

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПУСКЕ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Ю.Г. Володин, к. т. н., К.С. Федоров, студент, М.В. Яковлев, аспирант;  
Казанский государственный энергетический университет

Из всего многообразия условий нестационарного теплообмена менее изученными являются те, в которых нестационарность создается изменением температуры рабочего тела. В выполненных исследованиях экспериментально изучалась нестационарная теплоотдача при резком увеличении температуры газового потока и большом температурном напоре.

Эксперименты выполнялись на аэродинамической трубе разомкнутого типа с плазменным подогревом рабочего тела в диапазоне изменения числа  $Re_1$ .

Повышение температуры и скорости потока более чем в 3 раза за короткий промежуток времени приводит к тому, что процесс теплоотдачи протекает при тепловой и гидродинамической нестационарности с ускорением газового потока.

Определены условия, при которых происходит ламинаризация турбулентного пограничного слоя.

Пусковой режим энергетической установки характеризуется резким увеличением температуры рабочего тела. Теплообмен в таком режиме происходит в сложных термогазодинамических условиях, сопровождающихся совокупностью нестационарных эффектов. Теплоотдача в различных нестационарных ситуациях, преимущественно при тепловом потоке, направленном от стенки к рабочему телу, достаточно широко представлена в литературе. Из всего многообразия условий нестационарного теплообмена менее изученными являются те, в которых нестационарность создается изменением температуры рабочего тела. В выполненных исследованиях экспериментально изучалась нестационарная теплоотдача при резком увеличении температуры газового потока и большом температурном напоре.

Эксперименты выполнялись на аэродинамической трубе разомкнутого типа с плазменным подогревом рабочего тела в диапазоне изменения числа  $Re_1$ , построенного по средне-расходной скорости,  $3 \cdot 10^4 - 6 \cdot 10^4$ .

Нестационарные условия теплообмена создавались включением плазмотрона. Опытный канал представлял собой тонкостенную цилиндрическую трубу из нержавеющей стали. В эксперименте измерялись полное давление  $P_0$  и температура на входе в опытный канал  $T_0$ , распределение по длине канала температуры стенок  $T_w$  и динамического напора. Подробнее описание экспериментального и диагностического оборудования и его динамических характеристик приведено в [1]. Среднеквадратичные отклонения при определении температур составили 2,5 %, коэффициентов теплоотдачи 12 %.

Интенсивный рост температуры  $T_0$  газового потока (рис. 1) сопровождается таким же интенсивным уменьшением плотности  $\rho_0$  и увеличением вязкости  $\mu_0$  рабочей среды, вследствие чего увеличивается скорость  $w_0$  потока вне пограничного слоя. Повышение температуры  $T_0$  и скорости  $w_0$  потока более чем в 3 раза за короткий промежуток времени приводит к образованию больших по величине значений временных производных температуры  $dT_0/dt = 12\,000$  К/с и скорости  $dw_{01}/dt = 700$  м/с<sup>2</sup>. Это означает, что процесс теплоотдачи в интервале роста температуры  $T_0$  теплоносителя протекает при одновременном проявлении эффектов тепловой и гидродинамической нестационарности и уменьшении числа  $Re_1$  (см. рис. 1). Кроме того, в рассматриваемом интервале времени формируется ускорение потока, характеризующее производной  $dw_0/dx$  и представляющее собой еще один вид нестационарности  $\partial(dw_0/dx)/\partial t$ . В работах [2, 3] показано, что уменьшение числа  $Re$  стимулирует проявление нестационарных эффектов, а тепловая и гидродинамическая нестационарность оказывают взаимоположное влияние на теплоотдачу. В условиях такого влияния нестационарных эффектов наблюдается первоначальное в 2–2,5 раза возрастание коэффициента теплоотдачи  $St$  относительно квазистационарного значения (прямая 1, рис. 2) во всех измерительных сечениях опытного канала. Изме-

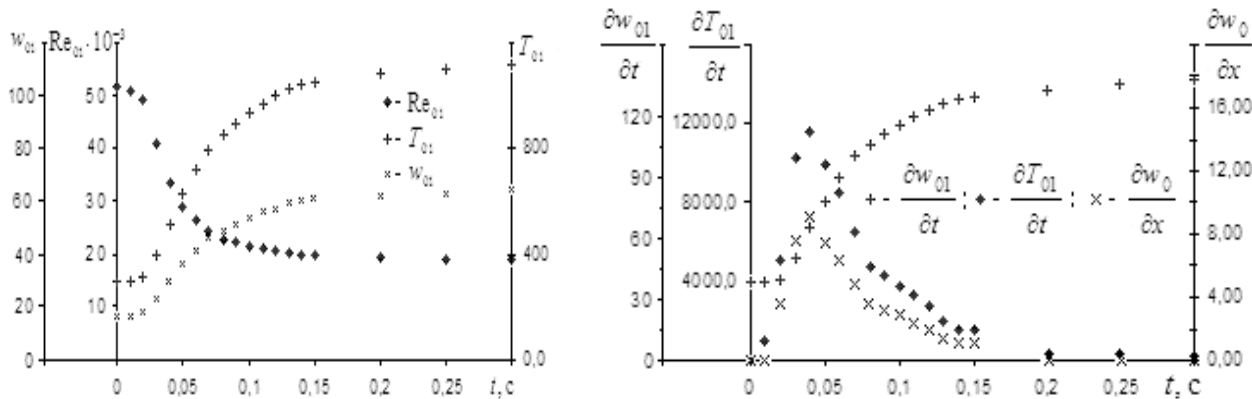


Рис. 1. Эволюция во времени начальных условий:

$w_{01}$ , м/с;  $T_{01}$ , К;  $dw_{01}/dt$ , м/с<sup>2</sup>;  $dT_{01}/dt$ , К/с;  $\partial w_0/\partial x$ , (м/с)/м;  $t$ , с

ние в начальные моменты времени вызвано преобладающим влиянием на структуру потока тепловой нестационарности и в интервале времени до 0,06 с величина коэффициента теплоотдачи превышает значения своих квазистационарных аналогов. Гидродинамическая нестационарность и в большей степени возрастающая с течением времени величина ускорения потока становятся определяющими в последующие моменты времени, что приводит к снижению процессов теплообмена и соответственно к уменьшению числа Стантона, происходящее во всех измерительных сечениях опытного канала по параллельным лучам 3 (см. рис. 2). Отсутствие опытных данных в интервале времени 0–0,02 с на рис. 2 связано с незначительным изменением температуры газа и стенок канала, которое при определении величин тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи приводит к большим погрешностям.

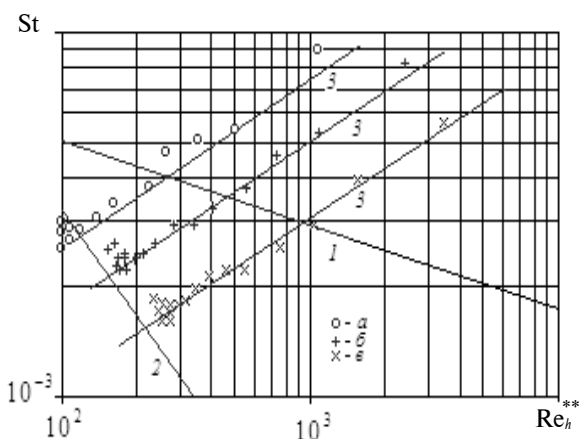


Рис. 2. Зависимость числа St от числа  $Re$   
 $a - X = 2,5$ ;  $b - 4,5$ ;  $c - 6,5$ ;

$$1 - St_0 = \frac{0,0128}{Re_h^{**0,25} Pr^{0,75}}; \quad 2 - St_{t_0} = \frac{0,22}{Re_h^{**} Pr^{4/3}};$$

$$3 - St = St_0 \left[ \frac{1}{Re_h^{**} (T_0 - T_w)} \frac{\partial (T_0 - T_w)}{\partial t} \right]^{0,5}.$$

Экспериментальные результаты по теплоотдаче при резком возрастании температуры теплоносителя обобщены аппроксимационной зависимостью вида:

$$St = \frac{St_0}{Re_h^{**0,5}} \left[ \frac{1}{T_0 - T_w} \frac{d(T_0 - T_w)}{dt} \right]^{0,5}, \quad (1)$$

Число  $Re_h^{**}$ , построенное по толщине потери энергии, определялось согласно [4] по выражению:

$$Re_h^{**} = \frac{d}{\mu_0 g C_p (T_0 - T_w)} \int_0^x q_w(X) dX, \quad (2)$$

где  $q_w = C_p \rho_w \delta_w \frac{\partial T_w}{\partial t}$  — плотность теплового потока.

Потери тепла при свободной конвекции и за счет лучеиспускательной способности поверхности опытного канала определялись по критериальным уравнениям [5] и составили не более 10% от величины  $q_w$ .

К моменту времени  $t = 0,12$  с нестационарный процесс теплоотдачи можно считать законченным, так как в интервале  $t > 0,12$  с, который характеризуется большим температурным напором  $\sim 800$  К, опытные точки группируются около прямой 2, представляющей собой «стандартный» закон теплоотдачи для ламинарных режимов течения. Таким образом, с достижением температурой потока постоянной величины формируются условия, при которых происходит ламинаризация турбулентного пограничного слоя (ТПС). Параметр ускорения

$$K = - \frac{v}{w_0^2} \frac{\partial w_0}{\partial x} - \frac{v}{w_0^3} \frac{\partial w_0}{\partial t}, \quad (3)$$

которым обычно характеризуют ламинаризацию ТПС, в интервале роста температуры потока достигает экстремального значения —  $1,42 \cdot 10^{-6}$  за счет производной скорости  $\partial w_0/\partial t$ . За пределами интервала нестационарной теплоотдачи

вклад в величину  $K$  второго слагаемого незначителен и параметр  $K$ , как при стационарных течениях в конфузорных каналах, определяется только первым слагаемым. При этом по направлению течения величина параметра  $K$  уменьшается, изменяясь от  $-0,63 \cdot 10^{-6}$  (в измерительном сечении и в сечении с координатой  $X = 2,5$ ) до  $-0,93 \cdot 10^{-6}$  ( $X = 6,5$ ).

По результатам выполненных экспериментальных исследований можно констатировать, что во время пуска энергоустановок проявляют себя различные нестационарные эффекты: тепловая нестационарность, обусловленная производной температуры газового потока по времени и гидродинамическая нестационарность, причиной которой являются производные скорости газового потока по времени. Причем если тепловая нестационарность интенсифицирует процесс теплообмена и приводит к увеличению числа  $St$ , то гидродинамическая, наоборот, ухудшает условия теплообмена, что проявляется в уменьшении величины числа  $St$ .

По окончании нестационарных процессов, т. е. при достижении температурой газового потока постоянной величины формируются условия, в которых происходит ламинаризация ТПС. Явление ламинаризации ТПС при стационарном течении ускоренного потока с внешним и внутренним обтеканием тел изучается с 1950 г. и широко представлено в литературе. И лишь единичные публикации [6] показывают, что явление ламинаризации ТПС может происходить в сложных термогазодинамических условиях, в том числе и в нашем рассматриваемом случае. Причиной ламинаризации ТПС является тем-

пературный напор  $\Delta T = T_0 - T_w$ , величина которого в обеих работах примерно одинаковая, если судить по величине температурного фактора  $\phi_h = T_w / T_0$ . Различие заключается в направлении теплового потока. В примере [6] тепловой поток направлен от стенки к рабочему телу, а в нашем случае — от газового потока к стенке.

Таким образом, при проведении проектных работ, связанных с разработкой теплоэнергетических и двигательных систем оборудования, в частности, при выполнении прочностных расчетов конструкций с теплообменными поверхностями, необходимо учитывать следующее:

➤ резкое увеличение температуры рабочего тела сопровождается нестационарными эффектами с положительными значениями производных температуры и скорости газового потока по времени; если первая — тепловая — увеличивает теплоотдачу в 2–3 раза относительно квазистационарного аналога, то вторая — гидродинамическая — снижает теплоотдачу в 2–3 раза относительно квазистационарного аналога;

➤ после недолгого по времени нестационарного режима формируется другой режим, характеризуемый величиной большого температурного напора, при котором происходит ламинаризация ТПС.

Как показали эксперименты, при  $\Delta T \geq 500$  °С независимо от направления теплового потока (с учетом [6]) и числа  $Re$ , определяющего режим течения турбулентным, расчет коэффициентов теплоотдачи для теплонагруженных поверхностей необходимо проводить по зависимостям для ламинарных режимов течения.

### Литература

1. Володин Ю.Г., Фомин А.В. Экспериментальное исследование нестационарного неизотермического течения в конфузорном канале // Современные проблемы теплофизики. Новосибирск, 1987. — С. 297–305.
2. Фафурин А. В. Законы трения и теплоотдачи в турбулентном пограничном слое // Тепло- и массообмен в двигателях летательных аппаратов. Казань, 1979. Вып. 2. — С. 62–69.
3. Володин Ю.Г., Фафурин А.В. Гидродинамика нестационарного неизотермического потока газа в каналах переменной геометрии // Повышение эффективности, совершенствование процессов и

аппаратов химических производств. Харьков, 1985. Ч. 3. — С. 71–73.

4. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. — 2-е изд., перераб. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 320 с.

5. Михеев М. А. Основы теплопередачи. — М.; Л., 1956.

6. Кун М., Перкинс Т. Переход от турбулентного режима к ламинарному для течения в трубе со значительным изменением физических свойств // Тр. Амер. Общества инженеров-механиков. Сер. С. Теплопередача, 1970. — Т. 92, № 3. — С. 198–204.