

ЛАМИНАРИЗАЦИЯ ТПС В ПУСКОВОМ РЕЖИМЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ВОЛОДИН, асп. М.В. ЯКОВЛЕВ

При экспериментальном исследовании теплообмена установлено, что высокие степени нагрева теплоносителя приводят к ламинаризации ТПС, причиной которой является температурный напор.

By experimental research heat transfer get what the great temperature heat-bearer guide laminaration the turbulent boundary layer (TBL) by cause from the temperature difference.

Явление ламинаризации турбулентного пограничного слоя (ТПС) впервые было обнаружено при исследовании обтекания сферы, а несколько позже — при течении в сужающихся каналах [1]. Исследования турбулентной структуры потока в условиях ламинаризации, например в [2], показали, что она приводит к уменьшению интенсивности процессов турбулентного переноса, чем объясняется, в частности, снижение коэффициентов теплоотдачи. Однако это явление проявляет себя не только в сужающихся каналах. Так, авторы [3] зарегистрировали его, изучая теплообмен в вертикальной цилиндрической трубе при высоких степенях нагрева обтекаемой поверхности.

Нами исследовался теплообмен в горизонтальной цилиндрической трубе при температурных напорах до 950 К. Температурный напор создавался включением плазмотрона при постоянном массовом расходе газа. Эксперименты выполнены в диапазоне изменения числа $Re = 3 \cdot 10^4 - 6 \cdot 10^4$, построенного по среднерасходной скорости. В процессе исследования регистрировались температура газа T_0 и стенок T_w канала, полное давление и динамический напор. В качестве датчиков для измерения температуры применялись хромель-алюмелевые и хромель-копелевые микротермопары, для измерения давлений — датчики ДМИ-0,1. Подробнее описание экспериментального и диагностического оборудования приведено в [4]. Среднеквадратичная погрешность в определении коэффициентов теплоотдачи составила 12 %.

При интенсивном росте температуры газового потока и таком же стремительном изменении теплофизических свойств теплоносителя увеличивается и скорость потока w_0 вне пограничного слоя. Процесс нестационарного теплообмена, вызванного возрастанием температуры T_0 газа, составляет около 0,1 с. За это время формируются величина температурного напора $T_0 - T_w$, скорости потока w_0 , числа Re , параметра ускорения K и коэффициента теплоотдачи St , которые в интервале времени $t > 0,1$ с остаются практически неизменными. На рис. 1 приведены зависимости $St(Re_h^{**}, Pr)$ [5] для турбулентных (кривая 1)

$$St = \frac{0,0128}{Re_h^{**0,25} Pr^{0,75}} \quad (1)$$

и ламинарных (кривая 2) $St = \frac{0,22}{Re_h^{**} Pr^{4/3}} \quad (2)$

режимов течения (измерительное сечение с координатой $X = x/d = 2,5$) при значении числа $Re_h^{**} = 100$, построенного по толщине потери энергии. Опытные точки

группируются около кривой 2, хотя число Рейнольдса составляет $Re = 18800$ и определяет режим движения рабочей среды турбулентным.

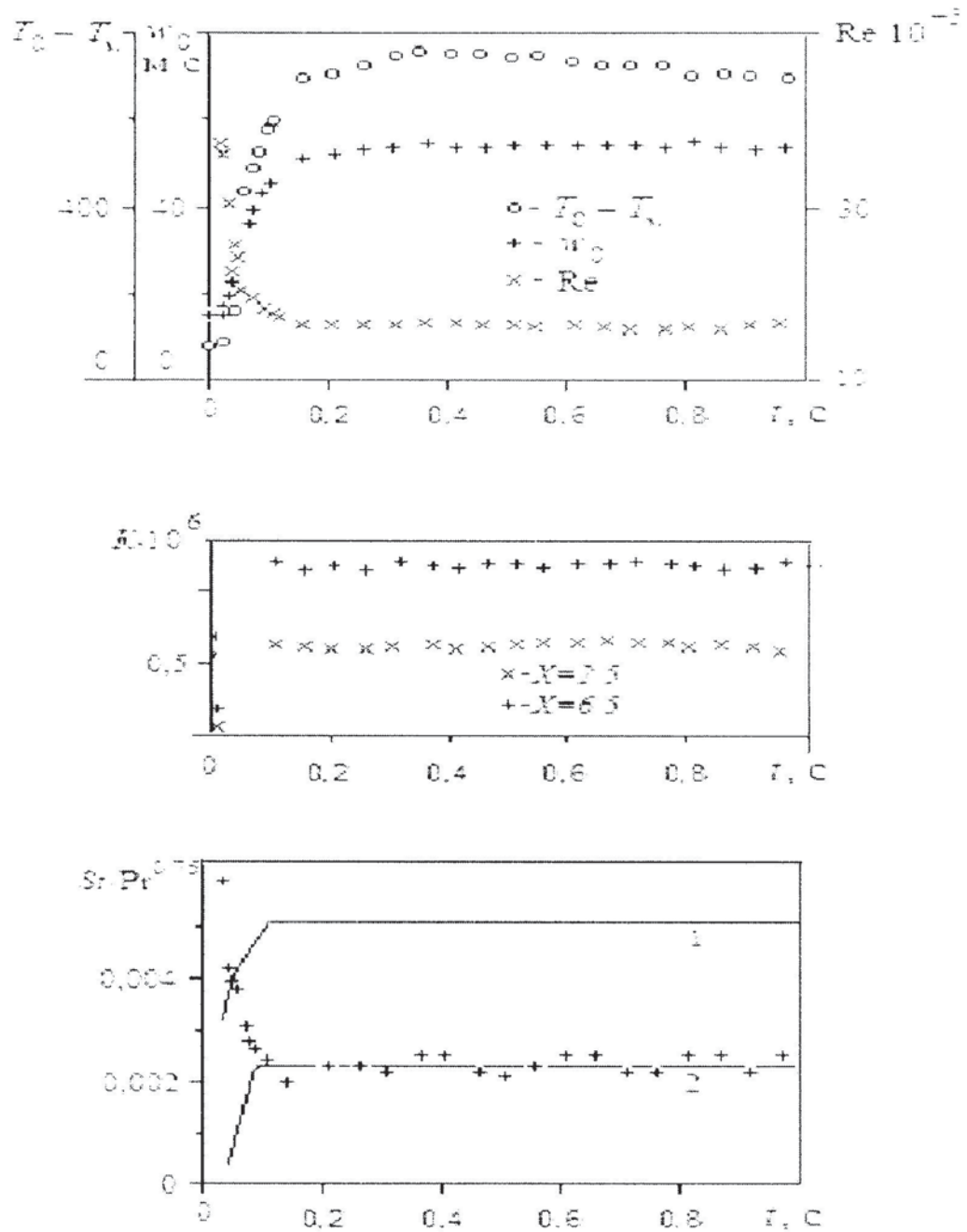


Рис. 1. Эволюция во времени начальных условий, параметра ускорения и коэффициента теплоотдачи

Экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи St определялись по выражению

$$St = \frac{q_w}{\rho_0 w_0 C_{p0} (T_0 - T_w)}. \quad (3)$$

Массовая скорость $\rho_0 w_0$ — величина постоянная из условий эксперимента. Плотность теплового потока q_w определялась так:

$$q_w = C_{pw} \rho_w \Delta_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + \Delta q_w. \quad (4)$$

Потери тепла Δq_w при свободной конвекции и за счет лучеиспускательной способности поверхности опытного канала определялись согласно рекомендациям, приведенным в [6], и составили не более 10 % от величины q_w . В первое слагаемое выражения (4) входит удельная теплоемкость и плотность материала стенки канала, толщина стенки канала и временной градиент температуры стенки. На рис. 2 показано изменение величин T_w (1) и $\partial T_w / \partial t$ (2), из которого следует, что скорость роста температуры T_w стенки является величиной постоянной. Следовательно, q_w будет неизменной величиной. Так как q_w входит в (3), то единственной переменной величиной, определяющей теплообмен в рассматриваемых условиях, будет температурный напор. Варьирование в эксперименте величиной температурного напора показало, что при $\Delta T \geq 500$ К опытные точки на рис. 1, независимо от числа Re и места расположения измерительного сечения по длине начального участка, группируются около кривой 2. Расширение временного интервала в эксперименте за пределы 1 с также показало, что по мере прогрева стенок канала и уменьшения температурного напора наблюдается прямой переход от ламинарного к турбулентному режиму, а опытные точки по коэффициенту теплоотдачи монотонно мигрируют от кривой 2 к кривой 1. Время, в течение которого опытные точки группируются около кривой 2, определяется величиной температурного напора. Чем больше температурный напор, тем больше времени необходимо для нагрева стенок канала и достижения величины $\Delta T \approx 500$ К, менее которой начинается увеличение теплоотдачи.

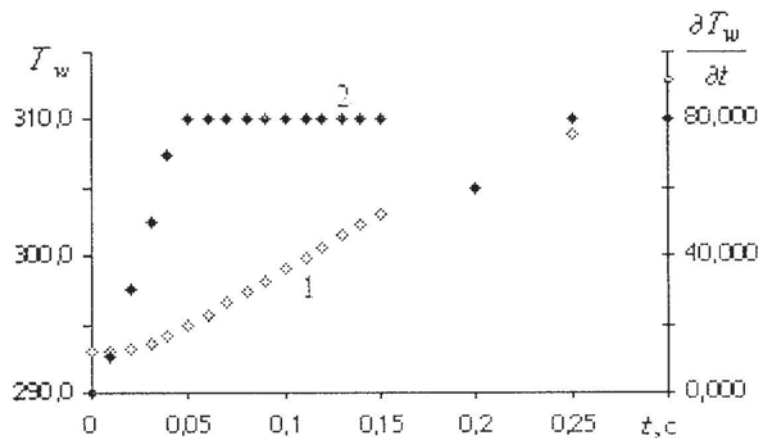


Рис. 2. Изменение во времени граничных условий

Представляется интересным рассмотреть результаты работы [3], где максимальное значение температурного фактора ϕ_n равно 4,4, а в нашем случае минимум ϕ_n равен 0,26. Это свидетельствует о примерно равнозначном по величине с [3] температурном напоре, но противоположно направленном. В рассматриваемых условиях авторы добились полного перехода к ламинарному режиму течения (число $Re = 1700$). Параметр ускорения K , предложенный в [7], увеличивается по направлению течения (рис. 1).

По результатам выполненных исследований можно сделать выводы, что высокие степени нагрева теплоносителя могут быть причиной ламинаризации ТПС. С учетом исследова-

дований [3] нужно отметить, что основной причиной, приводящей к ламинаризации ТПС при высоких степенях нагрева, независимо от направления теплового потока, является температурный напор. При расчете коэффициентов теплоотдачи, независимо от величины числа Re , характеризующего режим течения теплоносителя, особое внимание следует уделять величине температурного напора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дейч М. Г., Лазарев Л. Я. Исследование перехода турбулентного пограничного слоя в ламинарный // ИФЖ. — 1964. — Т. 7. — № 4. — С. 18—24.
2. Шишов Е. В., Афанасьев В. Н., Белов В. М. Структура «асимптотического» турбулентного пограничного слоя и теплообмен в ускоренном потоке / Труды МВТУ «Исследование процессов тепло- и массообмена». — 1979. — Вып. 4. — № 302. — с. 5—30.
3. Кун, Перкинс. Переход от турбулентного режима к ламинарному для течения в трубе со значительным изменением физических свойств / Труды Америк. Об-ва инж. — мех. — Сер. С. — Теплопередача. — 1970. — Т. 92. — № 3. — С. 198—204.
4. Володин Ю. Г., Федоров К. С., Яковлев М. В. Коэффициент трения в пусковом режиме энергетической установки // Известия вузов. Машиностроение. — 2006. — № 8. — С.
5. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 320 с.
6. Михеев М. А. Основы теплопередачи. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. — 392 с.
7. Moretti P. M., Kaye W. M. Heat transfer to a turbulent boundary layer with varying free-stream velocity and varying surface temperature — an experimental study // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 1965. — Vol. — P. 1187—1202.