

03

Распределение температуры выходящих потоков по сечению при различных схемах и режимах работы противоточной вихревой трубы

© В.Н. Самохвалов

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва, Самара, Россия
E-mail: vn_samokhvalov@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 июня 2024 г.

В окончательной редакции 30 июня 2024 г.

Принято к публикации 30 июня 2024 г.

Экспериментально установлено различие в распределении температуры по поперечному сечению потоков охлажденного и подогретого воздуха при осевом и радиальном расположении выходов противоточной вихревой трубы. При осевом расположении выходов как охлажденного, так и подогретого воздуха градиент температуры по поперечному сечению потока зависит от соотношения площадей сечений выходных каналов. Минимальную температуру имеют зоны вторичных вихревых структур. При радиальном расположении выходов как охлажденного, так и нагретого воздуха температура по поперечному сечению потоков выравнивается вследствие разрушения вторичных крупномасштабных вихревых структур.

Ключевые слова: вихревая труба, температурное разделение, вихревые структуры.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.20.58937.20013

Внутри камеры энергетического разделения противоточной вихревой трубы (ВТ) на границе периферийного и осевого течений образуются когерентные вращающиеся спиралевидные структуры, которые исследовались с использованием различных методов визуализации [1–6]. Адиабатическое охлаждение, возникающее за счет формирования интенсивного вихревого жгута вблизи оси внутри камеры расширения, предполагается в качестве механизма охлаждения газа в ВТ [1]. Структура и температурное распределение в выходящих из ВТ потоках исследованы в меньшей степени. В работе [4] показано, что при выходе охлажденного газа из диафрагмы ВТ ядро вторичного вихря совершает сложное спиральное движение.

Цель экспериментов состоит в исследовании влияния схемы конструктивного расположения выходов (осевого или радиального) противоточной ВТ и соотношения параметров выходных отверстий на величину и распределение температуры по поперечному сечению выходящих потоков.

В экспериментах использовалось перестраиваемое вихревое устройство (рис. 1). Оно позволяло реализовать в экспериментах схемы работы противоточной ВТ с осевым выходом охлажденного потока и периферийным (радиальным) выходом нагретого потока; противоточной ВТ с осевыми выходами как охлажденного, так и нагретого потоков; противоточной ВТ с радиальным выходом охлажденного потока.

Изменение схемы работы ВТ осуществлялось путем установки (снятия) заглушек на ее радиальные (рис. 1, *a*) или осевые (рис. 1, *b*) выходы. Диаметр цилиндрической камеры расширения 1 ВТ равен 10 мм, длина — 76 мм. Закручивающее устройство (улитка) 2 соплового входа толщиной 2.5 мм выполнено по спирали Архимеда.

Диаметры отверстий штуцеров 5–7, а также отверстия осевого выхода охлажденного воздуха составляют 5.0 мм.

На входной штуцер 5 вихревой трубы через редуктор подавался сжатый воздух давлением $P = 0.1–0.6$ МПа. Температура воздуха на входе ВТ составляла $T_0 = 24^\circ\text{C}$. В экспериментах варьируемыми параметрами были диаметр d отверстия сменной диафрагмы 3 (3.0, 4.0, 4.5 и 5.0 мм), а также диаметр D отверстия (диффузора) сменного штуцера 4 (2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 5.0 и 6.0 мм). В качестве геометрического параметра, определяющего режим работы противоточной ВТ (относительный весовой расход холодного потока), принято отношение площадей отверстий диафрагмы и диффузора $\beta = (d/D)^2$.

При осевом расположении выходов ВТ выходящие потоки (C_A — „холодный“ выход, H_A — „горячий“ выход, рис. 1, *a*) были сильно закрученными. Для измерения температуры воздуха в различных точках по поперечному сечению потока был использован метод регистрации теплового излучения с использованием тепловизора и преобразователя температуры в виде сетки тонких нитей из материала с низкой теплопроводностью [7]. Сетка-преобразователь температуры 8 из зачерненных полиамидных нитей закреплялась на рамке (рис. 1). Размер ячейки сетки 0.32×0.32 мм, диаметр продольных нитей 0.12 мм, диаметр поперечных нитей 0.06 мм. Такое расположение сетки нарушает газодинамическую структуру течения после прохождения воздуха через сетку, но позволяет фиксировать тепловой след от вихря при его контакте с сеткой в этом сечении. С использованием тепловизионной камеры FLIR SC7000 и программы Altair производился термографический анализ потоков. Рассчитывалось снижение температуры воздуха охлажденного потока $\Delta T_C = T_0 - T_i$ (ΔT_{C_A} и

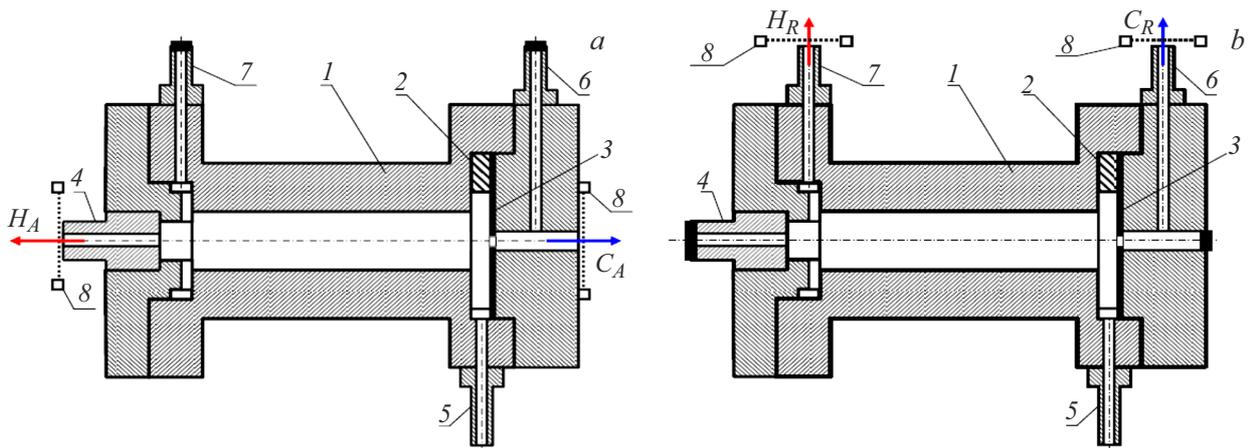


Рис. 1. Принципиальная схема вихревого устройства: *a* — с осевыми выходами, *b* — с радиальными выходами. Пояснение в тексте.

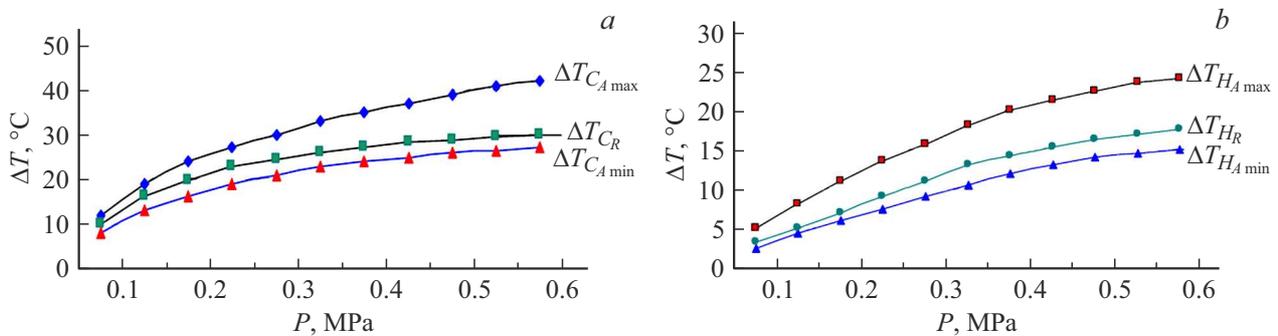


Рис. 2. Изменение температуры в зависимости от величины давления на входе ВТ. *a* — охлажденный воздух в осевом (C_A) и радиальном (C_R) выходном канале ($\beta = 1.27$); *b* — подогретый воздух в осевом (H_A) и радиальном (H_R) выходном канале ($\beta = 1.78$).

ΔT_{C_R} — в осевом и радиальном выходах соответственно) или изменение температуры воздуха подогретого потока $\Delta T_H = T_i - T_0$ (ΔT_{H_A} и ΔT_{H_R} — в осевом и радиальном выходах соответственно). Здесь T_i — текущая температура в контрольной точке на сетке-преобразователе δ .

В первой серии экспериментов были открыты только осевые выходы противоточной ВТ (рис. 1, *a*). При постоянном давлении на входе ВТ распределение температуры в разных точках поперечного сечения обоих потоков было довольно устойчивым в течение времени, но наблюдалась небольшая подвижность картины термограммы. Это, очевидно, обусловлено прецессией ядра когерентных вихревых структур [2–6] в выходящих потоках воздуха.

Установлено, что в разных точках поперечного сечения потока температура как охлажденного потока C_A , так и нагретого воздуха H_A может значительно различаться в зависимости от величины β . Как показали термограммы, например, на „горячем“ осевом выходе ВТ (поток H_A) при $\beta = 0.25–0.44$ ΔT_{H_A} составляет минус 2–4°C (при $P = 0.6$ МПа). Охлажденный воздух занимает практически всю площадь потока H_A (отвер-

стия диффузора). Здесь противоточная ВТ работает в режиме, близком к режиму односторонней ВТ, т.е. как охладитель [8]. При увеличении β на термограмме нагретого потока наблюдается тепловое „пятно“ диаметром порядка $(1/3–1/2)D$ с температурой ниже температуры нагретого периферийного потока. Это, очевидно, тепловой след более холодной когерентной вихревой структуры, идущей со стороны диафрагмы [8]. Центр теплового „пятна“ был смещен относительно центра отверстия диффузора. Разница минимального $\Delta T_{H_A min}$ и максимального $\Delta T_{H_A max}$ подогрева осевого потока в различных точках по поперечному сечению потока растет с увеличением давления на входе ВТ (рис. 2, *b*).

В „холодном“ осевом потоке C_A вихревой трубы (рис. 1, *a*) разница минимального $\Delta T_{C_A min}$ и максимального $\Delta T_{C_A max}$ охлаждения в различных точках по сечению также растет с увеличением давления на входе ВТ (рис. 2, *a*). Наибольшая степень охлаждения $\Delta T_{C_A max}$ осевого потока C_A имела место при $\beta = 0.81–1$. При $\beta > 1$ зона максимального охлаждения располагалась в центральной зоне потока C_A (диаметром менее $(1/3)D$), но была смещена относительно центра сечения диафраг-

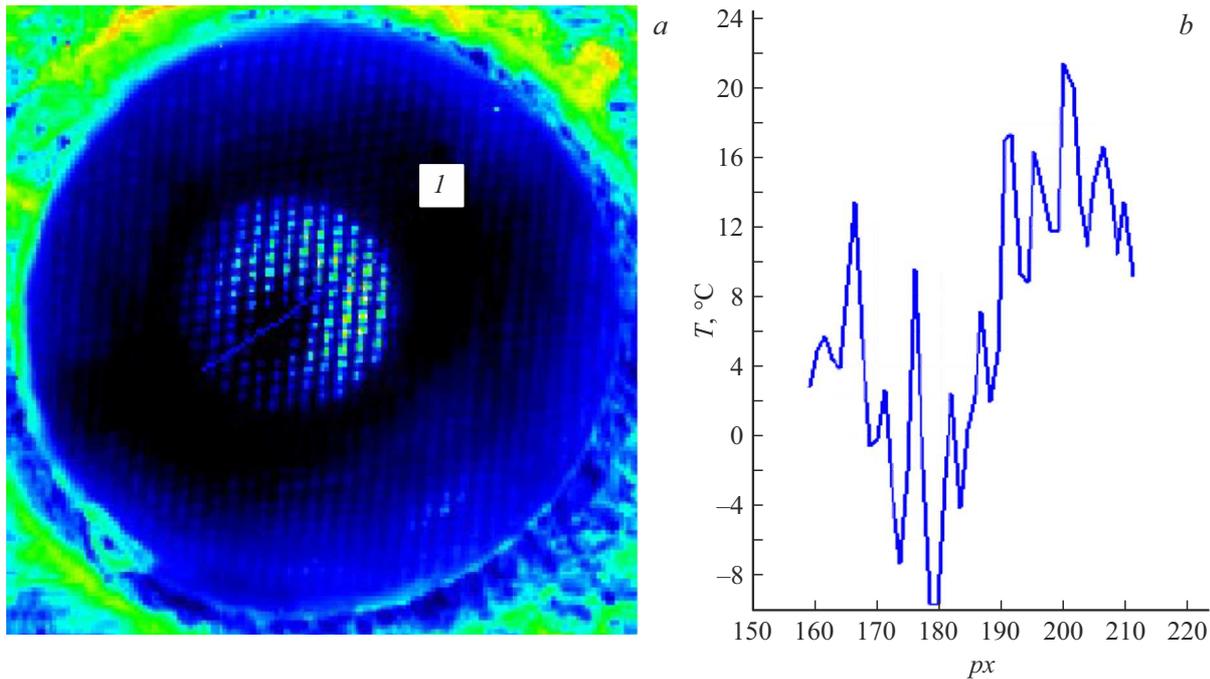


Рис. 3. Скриншот термограммы охлажденного потока в сечении (а) и распределение температуры по линии I на сетке ($1 \text{ px} = 0.1 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ mm}$, $\beta = 1.78$, $P = 0.6 \text{ MPa}$) (б).

мы. Зона минимального охлаждения была диаметрально противоположна ей (рис. 3). При $\beta < 0.8$, напротив, зона максимально охлажденного потока C_A располагалась по периферии отверстия диафрагмы. Зона минимально охлажденного потока C_A располагалась в центральной области потока, но была смещена относительно центра диафрагмы. Это, очевидно, обусловлено притоком нагретого воздуха со стороны диффузора.

Во второй серии экспериментов были открыты только радиальные выходы противоточной ВТ (рис. 1, б). Изменение параметра β производилось за счет изменения величины диаметра d сменной диафрагмы при неизменных диаметрах выходных отверстий штуцеров 6 и 7. Эксперименты показали, что температурное поле как охлажденного потока C_R , так и нагретого потока воздуха H_R в различных точках поперечного сечения потоков было близким к однородному при всех значениях β . В обоих потоках тепловой след („пятно“) крупномасштабных вихревых структур на термограмме не наблюдался во всем диапазоне изменения давления на входе ВТ. Очевидно, это обусловлено разрушением вихревых структур соответственно в щелевом развихрителе нагретого потока и в T -образном канале при выходе охлажденного потока воздуха.

Снижение температуры охлажденного воздуха ΔT_{C_R} , выходящего из отверстия радиального штуцера 6, было значительно меньше максимальной величины снижения температуры $\Delta T_{C_{A \max}}$ охлажденного воздуха, выходящего из осевого отверстия через диафрагму 3 в первой серии экспериментов (рис. 2, а). Увеличение температуры по-

догрева воздуха ΔT_{H_R} , выходящего из радиального штуцера 7 (рис. 1, б), было значительно ниже максимальной величины роста температуры $\Delta T_{H_{A \max}}$ подогретого воздуха, выходящего из осевого отверстия диффузора (штуцера 4 на рис. 1, а) в первой серии экспериментов (рис. 2, б). Поток подогретого воздуха H_R проходит к радиальному выходному отверстию штуцера 7 через щелевой развихритель потока (рис. 1, а). Это приводит к разрушению крупномасштабных вихревых структур и отсутствию теплового „пятна“ на термограмме во всем диапазоне величин β и давления на входе ВТ и обуславливает зафиксированную однородность температуры нагрева ΔT_{H_R} по поперечному сечению потока H_R .

Таким образом, в противоточной ВТ с осевым расположением выходов охлажденного и подогретого воздуха при отношении площади отверстия диафрагмы и диффузора $\beta < 1$ наблюдается значительный градиент температуры по поперечному сечению выходящего подогретого потока, увеличивающийся с уменьшением β вследствие притока охлажденного воздуха со стороны диафрагмы. В поперечном сечении выходящего охлажденного потока наибольшая степень охлаждения воздуха наблюдалась при $\beta = 0.81-1$ и уменьшалась с ростом β вследствие притока нагретого воздуха со стороны диффузора с одновременным увеличением градиента температуры по поперечному сечению потока. При радиальном расположении выходов охлажденного и подогретого воздуха противоточной ВТ градиент температуры по поперечному сечению потоков практически

отсутствует вследствие разрушения вторичных вихревых структур.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.А. Арбузов, Ю.Н. Дубнищев, А.В. Лебедев, М.Х. Правдина, Н.И. Яворский, Письма в ЖТФ, **23** (23), 84 (1997). [V.A. Arbuzov, Yu.N. Dubnishchev, A.V. Lebedev, M.Kh. Pravdina, N.I. Yavorski, Tech. Phys. Lett., **23** (12), 938 (1997). DOI: 10.1134/1.1261939].
- [2] Ю.М. Ахметов, Э.И. Зангиров, А.В. Свистунов, Тр. МФТИ, **6** (2), 99 (2014).
- [3] X. Guo, B. Zhang, B. Liu, X. Xu, Int. J. Refrig., **104** (6), 51 (2019). DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.04.030
- [4] Ш.А. Пиралишвили, *Вихревой эффект* (Научтехлитиздат, М., 2013), т. 1.
- [5] Y. Xue, J.R. Binns, M. Arjomandi, H. Yan, Int. J. Heat Fluid Flow, **75** (2), 195 (2019). DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.01.005
- [6] X. Guo, B. Liu, B. Zhang, Y. Shan, Int. J. Therm. Sci., **168**, 107067 (2021). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107067
- [7] Б.П. Жилкин, И.Д. Ларионов, А.Н. Шуба, Приборы и техника эксперимента, № 4, 136 (2004). [B.P. Zhilkin, I.D. Larionov, A.N. Shuba, Instrum. Exp. Tech., **47** (4), 545 (2004). DOI: 10.1023/B:INET.0000038406.76066.35].
- [8] В.Н. Самохвалов, Письма в ЖТФ, **47** (19), 41 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51513.18786 [V.N. Samokhvalov, Tech. Phys. Lett., **48** (1), 12 (2022). DOI: 10.1134/S1063785022010059].