

Кривошей Ф.А., Богдан Ю.А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ОБТЕКАНИИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СУДОВЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Получено выражение для определения плотности теплового потока на неизотермической поверхности охладителя наддувочного воздуха.

Ключевые слова: теплопередача, неизотермическая поверхность, тепловой поток

При расчетах конвективного теплообмена граничная поверхность теплообмена, как правило, полагается изотермической (или слабо неизотермической). Временная зависимость коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$ обусловлена только временными изменениями режима движения омывающей поверхности среды. Такой подход в приближении граничных условий III рода предполагает, что α не зависит от распределения температур на границе раздела (температурного напора). Для ряда задач конвективного теплообмена такое приближение не приводит к существенным погрешностям и его точности достаточно при решении практических задач для различных энергетических устройств с конвективным теплообменом.

Совершенно иная физическая ситуация возникает, когда граничная поверхность теплообмена неизотермична, то есть температурный напор $\Delta T = T_{II}(y, t) - T_C(t)$ существенно зависит от координаты вдоль по потоку y . В ряде работ [1-4] было показано, что в задачах с существенной неизотермичностью границы раздела использование коэффициента теплоотдачи для изотермической поверхности приводит не только к большим погрешностям, но и к качественно неправильным результатам. Оказалось, что пренебрежение зависимостью α от условий на границе в определенных ситуациях приводит к обращению в нуль плотности теплового потока при конечном температурном напоре $\Delta T \neq 0$ либо при нулевом температурном напоре $\Delta T = 0$ плотность теплового потока отлична от нуля. В первой ситуации коэффициент теплоотдачи обращается в нуль, а во второй вообще понятие коэффициента теплоотдачи теряет смысл [5, 6]. Поэтому был сделан вывод, что точные результаты в задачах с существенно неизотермическими поверхностями могут быть получены только при постановке таких задач как сопряженных. В этих задачах используются граничные условия IV рода (условия сопряжения) – равенства температур и плотностей теплового потока на границе раздела. В [5] отмечено, что поскольку методы решения уравнений теплопроводности разработаны сравнительно хорошо, основная трудность решения сопряженной задачи заключается в решении уравнений пограничного слоя для неизотермических поверхностей. Там же показано, что функция плотности теплового потока на неизотермической поверхности теплообмена описывается рядом

$$q_{II}(y, t) = \alpha_* (\Delta T + \sum_{n=1}^{\infty} g_n y^n \frac{\alpha^n \Delta T}{\alpha y^n}), \quad (1)$$

где α_* – коэффициент теплоотдачи для изотермической поверхности;

$\Delta T = T_{II}(y, t) - T_C(t)$ – температурный напор на поверхности раздела;

$g_n = (-1)^{n+1} f(1), f$ – функция влияния не обогреваемого участка.

Удерживая только первый член выражения (1), получим граничное условие III рода.

При решении обратной задачи восстановления плотности теплового потока на границе раздела нет необходимости решать задачу для пограничного слоя. Поскольку температуры, измеряемые на неизотермической поверхности теплообмена, несут в себе информацию о тепловых и гидродинамических процессах в пограничном слое, фактически обратная задача сводится к восстановлению распределения плотности теплового потока на границе раздела.

Предполагая такой подход, проинтегрируем двумерное нестационарное уравнение теплопроводности по координате x в интервале $[0, b]$, тогда получим

$$\int_0^b c \frac{\partial T}{\partial t} dx - q_{II}(y, t) - \int_0^b \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} dx = 0, \quad (2)$$

где q , α , $\Delta T = T_{II}(y, t) - T_c(t)$ – соответственно плотность теплового потока, неизотермический коэффициент теплоотдачи, температурный напор, $T_c(t)$ – температура омывающей среды, c – удельная теплоемкость.

Предположим существование статической зависимости между координатой y вдоль по потоку и q , связанной с случайными ошибками при измерении координат термодатчиков при экспериментальном измерении температур неизотермической поверхности. Физические процессы конвективного теплообмена являются по сути статическими процессами, особенно при наличии турбулентности, кипения и т. п. Приближение простой статической зависимости и между величинами q и ΔT через случайную координату y предполагает в данном случае, что ансамбль статических зависимостей сложного явления конвективного теплообмена «загоняется» в случайную величину координаты $y = \langle y \rangle + \delta y$, $\langle \delta y \rangle = 0$, где $\langle y \rangle$ – осредненное значение, δy – случайная флуктуация (ошибка) измерений. Покажем, что даже такая простая статическая корреляция между q_{II} и y позволяет обнаружить качественную зависимость между этими величинами.

Поскольку функция $q_{II}(y, t)$ входит в выражение (2) в виде свободного члена, для зацепления ее со статической величиной y проинтегрируем (2) по координате y , полагая $\lambda = const$

$$\int_0^y \int_0^b c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy - \int_0^y \alpha(y', t) \Delta T(y', t) dy' - \lambda \left[\int_0^b (T - T_{y=0}) dx - y \int_0^b \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} dx \right] = 0 \quad (3)$$

Теперь осредним второй интеграл в (3) по реализациям случайной величины ошибки отсчета координат δy с произвольным распределением вероятностей и затем продифференцируем полученное выражение по y . Тогда для среднего значения плотности теплового потока $\bar{\alpha} \Delta \bar{T}$ получим следующие выражение

$$\int_0^b c \frac{\partial T}{\partial t} dx - \left(\bar{\alpha} \Delta \bar{T} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} K_{n+1} \frac{\partial^n \bar{\alpha} \Delta \bar{T}}{\partial \bar{y}^n} \right) - \lambda \left[\int_0^b (T - T_{y=0}) dx - \bar{y} \int_0^b \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{\bar{y}=0} dx \right] = 0, \quad (4)$$

где K_{n+1} – кумулянты случайной величины флуктуации (ошибки) δy . Если положить $\bar{\alpha} = \alpha_*$, то получим в круглых скобках выражение аналогичное (1). Для гауссовской случайной величины δy со средним значением $\langle \delta y \rangle = 0$ единственным отличным от нуля кумулянтном

является $K_2 = \sigma_y^2$. Если учесть рекуррентную связь между моментами и кумулянтами случайной величины δy , то получаем

$$\langle \alpha \Delta T \delta y \rangle = \bar{\alpha} \Delta \bar{T} + \sum_{n=1}^{\infty} (2n-1)!! \delta^{2n} \frac{\partial^n \bar{\alpha} \Delta \bar{T}}{\partial \bar{y}^n}. \quad (5)$$

Очевидно, что все моменты нечетного порядка равны нулю и в выражении (5) будут фигурировать только четные степени дисперсии σ^{2n} .

Анализ описаний процедуры и ее результат позволяют прийти к выводу, что статистическая зависимость между q_{Π} и случайной координатой неизотермической поверхности приводит к качественному результату: плотность теплового потока зависит от градиента температур неизотермичной поверхности. Таким образом, учет статической корреляции $\langle \alpha \Delta T \delta y \rangle$ и моментов высших порядков приводит независимо от [5] путем к качественно одинаковому результату [1]. В отличие от (1) в случае гауссовского характера флуктуаций δy множитель при производных в (5) не содержит координату y . При произвольном (не гауссовском) распределении вероятностей случайной величины δy ее кумулянты K_{n+1} являются функцией координаты (хотя бы из соображений размерности). При $K_{n+1} = f(y)$ получаем прямой аналог дифференциальной формы (1). Статистический подход к влиянию неизотермичности и результат (5) позволяют также установить еще один из физических аспектов влияния неизотермичности границы раздела. Действительно, из выражения (5) следует, что влияние неизотермичности – немарковский процесс, т.е. процесс с последствием: все последующие (вниз по потоку) значения $q_{\Pi}(y, t)$ зависят от предыдущих (выше по потоку).

Для определения q_{Π} используем выражение

$$q_{\Pi} = \frac{\alpha c}{R} \left\{ \int_0^R r T dr - \alpha \int_0^R \int_0^t r T \exp[-\alpha(t-t')] dt' dr \right\}, \quad (6)$$

для определения плотности теплового потока на поверхности цилиндрической трубы воздухоохладителя надувочного воздуха. Эта поверхность существенно неизотермична из-за высоких градиентов температур вдоль по потоку $\Delta T(y)$.

По выражению (6) вычислены значения плотности теплового потока q_{Π} для изотермической поверхности и неизотермической. Отмечаются значительное (до 45%) расхождение q_{Π} на начальном участке теплообмена $y[0, y_1]$. При проектировании и расчетах теплообмена в воздухоохладителе такое расхождение может привести к более высоким значениям температуры воздуха. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению заряда воздуха и, как следствие, к падению мощности двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chapman P. R., Rubesin H. W.* Temperature and velocity profiles in the compressible laminar boundary layer with arbitrary distribution of surface temperature//Journ. Aeron. Sci. 1949. V16. N9. p. 547-565.
2. *Baster D.C., Reynolds W.C.* Fundamentation solution for heat transfer for nonisothermal flat plate.// Journ. Aer. Sci. 1958. V25. N6.

3. Лыков А. В., Перельман Т. Л. О нестационарном теплообмене между телом и обтекающим его потоком жидкости//Тепло- и массообмен тел с окружающей средой. Минск. 1965.
4. Перельман Т. Л. О сопряженных задачах теплообмена//Тепло- и массоперенос. Минск. Изд-во АНБССР. 1963. Т. 5
5. Дорфман А. Ш. Теплообмен при обтекании неизотермических тел. М. Энергия. 1982. 192с.
6. Дорфман А. Ш., Липовецкая О. А. Теплопередача произвольно неизотермических поверхностей при градиентном турбулентном течении несжимаемой жидкости в широком диапазоне чисел Прандтля и Рейнольдса.//Теплофизика высоких температур. 1976. Т. 14. №1.

Кривошей Ф.О., Богдан Ю.О.

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНИХ УМОВ ТЕПЛОВІДАЧІ ПРИ ОБТІКАННІ НЕІЗОТЕРМІЧНИХ ПОВЕРХОНЬ СУДНОВИХ ТЕПЛОБМІННИХ АПАРАТІВ

Отримано вираз для визначення густини теплового потоку на неізотермічній поверхні охолоджувача наддувального повітря.

Ключові слова: теплопередача, неізотермічна поверхня, тепловий потік.

Krivoshey F. A., Bogdan Y. A.

DETERMINATION OF BOUNDARY CONDITIONS OF HEAT TRANSFER AT FLOWING AROUND NON-ISOTHERMAL SURFACES OF SHIPS' HEAT EXCHANGERS

Solution for heat transfer for non-isothermal cylindric surface of air cooler.

Keywords: heat transfer, non-isothermal surface, heat flux.

УДК 629.12.001.11

Майборода А.Н., Косяковский А.В., Олійник К.А.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ СКАЧКОВ УПЛОТНЕНИЯ В ВОДЕ ПРИ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ ДВИЖЕНИЯ

Рассматривается проявление сжимаемости воды при движении со сверхзвуковыми скоростями при числах $M \leq 1.5$. Выполнен сравнительный анализ основных параметров и условий присоединения скачков уплотнения в воде и воздухе. Получены зависимости угла отклонения потока воды в скачке уплотнения от угла наклона скачка. Построена зависимость числа M присоединения скачка уплотнения в воде от угла атаки тонкого профиля. Полученные результаты могут быть использованы для расчёта гидродинамических нагрузок на сверхскоростных подводных телах.

Ключевые слова: вода, сжимаемость, сверхзвуковые скорости, скачки уплотнения.

Интерес к изучению газодинамических свойств воды вызван потребностью разработки методов расчёта гидродинамических характеристик сверхскоростных технических средств, взаимодействующих с водной средой (спускаемые космические аппараты, подводные средства поражения и др.).

При движении со сверхзвуковой скоростью перед телом движется скачок уплотнения, форма и относительное положение которого определяются числом M и геометрией носовой оконечности тела.