

ТЕПЛОБМЕН ПРИ СТРУЙНОЙ ЗАЩИТЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Э. П. Волчков, В. Я. Левченко

(Новосибирск)

В работе приведены экспериментальные данные по теплообмену при струйной защите гладкой пластины. Обсуждены результаты экспериментов по теплообмену на трубчатой поверхности без вдува охлаждающего газа, а также при вдуве охладителя параллельно поверхности.

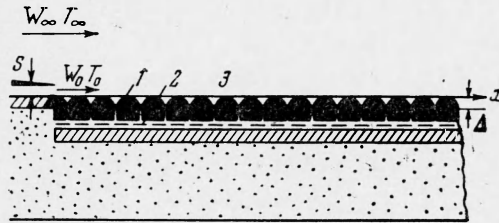
Обозначения

x — координата;	μ — коэффициент динамической вязкости;
w — скорость;	d — диаметр трубы;
t — температура;	α — коэффициент теплообмена;
γ — плотность;	λ — коэффициент теплопроводности;
s — высота щели;	R — число Рейнольдса;
Δ — высота трубки;	N — число Нуссельта;
θ — «эффективность» струйного охлаждения;	S — число Стэнтона;
q — удельный тепловой поток;	

$$R_x = \frac{\gamma_\infty w_\infty x}{\mu_\infty}, \quad m = \frac{\gamma_0 w_0}{\gamma_\infty w_\infty}, \quad N_x = \frac{\alpha x}{\lambda}, \quad S_t = \frac{\alpha}{\gamma_\infty C_{P_\infty} w_\infty}$$

$$\theta = \frac{t_{zw} - t_\infty}{t_0 - t_\infty}, \quad R_s = \frac{\gamma_0 w_0 s}{\mu_\infty}$$

1. Эксперименты проводились на установке, описанной в [1]. Схема рабочей части установки с теплообменной испытательной панелью приведена на фиг. 1. Теплообменная пластина 1 представляла собой стальную плиту толщиной 10 мм с поперечными пазами, заливаемыми эпоксидной смолой, исключаящими перетоки тепла вдоль пластины. Под ней располагался пластинчатый секционный электронагреватель 2. Длина одной нагревательной секции 112 мм. Электрические сопротивления каждой секции различались между собой не более чем на 8%. Электронагреватель был изолирован от теплообменной пластины слоем асбестовой бумаги толщиной 0.5 мм. Трубчатая поверхность образовывалась стальными, лужеными оловом полуцилиндрами 3 диаметром $2\Delta = 28$ мм, крепящимися к плите 1, причем контактные поверхности полуцилиндров и плиты были тщательно отшлифованы. Между испытательной панелью и боковыми стенками рабочей части помещался слой асбеста толщиной 10 мм. Вся конструкция снизу была изолирована слоем шлаковой ваты толщиной 200 мм. Потери тепла за счет теплопроводности были измерены, они составляли до 20% от общего количества подводимого тепла.



Фиг. 1

Методика эксперимента описана в [1]. Дополнительно измерялась электрическая мощность, подаваемая на каждые соединенные параллельно две секции пластинчатого электронагревателя. В процессе опыта мощность, подаваемая на эти секции, посредством независимого регулирования поддерживалась постоянной, колебания составляли не более 2%. Удельные тепловые потоки q в экспериментах колебались от $2 \cdot 10^3$ до $4.5 \cdot 10^3$ $вт / м^2$. Основной поток воздуха имел комнатную температуру t_∞ . Температура вдуваемого воздуха t_0 превышала температуру основного потока на $0 - 130^\circ$.

2. На фиг. 2 (а) приведены результаты экспериментов на гладкой пластине при отсутствии вторичного потока, $s = 0$. Экспериментальные точки группируются около кривой 1, уравнение которой $N_{x0} = 0.0263 R_x^{0.8}$, дающей здесь значение коэффициента теплообмена на гладкой пластине в турбулентном пограничном слое при постоянном тепловом потоке по длине пластины [2]. Разброс экспериментальных точек обусловлен, по-видимому, неравномерностью нагрева пластины. Удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с известной формулой позволяет считать описанную теплообменную панель вполне пригодной для исследования теплообмена.

На фиг. 3 дано изменение относительного критерия Нуссельта при струйном охлаждении гладкой пластины с расстоянием от места вдува при значениях параметра

Точки	S, мм	w _∞ , м/сек	w ₀ , м/сек	m
1	3.5	19.7	10	0.41
2	3.5	22	9.7	0.44
3	6.5	21.7	13.1	0.42
4	6.5	21.1	15.7	0.74
5	13	18	6.8	0.29
6	13	29.8	16.9	0.47
7	13	29.2	26.3	0.75
8	3.5	16.7	7.1	0.36
9	3.5	16.7	6.1	0.37
10	3.5	10.1	7.7	0.76
11	3.5	18.5	20	0.92
12	2	29.7	9.8	0.33
13	6.5	29.2	9.4	0.32
14	6.5	15.6	9	0.57
15	13	21.4	4.6	0.21
16	13	20.2	6.3	0.26
17	13	20.3	10.1	0.5
18	13	20.1	11.2	0.56
19	13	19.9	14.9	0.75
20	13	20	20.9	1.05

вдува $m = \gamma_0 w_0 / \gamma_\infty u_\infty < 1$. Основные режимные параметры проведенных экспериментов даны в таблице. Коэффициент теплообмена при струйном охлаждении определялся как

$$\alpha = \frac{q}{t_w - t_{aw}} \quad (2.1)$$

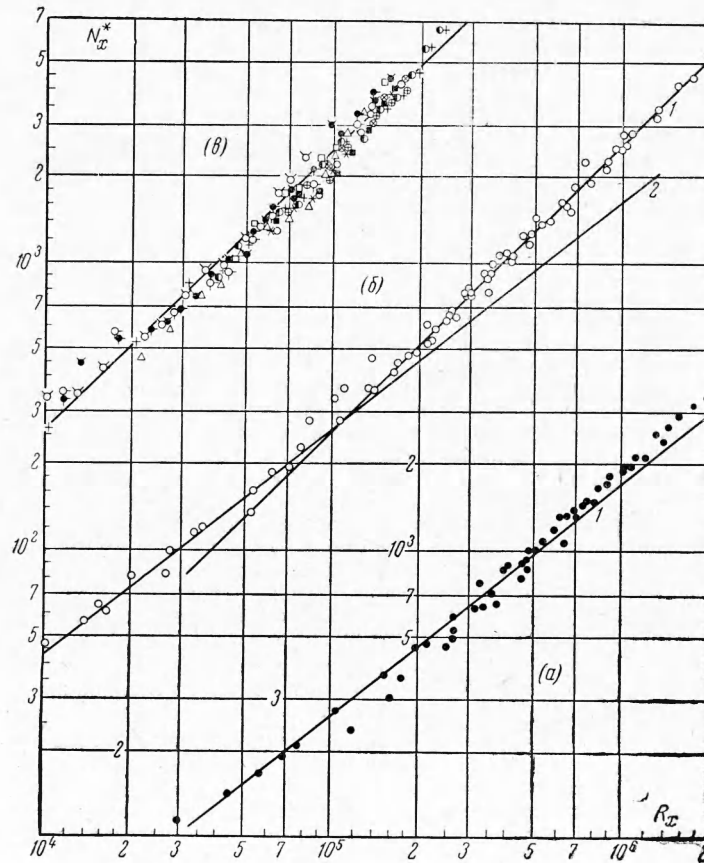
Здесь t_w — измеренная температура поверхности при наличии теплообмена, t_{aw} — адиабатическая температура поверхности на данном режиме. Значения t_{aw} вычислялись по формуле [3]

$$\theta = \left[1 + 0.24 \frac{\Delta x}{ms} R_s^{-0.25} \right]^{-0.8} \quad (2.2)$$

$$\left(\dot{u} = \frac{t_{aw} - t_\infty}{t_0 - t_\infty} \right)$$

удовлетворительно описывающей результаты экспериментов на данной установке [1]. Значения $N_{x,0}$ брались на фиг. 2 (а). Как видно, при $x/s > 50$ коэффициент теплообмена, определенный по формуле (1), совпадает с коэффициентом теплообмена для гладкой пластины без вдува. К этому выводу ранее

пришли С. С. Кутателадзе и А. И. Леонтьев в своей теории струйного охлаждения, основанной на схеме пограничного слоя [2], а также ряд экспериментаторов [3,4].



Фиг. 2

3. При обработке экспериментов на трубчатой поверхности удельный тепловой поток q определялся по отношению ко всей смачиваемой поверхности. На фиг. 2 (б) приведены результаты экспериментов при $s = 0$. В диапазоне чисел Рейнольдса R_x от $5 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^6$ экспериментальные данные описываются формулой (кривая 1)

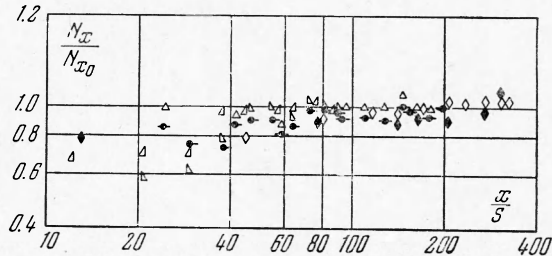
$$N_x^* = 0.0026R_x \quad (3.1)$$

т. е. коэффициент теплообмена α^* не зависит от линейного размера. Точки, для которых выполняется зависимость (3.1), расположены на расстояниях от начала панели $x / \Delta > 6$. Для первых трубок выполняется соотношение $N_x^* =$

$= 0.0263R_x^{0.8}$ (кривая 2). Аналогичный вид шероховатости исследовался Нуннером [5] в круглой трубе. В условиях развитого турбулентного течения им также получена очень слабая зависимость коэффициента теплообмена от линейного размера ($\sim d^{-0.07}$). Число Стэнтона $S = \alpha^* / \gamma C_p W$ в его экспериментах с точностью до 10% составляло $3.7 \cdot 10^{-3}$, что совпадает со значением числа Стэнтона в описываемых опытах. Вероятно, начиная с некоторого отношения толщины пограничного слоя к радиусу трубки (характерному размеру шероховатости), процесс теплообмена определяется исключительно характером течения вблизи трубок и становится автомодельным по отношению к толщине пограничного слоя. Область автомодельности устанавливается очень быстро на первых трубках.

На фиг. 2 (в) приведены экспериментальные данные по теплообмену на трубчатой поверхности при наличии пристеночной струи с $m \leq 1$. Режимные параметры проведенных экспериментов даны в таблице. Коэффициент теплообмена, как и для гладкой поверхности, определялся по формуле (2.1). Значения t_{aw} брались из фиг. 8 работы [1]. Нанесены точки для $x / s > 30$. Сплошная линия — зависимость (3.1). Как видно, и для поверхности с крупномасштабной шероховатостью коэффициент теплообмена при наличии пристеночной струи, определяемый по формуле (2.1), практически совпадает с коэффициентом теплообмена при отсутствии вдува.

Фиг. 3



Поступила 23 IX 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Seban R. A. Heat Transfer and Effectiveness for a Turbulent Boundary Layer with Tangential Fluid Injection. Trans. ASME, C, 1960, vol. 82, No. 4.
2. К у т а т е л а д з е С. С., Л е о н т ь е в А. И. Тепловая завеса при турбулентном пограничном слое газа. Теплофиз. высоких температур, 1963, т. 1, № 2.
3. Г а р т н е т т, Э к к е р т, Б и р к е б а к. Анализ основных характеристик турбулентного пограничного слоя с подачей воздуха через тангенциальные щели. Тр. Америк. об-ва инж.-мех. (русск. перев.), Теплопередача, сер. С, 1961, т. 83, № 3.
4. N u n n e r W. Wärmeübergang and Druckabfall in rauhen Röhren. VDI-Forschungsheft, 455, Düsseldorf, 1956.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА t, S ДЛЯ РТУТИ,
ПОСТРОЕННАЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ
О СКОРОСТИ ЗВУКА

И. И. Новиков, Е. П. Шелудяков
(Новосибирск)

В последнее время ртуть привлекает все большее внимание. Это связано, в первую очередь, с наметившейся перспективой использования ее жидкой и паровой фаз в качестве теплоносителя и рабочего вещества в целом ряде энергетических установок. Поэтому ясно, что исследование термодинамических свойств ртути приобретает особое значение. Попытки создания таблиц термодинамических свойств ртути предприни-