

03

## **Влияние дисперсной газовой фазы на характеристики прецессии вихря в закрученном газожидкостном потоке**

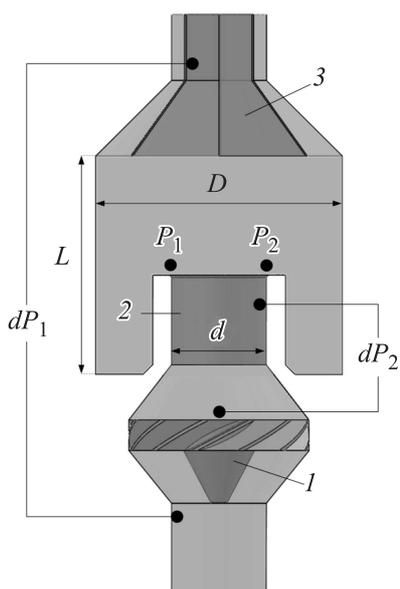
© А.П. Винокуров, С.И. Шторк, С.В. Алексеенко

Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет  
E-mail: alexey\_vin@mail.ru

Поступило в Редакцию 19 февраля 2015 г.

Экспериментально исследована прецессия вихря в закрученном газожидкостном потоке с дисперсной газовой фазой в осесимметричной гидродинамической камере. На основе визуализации течения обнаружена сепарация фаз в потоке с образованием полого вихря с газовым ядром вдоль оси. Измеренные зависимости частоты прецессии и характерных перепадов давления в гидродинамической камере от расходного газосодержания в потоке позволяют выявить скачкообразное изменение этих характеристик в области малых газосодержаний.

В настоящее время одной из актуальных задач гидрогазодинамики является исследование закрученных многофазных потоков, нашедших широкое применение в различных технических приложениях [1]. Отдельный интерес представляют нестационарные вихревые структуры, в частности прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ) [2]. Так, в гидроэнергетике при неоптимальном режиме работы генератора, когда поток за рабочим колесом гидротурбины остается закрученным, в отсасывающей трубе возникает ПВЯ, создающее мощные пульсации давления [3]. Резонанс, возникающий в случае совпадения частоты прецессии ПВЯ с собственной частотой гидроакустической системы, может привести к аварийным ситуациям. Одним из эффективных методов снижения пульсаций давления и контроля частоты прецессии вихря является добавление дисперсной газовой фазы в поток жидкости [4]. Другой пример использования прецессии вихря в газожидкостных потоках связан с развитием методик многофазной расходомерии, что является важной задачей энергетики и химической промышленности [5]. Вихревые процессы в многофазных потоках представляют значительный интерес и с точки зрения фундаментальной науки. Нестационарность,



**Рис. 1.** Схема вихревой гидродинамической камеры.

турбулентность и многофазность создают значительные трудности при математическом моделировании подобных процессов [6]. Для развития теории динамики вихрей и совершенствования численных методов применительно к дисперсным потокам необходимы новые детальные экспериментальные данные.

Была поставлена задача экспериментального исследования прецессии вихревого ядра в закрученном потоке жидкости при наличии дисперсной газовой фазы. Эксперименты проводились в осесимметричной гидродинамической вихревой камере, ориентированной вертикально (рис. 1). Газожидкостная смесь, попадающая в камеру через входную трубу диаметром 40 мм, получает закрутку на лопаточном завихрителе  $1$  с параметром крутки  $S = 0.9$  (параметр крутки определялся исходя из геометрических характеристик завихрителя [7]) и затем через сопло  $2$  диаметром  $d = 40$  мм проникает в цилиндрическую камеру диаметром  $D = 104$  мм и длиной  $L$ , также равной 104 мм. В результате

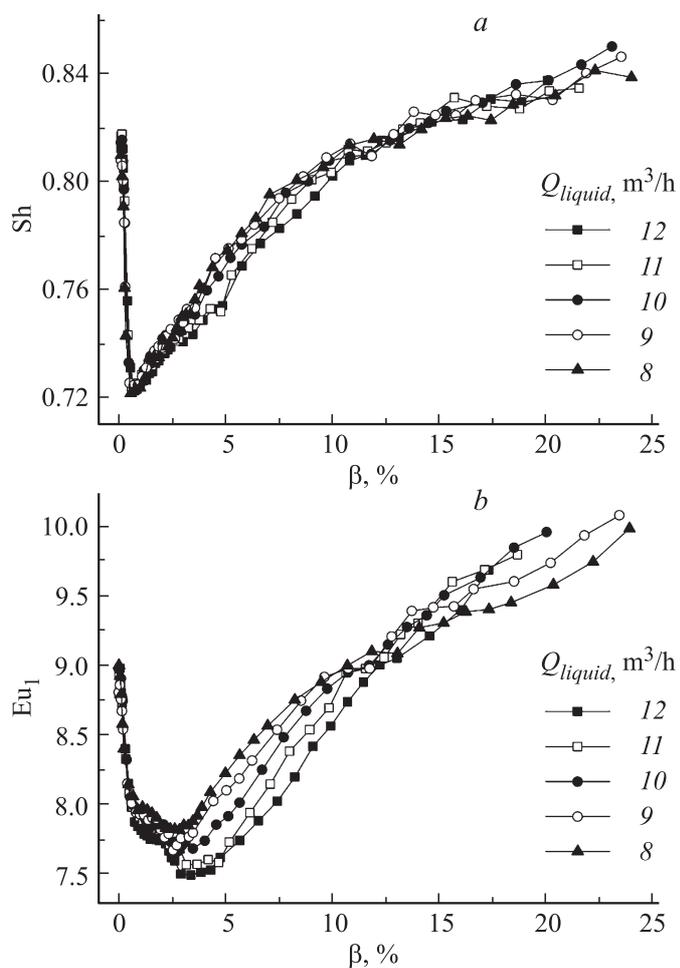
интенсивной закрутки потока и последующего внезапного расширения происходит распад вихря, сопровождающийся образованием ПВЯ [8]. На выходе из камеры установлена крестовина 3, препятствующая формированию вторичных вихрей. Для определения частоты прецессии вихря  $f$  используются два пьезодатчика давления, установленные над соплом диаметрально противоположно (точки  $P_1$  и  $P_2$ ). Такое расположение сенсоров позволяет детектировать генерируемые ПВЯ пульсации давления в противофазе и, вычитая один сигнал из другого, убирать посторонние шумы. Измерение характерных перепадов давления — полного перепада давления в камере  $dP_1$  и перепада между центром вихря и периферией  $dP_2$ , характеризующего всасывающую силу вихря, — производится при помощи двух дифференциальных тензодатчиков давления. Время каждого измерения составляло 120 s, за которые вихревое ядро совершает порядка 5000 оборотов. Для создания двухфазного потока применялся автоматизированный гидродинамический стенд, оснащенный системой подачи газа, в котором отдельно измеряется и контролируется объемный расход каждой из фаз. Подача воздуха в поток жидкости осуществлялась через штуцер диаметром 5 mm, вмонтированный во входную трубу на расстоянии 2 m от вихревой камеры. Дисперсность газовой фазы не контролировалась, однако анализ видеосъемки показал, что в прямооточном течении газа формировались пузырьки газа диаметром  $\sim 1-3$  mm.

Исследования, проведенные с однофазным потоком в вихревой камере, подтвердили образование ПВЯ, генерирующего периодические пульсации давления [9,10]. При добавлении газа в поток жидкости происходит эффективная сепарация фаз, возникающая под действием центробежных сил. На рис. 2 представлена мгновенная картина течения в камере, полученная с помощью высокоскоростной съемки при объемном расходе жидкости  $Q_{liquid} = 8 \text{ m}^3/\text{h}$  и расходном объемном газосодержании  $\beta = Q_{gas}/(Q_{gas} + Q_{liquid}) = 0.1\%$ , где  $Q_{gas}$  — объемный расход газа. Представленный снимок наглядно демонстрирует, что пузырьки газа в сопле формируют воздушную каверну, присоединенную к торцу завихрителя и расположенную вдоль оси вихря. Она имеет левоспиральную форму и вращается по направлению закрутки потока. При выходе из сопла в цилиндрическую камеру каверна разрушается. На рис. 3 приведены зависимости осредненных по времени характеристик потока, представленных в безразмерном виде, от расходного объемного газосодержания  $\beta$ . Каждый набор точек соответствует определенному расходу жидкости. О влиянии газа на частоту прецессии



**Рис. 2.** Мгновенная картина течения в вихревой камере, демонстрирующая образование воздушной каверны.

вихря можно судить по рис. 3, *a*, на котором изображена зависимость числа Струхали  $Sh$  от газосодержания. Здесь  $Sh = fd/U_0$ , где  $f$  — частота прецессии,  $d$  — диаметр сопла,  $U_0$  — среднерасходная осевая скорость жидкости в сопле. Появление газа в потоке ведет к резкому падению частоты прецессии (снижающейся на 12% при  $\beta$  всего  $\sim 1\%$ ). При дальнейшем увеличении газосодержания наблюдается рост частоты прецессии. Отметим, что зависимости, полученные при разных расходах жидкости, хорошо обобщаются в безразмерных координатах. На рис. 3, *b* и *c*, демонстрирующих влияние газа на перепады давления  $dP_1$  и  $dP_2$  (рис. 1), приведены зависимости чисел Эйлера  $Eu_{1,2} = 2dP_{1,2}/\rho U_0^2$  от газосодержания, где  $\rho$  — плотность воды. Видно, что  $Eu_1$  резко уменьшается при нарастании  $\beta$  с 0 до 1%. Точки, соответствующие разным расходам жидкости, на этом промежутке лежат на одной линии, однако последующий рост газосодержания ведет к расслоению кривых. Падение  $Eu_1$  продолжается до  $\beta \sim 3-4\%$ , затем наблюдается устойчи-



**Рис. 3.** Зависимости интегральных характеристик потока от расходного объемного газосодержания при различных расходах жидкости: число Струхаля (а), число Эйлера для перепада  $dP_1$  (b), число Эйлера для перепада  $dP_2$  (с).

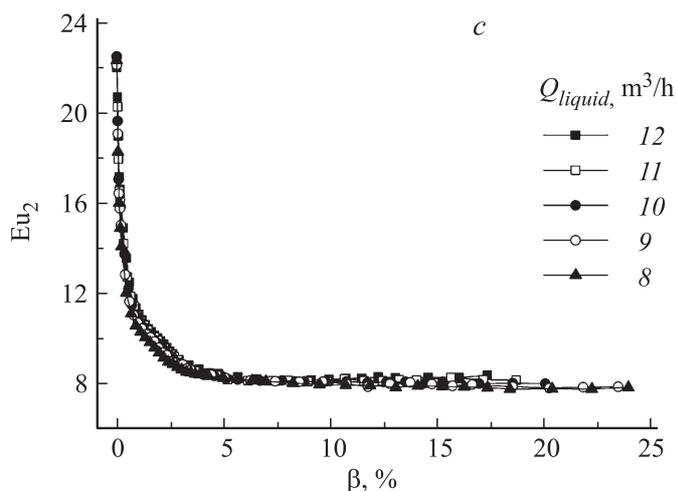


Рис. 3 (продолжение).

вый рост этой величины.  $Eu_2$  также резко снижается с появлением газа в потоке, затем наблюдается зона слабого уменьшения и при достижении  $\beta \sim 7\%$  значение  $Eu_2$  устанавливается на уровне  $\sim 1/3$  от значения при  $\beta = 0$  (чистая жидкость).

Такая эволюция характеристик потока с изменением газосодержания, судя по всему, связана с образованием и развитием воздушной каверны в камере. При появлении газа в потоке происходит скачкообразный переход вихревого ядра из формы концентрированного вихря к кольцевому вихрю с газовой полостью в центре. Резкое увеличение диаметра вихря ведет к снижению осевой завихренности, что в свою очередь приводит к уменьшению перепада давления  $dP_2$ , а также к падению частоты прецессии  $f$ . Формирование более широкого в поперечном размере и менее интенсивного вихря требует меньших энергетических затрат, в связи с чем уменьшается гидродинамическое сопротивление камеры и, как следствие, полный перепад давления  $dP_1$ . С дальнейшим ростом газосодержания происходит увеличение диаметра газовой полости и соответственно характерной скорости жидкости в сопле, что приводит к росту гидравлических потерь и увеличению частоты прецессии.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00093).

## Список литературы

- [1] *Alekseenko S., Kuibin P., Okulov V., Shtork S.* // Heat Transf. Res. 2010. V. 41. P. 465–477.
- [2] *Syred N.* // Prog. Energ. Combust. 2006. V. 32. P. 93–161.
- [3] *Dorfler P., Sick M., Coutu A.* Flow-Induced Pulsation and Vibration in Hydroelectric Machinery. London: Springer-Verlag, 2013. 242 p.
- [4] *Tuekmenoglu V.* // Turk. J. Elec. Eng. Comp. Sc. 2013. V. 21. P. 26–37.
- [5] *Hua C., Geng Y.* // Meas. 2010. V. 45. P. 763–768.
- [6] *Kuibin P., Pylev I., Zakharov A.* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2012. V. 15. Art. N 022001.
- [7] *Гунта А., Лили Д., Сайред Н.* Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 590 с.
- [8] *Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л.* Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. 504 с.
- [9] *Винокуров А., Шторк С., Алексеенко С.* // Вестник НГУ. Сер. Физ. 2013. Т. 8. В. 4. С. 76–83.
- [10] *Cala C.E., Fernandes E.C., Heitor M.V., Shtork S.I.* // Exp. Fluids. 2006. V. 40. N 2. P. 267–276.