудинова «Энергосбережение в теплогенерирующих установках» [4] предложена методика расчета коэффициента теплопередачи для поверхностных конденсационных теплоутилизаторов, основанная на обработке экспериментальных данных при испытании действующих теплоутилизаторов с оребренными трубками.

Известна многолетняя работа ученых Московского энергетического института под руководством профессоров А. С. Седлова, А. П. Солодова [5], Ю. А. Кузма-Кичты [6]. В диссертации Д. Ю. Бухонова [7] приведен обзор и анализ известных методов расчета конденсационных теплообменных установок, их применимость для расчета теплоутилизаторов.

Многочисленные публикации зарубежных авторов обнаруживают схожий подход [8–10]. Проводятся эксперименты на действующих или лабораторных образцах теплоутилизаторов. По результатам исследований выводятся критериальные уравнения по принципу подобия и рассчитываются необходимые коэффициенты.

ЦЕЛЬ

Анализ методики расчета коэффициентов теплоотдачи при использовании конденсационных теплоутилизаторов поверхностного типа.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Натурные испытания конденсационного теплоутилизатора поверхностного типа, выполненного на базе калорифера КСк-4-11, проводились на Ульяновской ТЭЦ-3 в 1996 и 1999 гг. Экспериментальные исследования позволили получить числовые значения коэффициентов теплопередачи КТ в зависимости от скорости уходящих продуктов сгорания и степени орошения наружной поверхности теплообменника конденсатом водяных паров из продуктов сгорания. Данные по коэффициентам теплопередачи $k_{к.т}$ представлены в [11, табл. 3.4–3.6].

В работе [11], авторами получено критериальное уравнение, описывающее процесс теплообмена при глубоком охлаждении газов в конденсационном теплоутилизаторе (КТ) поверхностного типа, которое имеет вид

$$Nu = B Re^m Pr^n K^R. \quad (1)$$

Полученное уравнение (1) находится в соответствии с π -теоремой (формулой Бэкингема): число критериев (Nu, Re, Pr, K) равно разнице между числом размерных физических параметров $n_1 = 8$ ($\alpha, D, v, \rho, \mu, \lambda, c, W$) и числом основных размерностей $m_1 = 4$ (L, θ, T, M). Константа B и неизвестные показатели степеней при определяющих критериях m, n и R в полученном уравнении определяются экспериментально.

Коэффициент теплопередачи через ребристую многослойную стенку при отнесении теплового потока к оребренной поверхности определяется из выражения [12]

$$k_{к.т} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} \cdot \frac{F_2}{F_1} + \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) \cdot \frac{F_2}{F_1} + \frac{1}{\alpha_n}}, \quad (2)$$

где α_n, α_e – коэффициент теплоотдачи соответственно на внутренней и наружной поверхности рабочей трубки калорифера, Вт/(м²·К);
 F_2/F_1 – отношение наружной оребренной поверхности к внутренней гладкой поверхности (коэффициент оребрения);
 δ_1, δ_2 – толщина стенки соответственно внутренней стальной трубки и наружной алюминиевой трубки, м;
 λ_1, λ_2 – коэффициент теплопроводности соответственно материала внутренней и наружной стенки рабочей трубки калорифера, Вт/(м·К).

Для определения значения коэффициента теплоотдачи α_n воспользуемся уравнением для расчета конвективного теплообмена при омывании пучков трубок, расположенных в шахматном порядке.

За основу приняты результаты испытаний, проведенных в [4]. Режим движения воды в трубках калорифера для всех проведенных опытов является турбулентным.

Дальнейшие расчеты по определению числовых значений B, m, R и n выполнялись по методике, изложенной в [12]. Для вычисления показателя степени m при числе Рейнольдса уравнение (1) записывается в виде

$$Nu = (BK^R Pr^n) Re^m. \quad (3)$$

График зависимости $\lg Nu = f_1(\lg Re)$ представлен на рис. 2. Вычисления выполнялись для скорости газов $v = 1...4$ м/с. В расчетах принимались следующие параметры продуктов сгорания: $\nu_r = 20,58 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\lambda_r = 0,03072$ Вт/(м·К) для $t_r = 0,5 \cdot (134 + 46) = 90$ °С (использовались экспериментальные данные, представленные в [4]).

За определяющий линейный размер при вычислении Nu и Re принимался наружный диаметр трубки calorifera $d_n = 0,018$ м, так как $\alpha_b > \alpha_n$.

Из рис. 2 получаем $m = (1,681 - 1,319)/(3,544 - 2,942) = 0,601$.

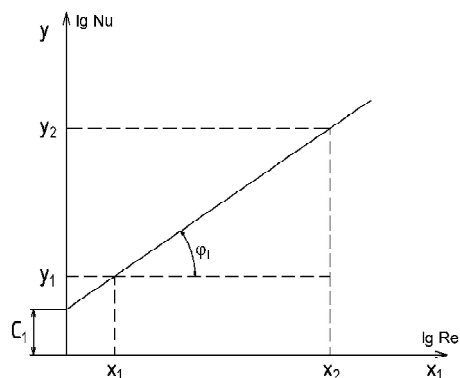


Рисунок 1 – Зависимость $\lg Nu = f_1(\lg Re)$.

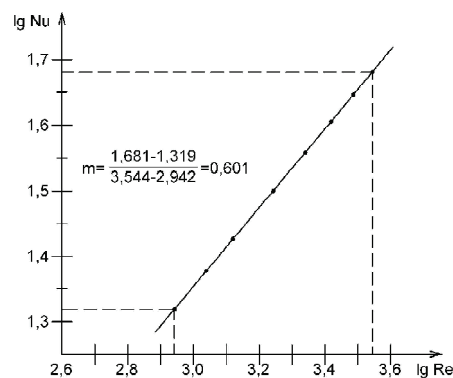


Рисунок 2 – Зависимость $\lg Nu = f_1(\lg Re)$: $t_r = 90$ °С; $\nu_r = 20,58 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda_r = 0,03072$ Вт/(м·К).

Для определения показателя степени при критерии орошения K уравнение (1) представляется в виде

$$Nu / Re^m = (B Pr^n) K^R. \tag{4}$$

Следовательно, значение R можно определить с помощью графического представления опытных данных $\lg(Nu/Re^m) = f_2(\lg K)$ (рис. 3).

Показатель степени R определяется из выражения

$$R = \operatorname{tg} \varphi_2 = (\eta_2 - \eta_1) / (\xi_2 - \xi_1). \tag{5}$$

Результаты вычислений представлены в табл. 1, а график зависимости $\lg(Nu/Re^m) = f_2(\lg K)$ – на рис. 4. Вычисления выполнялись для $W = 2,2...4,0$ кг/(м²·ч).

В расчетах принималось $Re = 2187$, что соответствует скорости газов $v_r = 2,5$ м/с. Теплофизические параметры принимались при средней температуре газов $t_r = 90$ °С.

Получено следующее значение R:

$$R = (-0,4033 + 0,4935) / (-0,0009 + 0,2605) = 0,3472.$$

Таблица 1 – Результаты вычислений критериев орошения K и Нуссельта Nu для установления зависимости $\lg(Nu/Re^m) = R \lg K$: $\nu_r = 20,58 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda_r = 0,03072$ Вт/(м·К); $\rho_r = 0,9739$ кг/м³; $\mu_r = 20,04 \cdot 10^{-6}$ кг/(м·с)

$W, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4,0
$v_r, \text{ м}/\text{с}$	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
$Re = v_r d_n / \nu$	2187	2187	2187	2187	2187	2187	2187
Re^m	100,9	100,9	100,9	100,9	100,9	100,9	100,9
$k_{к.т}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	49,91	51,72	53,53	55,34	57,15	58,96	60,08
$\alpha_n, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	55,27	57,50	59,75	62,01	64,29	66,59	68,03
$Nu = \alpha_n d_n / \lambda_r$	32,39	33,69	35,01	36,33	37,67	39,02	39,86
Nu / Re^m	0,3210	0,3339	0,3470	0,3601	0,3734	0,3867	0,3951
$\lg(Nu / Re^m)$	-0,4935	-0,4763	-0,4597	-0,4435	-0,4278	-0,4126	-0,4033
$K = W d_n / (3600 \mu_r)$	0,5489	0,6238	0,6986	0,7735	0,8483	0,9232	0,9980
$\lg K$	-0,2605	-0,2050	-0,1558	-0,1116	-0,0714	-0,0347	-0,0009

Принимаем $R = 0,347$.

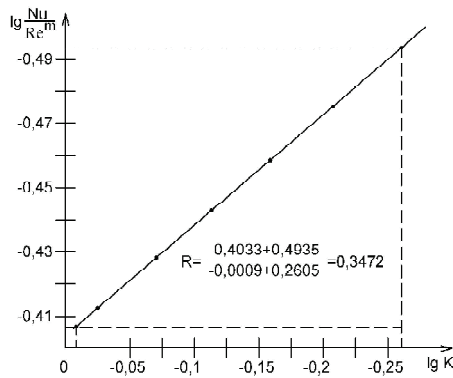


Рисунок 4 – Зависимость $\lg(Nu/Re^n) = f_2(\lg K)$: $t_f = 90^\circ\text{C}$; $\nu_f = 20,58 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda_f = 0,03072 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\rho_f = 0,9739 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\mu_f = 20,04 \cdot 10^{-6} \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$.

Показатель степени n при числе Прандтля определить по данным опытов затруднительно, так как число Прандтля практически не изменялось ввиду того, что рабочим телом во всех случаях были продукты сгорания при средней температуре $80\text{...}100^\circ\text{C}$ (при 80°C $Pr = 0,696$, а при 100°C $Pr = 0,69$ [13]). Однако представляется целесообразным ввести Pr в степени $2/3$, что позволяет распространить полученные результаты на сравнительно узкую область значений критерия Прандтля, характерную для газов.

Это подтверждается следующими соображениями. Наружная теплообменная поверхность калорифера состоит из множества прерывистых ребер, на которых возникают ламинарные пограничные слои (по крайней мере, на большей части поверхностей). Основные решения для ламинарного пограничного слоя указывают, что для газов в диапазоне чисел Прандтля $0,5\text{...}1,0$ критерий Pr входит в расчетные уравнения в степени $2/3$.

Таким образом, уравнение (1) можно записать в виде

$$Nu = B Re^{0,601} K^{0,347} Pr^{2/3} \quad (6)$$

Тогда

$$B = \frac{Nu}{Re^{0,601} K^{0,347} Pr^{2/3}}$$

Для определения B примем (табл. 1):

$$Nu = 36,33; Re = 2187; K = 0,7735; Pr = 0,693.$$

Принимаем $B = 0,503$. Искомое критериальное уравнение представляется в виде

$$Nu_{жд} = 0,503 \cdot Re_{жд}^{0,601} \cdot K_{жд}^{0,347} \cdot Pr_{жд}^{2/3} \quad (7)$$

При вычислении Nu , Re , K , представленных в формуле (7), определяющим размером является внешний диаметр трубки. Скорость газов, необходимая для определения $Re_{жд}$, подсчитывается по самому узкому поперечному сечению пучка трубок. Определяющей температурой является средняя температура газов.

Проверка согласованности результатов вычислений по формуле (7) с таблицами 3.4–3.6 из [12] представлена в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты вычислений коэффициентов теплоотдачи α_n по формуле (7) и их сравнение с опытными данными (α_T) [4]

v , м/с	W , кг/(м ² ·ч)	$Re_{жд}$	$K_{жд}$	$Nu_{жд}$	α_n , Вт/(м ² ·К)	α_T , Вт/(м ² ·К)	Относительная погрешность δ , %
1,0	2,54	875	0,6337	19,57	33,4	43,8	23,8
1,371	2,542	1 199	0,6342	23,65	40,4	47,52	15,1
2,0	3,1	1749	0,7735	31,78	54,2	57,8	6,2
2,5	3,1	2 187	0,7735	36,33	62,0	62,02	0,014
3,78	3,982	3 306	0,9935	50,79	86,7	77,82	11,4
4,0	4,0	3 499	0,9980	52,63	89,8	79,38	13,2

Анализ результатов вычислений коэффициентов теплоотдачи для различных значений скорости движения уходящих продуктов сгорания и плотностей орошения наружной поверхности теплообменника конденсатом водяных паров из дымовых газов показывает, что результаты расчетов по критериальному уравнению вида удовлетворительно согласуются с опытными данными. Критериальное уравнение (2.17) получено при $875 \leq Re \leq 3500$; $0,55 \leq K \leq 1,0$; $0,5 \leq Pr \leq 1,0$.

ВЫВОДЫ

Внедрение установок для глубокого охлаждения продуктов сгорания сдерживается отсутствием аналитических зависимостей, позволяющих рассчитывать теплообмен в конденсационных теплоутилизаторах поверхностного типа, а также данных о надежной работе наружных газоходов и дымовых труб при отводе охлажденных в конденсационных теплоутилизаторах продуктов сгорания.

Выполненный расчет позволяет оценить коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{\text{н}}$ для различных значений скорости движения уходящих продуктов сгорания и сравнить, насколько полученные значения согласуются с опытными данными $\alpha_{\text{р}}$, полученными экспериментальным путем в работе [4]. В пределах значений скорости дымовых газов 2,2...2,7 м/с наблюдается хорошая сходимость эмпирических формул, предлагаемых к расчету и формул классической теории теплообмена. При снижении скорости дымовых газов до 1,0 м/с и увеличении до 4,0 м/с наблюдается отклонение на величину до 24%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков, Ю. В. Экология, окружающая среда и человек : учебное пособие для вузов, средних школ и колледжей / Ю. В. Новиков. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : ФАИР-ПРЕСС, 2005. – 736 с. – Текст : непосредственный.
2. Аронов, И. З. Использование тепла уходящих газов газифицированных котельных / И. З. Аронов. – Москва : Энергия, 1967. – 192 с. – Текст : непосредственный.
3. Аронов, И. З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И. З. Аронов. – 2-е изд. – Ленинград : Недра, 1990. – 280 с. – Текст : непосредственный.
4. Кудинов, А. А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках / А. А. Кудинов. – Ульяновск : УлГТУ, 2000. – 139 с. – Текст : непосредственный.
5. Седлов, А. С. Получение конденсата из уходящих дымовых газов на экспериментальной установке ОАО ГРЭС-24 / А. С. Седлов, А. П. Солодов, Д. Ю. Бухонов. – Текст : непосредственный // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 5. – С. 76–77.
6. Кузма-Кичта, Ю. А. Интенсификация теплообмена при конденсации водяных паров из уходящих дымовых газов / Ю. А. Кузма-Кичта, Д. Ю. Бухонов, Ю. В. Борисов. – Текст : непосредственный // Теплоэнергетика. – 2007. – № 3. – С. 39–42.
7. Бухонов, Д. Ю. Исследование и оптимизация метода получения конденсата из уходящих продуктов сгорания природного газа : специальность 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бухонов Дмитрий Юрьевич. – Москва, 2007. – 137 с. – Текст : непосредственный.
8. Analytical modeling of water condensation in condensing heat exchanger / Kwangkook Jeong, Michael Kessen, Harun Bilirgen, Edward Levy. – Текст : непосредственный // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – № 53. – С. 2361–2368.
9. An investigation of the performance of compact heat exchanger for latent heat recovery from exhaust flue gases / Xiaojun Shi, Defu Che, Brian Agnew, Jianmin Gao. – Текст : непосредственный // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2011. – № 54. – С. 606–615.
10. Che, D. Heat and mass transfer characteristics of simulated high moisture flue gases / Defu Che, Yaodong Da, Zhengning Zhuang. – Текст : непосредственный // Heat Mass Transfer. – 2005. – № 41. – С. 250–256.
11. Кудинов, А. А. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях : многорафия / А. А. Кудинов, С. К. Зиганшина. – Москва : Машиностроение, 2011. – 374 с. – Текст : непосредственный.
12. Исаченко, В. П. Теплопередача : учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : «Энергия», 1975. – 488 с. – Текст : непосредственный.
13. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 2-е изд., стереотипное. – Москва : Энергия, 1977. – 343 с.

Получена 12.05.2021

М. О. СИМОНОВ, Д. В. ВИБОРНОВ
ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ГЛИБОКОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА
ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВОК
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. Авторами в даній статті проаналізовано теоретичні та емпіричні дослідження в області технологій глибокої утилізації тепла відхідних газів. Розглянуто різні методи визначення коефіцієнта тепловіддачі при використанні конденсаційних теплоутилізаторів поверхневого типу. Також розглянута залежність коефіцієнта тепловіддачі від різних значень швидкості руху продуктів згорання і щільності зрощення зовнішньої поверхні теплообмінника конденсатом водяної пари з димових газів.

В ході розрахунків виконана перевірка на відповідність отриманих значень коефіцієнтів тепловіддачі за емпіричними формулами, запропонованих для розрахунку, зі значеннями, отриманими при використанні формул класичної теорії теплообміну. За результатами розрахунково-аналітичних досліджень авторами зроблено висновок про доцільність застосування вищевказаних емпіричних залежностей при проектуванні конденсаційних теплообмінних апаратів, що утилізують теплоту димових газів.

Ключові слова: продукти згоряння, обребрена поверхня, конденсаційний теплоутилізатор, коефіцієнт тепловіддачі.

NIKOLAY SIMONOV, DMITRY VYBORNOV
INVESTIGATION OF WAYS OF DEEP UTILIZATION OF HEAT FROM HEAT-
GENERATING INSTALLATIONS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The authors in this article have analyzed theoretical and empirical studies in the field of technologies of deep utilization of heat from exhaust gases. Various methods for determining the heat transfer coefficient during the process of using surface-type condensation heat exchangers are considered. The dependence of the heat transfer coefficient on various values of the velocity of the outgoing combustion products and the density of irrigation of the outer surface of the heat exchanger with condensate of water vapor from the flue gases is also considered. In the part of the calculations, the check was made for the convergence of the obtained values of the heat transfer coefficients according to the empirical formulas proposed for calculation with the values obtained using the formulas of the classical theory of heat transfer. Based on the results of computational and analytical studies, the authors proposed a conclusion about the advisability of using the above empirical dependencies in the design of condensing heat exchangers utilizing the heat of flue gases.

Key words: combustion products, ribbed surface, condensation heat exchanger, heat transfer coefficient.

Симонов Николай Александрович – магистрант кафедри теплотехніки теплогазоснабження і вентиляції ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплоснабжения.

Выборнов Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедри теплотехніки теплогазоснабження і вентиляції ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплоснабжения, использование теплонасосных технологий.

Симонов Микола Олександрович – магистрант кафедри теплотехніки теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплогазопостачання.

Виборнов Дмитро Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплопостачання, використання теплонасосних технологій.

Simonov Nikolay – master's student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy and resource saving in heat and gas supply systems.

Vybornov Dmitry – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heatsaving in systems of a heat supply with usage of heat pump technologies.