

03

Влияние способа подачи воздуха на параметры прецессирующего вихревого жгута в гидродинамической вихревой камере

© С.В. Алексеенко^{1,2}, С.И. Шторк^{1,¶}, Р.Р. Юсупов^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

¶ E-mail: shtork@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 21 марта 2017 г.

Экспериментально исследовано влияние на параметры прецессирующего вихревого жгута способа подачи газовой фазы в закрученный поток жидкости. Моделирование условий возникновения эффекта прецессии вихревого жгута проводилось в гидродинамической вихревой камере с внезапным расширением. Получены зависимости частоты прецессии вихревого ядра, уровня пульсаций потока и полного перепада давления в вихревой камере от расходного газосодержания в потоке. Результаты измерений позволяют определить оптимальные условия для наиболее эффективного контроля явления прецессии вихревого жгута.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.05.45711.16786

Закрученные многофазные газожидкостные потоки представляют большой интерес, поскольку с ними достаточно часто приходится иметь дело в различных практических устройствах, таких как гидроциклонные сепараторы [1], атомизаторы [2], генераторы микропузырьков [3], многофазные расходомеры [4], гидротурбинные агрегаты [5]. Применительно к гидроэнергетике многофазные явления связаны также с эффектом сильной нестационарности течения, появляющейся при неоптимальных режимах работы гидроагрегата, когда поток, прошедший через рабочее колесо турбины, имеет большую остаточную закрутку. При этих условиях в конусе отсасывающей трубы формируется прецессирующее вихревое ядро — ПВЯ (в литературе по гидроэнергетической тематике ПВЯ называют прецессирующим вихревым жгутом [6]). Прецесси-

рующей вихревой жгут снижает эксплуатационные характеристики гидротурбины, являясь источником мощных низкочастотных пульсаций потока, которые могут быть причиной серьезных аварий на ГЭС. В настоящее время существуют различные способы уменьшения пульсаций давлений, одним из которых является подача воздуха под рабочее колесо гидротурбины [7]. Этот способ достаточно широко используется на практике, однако систематические экспериментальные исследования влияния наличия газовой фазы на параметры прецессирующего вихревого жгута практически не представлены в литературе, за исключением единичных работ [8]. Заметим, что учет влияния многофазности потока на параметры вихревого жгута необходим также в связи с явлением кавитации, когда из-за разрежения на оси вихревого ядра формируется паровая каверна. Цель настоящей работы, которая является продолжением наших предыдущих опытов [5,8], состоит в исследовании того, как способ подачи газовой фазы в жидкость влияет на характеристики течения с прецессирующим вихревым жгутом, в том числе на частоту прецессии вихревого ядра и уровень пульсаций. Результаты опытов важны для нахождения оптимального метода эффективного контроля прецессии вихревого жгута.

В качестве рабочего участка, как и в работе [8], использовалась осесимметричная цилиндрическая вихревая камера, ориентированная вертикально (рис. 1, *a*). На входе в рабочий участок поток приобретает закрутку, проходя через стационарный лопаточный завихритель *I*. Затем через сопло 2 диаметром $D = 52 \text{ mm}$ поток поступает в цилиндрическую камеру диаметром D^* и высотой $H = D^* = 104 \text{ mm}$. Из-за внезапного расширения происходит распад вихря, ведущий к образованию прецессирующего вихревого жгута [9]. На выходе из рабочего участка установлена крестовина 3, препятствующая образованию вторичных вихревых структур. Для создания закрученного потока использовался завихритель с параметром крутки $S = 0.87$, что соответствует высокому уровню закрутки, характерному для неоптимальных режимов работы гидротурбины. Под параметром S подразумевается геометрический параметр крутки, определяемый, как и в работах [8,9], по формуле

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - \left(\frac{d_h}{d}\right)^3}{1 - \left(\frac{d_h}{d}\right)^2} \right] \operatorname{tg} \phi,$$

где d — диаметр завихрителя, d_h — диаметр непроходной центральной части, ϕ — угол наклона лопаток (рис. 1, *b*).

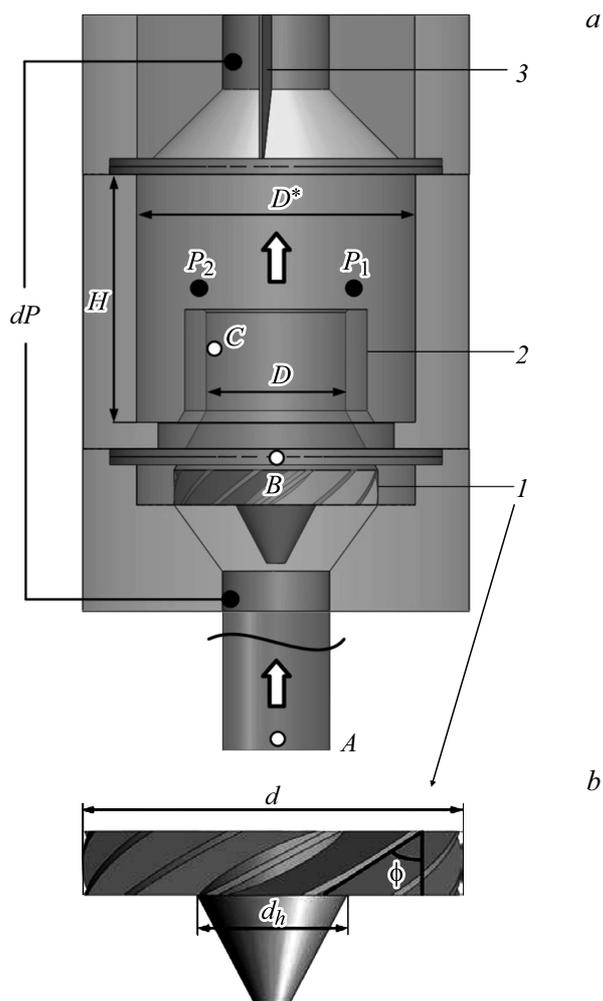


Рис. 1. *a* — схема вихревой гидродинамической камеры. P_1 и P_2 — точки измерения пульсаций давления; dP — измеряемый перепад давления; точки подачи воздуха в поток: A — перед рабочим участком, B — через центр завихрителя, C — на периферии сопла. *b* — схема завихрителя.

Над соплом диаметрально противоположно устанавливались два пьезодатчика давления Piezoelectric-014МТ (P_1 и P_2), предназначенные для измерения частоты прецессии и уровня пульсаций давления (рис. 1, *a*). Такое расположение пьезодатчиков позволяет регистрировать в противофазе пульсации давления, вызванные ПВЯ, и, вычитая один сигнал из другого, удалять посторонние шумы [8]. Измерение полного перепада давления в камере dP , являющегося стандартной характеристикой гидравлической системы, производилось при помощи дифференциального тензодатчика давления. Время каждого измерения составляло 120 с, за это время вихревое ядро совершает порядка 5000 оборотов. Для проведения экспериментальных исследований влияния подачи воздуха в вихревую камеру было реализовано три варианта вдува газа (точки *A*, *B*, *C* на рис. 1). Первый способ (точка *A*) основан на подаче дисперсной газовой фазы в поток жидкости на расстоянии 2 м до входа в рабочий участок. Во втором варианте (точка *B*) поток воздуха подавался в центр лопаточного завихрителя через отверстие диаметром 3 мм. И в последней реализации газовая фаза вдувалась на периферии сопла 2 (точка *C*) через аналогичное отверстие.

На рис. 2, *a* представлена зависимость безразмерной частоты прецессии ПВЯ от расходного газосодержания для разных значений расхода жидкости: $Q_{liquid} = 8, 10, 12 \text{ м}^3/\text{ч}$. Разные символы соответствуют различным способам подачи газовой фазы в поток. Видно, что появление газа в потоке ведет к уменьшению частоты прецессии. Данные для различного расхода жидкости в безразмерных координатах $St - \beta$ ($St = fD/U_0$ — число Струхалея, f — частота прецессии, U_0 — среднерасходная скорость жидкости в сопле, $\beta = Q_{gas}/(Q_{liquid} + Q_{gas})$ — расходное газосодержание) довольно хорошо обобщаются. Аналогичная эволюция имеет место для уровня пульсаций давления (рис. 2, *b*) и полного перепада давления в зависимости от расходного газосодержания $Eu - \beta$ (рис. 2, *c*), где $Eu = dP/\rho U_0^2$ — число Эйлера, dP — полный перепад давления, ρ — плотность жидкой фазы. Данные также хорошо обобщаются, если для вычисления безразмерных величин используются параметры жидкой фазы [8]. Можно видеть, что наибольшее влияние на измеренные параметры оказывает вдув воздуха через центр завихрителя (точки *B* на рис. 2). Наименьшее влияние наблюдается, когда воздух подается на периферии сопла (точки *C* на рис. 2). По всей видимости, в последнем случае воздух сразу же выносится потоком в цилиндрическую камеру, минуя ядро вихря.

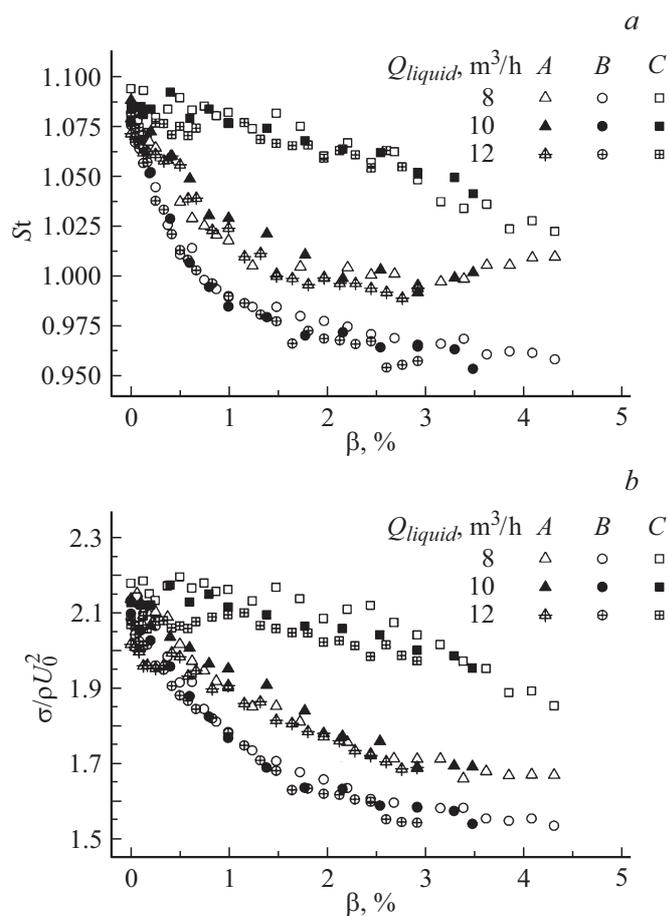


Рис. 2. Влияние места подачи воздуха и расхода жидкости на интегральные характеристики потока: *a* — безразмерная частота прецессии (St) в зависимости от расходного газосодержания (β); *b* — безразмерные значения среднеквадратичных отклонений пульсаций (RMS) давления σ ; *c* — безразмерный полный перепад давления (Eu); *d* — обобщающая зависимость St от Eu (стрелки показывают направление увеличения расхода газа).

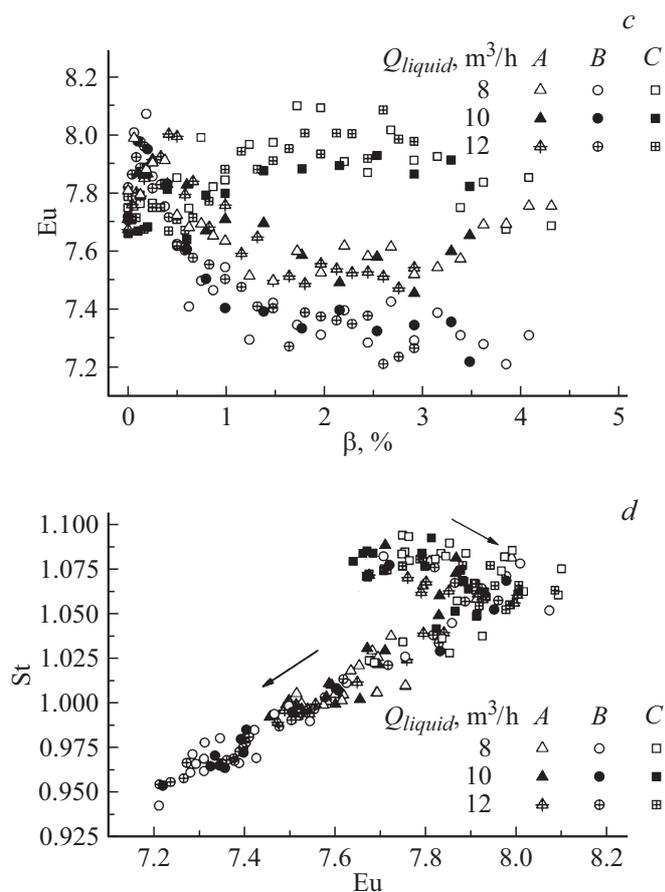


Рис. 2 (продолжение).

Можно предположить, что наблюдаемый эффект от подачи воздуха связан с сепарацией более легкой газовой фазы к центру вихря и формированием газового ядра. Это означает резкое увеличение поперечного масштаба вихревого ядра, т.е. имеет место переход от концентрированного интенсивного вихря, формирующегося в чистой жидкости, к менее концентрированному кольцевому вихрю. Такой кольцевой вихрь индуцирует существенно более низкую скорость движения

вокруг оси вихря и разрежение вблизи центра вращения. Все это приводит к уменьшению характерной частоты прецессии вихревого жгута и снижению уровня пульсаций давления, индуцированных прецессирующим вихрем. Генерация менее концентрированного вихря требует меньше энергии, поэтому при подаче газа происходит также снижение полного перепада давления. При этом зависимости для вдува воздуха перед рабочим участком (точки *A* на рис. 2) хотя и демонстрируют меньший эффект от подачи воздуха по сравнению со случаем инъекции воздуха непосредственно в центр вихря (точки *B* на рис. 2), но находятся достаточно близко от кривых, соответствующих вдуву через точку *B*. Это свидетельствует о том, что за счет сильной закрутки потока происходит эффективное разделение фаз в вихревом устройстве, если воздух подается перед рабочим участком. При подаче воздуха в центр завихрителя сильная закрутка, очевидно, стабильно удерживает газ вблизи оси вихря. Таким образом, результирующая структура течения внутри сопла, где происходит формирование ПВЯ, практически одинакова для случаев подачи воздуха в точки *A* и *B*. Это обуславливает небольшое отличие параметров течения, измеренных для этих двух серий экспериментов.

Интересный эффект обнаруживается при построении диаграммы $Eu-St$ (рис. 2, *d*), из которой видно, что данные для всех значений расхода жидкости и газа, а также способов его подачи, включая случай со вдувом через точку *C*, располагаются вдоль одной зависимости. Режимы с нулевым расходом газа, соответствующие течению чистой жидкости, располагаются в верхней части рисунка. При малых газосодержаниях зависимость идет с наклоном вниз, а затем при увеличении подачи газа резко изменяет направление, приобретая форму прямой линии с углом наклона вверх. Точка перехода соответствует, по-видимому, резкому изменению структуры течения именно поперечного размера газовой полости, которая формируется вдоль оси вихря [8].

Таким образом, исследования показали, что основной эффект от подачи воздуха связан с сепарацией более легкой газовой фазы к центру вихревого ядра и формированием газового ядра вдоль оси вихря. Это означает переход от концентрированного интенсивного вихревого жгута к менее концентрированному кольцевому вихрю, который генерирует заметно более слабые пульсации давления в потоке. Частота прецессии и полный перепад давления при этом снижаются. Наибольшее влияние на уровень пульсаций потока оказывает вдув воздуха через центр

завихрителя. Близкий эффект достигается также, когда вдув воздуха осуществляется до рабочего участка. В этом случае за счет сильной закрутки потока в вихревом устройстве происходит эффективное отделение газовой фазы в центр вихря и уменьшение пульсаций потока, вызываемых прецессией вихревого жгута. Это позволяет использовать способ подачи воздуха в подводный тракт гидротурбины не только для борьбы с прецессирующим вихревым жгутом (гидродинамической неустойчивостью), но и для коррекции условий распространения волн давления в проточных частях гидротурбины (например, с целью подавления гидроакустических колебаний).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00093).

Список литературы

- [1] *Matsubayashi T., Katono K., Hayashi K., Tomiyama A.* // Nucl. Eng. Design. 2012. V. 249. P. 63–70.
- [2] *Lee E.J., Oh S.Y., Kim H.Y., James S.C., Yoon S.S.* // Exp. Therm. Fluid Sci. 2010. V. 34. P. 1475–1483.
- [3] *Tabei K., Haruyama S., Yamaguchi S., Shirai H., Takakusagi F.* // J. Environment Eng. 2007. V. 2. P. 172–182.
- [4] *Pirouzpanah S., Çevik M., Morrison G.L.* // Flow Measurement Instrum. 2014. V. 40. P. 157–161.
- [5] *Скрипкин С.Г., Куйбин П.А., Шторк С.И.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 13. С. 48–55.
- [6] *Kuibin P., Pylev I., Zakharov A.* // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Sci. 2012. V. 15. P. 022001.
- [7] *Pejovic S.* Troubleshooting of turbine vortex core resonance and air introduction into the draft tube // Proc. of the XXI IAHR Symp. on hydraulic machinery and systems. Lausanne, 2002.
- [8] *Винокуров А.П., Шторк С.И., Алексеенко С.В.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 17. С. 61–67.
- [9] *Шторк С.И., Кала К.Э., Фернандес Э.К., Хейтор М.В.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 15. С. 62–68.