

03

Механические эффекты в вихревом устройстве с вращающимся сердечником

© В.Н. Самохвалов

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
E-mail: vn_samokhvalov@mail.ru

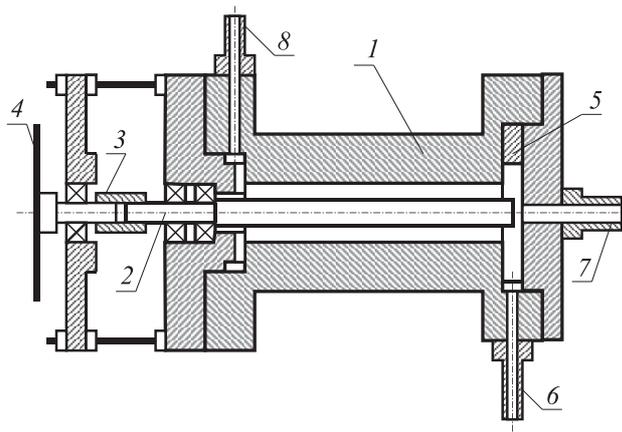
Поступило в Редакцию 13 декабря 2016 г.

Исследован процесс возникновения вынужденного вращения осевого сердечника, установленного в модифицированной вихревой трубе, в направлении, противоположном вращению воздушного вихря и прецессии его оси. Установлено, что в процессе вращения металлического осевого сердечника возникает его динамический изгиб, приводящий к механическому износу его концевой части и излому в зоне закрепления в подшипнике, без остаточного искривления оси сердечника. Возбуждение вращения и наблюдавшиеся силовые эффекты не связаны с механическим воздействием вращающегося потока воздуха на осевой сердечник.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.09.44581.16600

Изучению вихревого эффекта Ранка–Хилша посвящены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, подробно рассмотренные в [1]. До настоящего времени нет единого мнения о физическом механизме этого явления. В большинстве работ исследуется механизм разделения закрученного потока на охлажденное ядро и горячие периферийные слои, а также термогазодинамические параметры устройств, реализующих вихревой эффект. Экспериментально установлено наличие в закрученных потоках трехмерных вихревых структур винтовой формы и значительное влияние прецессии вихревого ядра на процесс энергоразделения [2].

Кроме эффекта энергоразделения в вихревых устройствах наблюдаются механические эффекты, не находящие очевидного объяснения. В работе [3] отмечен эффект вращения металлической оси, введенной в вихревой охладитель, в направлении, противоположном вращению воздушного вихря частотой вращения около 50 Hz. В работе [4] показано, что вращающиеся в противоположном направлении предметы цилин-



Принципиальная схема вихревого устройства.

рической формы медленно прецессируют в направлении, совпадающем с направлением потока, а частота вращения зависит от давления на входе. При этом установлено, что тангенциальные составляющие скоростей вращения периферийного и осевого вихря вихревой трубы направлены в одну сторону [1], т. е. не меняют направления.

Для экспериментального исследования вышеуказанного эффекта было использовано вихревое устройство на базе противоточной вихревой трубы, принципиальная схема которого представлена на рисунке.

Внутри камеры расширения 1 вихревой трубы был установлен осевой металлический сердечник 2, имеющий возможность свободного вращения на двух подшипниках качения. Длина консольной части сердечника внутри вихревой трубы — 87 мм. Через эластичную втулку 3 сердечник связан с диском 4, вращающимся на шарикоподшипнике. Эластичная втулка 3 была использована для минимизации вибрации измерительного диска 4 в процессе работы вихревого устройства. На диске 4 была установлена отражающая полоса для измерения скорости вращения осевого сердечника бесконтактным (лазерным) цифровым тахометром Mastech MS6208B. Вход вихревой трубы — улиточный, толщина „улитки“ 5 равна 2.5 мм. Внутренний диаметр цилиндрической камеры расширения вихревой трубы равен 10 мм, а ее длина составляет 76 мм.

На входной штуцер 6 вихревой трубы (см. рисунок) подавалось давление из сети сжатого воздуха $P_I = 0.1-0.6$ МПа. Измерение температуры выходящего из вихревой трубы охлажденного и нагретого воздуха производилось с использованием двух мультиметров Mastech MY64, концы штатных термодатчиков которых устанавливались внутри резиновых трубок, надетых на штуцер охлажденного воздуха 7 и штуцер нагретого воздуха 8.

В экспериментах использовались металлические осевые сердечники диаметром 4.0, 5.0 и 6.0 мм, изготовленные из гладких калиброванных прутков малоуглеродистой стали.

Проведенные эксперименты показали, что при установке осевого сердечника диаметром 6 мм и давлении воздуха на входе $P_I \sim 0.1$ МПа наблюдается неустойчивое (рывками) вынужденное вращение сердечника в направлении, противоположном вращению воздушного вихря, задаваемого улиточным входом.

При увеличении давления воздуха на входе вихревого устройства до $P_I = 0.6$ МПа частота вращения осевого сердечника возрастала до 100–150 Hz в направлении, противоположном вращению воздушного вихря.

При установке сердечников диаметром 5 и 4 мм частота вращения была ниже. Максимальная скорость вращения при $P_I = 0.6$ МПа достигала порядка 65 и 50 Hz соответственно, а неустойчивое вынужденное вращение сердечника начиналось только при давлении воздуха $P_I = 0.12-0.15$ МПа.

Используемая конструкция вихревого устройства с улиточным входом позволяла задавать как правовинтовое, так и левовинтовое вращение вихря (за счет переверачивания или смены „улитки“). Проведенные эксперименты показали, что в обоих случаях вынужденное вращение осевого металлического стержня происходит в направлении, противоположном вращению воздушного вихря. Таким образом экспериментально подтвержден эффект вращения металлической оси, установленной в вихревом устройстве, в направлении, противоположном вращению воздушного вихря, ранее отмеченный в работах [3,4].

При этом если осевой выход охлажденного воздуха 7 (см. рисунок) в процессе работы вихревой трубы перекрывался, то частота вращения осевого сердечника не изменялась. Если перекрывался выход нагретого воздуха 8 (см. рисунок), то частота вращения осевого сердечника снижалась: до 50% при давлении на входе вихревой трубы

$P_I = 0.25\text{--}0.3$ МПа; на 10–20% при давлении $P_I = 0.5\text{--}0.6$ МПа. Это можно объяснить уменьшением длины зоны взаимодействия вихря с осевым сердечником. При этом направление вращения сердечника в обоих случаях не изменялось, оно было противоположным вращению воздушного вихря.

Проведенные эксперименты показали также, что при вынужденном вращении сердечников возникают силы и моменты, приводящие к прецессии оси стержня и сильному его изгибу в процессе вращения. Это вызывало механический контакт концевой части сердечника с внутренней поверхностью камеры расширения вихревой трубы.

В экспериментах с металлическим сердечником диаметром 4 мм боковой зазор между сердечником и поверхностью камеры расширения вихревой трубы составлял 3 мм, что исключало механический контакт сердечника с поверхностью камеры расширения при его упругом изгибе и люфта в подшипниках. Однако, как показали эксперименты, металлический консольно установленный на двух шарикоподшипниках сердечник „затачивается“ на конус за счет трения о внутреннюю поверхность камеры расширения вихревой трубы при его вынужденном вращении в течение нескольких минут. Длина образованного конического участка составляла около 15 мм при длине консольной части 87 мм. В результате диаметр сердечника на его конце был равен 3.3 мм при исходном диаметре 4.0 мм. При использовании осевых сердечников диаметром 5 и 6 мм их вынужденное вращение приводило к образованию блестящего пояса длиной 12–13 мм на его свободном конце. Такой характер механического износа концевой части осевого сердечника возможен только за счет касания им стенок камеры, при S-образном изгибе и прецессии оси сердечника в процессе его вынужденного вращения.

При этом остаточной деформации (искривления) оси сердечников не наблюдалось — ось сердечников после остановки вращения оставалась прямолинейной. Это свидетельствует о том, что в процессе вынужденного вращения сердечника имел место значительный динамический изгиб, не связанный с пластической деформацией материала.

Явления, подобные прецессии оси осевого сердечника — пульсации потока (типа прецессии), в вихревых трубах экспериментально зафиксированы [2]. Прецессия ядра вихря в вихревой трубе Ранка–Хилша и прецессия оси сердечника в использованном вихревом устройстве, очевидно, имеют одну физическую природу.

Наблюдаемое при визуализации течений в вихревых трубах направление прецессионного вращения вихревого ядра совпадает с направлением вращения самого вихря. Это дает основание предположить, что в описанных выше экспериментах механический износ конца сердечника происходил в процессе, когда направление вращения сердечника вокруг его оси и направление прецессии оси были противоположными.

Силы и моменты, возникающие в процессе вынужденного вращения и прецессии оси сердечника, неоднократно приводили к поломке сердечников диаметром 5 и 6 мм без искривления их оси. Излом сердечника происходил в зоне ступенчатого перехода сердечника к хвостовику для установки подшипников (диаметр 4.0 мм), несмотря на предварительную обработку зоны перехода для удаления концентраторов напряжений. Излом сердечника имел вид, характерный для малоциклового усталости при изгибе с кручением — многочисленные очаги начального разрушения в тонком поверхностном слое и зона долома в центральной части, с зернистой поверхностью. Это означает, что осевой сердечник в процессе вынужденного вращения претерпевал сильный циклический изгиб при напряжениях в материале, близких к пределу текучести материала.

Как показали измерения, при работе вихревого устройства с установленным осевым сердечником механизм разделения потоков на нагретый и охлажденный (эффект Ранка–Хилша) практически не наблюдается. С ростом давления на входе вихревого устройства происходило небольшое охлаждение воздуха на обоих входах 7 и 8 (см. рисунок). При $P_I = 0.6$ МПа снижение температуры составляло 2–3°C относительно температуры воздуха на входе, что очевидно обусловлено обычным дросселированием потока. При удалении осевого сердечника устройство работало как обычная вихревая труба. При температуре воздуха на входе в вихревую трубу $T_I = +24^\circ\text{C}$, при $P_I = 0.6$ МПа, температура охлажденного и нагретого воздуха составляла соответственно $T_C = -13^\circ\text{C}$, $T_H = +37^\circ\text{C}$.

Было проведено исследование влияния вынужденного вращения осевого сердечника и его торможения на температуру выходящего воздуха. Первоначально измерялась температура воздуха на выходах 7 и 8 вихревого устройства при механически остановленном сердечнике. Затем измерялась температура на выходах 7 и 8 в режиме вынужденного вращения осевого сердечника. Установлено, что переход к вынужденному вращению осевого сердечника приводит к снижению температуры

воздуха на выходе 7 на $2-3.5^{\circ}\text{C}$ и к снижению температуры воздуха на выходе 8 на $1-1.5^{\circ}\text{C}$. Снижение температуры выходящего воздуха на обоих выходах может свидетельствовать о том, что энергия воздушного вихря расходуется на вынужденное вращение осевого сердечника, несмотря на то, что они имеют противоположные направления вращения.

В статье [5] высказано предположение, что эффект противовращения осевого стержня, отмеченный в [3,4], обусловлен изменением знака внутренних моментных напряжений (моментной среды) вблизи оси вихревой трубы, но обоснования этого не приведено.

В проведенных экспериментах воздух вращается в небольшом ($2-3\text{ mm}$) зазоре между сердечником и стенкой камеры вихревой трубы. Вращение вихря задано входной „улиткой“, и оно измениться не может. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что вынужденное вращение осевого сердечника не обусловлено механическим воздействием вращающегося потока воздуха на осевой сердечник, так как оно противоположно направлению вращения вихря. Крутящие и изгибающие моменты, действовавшие на осевой сердечник в процессе вынужденного вращения, которые приводили к поломке сердечника и „затачиванию“ его концевой участка, не могут быть объяснены воздействием вихревого потока на сердечник.

Установленный эффект может объяснить сильное закручивание и изгиб объектов в вихревых процессах, например, в торнадо, которые не могут возникнуть вследствие простого высокоскоростного напора потока воздуха.

Список литературы

- [1] *Гуцол А.Ф.* // УФН. 1997. Т. 167. В. 6. С. 665–687.
- [2] *Ахметов Ю.М., Зангиров Э.И., Свистунов А.В.* // Труды МФТИ. 2014. Т. 6. В. 2 (22). С. 99–104.
- [3] *Финько В.Е.* // ЖТФ. 1983. Т. 53. В. 9. С. 1770–1776.
- [4] *Kolomiets S.M., Vasiljev V.I., Visheratin K.N., Zarenkov A.A.* // International conference "Fluxes and Structures in Fluids". Sanct Petersburg, June 23–26. 2003. P. 92–93.
- [5] *Трофимов В.М.* // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 72. В. 5. С. 366–370.