

03

Условия возбуждения вращения сердечника в вихревом устройстве

© В.Н. Самохвалов

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

Поступило в Редакцию 4 апреля 2017 г.

Установлено, что аэродинамического трения не достаточно для возникновения вращения сердечника, установленного на шарикоподшипниках в использованном вихревом устройстве, при давлении на входе до 0.7 МПа. Необходимым условием возникновения вращения сердечника является возбуждение прецессии оси сердечника при его консольном закреплении. При отсутствии механического контакта сердечника с поверхностью камеры расширения вихревого устройства вращение сердечника происходит в сторону вращения воздушного вихря. Вращение сердечника в направлении, противоположном вращению вихря, возникает при динамическом изгибе, приводящем к механическому контакту и качению сердечника по поверхности камеры расширения вихревого устройства.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.08.45969.16812

Кроме эффекта Ранка—Хилша — разделения закрученного потока на охлажденное ядро и горячие периферийные слои — в вихревых устройствах наблюдаются механические эффекты, также не находящие очевидного объяснения. В работе [1] отмечен эффект вращения металлической оси, введенной в вихревой охладитель, в направлении, противоположном вращению воздушного вихря, с частотой вращения около 50 Hz. В [2,3] показано, что предметы цилиндрической формы, вращающиеся в направлении, противоположном вихрю, медленно прецессируют в направлении, совпадающем с направлением потока, а частота вращения зависит от величины давления на входе. В [4] высказано предположение, что эффект противовращения осевого стержня обусловлен изменением знака внутренних моментных напряжений (моментной среды) вблизи оси вихревой трубы.

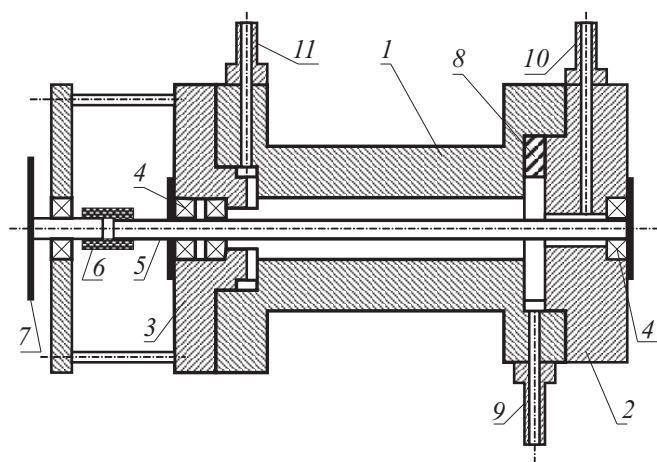


Рис. 1. Принципиальная схема вихревого устройства: 1 — камера расширения вихревой трубы, 2, 3 — передняя и задняя крышки, 4 — подшипники, 5 — сердечник, 6 — соединительная втулка, 7 — измерительный диск, 8 — «улитка» вихревой трубы, 9 — входной штуцер, 10 — выходной штуцер охлажденного воздуха, 11 — выходной штуцер нагретого воздуха.

Для экспериментальных исследований этих механических эффектов было использовано вихревое устройство на базе модифицированной противоточной вихревой трубы, принципиальная схема которого представлена на рис. 1.

Внутри камеры расширения 1 вихревой трубы с передней 2 и задней 3 крышками на подшипниках качения 4 устанавливался металлический сердечник 5. Использовались шарикоподшипники 1000094 (международный аналог NSK 694) с внутренним диаметром 4 мм, наружным диаметром 11 мм, шириной 4 мм.

Через эластичную втулку 6 сердечник был связан с диском 7, вращающимся на шарикоподшипнике. На диске 7 была установлена отражающая полоса для измерения скорости вращения сердечника бесконтактным (лазерным) цифровым тахометром Mastech MS6208B. Вход вихревой трубы улиточный, толщина «улитки» 8 равна 2,5 мм. Внутренний диаметр цилиндрической камеры расширения вихревой трубы равен 10 мм, а ее длина составляет 76 мм.

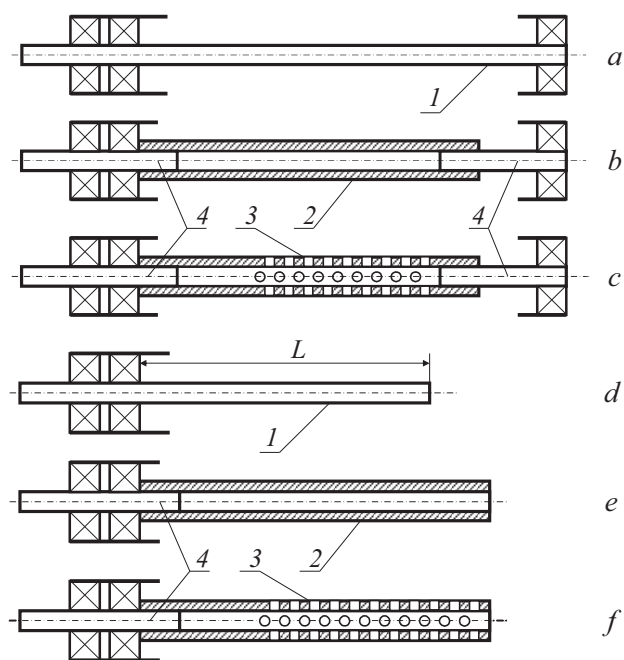


Рис. 2. Схемы крепления сердечника в вихревом устройстве: 1 — цилиндрический сердечник, 2 — трубчатый гладкий сердечник, 3 — трубчатый перфорированный сердечник, 4 — ось.

В экспериментах использовались гладкие стальные сердечники различной длины из калиброванного прутка диаметром 4 мм, а также стальные трубчатые сердечники длиной 86 мм с наружным диаметром 6 мм и толщиной стенки 1 мм. Первый трубчатый сердечник был с гладкой поверхностью, а во втором (перфорированном) сердечнике на длине 60 мм было выполнено 70 отверстий диаметром 2 мм. Трубчатые сердечники устанавливались в подшипниках с помощью запрессованных во внутреннюю полость стальных осей диаметром 4 мм.

В первой серии экспериментов было применено двухопорное крепление цилиндрического (рис. 2, *a*), гладкого (рис. 2, *b*) и перфорированного (рис. 2, *c*) трубчатых сердечников в подшипниках, установленных

в передней и задней крышках вихревого устройства. Расстояние между ближайшими опорами (подшипниками) составляло 108 мм.

На входной штуцер 9 (рис. 1) вихревого устройства подавалось давление из сети сжатого воздуха. Установлено, что в диапазоне изменения давления воздуха на входе от 0.1 до 0.7 МПа вращения сердечников не возникает. Трубчатый перфорированный сердечник создает повышенное аэродинамическое сопротивление при обтекании его воздушным вихрем, но его вращение также не возбуждалось. Вибрации устройства не возникало.

Отсутствие вращения при установке перфорированного трубчатого сердечника с повышенным аэродинамическим сопротивлением означает, что простого механического воздействия воздушного вихря на поверхность (аэродинамическое сопротивление — сопротивление трения) в использованном вихревом устройстве не достаточно для возбуждения вынужденного вращения сердечников, установленных на шарикоподшипниках.

Во второй серии экспериментов было применено консольное крепление цилиндрических сердечников диаметром 4 мм на двух подшипниках, установленных в задней крышке вихревого устройства (рис. 2, *d*). Установлено, что при длине консольной части сердечника $L \geq 88$ мм, т.е. когда свободный конец сердечника находился внутри отверстия диффузора диаметром 6 мм в передней крышке вихревого устройства (2 на рис. 1), вращение сердечника не возникало во всем диапазоне давлений $P_I = 0.1-0.7$ МПа. Вибрация устройства не наблюдалась, акустические колебания не возникали. Это также подтверждает, что простое механическое воздействие воздушного вихря не приводит к возбуждению вынужденного вращения сердечника, установленного на шарикоподшипниках.

Как показали эксперименты, вынужденное вращение сердечника в использованном вихревом устройстве возбуждается только при выходе свободного конца сердечника из отверстия диффузора в передней крышке ($L < 88$ мм). В этом случае консольно закрепленный сердечник получает возможность изгиба и прецессионного вращения его оси.

Установлено, что направление вынужденного вращения сердечника вокруг оси зависит от длины его консольной части L (его жесткости), давления на входе в вихревое устройство P_I и плотности установки (люфта) сердечника в подшипниках.

Для каждой величины длины консольной части сердечника имела место „граничная“ величина давления на входе вихревого устройства, при которой возникало неустойчивое вращение. Если давление было ниже этой величины, то наблюдалось вращение сердечника в сторону вращения вихря. При давлении выше „граничного“ возникало вращение сердечника в направлении, противоположном вращению вихря. При этом в обоих случаях наблюдалось возникновение вибрации устройства и появление низкочастотных звуковых колебаний.

При длине консольной части сердечника $L = 70$ мм величина „граничного“ давления была равна $P_I = 0.3–0.35$ МПа. При меньшем давлении происходило медленное (рывками) вращение сердечника по направлению вихря, а при $P_I = 0.4$ МПа наблюдалось уже вращение сердечника в направлении, противоположном вращению вихря, с частотой 2.5–3.5 Hz. В то же время при $L = 60$ мм и $P_I = 0.4$ МПа имело место неустойчивое (рывками) вращение сердечника в направлении вращения вихря с частотой 1.5–2 Hz, а при $P_I = 0.5$ МПа — такое же неустойчивое вращение в направлении, противоположном вращению вихря. При $L = 55$ мм вплоть до максимального давления $P_I = 0.7$ МПа наблюдалось вращение сердечника только в направлении вращения вихря. Частота вращения сердечника при $P_I = 0.7$ МПа составляла около 30 Hz,

После извлечения сердечников, вращавшихся в направлении, противоположном вихрю, на их концевой части наблюдались блестящие кольцевые пояски длиной 1–3 мм. У сердечников, вращавшихся в сторону вращения вихря, блестящие пояски не возникали.

Появление блестящего пояска на конце сердечника является следствием его механического контакта с поверхностью камеры расширения вихревого устройства в процессе вращения с динамическим изгибом. При достаточно большой величине динамического изгиба сердечника возникает механический контакт его конца с поверхностью камеры расширения. За счет сил трения при прецессии оси сердечника, совпадающей с направлением вращения вихря, сердечник начинает катиться по поверхности камеры расширения. Так возникает вращение сердечника вокруг его оси в направлении, противоположном вращению вихря. Поскольку собственное вращение сердечника (до момента касания стенки) совпадало с направлением вихря, качение сердечника происходит с проскальзыванием, что приводит к возникновению блестящего пояска на конце сердечника.

В третьей серии экспериментов гладкая (рис. 2, *e*) и перфорированная (рис. 2, *f*) стальные трубки были консольно установлены на двух подшипниках в задней крышке вихревого устройства. Обнаружено, что для гладкой трубки величина „граничного“ давления составляет $P_I = 0.15–0.2$ МПа. При $P_I = 0.5$ МПа частота вращения в сторону, противоположную вращению вихря, составляла 90–100 Hz. На конце сердечника возникал блестящий поясок длиной 3–6 mm. В то же время при установке перфорированного трубчатого сердечника во всем диапазоне давлений $P_I = 0.1–0.7$ МПа его вращение происходило только в направлении вращения вихря с частотой 70–90 Hz.

Начальный изгиб и прецессионное вращение сердечника возникают вследствие неоднородности вихря в вихревых трубах — экспериментально наблюдавшейся прецессии вихревого ядра газового [5] и водного вихря [6]. В дальнейшем при динамическом изгибе сердечника уменьшается сечение потока в зазоре со стенкой камеры расширения. У гладкого трубчатого сердечника это приводит к возрастанию скорости потока в зазоре и падению статического давления: возникает сила, которая вместе с центробежной силой прижимает сердечник к стенке камеры.

У перфорированного трубчатого сердечника вследствие перетекания воздуха через отверстия и внутреннюю полость трубки падение статического давления в зазоре снижается, что уменьшает возможность возникновения механического контакта сердечника со стенкой камеры. В эксперименте с перфорированным трубчатым сердечником это исключило возникновение вращения сердечника в направлении, противоположном вращению воздушного вихря.

Проведенные эксперименты позволяют сделать следующие выводы.

В использованном вихревом устройстве аэродинамического трения не достаточно для возникновения вращения сердечника, установленного на шарикоподшипниках, при давлении на входе до 0.7 МПа.

Возбуждение изгиба и прецессии оси сердечника при его консольном закреплении является необходимым условием возникновения вращения сердечника вокруг оси.

При отсутствии механического контакта сердечника с поверхностью камеры расширения вращение консольно закрепленного сердечника вокруг его оси происходит в сторону вращения воздушного вихря. Вращение сердечника в направлении, противоположном вращению вихря, возникает при динамическом изгибе, приводящем к механическому контакту и качению сердечника по поверхности камеры расширения вихревой трубы.

Список литературы

- [1] *Финько В.Е.* // ЖТФ. 1983. Т. 53. В. 9. С. 1770–1776.
- [2] *Kolomiets S.M., Vasiljev V.I., Visheratin K.N., Zarenkov A.A.* // Int. Conf. „Fluxes and structures in fluids“. St. Petersburg, 2003. P. 92–93.
- [3] *Visheratin K.N., Vasiljev V.I., Kolomiets S.M., Zarenkov A.A.* // Int. Heat Powered Cycles Conf. Cyprus, 2004. P. 1203–1210.
- [4] *Трофимов В.М.* // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 72. В. 5. С. 366–370.
- [5] *Ахметов Ю.М., Зангиров Э.И., Свистунов А.В.* // Тр. МФТИ. 2014. Т. 6. В. 2 (22). С. 99–104.
- [6] *Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л.* Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2003. 504 с.