

Н. Д. Колышев, Н. Н. Огородников

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ С ДИФфуЗОРОМ

Вихревая труба с диффузором сконструирована для охлаждения малогабаритных объектов примерно до -100°C . Компактность, простота устройства и очень быстрый выход на режим делают ее весьма удобной для лабораторной и научно-исследовательской практики [3].

Во многих случаях общая скорость охлаждения или температурный градиент по толщине объекта регламентируются. Иногда процесс захлаживания производится по сложной программе. Следует также учесть, что достижимый уровень минусовых температур и интенсивность теплообмена в значительной степени зависят от загромождения рабочего пространства испытуемым изделием. Поэтому для практического использования холодильной установки представляет интерес исследование интенсивности теплообмена на поверхности тел, помещенных в рабочее пространство трубы. Желательно, чтобы испытуемые объекты имели форму тел вращения. Подобные задачи ранее не рассматривались.

Коэффициент теплоотдачи определялся методом регулярного режима I-го рода. В качестве калориметров использовались модели в форме Архимедовых цилиндров из красной меди с целью проведения эксперимента в условиях $Bi \rightarrow 0$. В этом случае критерий неравномерности температурного поля $\psi \rightarrow 1$ (внешняя задача). Предварительное определение коэффициента теплоотдачи показало, что его величина составляет $\alpha = 180 \div 500$ тех. ед., а следовательно, значение критерия $Bi = 0,004 \div 0,035$.

Специальное исследование по вопросу об установлении связи $\psi = f(Bi)$ при малых значениях Bi для цилиндров проведено в работе [2].

$$\psi \cong 1 - \frac{Bi}{4}. \quad (1)$$

Вычисленные по этой формуле значения критерия неравномерности температурного поля для данной экспериментальной обстановки находятся в диапазоне: $\psi \cong 0,999 \div 0,991$ исходя из чего можно принять $\Psi = 1$.

Значительные радиальные градиенты температуры и скорости в вихревой трубе неизбежно должны привести к большой неоднородности локальных значений коэффициента теплоотдачи на торцах моделей, поэтому целью настоящих экспериментов было определение среднеинтегральных значений α .

В опытах использована вихревая труба ($D = 30$ мм) с диффузором, описание и результаты исследования которой изложены в работе [1]. Схема установки представлена на фиг. 1. В диафрагму из оргстекла 1 вставлялась притертая коническая пробка 2. В ее стержне d' укреплялся хвостовик калориметра 3. В центральный канал ($\varnothing 1$ мм) вводилась медь-константановая термопара с диаметром термоэлектродных проволок 0,1 мм. Рабочий спай устанавливался в центре медного цилиндра и вместе с прилегающим участком проволок (2 мм) заливался расплавленным оловом.

Давление в центре вихревой трубы $P_{\text{хо}}$ замерялось с помощью трубки, введенной в центр диска диффузора, соединенной с ртутным пьезометром. Была исследована теплоотдача цилиндров со следующими размерами (см. табл. 1).

Таблица 1

№	$\bar{d}$	d [мм]	$\bar{l}$	l [мм]	$\bar{d}'$	d' [мм]
1	0,25	7,5	0,25	7,5	0,1	3
2	0,4	12	0,4	12	0,16	4,8
3	0,6	18	0,6	18	0,24	7,2
4	0,8	24	0,8	24	0,32	9,6

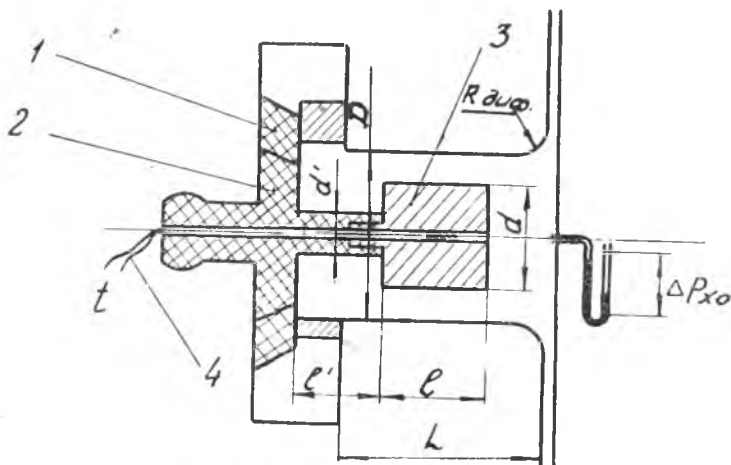
(Здесь $\bar{d} = \frac{d}{D}$; $\bar{d}' = \frac{d'}{D}$; $\bar{l} = \frac{l}{D}$, где $D = 30$ мм — диаметр вихревой трубы).

Расстояние между плоскостью диафрагмы и торцом цилиндра l было принято постоянным и равным 15 мм ($\bar{l} = 0,5$) с учетом расположения зоны минимальной температуры, а диаметр хвостовика d' для сохранения геометрического подобия в опытах выбирался так, чтобы отношение его к диаметру цилиндра было постоянным:

$$\frac{d'}{d} = 0,4 = \text{idem}$$

Для измерения и записи температуры цилиндров использовался электронный потенциометр-самописец (с погрешностью измерения

$\pm 0,5\%$). Ширина бумаги 250 мм, диапазон измерения 0-4,5 мв. Скорость протягивания бумаги — 3600 мм/час, время прохождения каретки по всей длине шкалы — 1,5 сек, интервал между двумя за-
мерами — 3 сек. Точность измерения температуры $\pm 0,5^\circ\text{C}$.



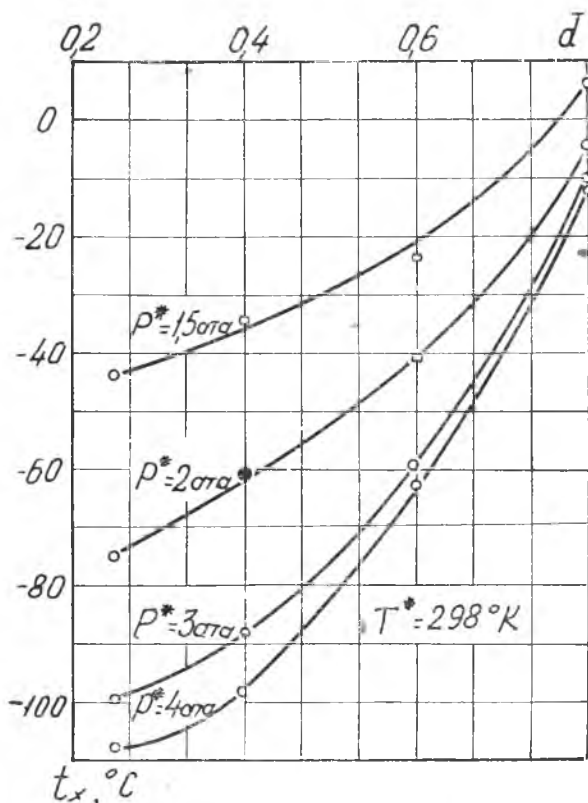
Фиг. 1.

Эксперименты с каждым цилиндром проводились в следующем порядке: в конусное отверстие диафрагмы устанавливалась пробка с имитатором цилиндра; сам цилиндр укреплялся на другой пробке, термopара его подключалась к самописцу и он находился около вихревой трубы в условиях комнатной температуры $t_a \cong +2^\circ\text{C}$. Вихревая труба с имитатором выводилась на заданный режим (выдерживалось время для стабилизации параметров сжатого воздуха на входе: P^* — давление и T^* — температура), включался привод самописца. Затем пробка с имитатором вынималась из отверстия диафрагмы, а на ее место вводилась пробка с экспериментальным цилиндром. Процесс замены длился не более 2 сек. За счет разрежения внутри вихревой трубы пробка с достаточным усилием прижималась к седлу диафрагмы, обеспечивая надежную центровку и герметичность. Запись э. д. с. термopары во времени проводилась до почти полной стабилизации э. д. с., затем привод самописца выключался и после длительной выдержки снималось окончательно установившееся значение э. д. с. Определение α для всех моделей проводилось в диапазоне давлений $P^* = 1,5 \div 4 \text{ атa}$.

Представленные в работе [1] температурные поля данной вихревой трубы определялись специальными датчиками, не вносящими сильных искажений в вихревой поток. При введении внутрь вихревой трубы тел с относительно большими размерами режим

ее будет нарушаться и при тех же параметрах сжатого воздуха на входе оптимальные значения некоторых величин будут иными.

В связи с этим предварительно были сняты характеристики трубы по охлаждению цилиндров в зависимости от их относительного диаметра ($\bar{d}$) и давления сжатого воздуха (P^*). Данные характеристики, представленные на фиг 2, могут быть использованы для практической оценки возможности охлаждения тел в вихревой трубе.

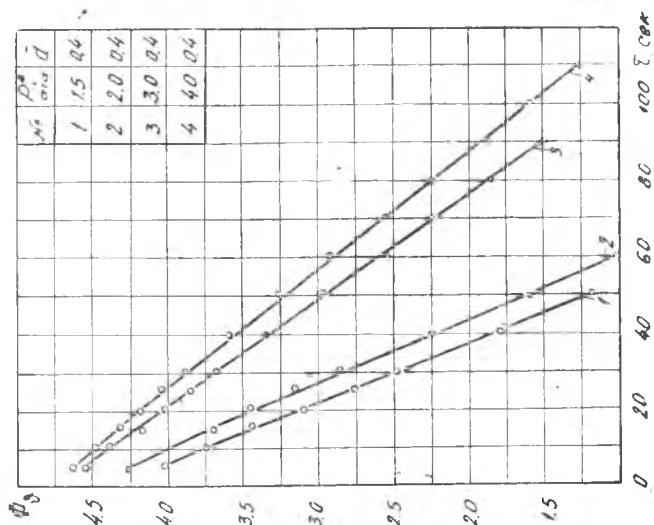
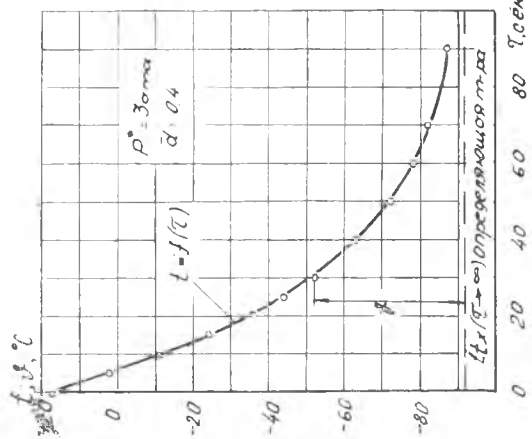


Фиг. 2.

Диаграммы процесса охлаждения цилиндров обрабатывались по методике¹ с учетом зависимости физических характеристик модели от температуры:

для отсчета избыточных температур (ϑ) принималась собственная температура цилиндра — t_x , замеряемая потенциометром при длительной выдержке модели в трубе;

¹ См. статью Н. Н. Огородникова «Уточнение методики определения теплоотдачи на основе регулярного режима с помощью металлических моделей». Наст. сборник, стр. 107.



Фиг. 3.

для определения α процесс охлаждения отображался в координатах $\Phi(\theta) \div \tau$, где

$$\Phi(\theta) = \ln \chi + A. \quad (2)$$

Значение температурной функции для меди принималось¹:

$$\varepsilon_t = 1 + 1,88 \cdot 10^{-4} \cdot t \quad (3)$$

Исходя из выражения (3), коэффициент A выражения (2) подсчитываем по соотношению.

$$A = \frac{1,88 \cdot 10^{-4}}{1 - 1,88 \cdot 10^{-4} \cdot t_x} \quad (t_c < 0^\circ \text{C}). \quad (4)$$

Используя участок регулярного режима, определяем условный темп охлаждения — m_0 :

$$m_0 = \frac{\Phi(\theta_1) - \Phi(\theta_2)}{\tau_2 - \tau_1} \quad (5)$$

и затем по соотношению

$$m_0 = \frac{\alpha \cdot F_0}{G \cdot C_{p0} \cdot \varepsilon_{t_x}} \quad (6)$$

коэффициент теплоотдачи — α

$$\alpha = C \cdot \varepsilon_{t_x} \cdot m_0, \quad (7)$$

где $C = \frac{C_{p0} \cdot G}{F_0}$ — константа калориметра, ккал/м²°C;
 $\varepsilon_{t_x} = 1 - 1,88 \cdot 10^{-4} t_c$ — значение температурной функции ε_t при температуре t_c ;
 $C_{p0} = 0,0926$ ккал/кг °C (теплоемкость меди при 0°С) [6];
 G — вес медного цилиндра, определялся взвешиванием с точностью до 0,1 г;

F_0 — внешняя поверхность модели, м². Определялась по результатам микрообмера.

Большинство графиков $\Phi(\theta) = f(\tau)$ (часть представлена на фиг. 3) в основной области имеют линейный характер.

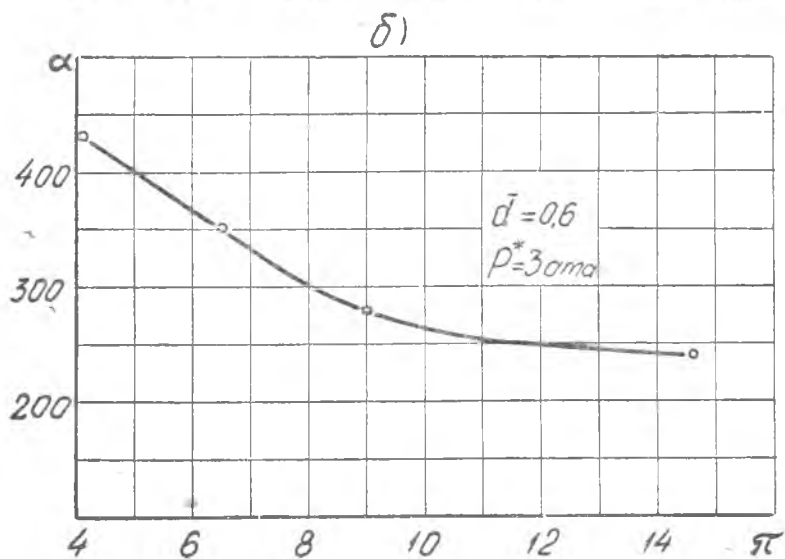
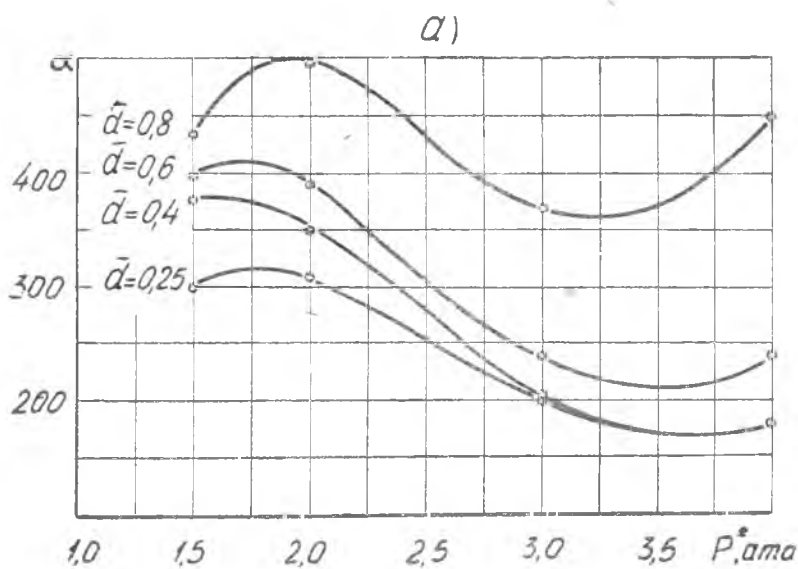
В отдельных графиках отклонения от линейности находятся в пределах 1÷3% что следует объяснить недостаточной точностью замеров.

На фиг. 4а представлена зависимость полученных в эксперименте значений коэффициента теплоотдачи α от давления P^* воздуха на входе при различных значениях диаметра цилиндра $\bar{d}$.

В интервале $P^* = 1,5 \div 4$ атм и $\bar{d} = 0,25 \div 0,8$ коэффициент теплоотдачи изменяется в пределах 182 ÷ 497 тех. ед.

В поведении кривых общей особенностью является увеличение α с ростом $\bar{d}$ которое следует объяснить увеличением скорости и плотности потока на периферии цилиндра. С увеличением давле-

¹ См. сноску на стр. 81.



Фиг. 4.

ния на входе эта особенность проявляется сильнее: так, если для $P^* = 1,5 \text{ ата}$ $\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}} = 0,7$, то для $P^* = 4 \text{ ата}$ это отношение составляет 0,4. Наиболее резко величина α возрастает в диапазоне диаметров цилиндров $d = 0,6 \div 0,8$ с увеличением значений P^* .

Из графика следует, что максимумы зависимости $\alpha = \alpha(P^*)$ лежат в области $P^* = 1,5 \div 2 \text{ ата}$. С увеличением давления значения α для всех цилиндров падают, причем минимумы лежат в зоне $P^* \cong 3,5 \text{ ата}$, сдвигаясь в сторону больших P^* с уменьшением $\bar{d}$. При дальнейшем возрастании давления вновь наблюдается рост α .

Нестабильный характер поведения кривых на фигуре 4а связан со сложной картиной изменения полей температур и давлений в вихревой трубе и их взаимодействием с находящимися внутри нее телами. Полученные в экспериментах значения коэффициента теплоотдачи являются средненитегральными не только в смысле осреднения по поверхности цилиндра, но и в смысле осреднения температурного поля на поверхности цилиндра. Наибольшее влияние в этом смысле оказывает цилиндр с $\bar{d} = 0,8$, на поверхности которого при сверхзвуковых скоростях обтекания возможно возникновение сложной системы скачков уплотнения.

Более стабильный характер имеет зависимость $\alpha = \alpha(\pi^*)$ (где $\pi^* = \frac{P^*}{P_{\text{хо}}}$), полученная при исследовании цилиндра $\bar{d} = 0,6$, при давлений на входе $P^* = 3 \text{ ата}$ (фиг 4б). В области $\pi^* = 15 \div 10$ α меняется мало, при дальнейшем уменьшении степени расширения в вихре коэффициент теплоотдачи значительно увеличивается, возрастая на участке $\pi^* = 10 \div 4$ на 80%. Так как тангенциальные скорости в вихре на этом радиусе возрастают незначительно [3], то увеличение α объясняется, в основном, ростом плотности в прилегающих к цилиндру слоях вихря.

Некоторый интерес представляет сравнение значений коэффициента теплоотдачи, определенных экспериментально и полученных расчетным путем. Так как исследование теплоотдачи в подобных условиях проводится впервые, то в качестве наиболее подходящей расчетной схемы принят случай обтекания пластины воздухом. Соответствующие критериальные уравнения имеют вид [3]:

$$Nu = 0,032 \cdot Pe^{0,8} - Re > 10^5, \quad (8)$$

$$Nu = 0,66 \cdot Re^{0,5} - Re < 10^5. \quad (9)$$

Критерий Рейнольдса определялся по формуле:

$$Re = \frac{W \cdot l}{\nu}, \quad (10)$$

где в качестве определяющего размера принималась длина окружности цилиндра $l = \pi d$.

Значения критерия Re подсчитывались по теоретическим вели-

чинам окружных скоростей на соответствующих d [3]. В качестве определяющей температуры принималось t_x .

Некоторые результаты расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2

d	P^* атм.	π^*	$W_{\text{теор.}}$ м/сек	$Re_{(\text{расч.})} = \frac{W_{\text{теор.}} \cdot l}{\nu}$	$\alpha_{(\text{расч.})}$ техн. ед.	$\alpha_{(\text{теор.})}$ техн. ед.
0,25	3,0	19,0	137	$0,904 \cdot 10^5$	111	202
»	4,0	30,0	145	$0,925 \cdot 10^5$	108	183
0,4	3,0	18,5	215	$2,08 \cdot 10^5$	214	205
»	4,0	30,0	235	$2,04 \cdot 10^5$	198	182
0,6	3,0	14,6	305	$4,01 \cdot 10^5$	283	240
0,8	3,0	8,8	350	$7,25 \cdot 10^5$	403	370
»	4,0	11,8	385	$7,93 \cdot 10^5$	433	448

Из таблицы следует, что для $\bar{d} \geq 0,4$ значения $\alpha_{\text{расч.}}$ неплохо согласуются с экспериментальными данными. На малых диаметрах рассогласование значительное.

В целом необходимо отметить высокий уровень интенсивности теплоотдачи в рабочем пространстве трубы ($\alpha \approx 130 \div 500$ тех. ед.), что является несомненным достоинством данной холодильной установки.

Высокие значения α обеспечивают эффективное использование рабочего агента и высокую производительность установки. На основе проведенных исследований представляется возможным подбор холодильного режима в достаточно широком диапазоне α .

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Меркулов, Н. Д. Колышев. Исследование температурных полей вихревой трубы с диффузором. Сборник трудов КуАИ, вып. XXII, 1965.
2. Н. А. Огородников. Кандидатская диссертация «Измерение переменных температур в газовых потоках методом двух термопар», КуАИ, 1962.
3. Н. Д. Колышев. Автореферат. Кандидатской диссертации «Исследование низкотемпературной вихревой трубы с щелевым диффузором», КуАС, 1965.
4. М. А. Михеев. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, 1956.
5. Теплофизические свойства веществ, справочник под ред. Н. Б. ВАРГАФТИКА. Энергоиздат. 1956.