

DOI: 10.12737/article_5a816be0533935.89772912

Горлов А.С., канд. техн. наук, доц.,
Савотченко С.Е., д-р ф.-м. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ КОРОТКИХ ВИХРЕВЫХ КАМЕР

belgoras@mail.ru

В статье представлены исследования течения вязкой несжимаемой жидкости в короткой вихревой камере. Проведены экспериментальные исследования гидродинамических процессов, проходящих в коротких вихревых камерах со стоком воды из центрального отверстия. Визуализация вихревого течения воды в короткой вихревой камере позволяет наблюдать процессы, которые нельзя познать никакими другими методами. Экспериментальные исследования и визуализация процессов помогают в постановке начальных и граничных условий для системы уравнений Навье-Стокса. Полученные данные позволяют провести упрощение системы для нахождения ее решения численными методами.

Ключевые слова: гидродинамика короткой вихревой камеры, вихревое движение, эксперимент.

Введение. Исследование гидродинамики коротких вихревых камер представляет интерес для понимания физических процессов проходящих в них. Вихревой поток в камере должен обладать необходимыми гидродинамическими характеристиками для организации технологических процессов в ней. Проведение экспериментов, а также математическое, физическое и имитационное моделирование помогут создать модель для описания процессов в вихревой камере и определения гидродинамических параметров энергоносителя (воды, других жидкостей) в них. Исследованиями вихревых движений занимались многие исследователи. Во многих работах были рассмотрены теоретические вопросы, связанные с вращением потока в трубе [1–4, 8], эффектом Ранка [3], течением в основном объеме вихревой камеры [3, 5, 6]. Авторами выдвинуты, теоретически обоснованы и экспериментально опробованы несколько оригинальных идей по использованию вихревых мельниц, у которых высота камеры больше радиуса [7]. В большинстве случаев рассматриваются вихревые камеры, у которых энергоносителем является воздух. Основное внимание уделяется аэродинамике вихревых процессов. Будем рассматривать короткие вихревые камеры цилиндрической формы с вертикальной осью, у которых высота камеры меньше радиуса $L/R < 0,5$ (рис. 1). Подвод воды может осуществляться тангенциально или под углом через одно или несколько подводящих сопел, а выход может проходить как через центральное отверстие в верхней крышке вихревой камеры, так и отверстие, смещенное относительно центра.

При изучении и моделировании гидродинамики в коротких вихревых камерах особое место занимает проблема масштабирования. Необходимо сформулировать условия, при которых воз-

можен перенос рассчитанных результатов, полученных для вихревой камеры с одними геометрическими размерами на камеры с другими размерами. Это относится и к экспериментальным данным, полученным для данного процесса в камерах с разными геометрическими размерами.



Рис. 1. Лабораторная установка короткой вихревой камеры

В большинстве случаев при составлении уравнений, описывающих вихревое движение, переходят к безразмерным величинам. Вводят соответствующие коэффициенты, в которые входят геометрические параметры камеры, гидродинамические характеристики воды. Прогнозирование гидродинамических параметров в промышленной установке в значительной мере зависит от того, насколько корректно учитывается влияние гидродинамической обстановки в вихревой камере на протекание процессов. Обычно при увеличении и изменении размеров технологических аппаратов происходят изменения гидродинамических характеристик, а также может снижаться эффективность их работы. Причина таких изменений носит в основном, гидродинамический характер и заключается в неравномерном распределении потоков по рабочему объему камеры, деформацию которых трудно предсказать при изменении размеров вихревых камер, а также размеров входящих и отводящих патрубков.

Для моделирования и описания вихревого движения воды в короткой вихревой камере в настоящее время применяются, как правило, три группы моделей: интегральные, теоретические с тангенциальной скоростью, зависящей только от радиуса; модели течения с тангенциальной скоростью, зависящей как от радиуса, так и от осевой координаты.

Для проведения экспериментов и описания процессов будем рассматривать модель, при которой тангенциальная скорость зависит только от радиуса, а по высоте камеры не меняется, то есть $v = v(r)$. Эта модель достаточно реалистична, так как во многих экспериментальных работах [3–6] получены результаты, которые отражают зависимость тангенциальной скорости от радиуса камеры, при этом по высоте камеры, в основном её объёме, скорость практически не меняется.

Рассмотрим течение вязкой несжимаемой жидкости в короткой вихревой камере при наличии тангенциальной скорости, которая зависит только от радиуса [9]. На боковой стенке, которая представляет собой цилиндрическую поверхность, скорость равна нулю, а в местах ввода потока, в выходном отверстии имеет отличное от нуля значение. Так как в осесимметричной модели отразить это не возможно, то предполагается рассматривать течение в области $0 < r < R_2$, где сформировавшийся поток не зависит от конструкции входа и имеет начальное значение компонент скорости при

$$r = R_2, u = u_2, w = 0, v = v_2. \quad (1)$$

Физическим аналогом модели, представленной на рис. 1, является камера радиусом R . Через подводящий патрубок подается вода расходом

$$Q = 2\pi R_2 L u_2. \quad (2)$$

При $v = v(r)$ из уравнения

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{uv}{r} + w \frac{\partial v}{\partial z} = v \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

следует, что радиальная скорость также зависит от радиуса, а из уравнения неразрывности

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

– осевая скорость линейна, поэтому $\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 0$.

Тогда уравнения вихревого движения примут вид

$$u \frac{du}{dr} - \frac{v^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} + \frac{d(rv)}{dr} \right); \quad (5)$$

$$\frac{u}{r} \frac{d(rv)}{dr} = v \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d(rv)}{dr} \right); \quad (6)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right); \quad (7)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (8)$$

На нижней торцевой крышке нет осевого движения жидкости, поэтому при

$$z = 0, w = 0. \quad (9)$$

Через центральное отверстие радиусом R_1 верхней торцевой крышки вода выходит из камеры, поэтому $z = L, R_1 < r < R_2, w = 0$. Из условия осевой симметрии задачи вытекает, что на оси камеры $u = v = 0$ при $r = 0$.

Записанная система дифференциальных уравнений (5) – (8) представлена уравнениями второго порядка для компонент скорости u, v, w и первого порядка для давления p . Решение системы уравнений Навье-Стокса на данном этапе является сложной задачей. При поиске решений системы уравнений Навье-Стокса появляется необходимость упрощения системы и сведения к такому количеству уравнений, а также граничных условий, которые можно сформулировать, опираясь на физический смысл происходящих процессов. Решение задачи по расчету несжимаемого течения в короткой вихревой камере необходимо искать при объединении теоретических и экспериментальных данных полученных на лабораторных моделях.

При описании гидродинамических условий на границах вихревого движения возникают трудности. С целью преодоления таких трудностей принимаются какие-либо гипотезы. Часто приходится решать задачу при произвольных граничных условиях, использование которых может быть оправдано результатами проведенных экспериментов. Чтобы решения, соответствовали действительным процессам, граничные условия должны удовлетворять условиям решаемой задачи для вихревого движения в короткой вихревой камере с заданными размерами.

Прежде чем перейти к теоретическому анализу необходимо провести экспериментальные исследования гидродинамических процессов, проходящих в коротких вихревых камерах со стоком воды из центрального отверстия. Визуализация вихревого течения воды в короткой вих-

ревой камере позволит наблюдать такие процессы, которые нельзя познать никакими другими методами. Визуализация процессов поможет в постановке начальных и граничных условий для решения системы (5)–(8) и позволит провести упрощение системы для нахождения ее решения численными методами.

Эксперименты проводились с короткой вихревой камерой с внутренним диаметром кольца равным 20 см, высота кольца 3 см, радиусы выходного отверстия 1,5 и 2 см, радиус подводящего патрубка 1 см при разных значениях расхода воды. Для визуализации течения воды можно использовать подкрашенную воду, мелкие легкие частицы, волокнистый материал. Прозрачная верхняя крышка позволяет наблюдать вихревое движение воды в короткой вихревой камере, а также выход воды из камеры.

Как показали результаты экспериментальных исследований течения в вихревой камере можно разбить на несколько характерных областей: область входной струи; область вращательного движения основного потока; область в окрестности выходного отверстия и наконец выходной поток из камеры в окружающее пространство. Эти области оказывают взаимное влияние друг на друга, которое имеет качественные и количественные характеристики.

Вода в камеру подается тангенциально. Форма входной струи определяется сечением



подводящего патрубка и его геометрическими размерами. Входная струя, попадая в камеру, соприкасается с внутренним потоком воды. Факел входной струи ограничен стенкой камеры и основным потоком. Форма факела, дальность, его искривление зависят от радиуса камеры от напора входящего потока и от размера входящего патрубка.

Для наблюдения линий тока воды в камеру с боковой поверхности и в область входной струи подавалась подкрашенная жидкость. Основной поток в камере имеет зону разгона в области входной струи и зону торможения. Условно эти зоны можно разделить горизонтальной плоскостью, проходящей через входной патрубок и центр камеры. Это обуславливает пульсационный режим истечения воды из центрального отверстия. Частота пульсаций зависит от скорости подачи воды.

В центре камеры в области выходного отверстия образуется конусообразная (цилиндрическая) воздушная воронка, низ которой совершает вращательные движения по направлению основного потока в камере (рис. 2). Радиус воздушной воронки зависит от радиуса выходного отверстия. По боковой поверхности этой воронки и по поверхности выходного патрубка происходит истечение воды из камеры.

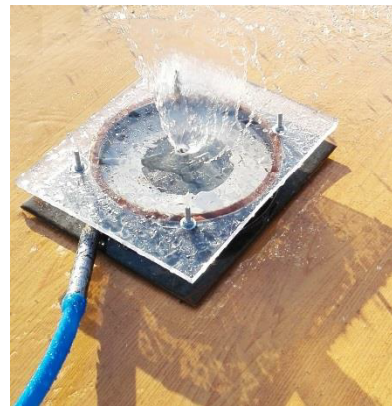


Рис. 2. Визуализация течения воды в короткой вихревой камере

Высота выходящего патрубка влияет на формирование выходящего потока (веера) жидкости на его вид и размеры. При истечении воды из центрального стока наблюдается два режима истечения: выход в виде закрученной струи и веерное истечение. В экспериментах использовалось оргстекло толщиной 0,8 см и 1,2 см (рис. 2). Форма веера, его разомкнутость и высота зависят от геометрических размеров выходного отверстия, выходного патрубка и от гидродинамических параметров внутреннего потока в камере. По высоте веер можно разбить на две области: первая в окрестности выходного патрубка, представляет собой поверхность, вторая – дискретная

область, состоящая из капель воды, которые получены в результате действия сил поверхностного натяжения и силы тяжести (рис. 2).

Проанализировав результаты визуального наблюдения, полученные экспериментальные данные можно сделать вывод, что движение воды в данной конструкции не является осесимметричным.

Для численного решения системы (5)–(8) многие исследователи используют конечно-разностные уравнения Эйлера. В них основными зависимыми переменными являются давление и скорость. Значения компонент скорости располагаются между узлами сетки, а в узлах – значения

давления и других переменных. На каждом шаге по времени величины u , v и w для последующего шага подставляются в уравнение неразрывности, выраженное в конечно-разностной форме для каждой ячейки, и итерационный процесс задания и коррекции давления и коррекция скорости повторяются до тех пор, пока не будет с достаточной точностью удовлетворяться уравнение неразрывности.

Область решения покрывается так называемой МАС-сеткой [6], в которой узлы определения давления располагаются внутри прямоугольника сеточной ячейки, а узлы определения компонент скорости – на ее гранях (рис. 3).

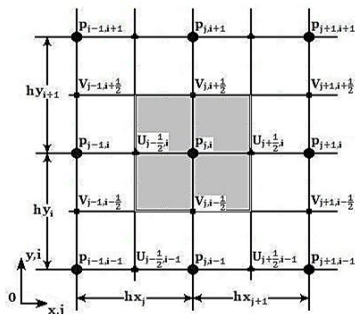


Рис. 3. Расчетная ячейка

Из системы конечно-разностных уравнений следует, что если в момент времени t скорость и давление определены в рассматриваемой расчетной области, то можно их определить в следующий момент времени $t + \Delta t$.

Результаты численного расчета скорости движения воды в реальной короткой вихревой камере представлены на рисунке 4.

При решении задач могут быть использованы аналитические и численные методы, результаты применения численного эксперимента, имитационного моделирования. На основе результатов, полученных с помощью применения этих методов, выбирают лучшую из моделей для описания вихревых движений в короткой вихревой камере.

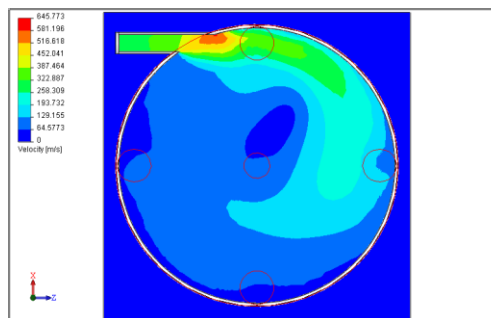


Рис. 4. Результат численного решения

При использовании этой модели движения воды в вихревой камере полученное решение дает распределение средних значений параметров: скорости и давления. Использование различных подходов к моделированию одного и того же течения позволят создать наилучшую из них для расчета вихревого движения воды в короткой вихревой камере.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
2. Пуанкаре А. Теория Вихрей. Ижевск.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. 162 с.
3. Гольдштик М.А., Леонтьев А.К., Палеев И.И. Аэродинамика вихревой камеры // Теплоэнергетика. 1961. №2. С. 40–45.
4. Ляховский Д.Н. Исследование аэродинамики циклонной камеры // Вопросы аэродинамики и теплоотдачи в котельно-топочных процессах. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. С. 114–150.
5. Рудницкий В.А. О коэффициенте сохранения скорости в расчетах циклонно-вихревых камер // Эффективность энергетических процессов: Межвузовский сб. Владивосток, 1976 Вып. 1. С. 12–16.
6. Long R.R. Vortex motion in a viscous fluid // Meteorol. 1958. Vol. 15. P. 108.
7. Смутьский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1992. 301 с.
8. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки: Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 588 с.

Информация об авторах

Горлов Александр Семенович, кандидат технических наук, доц., заведующий кафедрой высшей математики
E-mail: belgoras@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Савотченко Сергей Евгеньевич, доктор физико-математических наук, проф.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в декабре 2017 г.

© Горлов А.С., Савотченко С.Е., 2018

A.S. Gorlov, S.E. Savotchenko

INVESTIGATIONS OF HYDRODYNAMICS OF THE SHORT VORTEX CHAMBERS

The research of the flow of viscous incompressible fluid in short vortex chamber presented in article. The hydrodynamics processes, taking place in short vortex chambers with the water flow from the central hole, investigated experimentally. Visualization of vortex water course in short vortex chambers allows to observe processes, which impossible to cognize by any other methods. Experimental research and visualization of processes help in definition of the initial and boundary conditions for the system of the Navier-Stokes equations. The results provide the simplification of the system for its solution by numerical methods.

Keywords: *hydrodynamics of a short vortex chamber, vortex motion, experiment.*

Information about the authors

Aleksandr S. Gorlov, PhD, Assistant professor.

E-mail: belgoras@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Tel. 8 (4722) 30-99-06

Sergey E. Savotchenko, PhD, Professor.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in December 2017