

9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.— М.: Наука, 1969.
 10. Крайко А. Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной «собственного» давления // ПММ.— 1979.— Т. 43, вып. 3.
 11. Тирский Г. А. Условия на поверхностях сильного разрыва в многокомпонентных смесях // ПММ.— 1961.— Т. 25, вып. 2.

Поступила 3/VI 1986 г.

УДК 532.526

ВЛИЯНИЕ РЕЗКОЙ СМЕНЫ ТЕПЛОВЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ НА ПЛАСТИНЕ

Л. Н. Дроздова, А. Л. Сорокин
(Новосибирск)

Развитие теплового турбулентного пограничного слоя внутри уже сформированного динамического — ситуация, которая часто встречается в практике расчета теплообменных устройств. На рис. 1 представлена схематическая постановка данной задачи. На пластину с сечения $x = x_0$ (x_0 — длина необогреваемого участка) действует однородный тепловой поток q_w , либо температура поверхности «скачком» изменяется до T_w . Здесь δ_0 — толщина динамического пограничного слоя в сечении «скачка», L — длина участка теплообмена, u_e и T_e — скорость и температура основного потока. Течение квазиизотермическое. Данная задача в [1, 2] решена интегральными методами. Но этот подход недостаточно общий, так как требует дополнительной эмпирической информации. Кроме того, интегральным методом трудно получить подробную картину течения.

В настоящей работе для решения поставленной задачи применялся конечно-разностный метод Патанкара — Сполдинга решения системы дифференциальных уравнений пограничного слоя. Метод занижает значение числа Стантона St , особенно вблизи сечения $x = x_0$, где расхождение между экспериментальными результатами и расчетом составляет около 40% для данных из [2] и около 15% — из [3].

Указанный метод применялся и другими авторами [4] для решения аналогичной задачи. Видимо, они испытывали похожие затруднения, так как для получения согласия между экспериментом и расчетом в зоне «скачка» подбирали турбулентное число Прандтля Pr_T по сечению пограничного слоя. Расчет проведен с переменным

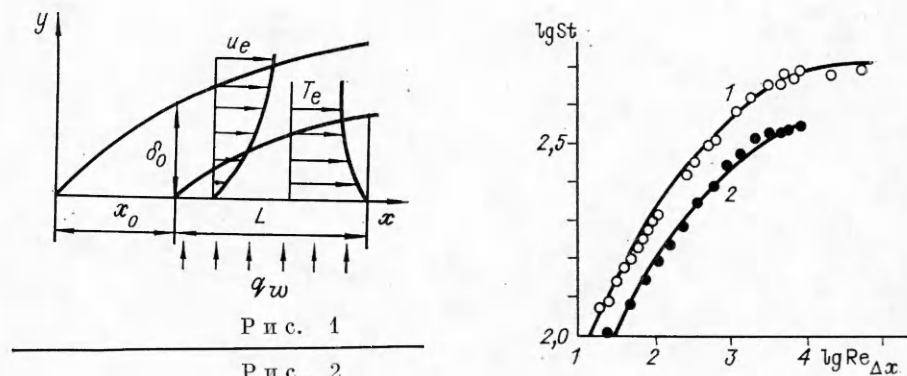
$$(1) \quad Pr_T(y) = \frac{\kappa [1 - \exp(-y/A)]}{\kappa_p [1 - \exp(-y/B)]^n}$$

рекомендованным в [5]. Заметим, что в оригинальном методе [6] использовано постоянное значение Pr_T .

Однако ни применение (1), ни рекомендованное в [4] увеличение числа точек расчетной сетки в вязком подслое не привели к существенному улучшению результатов. Анализ характера расхождения между результатами расчета и эксперимента позволил предположить, что причина этому — предложенная в [6] постановка граничного условия для уравнения теплопереноса на стенке. Для упрощения расчетов вблизи стенки принималась одномерная модель течения Куэтта, в которой пренебрегалось конвективным переносом тепла вдоль x . Для резкой смены же граничных условий градиент температуры по длине должен учитываться.

Из решения модельной задачи в [6] определялись зависимости $C_f = C_f(Re_y)$, $St = St(Re_y)$, которые использовались при постановке граничных условий.

Предлагается постановка модельной задачи с учетом составляющей $\partial T/\partial x$, в ней теплообмен вблизи точки резкого изменения теплового усло-



Р и с. 1

Р и с. 2

вия приближенно можно описать уравнением

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_+ \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad \left(\alpha_+ = \frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_T}{Pr_T} \right)$$

с начальным условием $T(x_0, y) = T_e$ и граничными условиями $T(x, \infty) = T_e$, $\partial T / \partial y|_{y=0} = -q_w / \lambda$ (или $T(x, 0) = T_w$) при $x > x_0$. Профиль скорости $u(y)$ вычислялся по аналитической зависимости [7]

$$y^+ = u^+ + \exp(-A) \left[\exp(Ku^+) - 1 - Ku^+ - \frac{(Ku^+)^2}{2!} - \frac{(Ku^+)^3}{3!} - \frac{(Ku^+)^4}{4!} \right],$$

где $A = 2,05$; $K = 0,41$. Для вычисления эффективной температуропроводности взяты значения турбулентной вязкости ν_T , найденной по формуле $\nu_T = (0,435y)^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| [1 - \exp(-y^+/A)]^2$, и Pr_T , вычисленного по (1).

Из решения модифицированной модельной задачи определялась зависимость $St = St(Re_{\Delta x})$ ($Re_{\Delta x} = u_e(x - x_0)/\nu$), представленная на рис. 2 в виде функции $\lg St$ от $\lg Re_{\Delta x}$ для двух вариантов изменения теплового условия на стенке (точки — численное решение, линии — аппроксимация параболой). Из графика видно, что кривая при заданном потоке (линия 1) проходит выше кривой при заданной температуре стенки (линия 2). Кроме того, для первого случая абсцисса выхода кривой «на полочку» больше, чем для второго. Последнее означает, что зона действия поправочной функции для заданной температуры меньше, чем для заданного потока.

Полученные численные результаты аппроксимировались аналитическим выражением $St(Re_{\Delta x}) = 10^{f(Re_{\Delta x})}$. Здесь $f(Re_{\Delta x}) = p_0 + p_1(\lg Re_{\Delta x}) + p_2(\lg Re_{\Delta x})^2$; $p_0 = -1,3738$, $p_1 = -0,5609$, $p_2 = -0,06305$, $0 \leq Re_{\Delta x} \leq 30000$ для заданного потока; $p_0 = -1,4044$, $p_1 = -0,535$, $p_2 = 0,0622$ для заданной температуры.

В программу Патанкара — Сполдинга аппроксимация вводилась в виде поправочной функции $\varphi(Re_{\Delta x}) = St(Re_{\Delta x}) / St_0$, где St_0 — значение числа Стантона в точке $x = x_0$, вычисленное по стандартной зависимости $St_0 = 0,0252 / Re_T^{*0,25}$.

Результаты расчетов, проведенных с использованием введенной поправки, представлены на рис. 3 и 4. На рис. 3 показано изменение числа Стантона вдоль участка теплообмена при $u_e = 51; 30, 1; 84, 35; 84, 35$ м/с, $T_e = 21; 24,3; 22,1; 22,1$ °С и $q_w = 6145; 9813; 17550$ Вт/м², $T_w = 100$ °С (линии 1—4, штриховые линии — расчет по методу Патанкара — Сполдинга, сплошные — по тому же методу с поправочной функцией $\varphi(Re_{\Delta x})$, 1 — эксперимент [3], 2, 3 — [2]). На рис. 4 обозначения те же, что и на рис. 3. Как видно, согласие между расчетом и экспериментом значительно улучшилось.

Ввиду недоступности для авторов экспериментальных данных для «скачка» в температуре поверхности решалась тестовая задача, аналогичная представленной на рис. 1. В качестве теплового граничного условия использовалась температура поверхности, измеренная в эксперименте

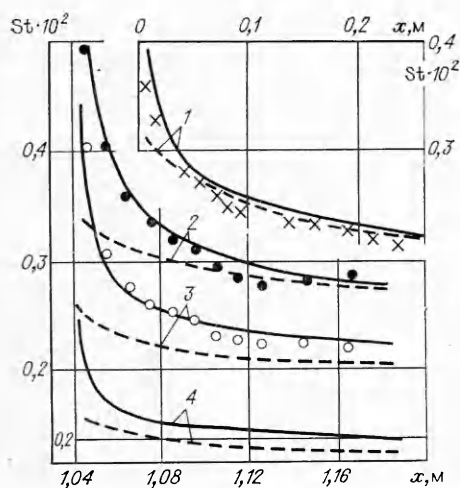


Рис. 3

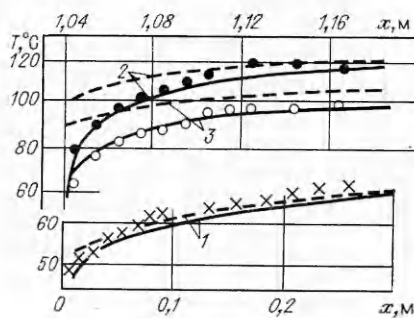


Рис. 4

[2] (линия 3 на рис. 4). Как видно из рис. 3, метод Патанкара — Сполдинга и для этого граничного условия плохо описывает процесс теплообмена вблизи сечения со «скачком». Введение поправочной функции аналогично случаю заданного теплового потока приводит к улучшению согласия между расчетом и экспериментом.

Таким образом, учет продольного конвективного переноса в постановке граничного условия позволил с хорошей точностью рассчитать теплообмен вблизи сечения разрыва теплового состояния поверхности.

Программа Патанкара — Сполдинга с введенной в нее поправочной функцией может быть использована для решения аналогичных задач.

Программа Патанкара — Сполдинга с введенной в нее поправочной функцией может быть использована для решения аналогичных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эккерт Э. Р., Дрейк Р. М. Теория тепло- и массообмена. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961.
2. Васечки В. Н., Миронов Б. П., Ярыгина Н. И. Влияние предистории потока на процессы турбулентного теплопереноса // Турбулентный пограничный слой при сложных граничных условиях. — Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1977.
3. Гартнетт, Эккерт, Биркебак. Анализ основных характеристик турбулентного пограничного слоя с подачей воздуха через тангенциальные щели // Теплопередача. — 1961. — Т. 83, № 3.
4. Браун, Антониа. Расчет турбулентного пограничного слоя за сечением со скачкообразным изменением температуры поверхности // Теплопередача. — 1979. — Т. 101, № 1.
5. Романенко П. Н. Гидродинамика и тепломассообмен в пограничном слое. Справочник. — М.: Энергия, 1974.
6. Патанкар С., Сполдинг Д. Тепло- и массообмен в пограничных слоях. — М.: Энергия, 1971.
7. Дин. Единая формула для полного профиля скорости в турбулентном пограничном слое // ТОИР. — 1976. — Т. 98, № 4.

Поступила 9/VI 1986 г.

УДК 532.135

НЕСИММЕТРИЧНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ, ОХЛАЖДАЮЩЕЙСЯ В СИММЕТРИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

В. В. Грачев, Э. Н. Руманов
(Черноголовка)

Аппараты, в которых охлаждается жидкость, прогоняемая через пучок «параллельных» трубок (питаемых общим источником), активно используются в промышленности. Среди них трубчатые теплообменники, системы перекачки подогретой нефти по параллельным трубопроводам и др. Практика их эксплуатации показывает, что в некоторых случаях часть труб не работает в нужном технологическом режиме, хотя все трубы находятся в одинаковых условиях. В данной работе исследуется нарушение симметрии течения охлаждающейся жидкости через пару одинаковых параллельных труб.