УДК 532.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЦЕССИРУЮЩЕГО ВИХРЯ В ДВУХФАЗНОМ ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

Алексеенко С.В., Винокуров А.П., Шторк С.И.

Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00093)

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена экспериментальному исследованию прецессирующего вихря в газожидкостном интенсивно закрученном потоке. Опыты включали в себя визуализацию течения с помощью скоростной камеры, измерения мгновенного поля давления с помощью акустических датчиков, перепада давления на рабочем участке, поля скоростей с применением бесконтактной ЛДА системы. Исследования влияния на параметры нестационарного вихревого течения наличия дисперсной газовой фазы проведены при варьировании в широких пределах расходов жидкой и газовой фаз. Установлено, что вследствие сильной закрутки потока происходит сепарация фаз с образованием полого вихревого ядра. Поперечный размер газовой полости в центре вихря увеличивается при увеличении расхода воздуха, причем в области малых газосодержаний данный эффект имеет скачкообразный характер. С эволюцией газового ядра связано обнаруженное явление резкого падения частоты прецессии ПВЯ и перепада давления при добавлении небольшого количества воздуха в жидкость. Исследования показали также существенное снижение уровня пульсаций потока при добавлении воздуха.

ВВЕДЕНИЕ

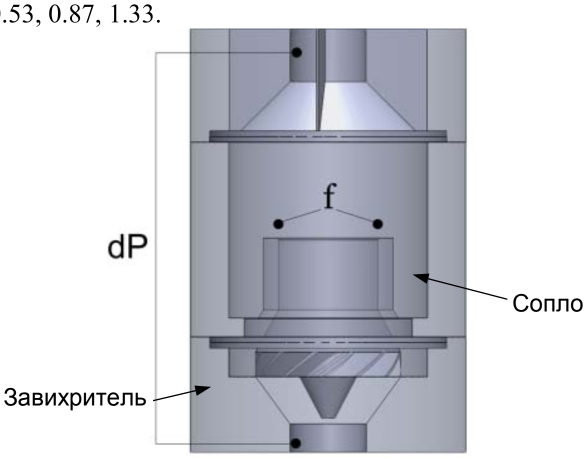
Актуальность исследования закрученных многофазных потоков связана с широкой областью их применения в практических приложениях, включая гидроциклоны, сепараторы, химические реакторы и т.д. [1, 2]. Данная проблема является также весьма важной для гидроэнергетики. В случае неоптимального режима работы гидрогенератора, при котором закрутка потока снимается не полностью, за рабочим колесом гидротурбины возникает прецессирующий вихревой жгут, генерирующий мощные пульсации потока. Совпадение частоты прецессии вихря с собственными частотами элементов ГЭС может привести к значительным повреждениям конструкций и оборудования вследствие резонанса. Одним из методов контроля частоты прецессии вихревого ядра (ПВЯ) и снижения уровня пульсаций потока является добавление в поток воды дисперсной газовой фазы [3]. В связи с этим в литературе появляются публикации, посвященные математическому описанию эффекта ПВЯ в многофазных течениях [4]. Вместе с тем, следует отметить, что на настоящее время в литературе практически отсутствуют опытные данные, полученные на основе систематических исследований влияния дисперсной газовой фазы на характеристики ПВЯ в газожидкостном потоке. На восполнение этого пробела, именно, получение банка экспериментальных данных, которые, в том числе, могут быть использованы для тестирования математических моделей газожидкостных течений, направлена данная работа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

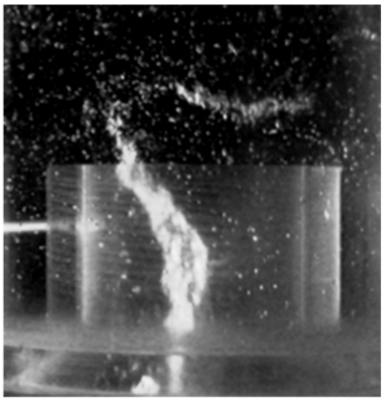
В качестве рабочего участка использовалась цилиндрическая вихревая камера, изготовленная из оргстекла (рис. 1а). Закрутка потока в рабочем участке создается с помощью лопаточного завихрителя, после которого через сопло диаметром 40 мм жидкость поступает в цилиндрическую камеру диаметром 104 мм. В выходной части цилиндрической камеры установлена крестовина, препятствующая возникновению вторичных вихревых структур. Для изменения степени закрутки потока использовались сменные завихрители с углами установки лопаток 30°, 40°, 50°. Крутка потока характеризовалась конструктивным параметром, который рассчитывался на основе геометрии завихрителей по формуле [5]:

$$S = \frac{2}{3}\left[\frac{1-\left(\frac{d}{d_h}\right)^3}{1-\left(\frac{d}{d_h}\right)^2}\right]\mathrm{tg}\varphi \qquad (1)$$

где d и d_h - диаметры завихрителя и втулки соответственно, а φ - угол наклона лопаток. Использованные завихрители соответствуют значениям параметра S = 0.53, 0.87, 1.33.



(а)



(б)

Рис. 1 Схема вихревой гидродинамической камеры (а) и визуализация вихревого ядра с газовой полостью для S = 0.9 (б). Направление движения потока снизу-вверх

В качестве основной фазы использовалась вода, циркулирующая по замкнутому гидравлическому контуру посредством центробежного насоса. Дисперсная газовая фаза (воздух) подавалась через смеситель перед рабочим участком. После рабочего участка газожидкостная смесь поступала в бак, где воздух отделялся от воды под действием силы тяжести. Бак находился при атмосферном давлении, поэтому давление в рабочем участке, практически не отличалось от атмосферного. До и после рабочего участка имелись прямолинейные участки труб диаметром 40 мм и длиной 1.5 и 0.5 м, соответственно. Поскольку, как будет показано ниже, за счет сильной закрутки потока в рабочем участке происходит эффективная сепарация фаз, дисперсность газожидкостного потока (размер воздушных пузырьков), образующегося в смесителе, не контролировалась.

Расходы жидкости и газа измерялись перед смесителем. Для измерения расхода жидкости использовался вихреакустический расходомер Метран-300ПР. Частотный преобразователь, задающий частоту вращения центробежного насоса, и расходомер связаны через пропорционально – интегрально – дифференциальный (ПИД) регулятор ОВЕН ТРМ210 и образуют управляющий контур с обратной связью, который способен поддерживать расход жидкости, заданный с персонального компьютера (ПК). Для хранения сжатого воздуха использовался ресивер емкостью 500 л, способный выдерживать давление до 15 атм. Управление расходом воздуха и его измерение осуществлялись с помощью регуляторов расхода газа, подключенных к ПК. В зависимости от расхода использовались: Элточприбор РРГ-12 (0-0.36 $м^3/ч$), Bronkhorst F-202AV (0.36-3 $м^3/ч$) и Bronkhorst F-213AV (3-12 $м^3/ч$). Таким образом, с ПК можно было управлять как расходом жидкости, так и расходом газа, создавая газожидкостный поток с необходимым соотношением расходов фаз.

Для измерения параметров течения была смонтирована линейка датчиков – два пьезоэлектрических датчика давления 014МТ для измерения пульсаций давления в рабочем участке и один тензоэлектрический датчик дифференциального давления BD Sensors DMD 331 для измерения перепада давления dP на рабочем участке. Заметим, что перепад давления на рабочем участке, связанный с его гидравлическим сопротивлением, является стандартной характеристикой технологического аппарата. В случае вихревых аппаратов большая часть входного напора тратится на создание закрутки и поэтому данный параметр характеризует процессы вихреобразования в рабочем участке.

Сигналы с датчиков через АЦП передавались на ПК для хранения и дальнейшей обработки. В частности, сигналы с пьезоэлектрических датчиков использовались для определения доминантной частоты пульсаций давления на основе вычисления спектра с помощью быстрого Фурье преобразования (FFT). Для выделения в сильно зашумленном газожидкостном потоке моды пульсаций давления, соответствующей прецессии вихревого ядра, анализировался разностный сигнал от двух пьезодатчиков, установленных в диаметрально противоположных положениях [6], как показано на рис. 1а. В дополнение, в процессе опытов проводилась видеосъемка картины течения с использованием скоростной видеокамеры с частотой до 1000 кадров в секунду.

Для исследования структуры исходного однофазного течения, рабочий участок подключался к аэродинамическому стенду. При этом для обеспечения оптического доступа к исследуемому течению опыты проводились со снятой цилиндрической камерой. Как показали измерения, ограниченность потока не оказывает существенного влияния на параметры течения, по крайней мере, вблизи выхода из сопла. Причиной этого является достаточно большая степень расширения потока при истечении закрученной струи из сопла в цилиндрическую камеру.

В опытах на аэродинамическом стенде проводились измерения частоты пульсаций потока с помощью акустического датчика, имеющего в своем составе прецизионный микрофон B&K. Измерения распределений скоростей осуществлялись с использованием лазерно-Допплеровского анемометра (ЛДА) ЛАД-06. Подробное описание оборудования и процедуры измерений на аэродинамическом стенде представлено в работе [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Особенностью течения в исследуемом рабочем участке является формирование в области внезапного расширения на выходе из сопла вихревой структуры, прецессирующей вокруг геометрической оси канала. На фото, полученном в режиме с двухфазным потоком, вихревое ядро визуализируется за счет образования газовой полости вдоль оси вихря (рис. 1б). Таким образом, при сильной закрутке в рабочем участке происходит сепарация более легкой газовой фазы к центру вращения, где формируется область пониженного давления.

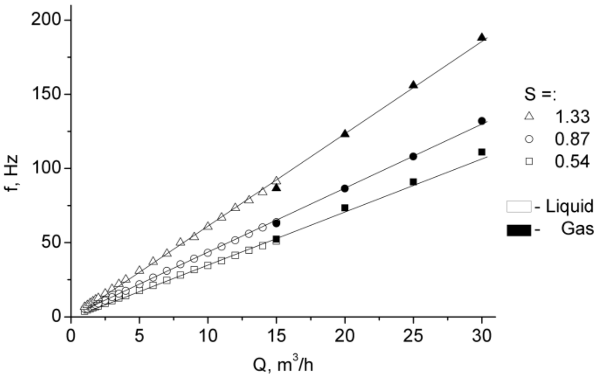
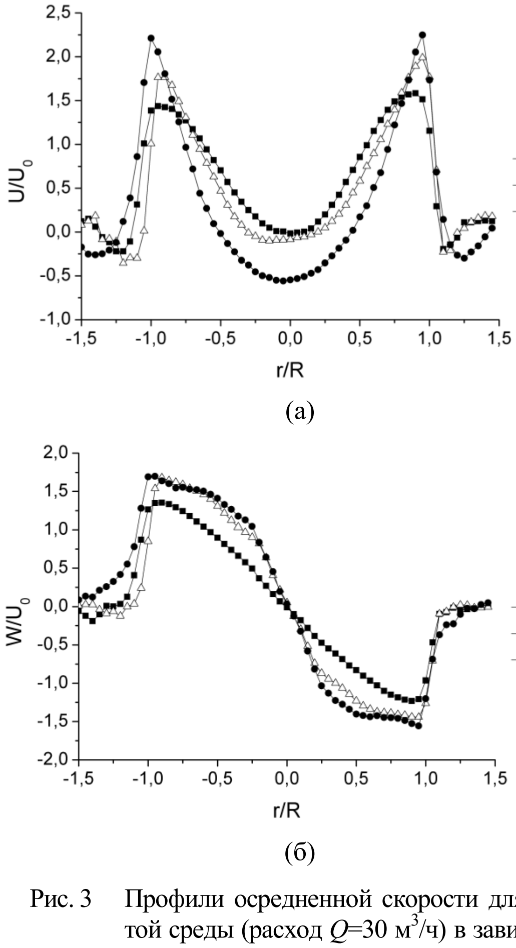


Рис. 2 Зависимости частоты прецессии от расхода и параметра крутки потока для чистой среды (открытые символы – вода, заполненные – воздух)

На рис. 2 показаны зависимости частоты прецессии от объемного расхода среды в случае однофазного течения жидкости и воздуха для трех значений параметра крутки. Видно, что в обоих случаях частота прецессии линейно зависит от расхода и увеличивается с ростом *S*. Можно видеть также, что хотя диапазоны изменения по расходам воды и воздуха не перекрываются, точки для одинакового параметра крутки ложатся на одну и ту же линию. Из этого можно заключить, что, во-первых, исследованные расходы, соответствующие большим числам Рейнольдса (порядка 50-100 тысяч, если определять по диаметру и среднерасходной скорости в сопле), попадают в область автомодельности [8]. Во-вторых, учитывая, что исследования на воздухе проведены со снятой цилиндрической камерой, ограниченность течения не оказывает существенного влияния на область течения, где формируется ПВЯ. Поэтому, для выяснения особенностей структуры течения исходного однофазного течения, исследования проводились на аэродинамическом стенде, что существенно упростило проблему обеспечения оптического доступа.



(а)

(б)

Рис. 3 Профили осредненной скорости для чистой среды (расход Q=30 м^3/ч) в зависимости от параметра крутки: а) – аксиальная скорость, б) – тангенциальная скорость.

На рис. 3 представлены профили осевой и тангенциальной компонент скорости, измеренные вблизи среза сопла для трех значений параметра крутки. Данные обезразмерены по радиусу сопла R и среднерасходной скорости U_0 в сопле. Измерения проводились на аэродинамическом стенде при истечении закрученной струи воздуха в неограниченное пространство Распределение осевой скорости демонстрирует характерный центральный провал, вплоть до образования возвратного течения при наибольшем параметре крутки (рис. 3а). Увеличение закрутки сопровождается также ожидаемым ростом максимальной тангенциальной скорости (рис. 3б). Представленная картина течения в виде кольцевой закрученной струи с центральным дефицитом осевой скорости соответствует области распада закрученной струи при сильной закрутке. Именно для этих условий характерно развитие режима течения с генерацией ПВЯ [9, 10].

При работе с водой в качестве рабочей среды было обнаружено, что добавление воздуха меняет частоту и амплитуду пульсаций давления, генерируемых ПВЯ (рис. 4). Для более детального выяснения характера влияния на параметры течения добавления воздуха были проведены дальнейшие исследования с варьированием в широком диапазоне расходов воды и воздуха (рис. 5). Опыты включали 9 серий измерений при фиксированных значениях расхода воды в диапазоне от 4 до 12 м^3/ч. В каждой серии расход воздуха изменялся от 0 (чистая жидкость) до 2-3 м^3/ч.

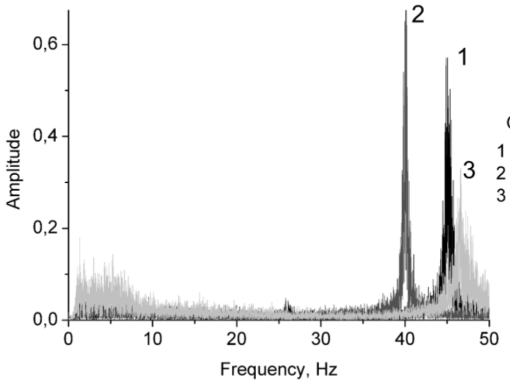
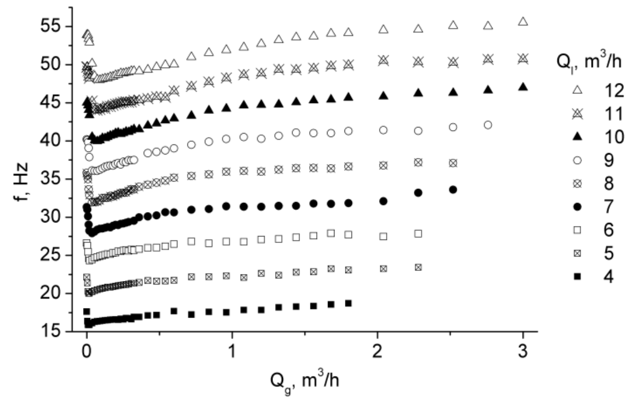
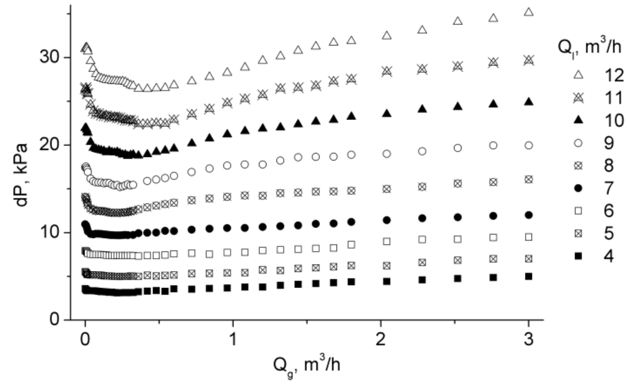


Рис. 4 Спектры пульсаций давления над соплом при расходе воды Q_l=10 м^3/ч и разных расходах газа. Вертикальная ось построена в относительных единицах

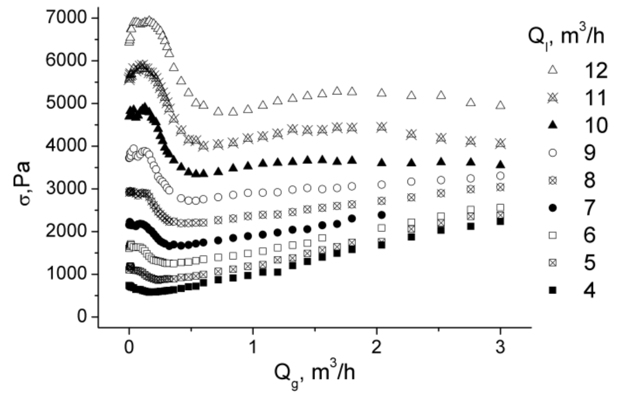
Данные показывают, что добавление небольшого количества воздуха в чистую жидкость приводит к достаточно резкому падению частоты прецессии f (рис. 5а) и перепада давления dP (рис. 5б) до некоторых минимальных значений. Дальнейшее увеличение расхода воздуха приводит к более медленному монотонному росту f и dP. Указанные изменения в области небольших газосодержаний сопровождаются также заметным уменьшением уровня пульсаций давления (рис. 5в).



(а)



(б)



(в)

Рис. 5 Параметры газожидкостного течения в зависимости от расхода воды и воздуха: а) – частота прецессии б) – полный перепад давления в) уровень пульсаций давления над соплом. S=0.87

Эффект резкого падения частоты прецессии и перепада давления при подаче газа может объясняться скачкообразным изменением структуры вихревого ядра, когда концентрированное вихревое ядро переходит в кольцевой вихрь с газовой полостью в центре вихря. Действительно, как можно видеть на рис. 6, где показаны результаты измерений размера газового ядра в зависимости от расхода воздуха, при добавлении в поток даже небольшого количества воздуха происходит ступенчатое увеличение диаметра газового ядра. При дальнейшем увеличении расхода газа диаметр вихревого ядра также продолжает увеличиваться, но более медленно. Подобный характер изменений вполне коррелирует с эволюцией параметров, представленных на рис. 5.

Формирование при подаче газа более широкого и менее интенсивного вихревого ядра требует меньших энергетических затрат, что приводит к снижению гидравлического сопротивления вихревой камеры. Кроме того, заполнение газом рециркуляционной зоны, образующейся в центре при течении чистой жидкости, также должно приводить к уменьшению потерь энергии потока. Все это в сумме дает отмеченное резкое уменьшение *dP* в области малых газосодержаний (рис. 5б).

Аналогично, расширение вихревого ядра снижает скорость вращения жидкости вокруг оси вращения, а это, соответственно, должно приводить к снижению скорости кругового движения центра вихря, т.е. снижать частоту прецессии. Дополнительным эффектом, снижающим частоту прецессии, может быть увеличение радиуса прецессии за счет оттеснения жидкости к периферии сопла.

Дальнейшее увеличение полного перепада с ростом расхода газа в области больших газосодержаний связано, по-видимому, с уменьшением проходного сечения для жидкости и ростом характерной объемной скорости жидкости через вихревую камеру при подаче газа и, соответственно, увеличением гидравлических потерь. Относительно небольшое увеличение частоты прецессии при росте газосодержания может объясняться тем, что разделение газожидкостной смеси происходит уже в завихрителе. При этом жидкость оттесняется к периферии и, соответственно, приобретает большую степень закрутки.

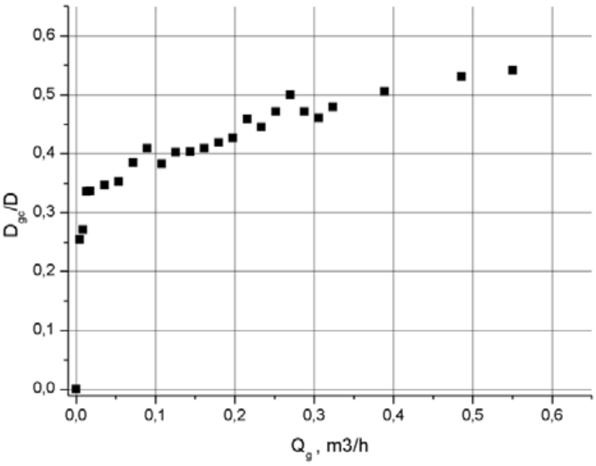


Рис. 6 Зависимость диаметра воздушного ядра от расхода газа. Диаметр воздушного ядра определялся на основе анализа стоп-кадров скоростной видеосъемки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе проведено экспериментальное исследование двухфазного газожидкостного закрученного потока для режимов с формированием прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). В качестве рабочего участка использовалась вихревая камера, в которой ПВЯ образуется при прохождении закрученного потока через область внезапного расширения (закрученная струя истекает из сопла диаметром 40 мм в соосную цилиндрическую камеру диаметром 104 мм). Эксперименты включали в себя визуализацию двухфазного течения, измерения частотных и амплитудных характеристик пульсаций давления, индуцированных ПВЯ. Кроме того, измерялись перепад давления на рабочем участке и распределения осредненных скоростей в области формирования ПВЯ. Варьируемые параметры включали в себя степень закрутки потока (геометрический параметр крутки *S* изменялся от 0.5 до 1.3), расходы жидкой и газовой фаз, которые изменялись в пределах от 4 до 12 $м^3$/ч и от 0 до 3 $м^3$/ч, соответственно. Исследованные диапазоны по расходным характеристикам для несущей фазы соответствуют высокотурбулентным режимам (определенное по параметрам сопла число $Re \sim 5\text{-}10 \cdot 10^4$), для которых обычно реализуется автомодельность по Re. При исследованных параметрах крутки закрученный поток в области внезапного расширения подвержен эффекту распада вихря, о чем свидетельствует образование центрального провала (вплоть до появления возвратного течения при больших *S*) на профилях осевой скорости. Образование ПВЯ в потоке сопровождается генерацией мощных пульсаций давления с выделенной частотой, совпадающей с частотой прецессии. При добавлении воздуха в поток пульсации потока продолжают наблюдаться. При этом вследствие сильной закрутки потока происходит сепарация фаз с образованием полого вихревого ядра. Диаметр газовой полости увеличивается с расходом воздуха, причем в области малых газосодержаний данный эффект имеет скачкообразный характер. Данная эволюция структуры газожидкостного течения сопровождается резким уменьшением частоты прецессии ПВЯ и перепада давления при добавлении небольшого количества воздуха в жидкость. Было обнаружено также существенное снижение уровня пульсаций давления при добавлении воздуха. Эффект уменьшения уровня пульсаций при подаче газа может быть использован, в частности, для борьбы с прецессией вихревого жгута, образующегося в отсасывающей трубе гидротурбины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hreiz R., Gentric C., Midoux N., Laine R., Funfschilling D. Hydrodynamics and velocity measurements in gas-liquid swirling flows in cylindrical cyclones // Chemical Engineering Research and Design. - 2014. (in press, available online at http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2014.02.029)
2. Bandyopadhyay P.R., Gad-el-Hak M. Rotating gas-liquid flows in finite cylinders: sensitivity of standing vortices to end effect // Experiments in Fluids. - 1996. - Vol. 21. - P. 124-138.
3. Papillon B., Sabourin M., Couston M., Deshenes C. Methods for air admission in hydroturbines // Proceedings of the XXIst IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, September 9 - 12, 2002, Lausanne.
4. Kuibin P.A., Pylev I.M., Zaharov A.V. Two-phase models development for description of vortex-induced pulsation in Francis turbine // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2012. - Vol. 15. - Article number 022001.
5. Гупта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки. - М.: Мир, 1987. - 590 С.

   Gupta, A.K., Lilley, D.G., Syred, N.: Swirl flows. Abacus Press, London. 1984.
6. Alekseenko, S.V., Kuibin, P.A. , Okulov, V.L., Shtork, S.I. Vortex precession in a gas-liquid flow // Heat Transfer Research. - 2010. - Vol. 41(4). - P. 465-477.
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 // International Journal of Heat and Fluid Flow. - 2013. - Vol. 42. - P. 251-264.
8. Shtork S.I., Cala C.E., Fernandes E.C. Experimental characterization of rotating flow field in a model vortex burner // Experimental thermal and fluid science. - 2007. - Vol. 31. - P. - 779-788.
9. Syred N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems // Prog. Energy Combust. Sc. - 2006. - Vol. 32(2). - P. 93-161.
10. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. - Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. - 504 С.

    Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Okulov V.L. Theory of concentrated vortices: an introduction. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.