

Министерство высшего и среднего специального образования
У С С Р

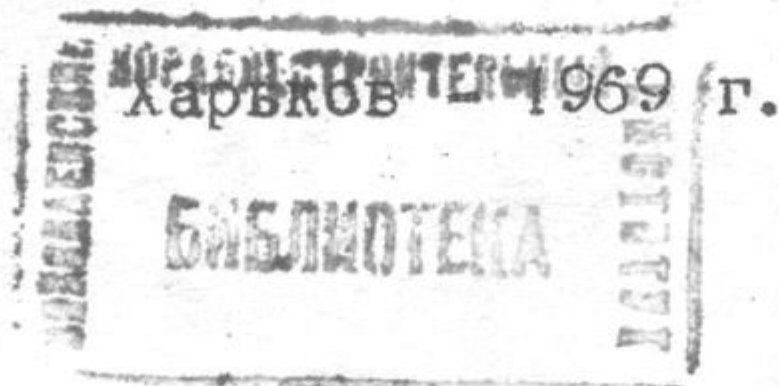
ХАРЬКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени В.И.ЛЕНИНА

АВАД МАХМУД МУСТАФА АЛИ

ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНОЙ С НЕСТАЦИОНАРНОЙ
ТЕМПЕРАТУРОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ЛАМИНАРНО ОБТЕКАЮЩИМ
ЕЁ ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ.

№ 273 - Промышленная теплоэнергетика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Харьковский ордена Ленина политехнический институт имени В.И.Ленина, направляя автореферат, просит прислать отзыв в 4-х экземплярах (заверенный печатью) и принять участие в заседании Ученого Совета энергомашиностроительного факультета, посвященного публичной защите этой диссертации.

Защита намечается на " 23 " мая 1969 г. Окончательная дата и время будут опубликованы в газете "Соц. харківщина" за 10 дней до защиты.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Диссертация выполнена на кафедре общей теплотехники Харьковского ордена Ленина политехнического института имени В.И.Ленина. Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент Павловский Г.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент Капинос В.М., кандидат технических наук Поволоцкий Л.В.

Ведущее предприятие: Харьковский филиал института Механики АН УССР.

Автореферат разослан " 21 " апреля 1969 года.

Адрес для направления отзывов на автореферат - г. Харьков, ул. Журавля, 21.

УЧЕНЫМ СЕКРЕТАРЬ

ХПИ им. В.И.ЛЕНИНА /ШЛЕХОТКИН И.М./

Проблема переноса тепла в условиях вынужденной конвекции с поверхности, температура которой меняется во времени, встречается во многих отраслях техники и приобретает все возрастающее значение. Практически такой теплообмен имеет место в процессах нестационарного режима работы ядерного реактора, в ракетах, скорость полета которых меняется на траектории, в теплоэнергетике при нагревании элементов энергетического оборудования, в металлургии при нагревании и охлаждении металла.

С развитием энергетики и совершенствованием высокоинтенсивных технологических процессов в различных отраслях промышленности исследованию переходных процессов при нестационарном режиме уделяется все большее внимание.

Конвективный теплообмен при нестационарном режиме является одним из новых и малоизученных вопросов. Он еще далек от того уровня разработки, который, например, характерен для теории нестационарной теплопроводности. В литературе нет достаточных сведений о влиянии тепловой нестационарности на значение коэффициентов конвективного теплообмена.

В настоящее время часто рассматривают нестационарные тепловые процессы в промышленности и в других отраслях техники как квазистационарные. Однако, при таком подходе к расчету нестационарных процессов во многих случаях результаты расчета не согласуются с опытными

данными, что свидетельствует о неправильности методики расчета.

Целью настоящей работы являются исследование процессов конвективного теплообмена при установившемся ламинарном обтекании плоской пластины с нестационарной температурой поверхности.

Аналитически исследуется нестационарный теплообмен при произвольном изменении температуры поверхности. Рассмотрены случаи, когда до начала нестационарного процесса температура поверхности пластины равна или неравна температуре потока жидкости.

Наряду с теоретическим исследованием вопроса проводились экспериментальные исследования, целью которых являлось подтверждение результатов аналитического решения поставленных задач, а также выяснение зависимости коэффициентов нестационарного теплообмена от теплофизических свойств и размеров нагреваемого тела при тождественных гидродинамических условиях.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Первая глава диссертации посвящена анализу известных теоретических и экспериментальных работ по влиянию тепловой нестационарности на конвективный коэффициент теплообмена. В последнее время опубликовано несколько работ, посвященных решению уравнения нестационарного переноса тепла в случае ламинарного и турбулентного

потока, ограниченного цилиндрической поверхностью или ограниченного параллельными плоскими пластинами. Кроме того, появились несколько работ, посвященных нестационарному теплообмену между телом и обтекающим его потоком жидкости. Свсс, Гудмэн, Рукинштейн и Розеншток аналитически исследовали нестационарный конвективный теплообмен от плоской пластины. Кудряшев Л.И. и Смирнов А.А. экспериментально исследовали нестационарный теплообмен при продольном обтекании цилиндра. Нестационарный массообмен экспериментально рассматривали Кацнельсон Б.Д. и Тимофеева Ф.А., Попов В.П. и Покрываило И.А.

В большинстве известных работ в области нестационарной вынужденной конвекции рассматривается случай внезапного изменения температуры поверхности. Нам неизвестны опубликованные работы, посвященные исследованию нестационарного теплообмена для случая, когда при установившихся динамическом и тепловом пограничных слоях температура поверхности произвольно изменяется во времени. Экспериментальных работ по нестационарному теплообмену мало, а работы по экспериментальному исследованию локальных нестационарных коэффициентов конвективного теплообмена вообще отсутствуют.

Вторая глава диссертации посвящена аналитическому исследованию нестационарного теплообмена при вынужденном обтекании плоской пластины для случаев, когда до начала нестационарного процесса температура поверхности пласти-

ны равна или неравна температуре потока жидкости.

Для случая, когда температура поверхности пластины в начале постоянна и равна температуре потока жидкости, а затем она внезапно изменилась скачком и поддерживалась постоянной, уравнение переноса энергии решилось интегральным методом. Полученное при этом дифференциальное уравнение в частных производных первого порядка решалось методом характеристик, методом преобразования Лапласа и методом подобия.

Тепловой поток в этом случае описывается следующими соотношениями:

$$\frac{q}{q_{кв}} = \frac{Nu_x}{Nu_{x,кв}} = \left(\frac{\delta}{\delta_a}\right)^{-1/2}; \quad \delta \leq \delta_a, \quad (1)$$

$$\frac{q}{q_{кв}} = \frac{Nu_x}{Nu_{x,кв}} = 1; \quad \delta \geq \delta_a, \quad (2)$$

где

$$\frac{q_{кв} x}{\lambda \vartheta_{\omega}} = Nu_{x,кв} = 0.332 Pr^{1/3} Re_x^{1/2}. \quad (3)$$

Время образования теплового пограничного слоя δ_a , которое в этом случае равно времени перехода в стационарный режим δ'_a , определяется соотношением

$$\delta_a = \frac{U \tau_a}{x} = 2.56 Pr^{1/3}. \quad (4)$$

Выражения (1) и (2) довольно хорошо согласуются с данными Сэсса, Гудмэна и Рукинштейна.

Значение времени образования теплового пограничного слоя τ_a , данное соотношением (4), хорошо согласуется с результатами, данными Сэссом и Розенштоком, и больше результата, данного Гудмэном, в два раза. Причиной такого отклонения является предположение Гудмэна о линейном профиле распределения скоростей в пограничном слое.

Два предельных решения (1) и (2) с помощью преобразования Лапласа методом аппроксимации были объединены в одно решение, годное для всех временных интервалов. Это приближенное решение имеет следующий вид:

$$\frac{q}{q_{кв}} = \left(\frac{\delta}{\delta_a}\right)^{-1/2} \exp\left(-\frac{4}{\pi} \frac{\delta}{\delta_a}\right) + \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{4}{\pi}} \frac{\delta}{\delta_a}\right). \quad (5)$$

Решения (1), (2) и (5) были обобщены на случай произвольного изменения температуры поверхности пластины с помощью теоремы Драмеля.

$$\frac{q}{q_{кв}} = \frac{1}{\vartheta_{\omega}} \left(\frac{\delta}{\delta_a}\right)^{-1/2} \left[\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{2k}{(2k-1) \cdot k!} \delta^k \vartheta_{\omega}^{(k)}(\delta) \right]; \quad \delta \leq \delta_a, \quad (6)$$

$$\frac{q}{q_{кв}} = 1 + \frac{1}{\vartheta_{\omega}} \left[\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{1}{(2k-1) \cdot k!} \delta_a^k \vartheta_{\omega}^{(k)}(\delta) \right]; \quad \delta \geq \delta_a \quad (7)$$

и

$$\frac{q}{q_{кв}} = \frac{1}{\vartheta_{\omega}} \int_0^{\delta} \left[\left(\frac{t}{\delta_a}\right)^{-1/2} \exp\left(-\frac{4}{\pi} \frac{t}{\delta_a}\right) + \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{4}{\pi}} \frac{t}{\delta_a}\right) \right] \vartheta_{\omega}'(\delta-t) dt. \quad (8)$$

Пределные решения (6) и (7) были сопоставлены с приближенным решением (8) при скачкообразном и линейном изменении температуры поверхности во времени, и было установлено, что приближенное решение для всех временных интервалов является логическим обобщением двух предельных решений.

Соотношения (6) и (7) были представлены в виде кривых для различных функций изменения температуры поверхности. Из приведенных графиков видно, что чем резче изменяется температура поверхности во времени, т.е. чем больше параметр нестационарности $\dot{v}_w/v_w$, тем интенсивнее тепловой поток и тем больше время перехода в квазистационарный теплообмен β_a . При больших значениях времени мгновенное значение теплового потока приближается к значению при квазистационарном теплообмене.

В результате анализа приведенных кривых установлено, что в процессе нагревания после некоторого отрезка времени ($\beta > \beta_a$) коэффициент теплообмена практически не зависит от тепловой нестационарности и остается постоянной величиной, хотя температура поверхности продолжает изменяться.

В случае, когда температура поверхности пластины постоянна и отличается от температуры потока жидкости, т.е. когда имеет место стационарный теплообмен, а затем температура поверхности произвольно изменяется во времени, предполагалось, что толщина пограничного слоя

не изменяется, а изменяется только температурное поле в нем. На основе этого предположения установлен температурный профиль в виде кубической параболы.

В этом случае тепловой поток на поверхности описывается соотношением

$$\frac{q}{q_{kv}} = 1 + 3,41 P_r^{1/3} \left(\frac{x}{U} \right) \frac{\dot{v}_w(\tau)}{v_w(\tau)} \quad (9a)$$

или

$$\frac{q}{q_{kv}} = 1 + 1,33 \beta_a \frac{\dot{v}_w(\beta)}{v_w(\beta)} \quad (9b)$$

Если $|v_w|$ увеличивается во времени, т.е. $\dot{v}_w$ и v_w имеют одинаковый знак, то отношения тепловых потоков q/q_{kv} будет больше единицы и наоборот.

Из соотношений (4) - (9) видно, что эффект нестационарности наиболее важен для больших чисел Прандтля, т.е. чем больше число Прандтля, тем интенсивнее изменяется отношение тепловых потоков, и тем больше будет время перехода в квазистационарный режим и время образования теплового пограничного слоя. Эффект нестационарности наиболее важен также для малых скоростей потока жидкости и больших расстояний от передней кромки пластины.

Третья глава посвящена описанию экспериментальной установки и методике проведения опытов.

Экспериментальное изучение нестационарного теплообмена между плоской пластиной и потоком воздуха проводилось методом охлаждения объекта исследования в аэродинамической трубе разомкнутого типа прямоугольного сечения размером 450 x 450 мм.

Объектом исследования служила трехполосовая плоская пластина длиной 75,4 мм и толщиной 0,4 мм. Пластина изготовлена из константановых лент толщиной 0,1 мм и шириной 25 мм. Каркасом пластины служила стеклянная ткань, к обеим сторонам которой приклеены клеем БФ-2 константановые полосы. Между одной стенкой пластины и стеклянной тканью на определенном расстоянии друг от друга расположены двенадцать медно-константановых термопар, горячие спай которых сварены с внутренними поверхностями стенки.

Нагревалась вся высота пластины постоянным электрическим током, но исследуемым участком служила только центральная часть пластины высотой 100 мм. На этом участке пластины измерялось падение напряжения. Ограниченная высота исследованного участка была выбрана с целью уменьшить влияние неравномерности скоростного поля по высоте трубы, а также с целью избежать концевых потерь тепла.

Равномерность температурного поля по высоте исследуемого участка контролировалась четырьмя термопарами, расположенными по его высоте.

Средняя скорость воздуха в рабочем участке определялась путем измерения расхода воздуха через измерительный участок трубы. Температура пластины, падение напряжений и сила тока регистрировались осциллографом типа Н-700.

Первая серия опытов была проведена для случая, когда в начале температура пластины равнялась температуре воздуха, а затем внезапно включился греющий ток. Вторая серия опытов проведена для случая, когда температура пластины не равна температуре воздуха, т.е. когда через пластину проходил ток постоянной величины, а затем сила тока произвольно изменялась. Опыты проводились при разных скоростях потока воздуха и разной силе электрического тока.

Так как отвод тепла от пластины происходит как конвективным, так и лучистым теплообменом, то при определении конвективного коэффициента теплообмена необходимо было определить зависимость степени черноты константановой ленты от температуры ее поверхности. Эта зависимость определялась новым разработанным методом.

Предлагаемый метод является сравнительным и состоит в том, что сравниваются количества тепла, передаваемые в окружающую среду поверхностью образца и поверхностью эталона, степень черноты поверхности которого известна.

Четвертая глава посвящена анализу экспериментальных результатов и сопоставлением их с теоретическими.

Предполагая, что коэффициент неравномерности температурного поля в пластине равен единице, электрический ток равномерно распределяется по всей ширине пластины, нет тепловых потерь на концах исследуемого участка и нет передачи тепла теплопроводностью вдоль пластины (все эти предположения близки к действительности), мгновенное значение коэффициента конвективного теплообмена определялось следующим образом:

$$\alpha = \left\{ \left[q_s - c'' \left(\frac{\partial T_w}{\partial \tau} \right) \right] / v_w \right\} - \alpha_n. \quad (10)$$

Результаты опытов были представлены в форме отношения мгновенного значения теплового потока к значению потока при стационарном режиме.

Из анализа опытов следует, что изменение коэффициентов теплообмена по экспериментальным данным имеет такой же характер как и по данным аналитических решений. Эффект нестационарности более существенен для большой удельной мощности источников тепла (резкого изменения температуры поверхности), малой скорости потока воздуха и большого расстояния от передней кромки пластины.

Темп изменения температуры поверхности во времени, при тождественных гидродинамических условиях, можно изменить или путем уменьшения толщины стенки, ее теплоемкости и плотности, сохраняя постоянное количество выделяющегося в пластине тепла, или путем изменения

греющего тока для одной и той же пластины.

Влияние теплофизических свойств и размеров тела на нестационарный коэффициент теплообмена, при тождественных гидродинамических условиях, экспериментально определялось путем изменения величины греющего тока.

Установлено, что эффект нестационарности более существенен для тел малых размеров, с малыми значениями теплоемкостей и плотностей.

При сопоставлении экспериментальных данных с теоретическими, для условий теплообмена когда температуры поверхности и жидкости вначале процесса одинаковы, было обнаружено, что при малых отрезках времени, отношение $q/q_{\kappa B}$ (или $\alpha/\alpha_{\kappa B}$), полученное экспериментально, превышает теоретическое значение. Причиной этого расхождения является инерционность измерительной системы, в первую очередь инерционность термопар.

В заключение приведено сравнение нестационарного теплообмена пластины и тел других форм при внешнем обтекании. Общий для всех тел, при нестационарном конвективном теплообмене, является перестройка температурного поля в пограничном слое. Установлено, что соотношение (7) для случая, когда температура поверхности пластины изменяется во времени по квадратичной параболе, хорошо согласуется с формулой, полученной Кутателадзе С.С. на основе экспериментального исследования Кацнельсона Б.Д. и Тимофеевой Ж.А. при обтекании частиц.

Для оценки отклонения нестационарного процесса теплообмена от стационарного установлено наименьшее значение параметра нестационарности. Считая тепловой процесс нестационарным, если мгновенное значение теплового потока отличается на 2% от значения при квазистационарном режиме, получено

$$\left| \frac{\dot{q}'_w(\tau)}{\dot{q}_w(\tau)} \right| \geq 0,006 \left(\frac{U}{x} \right) P_r^{-1/3} \quad (11 \text{ а})$$

или

$$\left| \frac{\dot{q}'_w(\zeta)}{\dot{q}_w(\zeta)} \right| \geq 0,006 P_r^{-1/3} \quad (11 \text{ б})$$

Такое значение параметра нестационарности имеет место при некоторых реакциях, в ядерных реакторах и в ракетах, где температура поверхности резко изменяется во времени. В паросиловых установках такое значение параметра нестационарности не осуществимо. В этом случае не ожидается влияния тепловой нестационарности на коэффициент теплообмена.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.

1. Получены аналитические решения, описывающие нестационарный теплообмен между пластиной и обтекающим ее потоком жидкости для разных случаев изменения температуры поверхности во времени.

2. Когда температуры поверхности и потока жидкости вначале одинаковы, значения коэффициентов теплообмена изменяются от весьма больших величин до значений, соответствующих стационарному процессу теплообмена. В случае когда температуры поверхности и потока вначале неодинаковы, мгновенный коэффициент теплообмена может быть как больше так и меньше его стационарного значения.

3. Отклонение от квазистационарного теплообмена, т.е. эффект нестационарности увеличивается с увеличением числа Прандтля, расстояния от передней кромки пластины и удельной мощности источников тепла, а также уменьшается с увеличением скорости потока жидкости, толщины стенки и ее теплоемкости и плотности.

4. Теоретически и экспериментально установлено наименьшее значение параметра нестационарности, при котором нестационарные процессы можно с достаточной степенью точности рассматривать как квазистационарные и вести расчеты, используя соотношения, справедливые для стационарных процессов.

5. При расчете нестационарных процессов, где вначале не имеет место теплообмен, значения квазистационарных коэффициентов теплообмена не могут быть использованы.

6. Разработан и внедрен новый метод для определения степени черноты в зависимости от температуры поверхности.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

$$Nu_x = \frac{\alpha x}{\lambda}; Re_x = \frac{Ux}{\nu}; Pr = \frac{\nu}{\alpha}; Gr = \frac{U\tau}{x}; \vartheta = T - T_{\infty};$$

T - температура; τ - время; τ_a - время образования теплового пограничного слоя; τ'_a - время перехода в квазистационарный режим; x - линейная координата, отсчитываемая вдоль пластины от передней кромки;

y - линейная координата, отсчитываемая по нормали к пластине; U - скорость потока жидкости; ν - коэффициент кинематической вязкости; α - коэффициент температуропроводности; λ - коэффициент теплопроводности; α - конвективный коэффициент теплообмена;

α_l - лучистый коэффициент теплообмена; q - плотность теплового потока; q_s - тепло, выделяющееся в пластине на единице поверхности; C'' - теплоемкость пластины, отнесенная к единице поверхности; t - переменная интегрирования.

Индексы: kv - квазистационарная теплоотдача, ω - условия на поверхности пластины; ∞ - условия в невозмущенном потоке.

Основные результаты диссертации содержатся в следующих статьях:

1. Павловский Г.И. и Авад М.М.А., "Теплообмен между плоской пластиной с нестационарной температурой поверхности и ламинарно обтекающим ее потоком жидкости", Изв. (в печати).

2. Авад М.М.А., Братута Э.Г. и Шевелев А.А., "К определению степени черноты некоторых тел", Изв. ВУЗ, ов, Энергетика (в печати).

Материалы данной работы докладывались на научно-технических конференциях ХПИ имени В.И.Ленина в 1967 и 1968 г.г.