

А. П. МЕРКУЛОВ, Г. В. ФИЛИПОВ, И. И. ГУСЕВ

О ВЛИЯНИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ХОЛОДНОГО ПОТОКА ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Необходимость получения температур до (-80°C) требует изыскания путей увеличения эффективности вихревой трубы.

Одним из них является устранение эффекта подмешивания в холодный поток теплого пограничного слоя, текущего по торцевой плоскости диафрагмы.

Целью настоящей работы являлось изучение пограничного слоя диафрагмы и определение степени его влияния на холодный поток.

При вводе сжатого воздуха через тангенциальные сопловые входы в трубе образуется интенсивный вихрь. Если отношение давлений сжатого воздуха на входе в вихревую камеру P_1 и на оси вихря P_0 невелико

$$\pi = \frac{P_1}{P_0} < 4,15,$$

то, согласно гипотезе взаимодействия вихрей, в вихревой камере газ вращается по закону твердого тела.

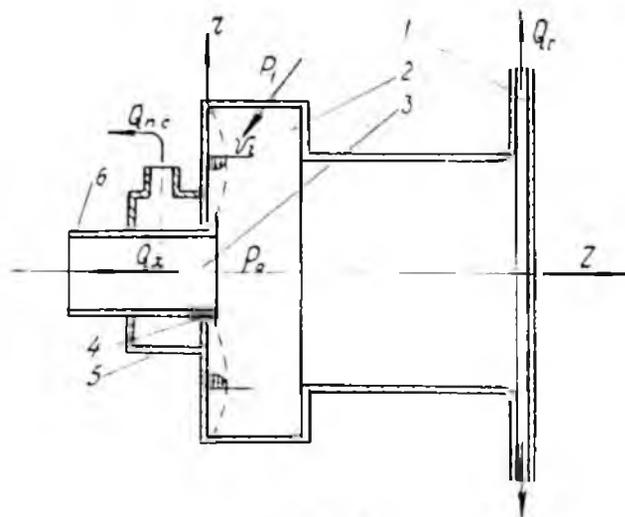
При этом дифференциальное уравнение движения в цилиндрических координатах выражает равенство центробежных сил и сил давления

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} = \frac{w^2}{r}$$

Для частиц пограничного слоя азимутальная скорость понижена вследствие торможения силами вязкости, поэтому здесь центробежная сила значительно уменьшена, между тем, как положительный радиальный градиент давления остается таким же, как и на большом расстоянии от диафрагмы. В результате, вблизи

диафрагмы возникает радиальное течение, направленное к оси трубы. Если предположить, что в пограничном слое на диафрагме энергетическое разделение потока не является полным, то радиальное течение приводит к подмешиванию пограничного слоя к холодному потоку и подогреву последнего. Таким образом, задача сводится к определению расхода воздуха через пограничный слой в радиальном направлении и к оценке температурного влияния его на холодный поток для различных режимов работы вихревой трубы.

Сложность аналитического решения системы дифференциальных уравнений пограничного слоя при наличии вращения во внешнем потоке усугубляется для рассматриваемого случая наличием большого радиального градиента температуры во внешнем потоке



фиг. 1.

(неизотермичностью), влиянием сжимаемости, наличием конечного числа сопловых вводов на периферии вихря и центрального отверстия диафрагмы.

Поэтому пришлось ограничиться экспериментальными исследованиями кинематических и температурных характеристик пограничного слоя.

Экспериментальная установка (фиг. 1) включает в себя вихревую трубку с диффузором 1, трехсегментный сопловый вход с регулируемым проходным сечением 2, диафрагму с центральным отверстием 3 и кольцевой регулируемой щелью 4, камеру для отвода пограничного слоя 5.

Кинематические исследования сводились к определению эпюры векторов скорости по толщине пограничного слоя для различных

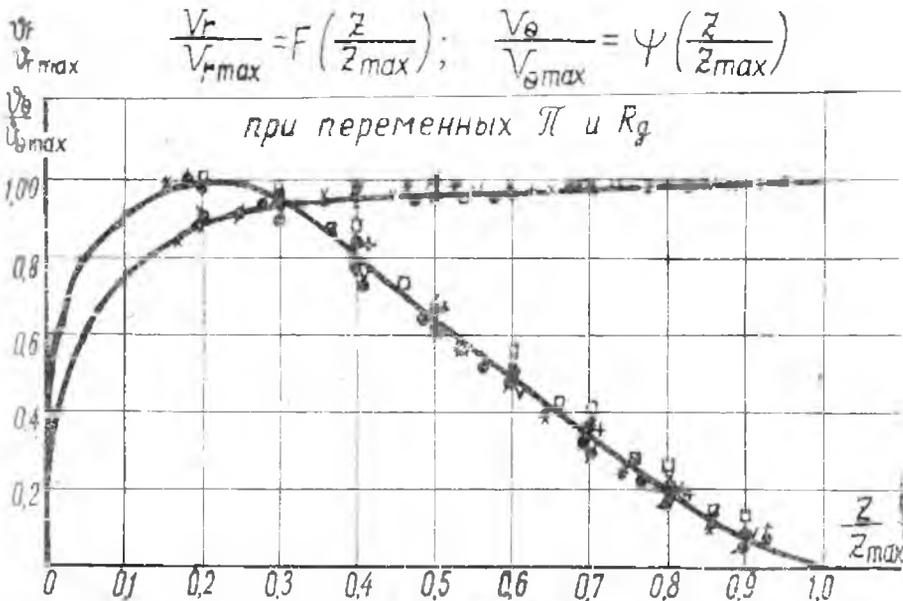
значений давления воздуха на входе в вихревую трубу, на различных расстояниях от оси диафрагмы. Датчик давления — трубка полного напора прямоугольного сечения с высотой прямоугольника 0,3 мм, высотой щели 0,1 мм устанавливался в координатнике, дающем возможность осуществлять два независимых (осевое через 0,025 мм и вращательное через 0,5°) движения. Направление и величина скорости определялись по положению и величине максимума полного напора, так как обычный тройной насадок давал слишком большую погрешность ввиду большого радиального градиента скорости в вихре. Приемником давления служил U-образный водяной манометр.

Таким образом, в эксперименте определялись величина $\omega(z)$ и направление $\Theta(z)$ скорости в пограничном слое. Затем были найдены радиальные и тангенциальные составляющие скорости:

$$\begin{aligned} V_r &= W \sin \Theta, \\ V_\theta &= W \cos \Theta. \end{aligned} \quad (1)$$

Введем безразмерные скорости $\bar{U}_r = \frac{U_r}{U_{r\max}}$; $\bar{U}_\theta = \frac{U_\theta}{U_{\theta\max}}$ и безразмерную координату $\bar{z} = \frac{z}{z_{\max}}$.

Сводные результаты опытов приведены на фиг. 2, из которой видно, что безразмерные профили скоростей для всех исследован-



Фиг. 2.

ных давлений и всех расстояний от диафрагмы совпадают. Участки указанных кривых в области $0 < z < 0,15$, где не было возможности использовать трубку полного напора, могут быть аппроксимированы законом «одной седьмой». Объемный расход в радиальном направлении

$$Q_{\text{пс}} = 2\pi r \int_0^{\delta} V_r dz = 2\pi r V_{r, \text{max}} \delta \int_0^1 \bar{v}_r d\bar{z}.$$

Вследствие идентичности профили скоростей

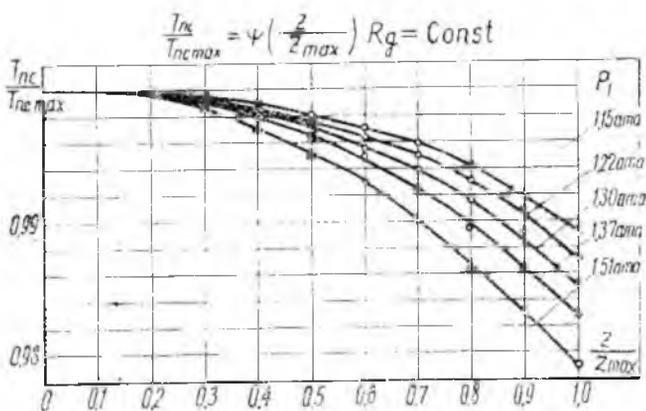
$$\int_0^1 \bar{v}_r d\bar{z} = 0,5085$$

и формула для определения расхода принимает вид:

$$Q_{\text{пс}} = 1,017\pi V_{r, \text{max}} \delta. \quad (2)$$

Температурные исследования пограничного слоя заключались в измерении профиля температур при тех же условиях, при которых определялась кинематика потока.

Датчиком служила хромель-алюмелевая термопара, диаметром 0,2 мм, сваренная встык. Термопара вместе с фиксатором устанавливалась в вышесказанный координатник, что позволяло перемещать ее по нормали к плоскости диафрагмы. Потенциометром-самописцем с растянутой шкалой можно было регистрировать температуру с точностью до десятых долей градуса. Результаты этой серии опытов представлены на фиг. 3 и 4 и указывают на то, что



Фиг. 3.

в пограничном слое энергетическое разделение газа является неполным. Причем, при $z < 0,5$, т. е. в той зоне, которая обеспечивает большую часть расхода газа в радиальном направлении, вихревой эффект выражен очень слабо.

Правые части фиг. 3, 4 свидетельствуют об известных фактах:

во-первых, по мере приближения к центру вынужденного вихря температура газа падает, во-вторых, вихревой эффект усиливается по мере увеличения давления на входе.

Для удобства последующих расчетов введем среднюю температуру пограничного слоя.

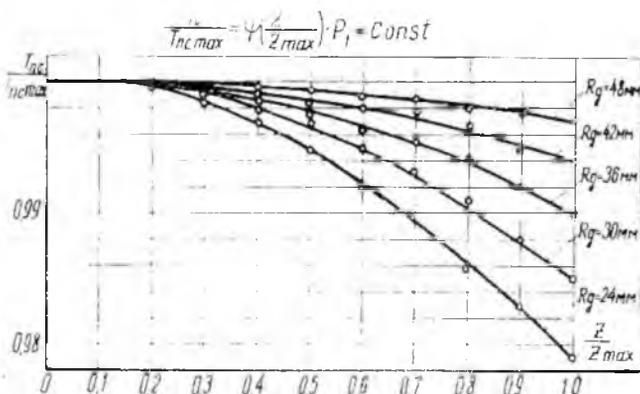
Количество тепла, пронесимое потоком газа в радиальном направлении через цилиндрическую поверхность радиуса r и высотой, равной толщине пограничного слоя, равно:

$$q = 2\pi r C_p \int_0^{\delta} v_r \gamma T dz.$$

С другой стороны,

$$q = 2\pi r C_p T_{nc} \int_0^{\delta} v_r \gamma dz.$$

Приравняв правые части, выражая с помощью уравнения состояния весовую плотность через давление и температуру, имея в виду малость градиента давления по высоте пограничного слоя



Фиг. 4.

и пренебрегая динамической добавкой к температуре, получим среднюю температуру пограничного слоя:

$$\bar{T}_{nc} = \frac{\int_0^{\delta} v_r T dz}{\int_0^{\delta} v_r dz}. \quad (3)$$

Здесь температура отнесена к температуре газа у стенки.

Определим, какова была бы температура холодного потока T_x , если бы к нему не примешивался пограничный слой диафрагмы. С этой целью составим уравнение теплового баланса

$$G_{nc} C_p T_{nc} + G_x C_p T_x = (G_{nc} + G_x) C_p T_{см},$$

где G — весовой расход газа;

$T_{см}$ — температура смеси холодного потока и пограничного слоя.

Выражая весовой расход через объемный, заменяя весовую плотность через давление и температуру, после несложных преобразований получим:

$$T_x = T_{см} \frac{1 - \frac{Q_{лс}}{Q_{см}}}{1 - \frac{Q_{лс}}{Q_{см}} \cdot \frac{T_{сст}}{T_{лс}}} \quad (4)$$

Выполненные в соответствии с уравнениями (2), (3), (4) расчеты приведены в таблице 1.

Из таблицы видно, что в условиях опыта ($1,15 < \frac{P_1}{P_0} < 1,51$ и $0,128 < \mu < 0,14$) расход пограничного слоя составляет (20—40)% от суммарного расхода через диафрагму, при этом за счет отвода пограничного слоя можно ожидать понижения температуры на выходе из диафрагмы на (22—51)%.

Были поставлены также эксперименты по непосредственному отводу пограничного слоя при указанных выше условиях. Эта серия опытов проводилась следующим образом. Подвижная трубка (6) перемещалась в осевом направлении. При этом через зазор между буртиком трубки и диафрагмой отводился воздух из области пограничного слоя. При этом температура воздуха, выходящего из диафрагмы, по мере увеличения расхода пограничного слоя (увеличение щели) постепенно понижалась от температуры смеси $T_{см}$ до температуры холодного потока T_x . Таким образом, экспериментально для каждого значения P_1 удалось установить то оптимальное количество выходящего через зазор воздуха, начиная с которого температура потока, выходящего из диафрагмы, оставалась неизменной. Результаты вышеописанного эксперимента представлены кривыми (фиг. 5), а также таблицей 2.

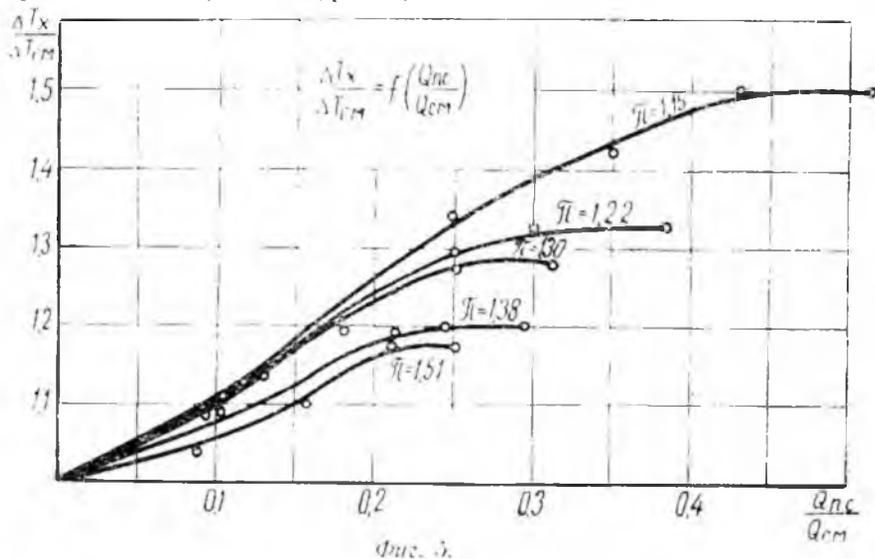


Таблица 1

π	T_1, K	$T_{\text{св}}, K$	$T_0, \frac{J}{\text{св}}$	$Q_{\text{св}}, \frac{J}{\text{св}}$	γ	$V_{\text{полн}}, \frac{\text{м}}{\text{св}}$	$\frac{\Delta t}{t_{\text{полн}}}, \frac{\text{св}}{\text{св}}$	$\frac{\Delta t}{t_{\text{полн}}}, \frac{\text{св}}{\text{св}}$	$z_{\text{max}}, \frac{\text{м}}{\text{св}}$	$Q_{\text{не}}, \frac{J}{\text{св}}$	$T_{\text{св}}^{\text{полн}}, K$	$T_{\text{св}}^{\text{полн}}, K$	$T_{\text{св}}^{\text{полн}}, K$	T_x, K	$\Delta T_{\text{св}}^0, K$	$\Delta T_{\text{св}}^0, K$	$Q_{\text{не}}, \frac{J}{\text{св}}$	$\frac{\Delta T_x}{\Delta T_{\text{св}}}, \frac{\text{св}}{\text{св}}$
1,51	278,2	267,6	93,5	12,0	0,128	29,3	170,0	0,650	21,5	277,20	275,2	265,3	10,6	12,5	20,4	122,0		
1,38	280,0	270,6	80,0	10,4	0,130	25,4	150,0	0,780	2,28	270,18	278,4	268,4	9,4	11,6	22,0	123,0		
1,30	279,7	271,2	70,0	9,4	0,134	24,2	140,0	0,780	2,32	279,20	278,6	268,7	8,5	11,6	21,6	130,0		
1,22	267,6	260,7	57,0	7,8	0,136	20,2	113,0	0,875	2,26	267,22	266,7	258,1	6,9	9,5	20,0	138,0		
1,15	267,8	253,2	49,0	5,6	0,140	18,3	92,5	0,950	2,22	268,10	267,9	260,6	1,6	7,2	49,0	156,0		

Таблица 2

π	T_1, K	$T_{\text{св}}, K$	$Q_1, \frac{J}{\text{св}}$	$Q_{20}, \frac{J}{\text{св}}$	γ	$Q_{\text{не}}, \frac{J}{\text{св}}$	T_x, K	$\Delta T_{\text{св}}^0, K$	$\Delta T_{\text{св}}^0, K$	$Q_{\text{не}}, \frac{J}{\text{св}}$	$\frac{\Delta T_x}{\Delta T_{\text{св}}}, \frac{\text{св}}{\text{св}}$
1,51	291,4	281	93,5	12,0	0,128	2,6	279,2	10,1	12,2	22,5	117,0
1,38	291,4	282,2	80,0	10,4	0,130	2,5	280,4	9,2	11,0	24,0	130,0
1,30	291,4	283,2	70,0	9,4	0,134	2,5	281,6	8,2	10,1	26,5	127,0
1,22	291,7	284,7	57,0	7,8	0,136	2,4	282,4	7,0	9,3	30,8	133,0
1,15	291,7	287,2	49,0	5,6	0,140	2,4	284,9	4,5	6,8	43	151,0

Из сопоставления двух последних столбцов обеих таблиц следует, что значение температурного выигрыша в эксперименте в среднем на 4% меньше расчетного, а оптимальный расход воздуха из области пограничного слоя в среднем на 2% превышает расчетный расход пограничного слоя. Разницу эту, очевидно, можно объяснить конечной шириной буртика подвижной трубки, с которого пограничный слой во всех случаях выпадает в холодный поток. Через зазор же вместе с пограничным слоем вытекает часть внешнего потока.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлено, что на торцевой плоскости диафрагмы к оси трубы течет теплый пограничный слой, расход которого соизмерим с расходом вытекающего через отверстие диафрагмы холодного потока.

2. При изменении давления на входе от 1,15 до 1,51 ата расход пограничного слоя составлял от 43 до 22% от расхода холодного потока при весовой доле холодного потока $\mu = 0,13$.

3. При данных условиях эффект подменивания пограничного слоя снижает получаемый эффект охлаждения холодного потока на величину от 51 до 17%.

Отвод пограничного слоя при работе на малых μ существенно увеличивает эффективность вихревой трубы.