

DOI 10.15589/jnn20170405
 УДК 536.27
 М87

**APPROXIMATE DETERMINATION OF HEAT DISSIPATION IN THE TUBES
 OF HEAT EXCHANGERS FOR COOLING SYSTEMS
 OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES**

**ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ
 В ТРУБКАХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ
 ДЛЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Yurii L. Moshentsev
 yurii.moshentsev@nuos.edu.ua
 ORCID: 0000-0002-1377-7498

Oleksii A. Gogorenko
 oleksii.gogorenko@nuos.edu.ua
 ORCID: 0000-0002-9157-6659

Ю. Л. Мошенцев,
 канд. техн. наук, проф.

А. А. Гогоренко,
 канд. техн. наук, доц.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, г. Николаев

Abstract. There has been considered the possibility of precise determination of the boundaries of the areas of applicability of the approximate formulas for determination of the coefficients of heat transfer from the coolant to the walls. These areas are defined as medium for heat exchangers. Special features of the boundaries obtained in such a way are outlined. The method of accounting for the boundaries in the industrial calculations of heat exchangers is proposed.

Keywords: charge air cooler; heat exchange surface; heat transfer; heat dissipation; tube.

Аннотация. Рассмотрена возможность точного установления границ областей применимости для формул приближенного определения коэффициентов теплоотдачи от охлаждающей жидкости к стенке, средних для теплообменных аппаратов. Выделены особенности получаемых данным способом границ. Предложен способ учета определяемых границ в промышленных расчетах теплообменных аппаратов.

Ключевые слова: охладитель наддувочного воздуха; поверхность теплообмена; теплообмен; теплоотдача; трубка.

Анотація. Розглянуто можливість точного встановлення меж областей придатності для формул наближеного визначення коефіцієнтів тепловіддачі від охолоджувальної рідини до стінки, середніх для теплообмінних апаратів. Виділено особливості отримуваних цим способом меж. Запропоновано спосіб врахування визначуваних меж у промислових розрахунках теплообмінних апаратів.

Ключові слова: охолоджувач наддувочного повітря; поверхня теплообміну; теплообмін; тепловіддача; трубка.

REFERENCES

- [1] Berman S. S. *Teploobmennye apparaty i kondensatsionnye ustroystva turboustanovok* [Heat exchangers and condensers of turbine units]. Moscow, MASHGIZ Publ., 1959. 428 p.
- [2] Gogolin A. A. *Konditsionirovanie vozdukha v myasnoy promyshlennosti* [Air conditioning in the meat industry]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost Publ., 1966. 239 p.
- [3] Keys V. M. *Kompaktnye teploobmenniki* [Compact heat exchangers]. Moscow, Energiya Publ., 1967. 224 p.
- [4] Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 344 p.
- [5] Petrovskiy Yu. V., Fastovskiy V. G. *Sovremennye effektivnye teploobmenniki* [Advanced efficient heat exchangers]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1962. 265 p.
- [6] Baklastov A. M., Gorbenko A. V., Danilov O. L. et al. *Promyshlennye teplomassoobmennye protsessy i ustanovki: uchebnyy dlya vuzov* [Industrial heat and mass transfer processes and plants: university textbook]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 328 p.
- [7] Petukhov B. S., Shikov V. K. *Spravochnik po teploobmennikam: v 2 t* [Reference book on heat exchangers: in 2 vol.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 560 p.

- [8] Ametistov Ye. V., Grigorev V. A., Yemtsev B. T. et al. *Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskiiy eksperiment : Spravochnik : v 2 t. T. 2* [Heat and mass transfer. Thermal engineering experiment: Reference book in 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 512 p.
- [9] Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. et al. *Teploperedacha : uchebnik dlya vuzov* [Heat transfer: university textbook]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 488 p.
- [10] Yurenev V. N., Lebedev P. D. *Teplotekhnicheskiiy spravochnik v 2 t.* [Reference book on thermal engineering in 2 vol.]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 896 p.
- [11] Khobler T. *Teploperedacha i teploobmenniki* [Heat transfer and heat exchangers]. Leningrad, Goskhimizdat Publ., 1961. 820 p.
- [12] Ekkert E. R., Dreyk R. M. *Teoriya teplo- i massoobmena* [Introduction to heat and mass transfer]. Moscow - Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1961. 680 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

При выполнении промышленных расчетов теплообменных аппаратов систем охлаждения двигателей внутреннего сгорания (ДВС) необходимо знать параметры теплообмена между стенкой трубок и охлаждающей жидкостью в широком диапазоне изменения режимов ее течения — от ламинарного до турбулентного. Такая необходимость связана, во-первых, с тем, что различные современные теплообменники проектируются для номинального режима как со сравнительно высокой скоростью течения охлаждающей жидкости в трубках (до 2,5 м/с), так и низкой скоростью (около 0,3 м/с). Во-вторых, существует необходимость производить расчеты систем охлаждения при их регулировании. Последнее обычно связано с уменьшением скорости течения охлаждающей жидкости по сравнению с номинальным режимом.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Вопрос точного определения коэффициента теплоотдачи между охлаждающей жидкостью и стенкой трубки теплообменного аппарата на различных режимах очень сложен. Он исследовался рядом авторов и организаций с получением очень сложных расчетных методик [3, 4, 7, 8, 10]. Большинство подобных методов и методик трудно использовать в расчетах промышленных теплообменных аппаратов. При этом точность соответствующих результатов не получается высокой с учетом возможности определения в таких расчетах многих параметров, необходимых для подстановки в расчетные формулы. Более удобны для промышленных расчетов теплообменных аппаратов упрощенные зависимости, позволяющие получить средние значения коэффициентов теплоотдачи для всего теплообменника на возможных режимах его работы. Наиболее точные и удобные зависимости такого рода приведены в [4, 9, 12]. Вместе с тем, применение этих зависимостей приводит к ряду сложностей. Предлагаемые формулы, в соответствии с рекомендациями авторов, могут быть использованы в определенных диапазонах чисел Рейнольдса по воде (Re_w), но в названных источниках эти диапазоны указываются.

Как уже говорилось, методики расчетов теплообменных аппаратов систем охлаждения ДВС могут применяться при разных скоростях охлаждающей жидкости в трубках теплообменников. В этих случаях возможен переход из одного диапазона чисел Re_w в другой. Особенности расчетов требуют, чтобы возможный переход происходил без скачка в параметрах расчетов. В этом случае приближенные рекомендации выбора краев диапазона в зависимости от приблизительно указанных чисел Re_w не приемлемы. Вместе с тем, рассмотрение расчетных формул, взятых из указанных источников, позволяет достаточно просто решить вопрос границ соответствующих диапазонов.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — установление границ применимости известных зависимостей для определения коэффициента теплоотдачи между охлаждающей жидкостью и стенкой трубки теплообменного аппарата, а также учет изменяемости этих границ в зависимости от исходных данных задач расчетов.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Весь возможный диапазон изменений режимов течения охлаждающей жидкости в трубках теплообменных аппаратов может быть «покрыт» следующими зависимостями по определению средних для теплообменного аппарата коэффициентов теплоотдачи между охлаждающей жидкостью и стенкой трубки:

$$\alpha_w = 4 \left(\frac{Pr_w}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \frac{\lambda_w}{d_{эв}}; \quad (1)$$

$$\alpha_w = 1,4 Re_w^{0,4} \left(\frac{d_{эв}}{H_{II}} \right)^{0,4} Pr_w^{0,33} \left(\frac{Pr_w}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \frac{\lambda_w}{d_{эв}}; \quad (2)$$

$$\alpha_w = 0,116 \left(Re_w^{\frac{2}{3}} - 125 \right) Pr_w^{\frac{1}{3}} \left[1 + \left(\frac{d_{эв}}{H_{II}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot \left(\frac{\mu_w}{\mu_{ст}} \right)^{0,14} \frac{\lambda_w}{d_{эв}}; \quad (3)$$

$$\alpha_w = 0,021 \varepsilon_l Re_w^{0,8} Pr_w^{0,43} \frac{\lambda_w}{d_{эв}} \left(\frac{Pr_w}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}; \quad (4)$$

где α_w — коэффициент теплоотдачи между водой и стенкой, средний для теплообменного аппарата, Вт/(м²·К); $Pr_w, Pr_{ст}$ — число Прандтля для охлаждающей жидкости, взятое при средней температуры воды и средней температуре стенки трубки, соответственно; λ_w — коэффициент теплопроводности воды; $d_{эв}$ — эквивалентный диаметр водяного канала, м; Re_w — число Рейнольдса по воде; H_{II} — длина водяного канала, м; ε_l — коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубки; $\mu_w, \mu_{ст}$ — коэффициент динамической вязкости охлаждающей жидкости при средней температуре охлаждающей жидкости и средней температуре стенки трубы, соответственно.

В формулах (1)–(4) в качестве определяющего размера принят эквивалентный диаметр канала, в качестве определяющей температуры — средняя температура охлаждающей жидкости или стенки трубки.

Зависимости (1), (2), (4) взяты из [4], а (3) из [12]. Авторы приводят и приближенный диапазон применимости формул по числу Рейнольдса. Согласно рекомендациям, формула (1) применима при $Re_w < 2000$ и $W < 15$. Формула (2) — при $500 < Re_w < 2000$ и $W > 15$, (3) — при $2000 < Re_w < 6000$ и (4) — $Re_w > 6000$.

Теплообмен между стенкой трубки и охлаждающей жидкостью в соответствии с принятыми зависимостями должен протекать по ломаной кривой *ABCDE* (рис. 1 построен для охладителя наддувочного воздуха). Кривая 1 соответствует формуле (1), 2 — (2), 3 — (3), 4 — (4).

На отрезке *AB* коэффициент теплоотдачи определяется по формуле (1) и соответствует линии 1 (см. рис. 1) — первый ламинарный режим течения при малых значениях *W*. Линия 2 и принадлежащий ей отрезок *BC* отвечает второму ламинарному режиму течения. Линия 2 строится по формуле (2) при:

$$W = Re_{wd3} \frac{d_{w3}}{H} Pr_w^{5/6} > 15.$$

Линия 3 и принадлежащий ей отрезок *CD* соответствует формуле (3) — переходной режим течения. На отрезке *DE* коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле (4) и отвечает линии 4 на рис. 1 — турбулентный режим течения.

Координаты точек границ диапазонов, установленные в соответствии с рис. 1, могут быть вычислены математически точно на основании равенства α_w для формул, между которыми устанавливается граница. Найденные координаты могут быть использованы в расчетных методиках для определения границ перехода от одной формулы к другой. Следует отметить, что эти координаты не являются постоянными по значению Re_w . Они изменяются в зависимости от выбранной скорости охлаждающей жидкости, ее температуры и температуры стенки трубки теплообменного аппарата.

На рис. 2 показана ломаная кривая изменения α_w для другого теплообменного аппарата (радиатора) с иными условиями теплообмена.

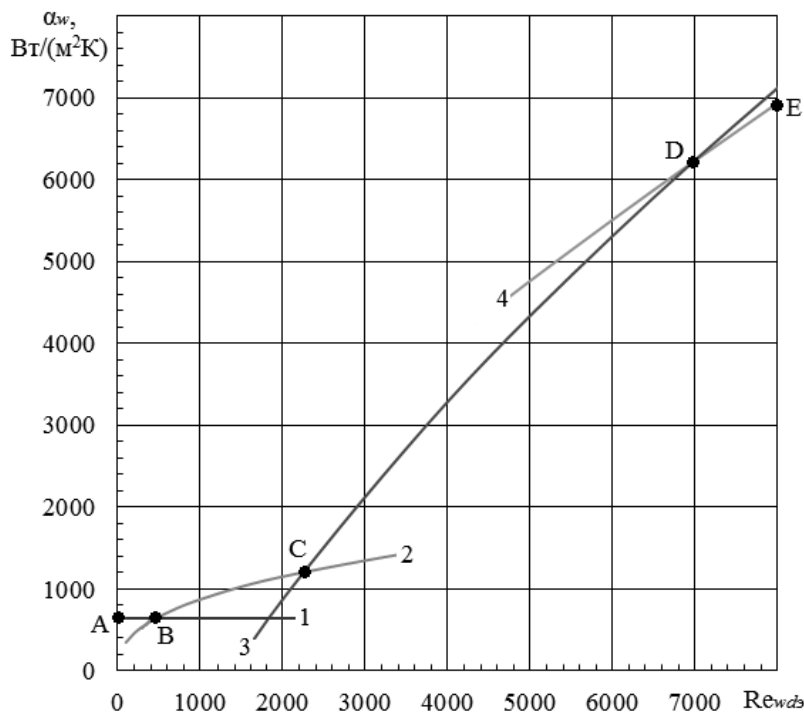


Рис. 1. Изменение коэффициента теплоотдачи между охлаждающей жидкостью и стенкой трубки для охладителя наддувочного воздуха в зависимости от режима течения воды

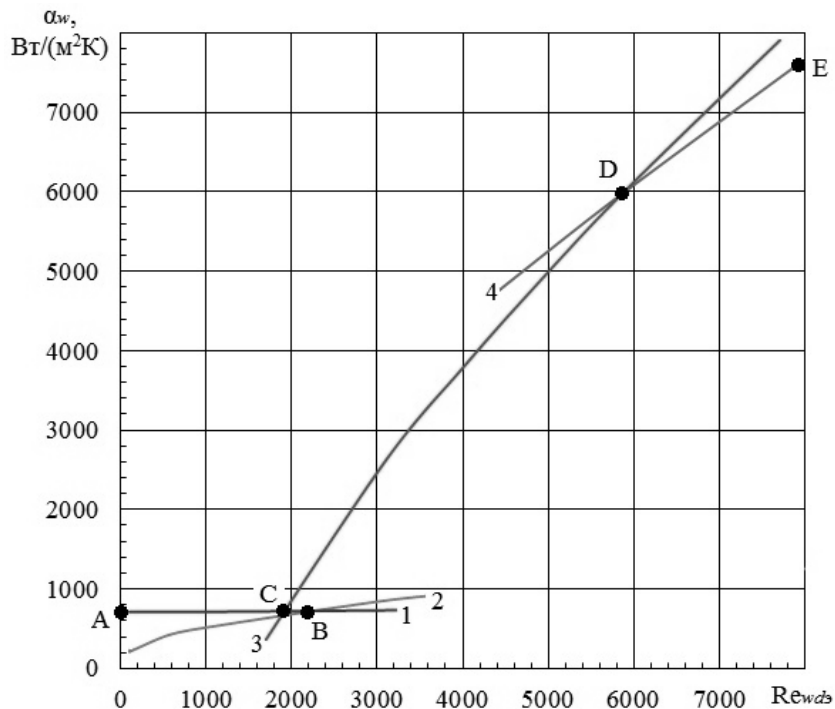


Рис. 2. Изменение коэффициента теплоотдачи между охлаждающей жидкостью и стенкой трубки для радиатора в зависимости от режима течения воды

Из рис. 2 видно, что координаты точек *A*, *B*, *C*, *D* и *E* существенно изменились. Более того, теперь теплообмен будет проходить по ломаной кривой *ACDE*, т. е. он должен быть описан без использования формулы (2). Здесь переходный режим заканчивается в точке *C*, для которой $W < 15$, и после которой коэффициент теплоотдачи (в соответствии со значением W) должен вычисляться по формуле (3). Изменение условий теплообмена в данном случае совершенно логично соответствует иным условиям теплопередачи в другом теплообменном аппарате, а использование тех или иных формул не противоречит рекомендациям их авторов. Определяя математически точно границы использования формул (1)–(4), мы никоим образом не претендуем на уточнение рекомендаций авторов формул. Будучи предложенными и соответственным образом записанными, эти формулы могут быть применены в расчетных методиках с учетом определенных условий (отсутствие скачкообразных переходов на границах применимости формул). Этим условиям отвечает описание процесса теплообмена, соответствующее приведенным рисункам.

ВЫВОДЫ. Непротиворечивое толкование непрерывного процесса теплоотдачи требует математического установления границ применимости зависимостей по определению средних для теплообменного аппарата коэффициентов теплоотдачи. То, что границы несколько изменяются с условиями теплопередачи, не противоречит толкованиям авторов формул и позволяет, в то же время, использовать эти формулы в расчетных методиках.

Авторы статьи не считают возможным специально толковать выясненную особенность границ применимости формул, поскольку предложенные формулы являются приближенными и эмпирическими. В то же время данная особенность является существенной с точки зрения технического использования данных формул. Она требует создания в расчетных методиках специальных процедур определения границ применимости и учета изменяемости этих границ в зависимости от исходных данных задач расчетов. Процедуры по установлению границ применимости формул обуславливают протекание процесса теплообмена по тем или иным закономерностям в зависимости от найденных границ применимости.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Берман С. С. Теплообменные аппараты и конденсационные устройства турбоустановок [Текст] / С. С. Берман. — М. : МАШГИЗ, 1959. — 428 с.
- [2] Гоголин А. А. Кондиционирование воздуха в мясной промышленности [Текст] / А. А. Гоголин. — М. : Пищевая промышленность, 1966. — 239 с.

- [3] **Кейс В. М.** Компактные теплообменники [Текст] / В. М. Кейс, А. Л. Лондон; пер. с англ.; под ред. Ю. В. Петровского. — М. : Энергия, 1967. — 224 с.
- [4] **Михеев М. А.** Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. — М. : Энергия, 1977. — 344 с.
- [5] **Петровский Ю. В.** Современные эффективные теплообменники [Текст] / Ю. В. Петровский, В. Г. Фастовский. — М. : Госэнергоиздат, 1962. — 265 с.
- [6] Промышленные тепломассообменные процессы и установки: учебник для вузов [Текст] / А. М. Бакластов, А. В. Горбенко, О. Л. Данилов и др. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 328 с.
- [7] Справочник по теплообменникам [Текст]; в 2-х т. / пер с англ.; под ред. Б. С. Петухова, В. К. Шикова. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 560 с.
- [8] Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент : Справочник : Т. 2 [Текст] / Е. В. Аметистов, В. А. Григорьев, Б. Т. Емцев и др.; под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. — М. : Энергоиздат, 1982. — 512 с.
- [9] Теплопередача [Текст] : учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел и др. / 3-е изд. — М. : Энергия, 1975. — 488 с.
- [10] Теплотехнический справочник : в 2 т. [Текст] / под общ. ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева. — М. : Энергия, 1976. — 896 с.
- [11] **Хоблер Т.** Теплопередача и теплообменники [Текст] / Т. Хоблер; пер. с пол.; под ред. проф. П. Г. Романкова. — Л. : Госхимиздат, 1961. — 820 с.
- [12] **Эккерт Э. Р.** Теория тепло- и массообмена [Текст] / Э. Р. Эккерт, Р. М. Дрейк; пер. с англ.; под ред. А. В. Лыкова. — М.–Л. : Госэнергоиздат, 1961. — 680 с.

© Ю. Л. Мошенцев, О. А. Гогоренко

Надійшла до редколегії 29.11.17
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *Б. Г. Тимошевський*