

УДК 532.5

Исследование влияния газовой фазы на характеристики прецессирующего вихревого ядра в осесимметричной гидродинамической камере*

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

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

E-mail: alexey_vin@mail.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию прецессирующего вихря в газожидкостном закрученном потоке. Представлены данные визуализации течения, определены зависимости частоты прецессии вихря и перепада давления от расхода газа, выявлена корреляция между этими характеристиками, которые при малых газосодержаниях претерпевают резкие скачкообразные изменения. Основной эффект, определяющий характер эволюции параметров течения, связан с тем, что за счет сильной закрутки потока происходит сепарация фаз с образованием полого вихря с газовым ядром.

Ключевые слова: прецессия вихря, закрученные потоки, многофазные потоки.

Изучение закрученных многофазных потоков является важной научной задачей современной гидрогазодинамики, к наиболее интересной и малоизученной части которой относится эффект формирования нестационарных вихревых структур в газожидкостных потоках [1], в частности, прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). Турбулентность, нестационарность и многофазность делают подобные явления крайне сложными для математического моделирования. Развитие теории динамики вихрей и совершенствование численных методов CFD (Computational Fluid Dynamics) применительно к дисперсным потокам требуют новых детальных экспериментальных данных [2]. Исследования вихревых процессов в многофазных потоках важны и с точки зрения практического применения, в частности, в гидроэнергетике. Так, в случае неоптимального режима работы генератора, при котором закрутка потока снимается не полностью, за рабочим колесом гидротурбины возникает ПВЯ, генерирующее мощные пульсации давления. Совпадение частоты прецессии вихря с собственными частотами элементов ГЭС, вызывающее резонанс, может привести к значительным повреждениям оборудования и аварийным ситуациям. Одним из методов контроля частоты прецессии вихревого ядра и снижения пульсаций давления является добавление в поток воды дисперсной газовой фазы [3, 4]. Следует отметить, что на настоящее время в литературе практически отсутствуют экспериментальные данные, полученные на основе систематических исследований влияния дисперсной газовой фазы на характеристики ПВЯ в газожидкостном потоке.

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

Эксперимент проводился на гидродинамическом стенде [5], оборудованном системой подачи воздуха и позволяющем создавать газожидкостный поток вода–воздух с необходимым объемным расходом и соотношением фаз. В качестве рабочего участка используется осесимметричная гидродинамическая камера (рис. 1а). При входе в рабочий участок поток получает закрутку на лопаточном завихрителе с параметром крутки $S = 0,9$ и затем через сопло диаметром $d = 40$ мм поступает в цилиндрическую камеру диаметром $D = 104$ мм. Параметр крутки S определяется геометрическими характеристиками завихрителя [1], значения S первого порядка и более относятся к случаю сильной закрутки потока. Сильная закрутка и внезапное расширение ведут к распаду вихря и образованию ПВЯ, имеющего левоспиральную форму [5]. Над соплом диаметрально противоположно расположены пьезодатчики давления, предназначенные для определения частоты прецессии f . Кроме того, с помощью дифференциального тензодатчика измеряется полный перепад давления в камере dP , характеризующий интенсивность процессов вихреобразования.

Эксперименты показали, что в сильнозакрученном газожидкостном потоке происходит эффективная сепарация фаз, вызванная действием центробежных сил. Вдоль оси вихря образуется газовое ядро, оттесняя жидкость к стенкам сопла (рис. 1б и 1с). На рис. 2а представлена зависимость частоты прецессии f от расхода газа Q_{gas} , где каждая кривая соответствует фиксированному расходу жидкости Q_{liquid} . При добавлении газа в поток наблюдается резкое падение частоты прецессии (область I), которое с увеличением расхода газа сменяется ее слабым ростом (область II). На графике зависимости полного перепада давления от расхода газа (рис. 2б) можно выделить три характерные зоны: А — резкое уменьшение перепада (совпадает с областью падения частоты прецессии), В — относительно плавное уменьшение, С — зона монотонного увеличения. При этом изменения частоты прецессии и полного перепада давления с увеличением расхода газа коррелируют между собой, что можно видеть из диаграммы Eu/St (рис. 2с), где число Эйлера $Eu = (2 dP)/(\rho_{\text{liq}} \cdot v_{\text{liq}}^2)$, число Струхала $St = f \cdot d/v_{\text{liq}}$, ρ_{liq} — плотность жидкости, v_{liq} — среднерасходная скорость жидкости в сопле. Каждая кривая соответствует фиксированному расходу жидкости, каждая точка — расходу газа. Зоны I-A, II-B и II-C согласуются с соответствующими областями на рис. 2а и 2б. Видно, что участки резкого падения частоты прецессии f и резкого уменьшения перепада давления dP совпадают. Кривые имеют форму петель и начинаются в точке нулевого газосодержания. При увеличении расхода газа они совершают полный оборот против часовой стрелки, вновь пересекая

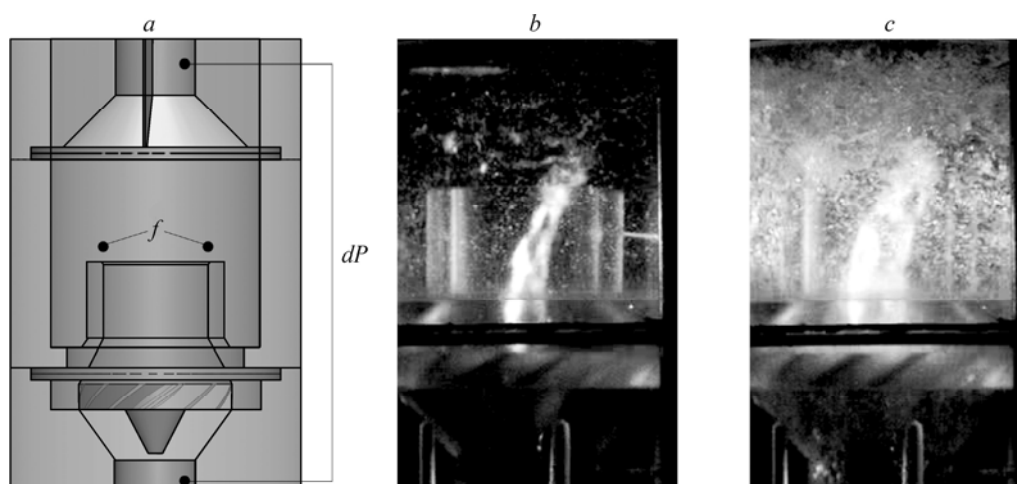


Рис. 1. Схема вихревой гидродинамической камеры (а); мгновенные картины течения, демонстрирующие образование воздушного жгута в ядре вихря при объемных газосодержаниях в потоке 0,06 % (б) и 1,8 % (с).

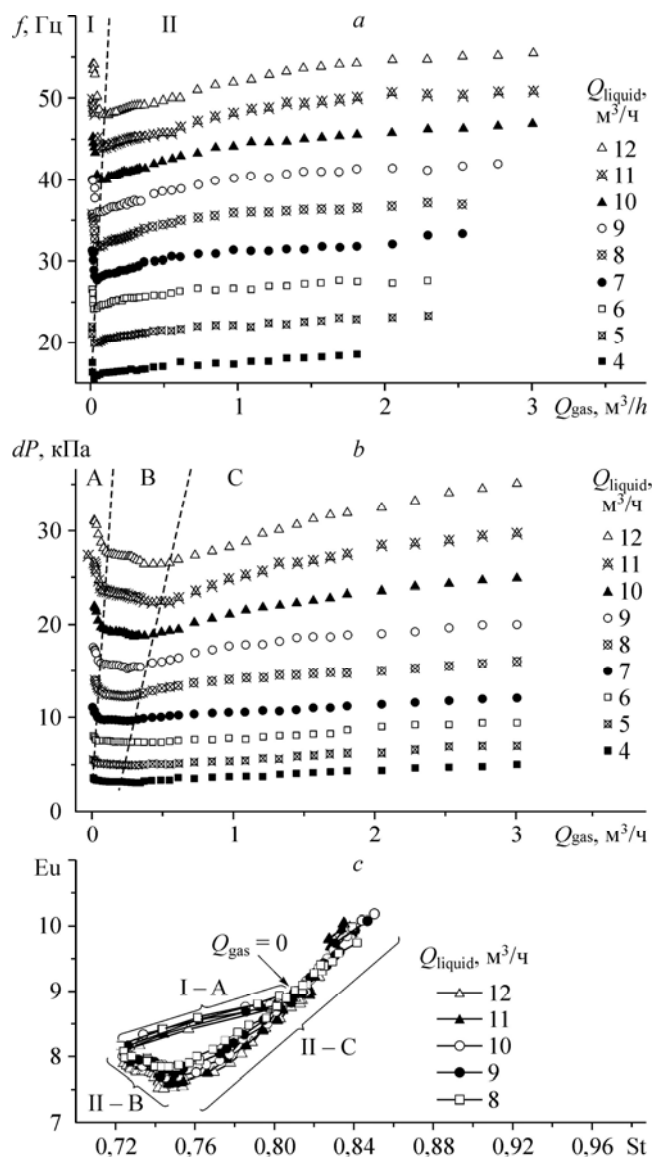


Рис. 2. Зависимости частоты прецессии от расхода газа (a) и полного перепада давления (b) от расхода газа; диаграмма Eu/St (c).

точку нулевого газосодержания. Можно видеть, что в безразмерных координатах, определенных по параметрам жидкой фазы, зависимости для разных расходов жидкости хорошо обобщаются.

Выявленные особенности эволюции частоты прецессии и полного перепада при подаче воздуха объясняются возникновением и развитием воздушной полости на оси вихря. При появлении газа в потоке вихревое ядро скачкообразно переходит из формы концентрированного вихря к кольцевому вихрю с газовой полостью в центре. Формирование менее интенсивного и более широкого в поперечном размере вихря требует меньших энергетических затрат, что ведет к снижению гидродинамического сопротивления камеры и, как следствие, к снижению полного перепада давления в ней. С дальнейшим ростом газосодержания происходит увеличение диаметра газовой полости (рис. 1b и 1c), т.е. уменьшение проходного сечения для жидкой фазы (соответственно, увеличение

характерной скорости жидкости), что приводит к росту гидравлических потерь и увеличению частоты прецессии.

Таким образом, в настоящей работе проведены экспериментальные исследования характеристик сильнозакрученного газожидкостного течения с генерацией прецессирующего вихревого ядра для широкого диапазона изменения расходов жидкой и газовой фаз. Исследования показали, что интенсивная закрутка потока приводит к эффективной сепарации жидкой и газовой фаз с формированием воздушной полости на оси вихря. Обнаружена немонотонная петлеобразная взаимосвязь между безразмерными значениями перепада давления в камере и частотой прецессии вихря в двухфазных режимах течения.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. П.А. Куйбину за полезные обсуждения.

Список литературы

1. **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, Iss. 4. P. 465–477.
2. **Куйбин П.А., Пылев И.М., Захаров А.В.** Развитие двухфазных вихревых моделей для описания пульсаций давления в гидротурбинах // Сб. докл. Четвертой межд. конф. «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках», Москва, 18–20 октября 2011. Статья № s411. CD, гос. рег. № 0321102743. 16 с.
3. **Papillon B., Sabourin M., Paquet F., Couston M., Deshenes C.** Methods for air admission in hydroturbines // *Proceedings of the XXIst IAHR Symp. on Hydraulic Machinery and Systems*, September 9–12, 2002, Lausanne. 6 p.
4. **Tuekmenoglu V.** The vortex effect of Francis turbine in electric power generation // *Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci.* 2013. Vol. 21, iss. 1. P. 26–37.
5. **Винокуров А.П., Алексеенко С.В., Шторк С.И.** Исследование нестационарных вихревых структур в осесимметричной гидродинамической камере // *Вестник НГУ. Серия: Физика*. 2013. Т. 8, вып. 4. С. 76–83.

*Статья поступила в редакцию 27 августа 2014 г.,
после доработки — 9 сентября 2014 г.*