

С. Г. Скрипкин¹, М. А. Цой¹, С. И. Шторк^{1,2}, П. А. Куйбин¹

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
ул. Кутателадзе, 2, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

skripkin.s.g@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В МОДЕЛЬНОЙ ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЕ ГИДРОТУРБИНЫ, ВЫЗВАННЫХ ВИХРЕВЫМИ КОЛЬЦАМИ*

Работа посвящена экспериментальному исследованию поведения прецессирующего вихревого жгута в модельной отсасывающей трубе гидротурбины. В качестве модели рабочего колеса использовалась комбинация лопаточных завихрителей – стационарного и свободновращающегося. Подобная конструкция обеспечивала распределение скорости на входе в отсасывающую трубу, близкое к распределению в натуральных гидротурбинах, работающих в неоптимальных режимах. В ходе экспериментального наблюдения с использованием высокоскоростной съёмки было обнаружено явление перезапыления прецессирующего вихревого жгута с последующим формированием вихревого кольца. Синхронизация высокоскоростной съёмки с измерением давления пьезорезистивным датчиком позволила сопоставить мощные пульсации давления на стенке отсасывающей трубы, регистрируемые в исследуемом режиме, с приближающимся к ней вихревым кольцом.

Ключевые слова: вихревое кольцо, гидротурбина, прецессирующее вихревое ядро пульсации.

Введение

На современном этапе развития рынка электроэнергии гидроэлектростанции выступают в качестве производителей энергии и играют значительную роль в регулировании электрических сетей. Ввиду этого гидроагрегаты работают в широком диапазоне режимов, иногда неоптимальных для гидротурбин. Причем стабильность работы гидротурбин может значительно снижаться в переходном или неоптимальном режимах работы. В большей мере сказанное относится к турбинам Френсиса, имеющим большую единичную мощность. При работе гидротурбины Френсиса вне оптимального режима

(или турбины Каплана в некомбинаторном режиме) поток за рабочим колесом имеет остаточную закрутку. В совокупности с диффузорностью отсасывающей трубы наличие закрученного потока приводит к возникновению гидродинамического явления, известного как прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ). В потоке за рабочим колесом формируется концентрированный вихрь, который начинает совершать прецессирующее движение вокруг оси конического участка отсасывающей трубы. В результате взаимодействия с коленом вихревой жгут вызывает мощные пульсации давления, распространяющиеся во всем гидродинамическом тракте и оказывающие негативное

* Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ (проект № 16-08-01191 А).

влияние на элементы и конструкции гидроагрегата. Совпадение частоты этих пульсаций с собственными частотами проточной части в определенных режимах приводит к ограничению диапазона допустимых параметров эксплуатации турбин из-за негативных резонансных последствий [1]. Таким образом, ПВЯ является одной из основных причин, приводящих к снижению эффективности и эксплуатационной надежности гидроагрегата. Ввиду действия центробежных сил область ПВЯ является зоной пониженного давления, которое в некоторых случаях может быть ниже давления насыщенных паров воды, что приводит к локальному возникновению кавитации в потоке. Попадая в область повышенного давления ниже по течению, кавитационные полости начинают схлопываться, также генерируя нежелательные пульсации давления.

Формирование прецессирующего вихревого жгута в гидротурбинах исследовалось на протяжении долгого времени как экспериментальными методами, так и с использованием численного моделирования [2–5]. Ввиду сложности воспроизведения всего полномасштабного гидродинамического тракта используются уменьшенные и упрощенные модели, воспроизводящие основные элементы турбин. Еще больше упростило проведение экспериментов использование в качестве рабочей среды воздуха, причем гидродинамические и аэродинамические эксперименты показали хорошее согласование между собой [6].

Также были осуществлены успешные попытки аналитического описания ПВЯ с апробацией их модельным экспериментом. Так, в работе [7] был проведен анализ частоты прецессии вихревого жгута, полученной из эксперимента и рассчитанной с использованием теории винтовых вихрей. Несмотря на продолжительные исследования данного явления, ввиду многообразия геометрий гидротурбин, сложности потока за рабочим колесом и большого количества режимов течения исследования формирования ПВЯ и сопутствующих ему явлений до сих пор актуальны. Методы численного моделирования (CFD) значительно ускоряют исследование ПВЯ, наблюдаемого в натуральных гидротурбинах, а также позволяют проводить оптимизацию основных элементов гидротурбины [3]. Тем не менее методы чис-

ленного моделирования также требуют верификации модельными экспериментами.

Как было сказано, одним из факторов, определяющих характер течения в отсасывающих трубах, является режим работы гидротурбины. При работе турбины с постоянной частотой вращения рабочего колеса структура течения зависит от напора H и величины угла открытия направляющего аппарата α . Чаще всего режим работы гидротурбины характеризуют мощностью P или расходом Q , которые являются однозначными функциями от H и α . Известно, что режим течения в диапазоне расхода $Q = 0,5–0,8 Q_{\text{опт}}$ ($Q_{\text{опт}}$ – оптимальный расход, соответствующий максимальной эффективности турбины) характеризуется наличием явно выраженного вихревого жгута спиральной формы. Смещение в сторону более сильной недогрузки ($0,4–0,5 Q_{\text{опт}}$) приводит к появлению большого количества нерегулярных вихревых жгутов, замещающих спиральный вихрь [8; 9]. Иногда в очень узком диапазоне расхода наблюдается режим с устойчивым двойным вихревым жгутом [10; 11].

Отдельно следует отметить режим «слабой недогрузки» $0,7–0,8 Q_{\text{опт}}$ ввиду неустойчивости спиралевидной формы вихря. В литературе данный режим также упоминается как «ударная зона» [8]. Это связывают с неустойчивостью вихревого жгута, части кавитационной каверны которого постоянно отрываются и схлопываются. В работах [9; 12] отмечено, что в таком режиме – с небольшой остаточной закруткой, могут существовать различные формы вихревого жгута, а сам режим требует дальнейшего тщательного экспериментального исследования.

В данной работе на упрощенной модели отсасывающей трубы гидротурбины были воспроизведены распределения скорости за рабочим колесом турбины, качественно похожие на режимы при $Q = 0,8–0,9 Q_{\text{опт}}$. Как и в работах других авторов (см., например, [8; 12]), вихревой жгут имеет явно выраженную спиральную форму, однако его геометрия с некоторой регулярностью искажается. В результате происходит перезамыкание участка вихревой спирали с формированием вихревого кольца. Перезамыкание на винтовом вихре в коническом канале наблюдалось впервые. Количественная информа-

ция по структуре течения была получена с использованием техники лазерно-доплеровской анемометрии (ЛДА).

Экспериментальная установка

Измерения проводились на экспериментальном стенде в Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, в лаборатории экологических проблем теплоэнергетики. Стенд представляет собой замкнутый гидродинамический контур с рабочим участком, моделирующим проточный тракт гидротурбины. Вместо рабочего колеса используется комбинация стационарного и свободно вращающегося завихрителей, позволяющих получать распределение скорости на входе в отсасывающую трубу близкое к натурным. В качестве модели отсасывающей трубы использовалась упрощенная геометрия без поворотного колена, которая позволяет анализировать эффекты, связанные с распределением скорости за рабочим колесом, исключая взаимодействия ПВЯ с коленом (рис. 1).

Отсасывающая труба изготовлена из полиметилметакрилата, что обеспечивает полный оптический доступ для бесконтактных методов диагностики потока. Для создания закручивающего аппарата была использована техника быстрого 3D-прототипирования, позволяющая воспроизводить 3D-модели деталей с высокой точностью. Расход в гидродинамическом контуре, создаваемый центробежным насосом Ebara 3LMH 80-160/18.5, варьировался от 0 до 0,067 м³/с. Система обратной связи с использованием электромагнитного расходомера позволяла стабилизировать расход и поддерживать его при выбранных значениях с точностью до 0,5 %. Для измерения абсолютного давления на стенке отсасывающей трубы в конусе был вмонтирован пьезорезистивный датчик давления. Моделирование кавитационных условий производилось с помощью вакуумного насоса, установленного в верхней части экспериментального стенда. Насос обеспечивал дополнительное разрежение до 96 кПа, что позволяло регулировать число кавитации в широком диапазоне.

Одним из основных параметров, характеризующих завихритель (см. рис. 1), моделирующий рабочее колесо, является параметр крутки потока – S . Обычно он определяется как отношение потока момента количества

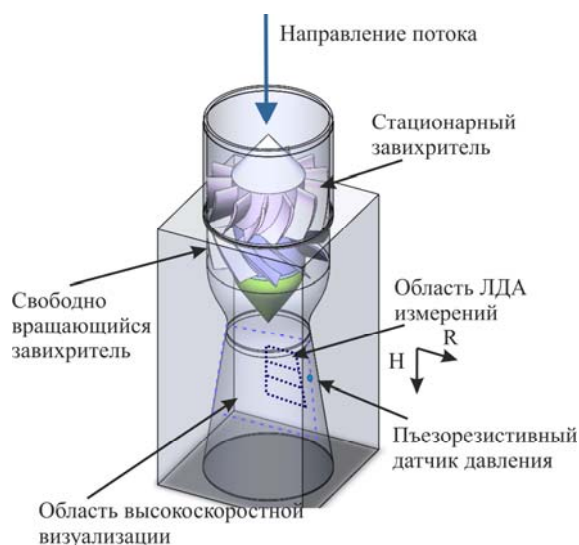


Рис. 1. Схема рабочего участка и измерительной области

движения в осевом направлении к потоку количества движения в осевом направлении. Однако в случае простых закручивающих устройств, например таких, как лопаточные завихрители, гораздо удобнее использовать конструктивный параметр крутки Sg :

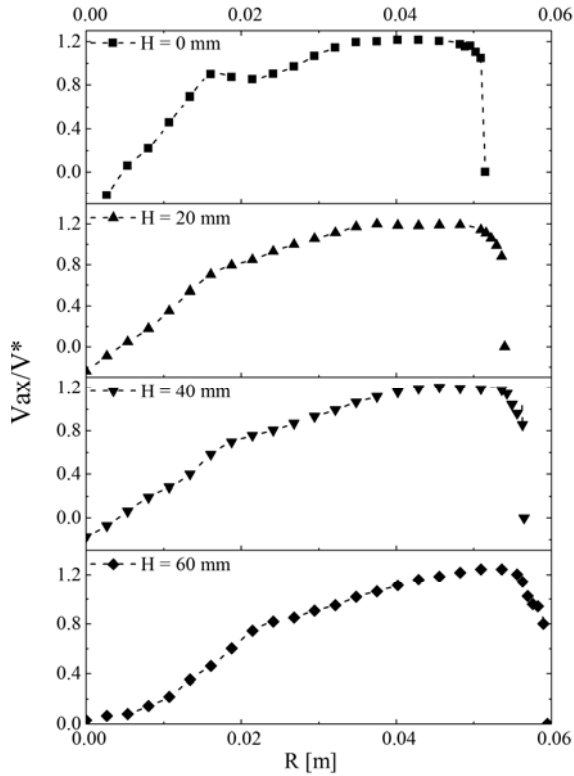
$$Sg = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (d_1/d_2)^3}{1 - (d_1/d_2)^2} \right] \tan(\varphi),$$

где d_1 и d_2 – внутренний и внешние диаметры, φ – угол наклона лопаток на выходе из завихрителя [13].

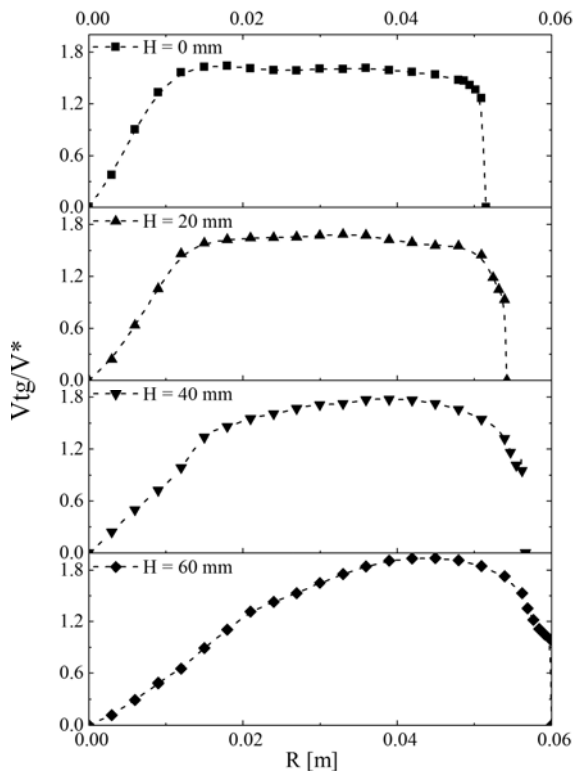
В данной работе завихритель был спроектирован таким образом, что $Sg = 0,65$. Использование конструктивного параметра крутки удобно при сопоставлении результатов, полученных в схожих геометриях.

Экспериментальное оборудование

Современная техника визуализации потока позволяет исследовать различные особенности ПВЯ при высоком временном разрешении. Так, использование высокоскоростной камеры CMOS PCO 1200.hs с частотой съёмки 500 кадров в секунду позволило выявить интересные особенности поведения ПВЯ в исследуемом режиме. Более того, использование пьезорезистивного датчика давления Keller PA-4LC, синхронизированного посредством аналогово-цифрового преобразователя L-Card LE-440 с высокоскоростной камерой, позволило сопоста-



а



б

Рис. 2. Профили аксиальной (а) и тангенциальной (б) скорости в различных сечениях, обезразмеренные через среднерасходную скорость, $Q = 0,028 \text{ м}^3/\text{с}$

вить отрывы участков кавитационных камер в форме колец с резкими пульсациями давления на стенке отсасывающей трубы.

Количественные измерения аксиальной и тангенциальной скорости в конусе отсасывающей трубы были проведены с использованием лазерно-доплеровского анемометра ЛАД-06, разработанного в Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. Работа ЛАД-06 основана на измерении доплеровского сдвига лазерного излучения, отраженного от специальных полиамидных частиц размером 20 мкм, засеянных в поток. Измерительный объем, формируемый двумя скрещивающимися лазерными лучами ЛАД-06, равняется $0,05 \times 0,05 \times 1 \text{ мм}$. Время измерения в каждой точке 300 с, что соответствует 1000–6500 вспышек. Схема измерения профилей скорости представлена на рис. 1. Измерительная система была установлена на полностью автоматизированном координатном устройстве; измерительный шаг по вертикальной оси был 5 мм и 2,5 мм вдоль радиуса.

Экспериментальные результаты

На рис. 2 представлена количественная информация, характеризующая структуру потока в исследуемом режиме. Основной аксиальный поток сосредоточен вблизи стенок отсасывающей трубы, причем в самом начале конуса наблюдается узкая зона рециркуляции, примерно $0,1R$, которая исчезает в сечении $H = 60 \text{ мм}$. Форма профиля тангенциальной скорости также изменяется по сечениям: при $H = 0 \text{ мм}$ профиль скорости очень пологий, с прямолинейным участком ближе к оси в центре, а при $H = 60 \text{ мм}$ наблюдается выраженный максимум на расстоянии $0,75R$.

Эксперименты по визуализации проводились при разных расходах и дополнительном разрежении, однако, как выяснилось, расход жидкости в контуре не оказывает влияния на структуру течения, в результате чего в работе представлена визуализация при расходе $Q = 0,041 \text{ м}^3/\text{с}$, при котором вихревой жгут визуализировался наиболее четко. Частота прецессии ПВЯ ввиду слабого сигнала давления на стенке отсасывающей трубы определялась с помощью покадрового анализа высокоскоростной визуализации и равнялась 40 Гц для данного расхода.

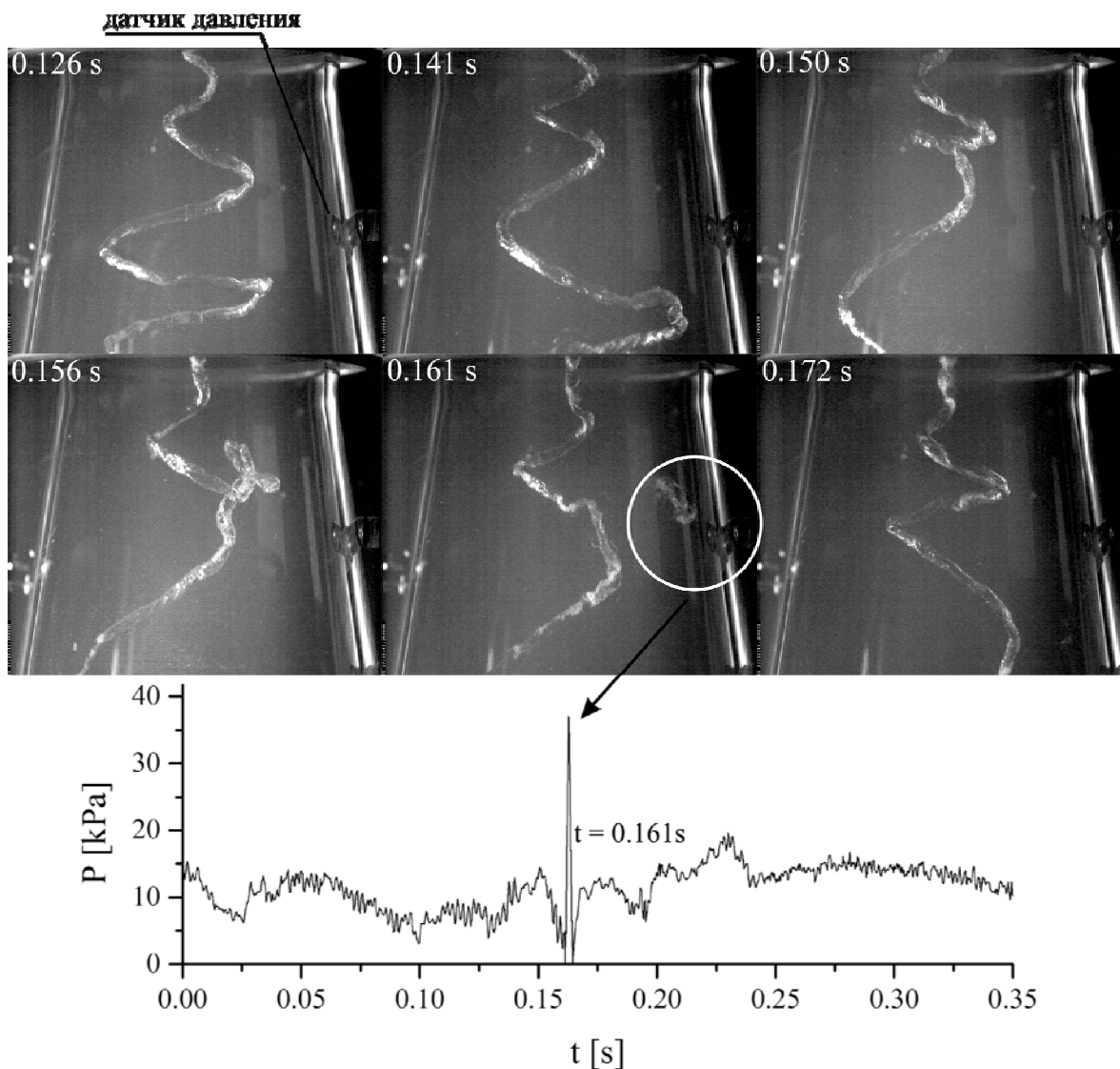


Рис. 3. Высокоскоростная съёмка и осциллограмма, синхронизованные посредством АЦП, $Q = 0,041 \text{ м}^3/\text{с}$

На рис. 3 представлена серия изображений процесса формирования вихревого кольца и его движения в потоке. Визуально перегиб вихревого жгута похож на описанный в работе [14], формирующийся в режиме $0,9 Q_{\text{опт}}$, однако информация о вихревом перезамыкании и последующем отрыве вихревого кольца в работе [14] отсутствует.

Сам процесс вихревого перезамыкания достаточно сложен и более подробно описан в статье [15].

Следует отметить, что часть вихревой спирали, предположительно, попадая в область возвратного течения, замирает на месте, затем начинает сближаться с верхним витком. Продолжительность процесса от момента перегиба до полного отделения

вихревого кольца составляет 10 мс. Иногда после отрыва вихревого кольца наблюдается значительная деформация базовой геометрии вихревой спирали.

Также на рис. 3 представлена осциллограмма давления на стенке отсасывающей трубы. Видно, что в момент $t = 0,161 \text{ с}$ от начала реализации съёмки к стенке отсасывающей трубы подлетает вихревое кольцо, в этот же момент датчик регистрирует значительный скачок давления. Причем средний уровень пульсаций давления на стенке, связанный с наличием ПВЯ, составляет всего 5–7 кПа; в свою очередь, вихревое кольцо создает скачок давления в 6–7 раз больше. При данном расходе также были зафиксированы скачки давления, до 10 раз превышаю-

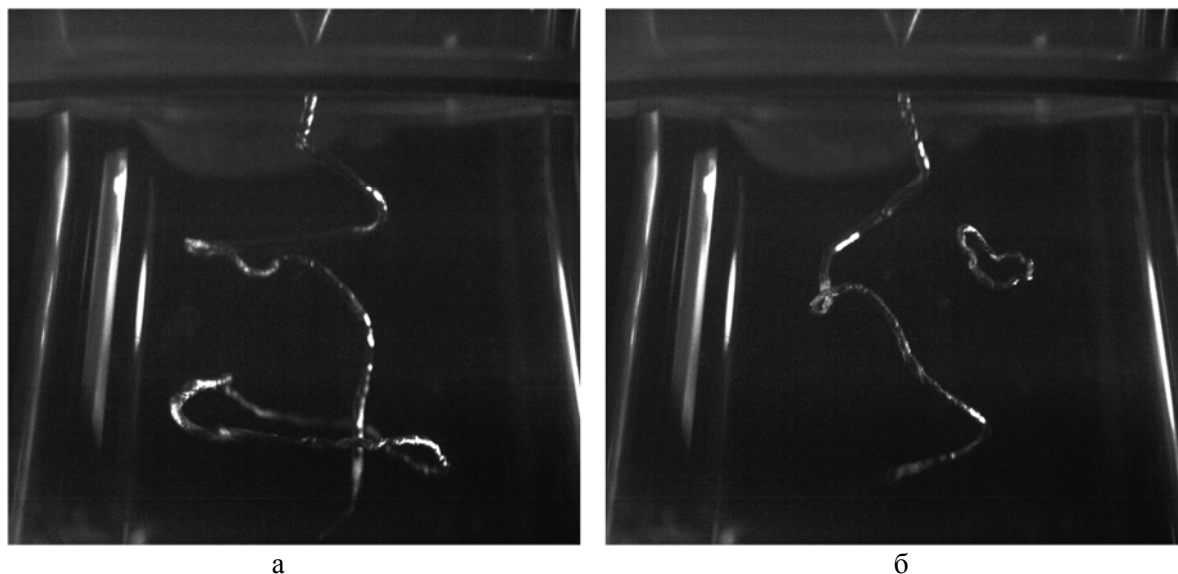


Рис. 4. Визуализация вихревых колец: а – связанное; б – изолированное

щие пульсации ПВЯ, однако вид сигнала в значительной мере отличался. В основном вид скачка давления, регистрируемый датчиком, зависит от того, каким образом вихревое кольцо подлетает к стенке отсасывающей трубы и движется вдоль нее. Частота отрыва вихревых колец непостоянна и имеет вид распределения Гаусса, причем наибольшее количество отрывов – с частотой 0,15–0,40 от частоты прецессии вихря.

В результате высокоскоростной визуализации были выявлены два основных сценария формирования вихревых колец. Когда перезамыкание происходит между частями спирали, ограничивающими примерно один виток вихря, формируется зацепленное вихревое кольцо, надетое на основной вихрь (рис. 4, а); в случае, когда внутри перезамыкания оказывается участок спирали меньше целого витка, происходит формирование изолированного вихревого кольца (рис. 4, б). Причем именно изолированное вихревое кольцо генерирует значительные пульсации давления на стенке отсасывающей трубы, в свою очередь, зацепленное вихревое кольцо уносится вдоль оси камеры вниз по потоку, не оказывая заметного воздействия на стенки отсасывающей трубы. Предположительно, изолированные вихревые кольца могут вызывать случайные (апериодические) пульсации давления и в отсасывающей трубе с коленом.

Размер формирующихся вихревых колец напрямую связан с локализацией зоны перезамыкания и, следовательно, с локальным размером вихревой спирали. Если перезамыкание происходит в начале вихревой спирали, ближе к обтекателю, геометрический размер витка небольшой. Полученные оценки показали, что средний диаметр вихревых колец, сформированных в верхней части отсасывающей трубы, составляет 10–12 мм, в средней – 24–28 мм, ниже по потоку – 35 мм.

Заключение

В ходе экспериментального наблюдения прецессирующего вихревого жгута в модельной отсасывающей трубе было обнаружено явление перезамыкания с отрывом вихревых колец. Синхронизованная запись сигнала давления и высокоскоростной камеры позволили сопоставить резкие импульсы давления на стенке отсасывающей трубы с вихревым кольцом, движущимся по спиральной траектории вдоль стенки. Наиболее вероятная частота отрыва вихревых колец лежит в диапазоне 0,15–0,40 от частоты ПВЯ. Датчик давления зарегистрировал как положительные, так и отрицательные пики давления, вид которых зависит от того, каким образом вихревое кольцо движется мимо датчика. Траектория вихревого кольца и его поведение являются очень сложными.

Это связано с тем, что вихревое кольцо движется в закрученном потоке, в поле скорости, индуцированном ПВЯ, в самоиндуцированном поле и поле, индуцированном взаимодействием со стенкой. Количественная информация об осредненной структуре потока, в котором наблюдается явление отрыва вихревых колец, была получена с использованием техники ЛДА. В дальнейшем данные профили могут быть использованы для верификации численных расчетов этого явления. Несмотря на использование упрощенной геометрии отсасывающей трубы и закручивающего устройства, мы предполагаем, что ввиду качественной схожести наблюдаемого ПВЯ с работами других авторов (см., например, [12; 14]), явление отрыва вихревых колец может иметь место и в натурных гидротурбинах и представлять серьезную опасность для гидродинамической стабильности гидроагрегатов в определенных режимах работы.

Список литературы

1. Favrel A., Landry C., Müller A., Yamamoto K., Avellan F. Hydro-acoustic resonance behavior in presence of a precessing vortex rope: observation of a lock-in phenomenon at part load Francis turbine operation // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2014. DOI: 10.1088/1755-1315/22/3/032035.
2. Сентябов А. В., Гаврилов А. А., Дектерев А. А., Минаков А. В. Численное исследование прецессии вихревого ядра в модельной гидротурбине с помощью гибридных методов расчета турбулентных течений // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, вып. 6. С. 739–750.
3. Galván S., Reggio M., Guibault F. Numerical Optimization of the Inlet Velocity Profile Ingested by the Conical Draft Tube of a Hydraulic Turbine // ASME J. Fluids Eng. 2015. Vol. 137. No. 7. P. 071102.
4. Susan-Resiga R., Ciocan G., Anton I., Avellan F. Analysis of the Swirling Flow Downstream a Francis Turbine Runner // ASME J. Fluids Eng. 2006. Vol. 128. No. 1. P. 177–189.
5. Jonsson P. P., Mulu B. G., Cervantes M. J. Experimental investigation of a Kaplan draft tube – Part II: Off-design conditions // Applied Energy. 2012. Vol. 94. P. 71–83.
6. Литвинов И. В., Митряков А. С., Шторк С. И. Исследование нестационарных режимов течения в модели отсасывающей трубы гидротурбины // Гидротехническое строительство. 2015. Вып. 9. С. 122–127.
7. Litvinov I. V., Shtork S. I., Kuibin P. A., Alekseenko S. V., Hanjalic K. Experimental study and analytical reconstruction of precessing vortex in a tangential swirler // Int. J. Heat Fluid Flow. 2013. Vol. 42. P. 251–264.
8. Dörfler P., Sick M., Coutu A. Flow-induced pulsation and vibration in hydroelectric machinery. London: Springer, 2014.
9. Nishi M., Liu S. An outlook on the draft-tube-surge study // International Journal of Fluid Machinery and Systems. 2013. Vol. 6. No. 1. P. 33–48.
10. Скрипкин С. Г., Цой М. А., Шторк С. И. Экспериментальное исследование формирования двойного прецессирующего вихревого жгута в модельных отсасывающих трубах // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 73–82.
11. Wahl T. L. Draft tube surging times two: the twin vortex phenomenon // Hydro Review. 1994. Vol. 13. No. 1. P. 60–69.
12. Nicolet C., Zobeiri A., Maruzewski P., Avellan F. Experimental Investigations on Upper Part Load Vortex Rope Pressure Fluctuations in Francis Turbine Draft Tube // Int. J. Fluid Mach. Syst. 2011. Vol. 4. No. 1. P. 179–190.
13. Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей: монография. Новосибирск, 2003.
14. Jacob T. Evaluation sur modele reduit et prediction de la stabilite de fonctionnement desturbines Francis: PhD. Thesis. Laussane, Switzerland, 1993.
15. Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Шторк С. И., Скрипкин С. Г., Цой М. А. Явление вихревого перезамыкания в закрученном потоке // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103, вып. 7. С. 516–521.

S. G. Skripkin¹, M. A. Tsoy¹, S. I. Shtork^{1,2}, P. A. Kuibin¹

¹ *Institute of Thermophysics, SB RAS
1 Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

² *Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

skripkin.s.g@gmail.com

INVESTIGATIONS OF PRESSURE PULSATIONS IN A MODEL OF DRAFT TUBE OF HYDRAULIC TURBINE CAUSED BY VORTEX RINGS

Current work is devoted to experimental investigations of behavior of precessing vortex rope in a draft tube model of hydraulic turbine. We used combination of stationary and freely rotating swirlers as a hydro turbine model. Such construction provides velocity distribution on the draft tube inlet close to distribution in natural hydraulic turbines operated at non-optimal conditions. The phenomenon of precessing vortex rope reconnection with further formation of vortex ring was founded in this experimental research using high-speed visualization technique. Synchronization of high-speed visualization and pressure measurements allowed us to relate pressure shock on the draft tube wall with vortex ring moving along wall.

Keywords: vortex ring, hydraulic turbine, precessing vortex rope, pulsations.