

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ТЕЛА ОБТЕКАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА В ВИХРЕВЫХ РАСХОДОМЕРАХ

В.Е. Вершинин, Ф.И. Полковников (Тюменский государственный университет)

Представлены результаты исследования влияния формы тела обтекания на устойчивость процесса вихреобразования в потоке жидкости. Показано, что расширение области устойчивого существования вихрей позволяет расширить диапазон измерения скорости вихревым расходомером. В рамках исследований проведено численное моделирование вихревых течений, формируемых телами обтекания различной формы в вихревых расходомерах. Произведен сравнительный анализ характеристик потока. Определено тело обтекания с наилучшими параметрами потока, позволяющими улучшить метрологические характеристики расходомеров¹.

Ключевые слова: расходомерия, численное моделирование вихревых течений, устойчивость, тела обтекания различной формы, характеристики потока.

Введение

Работа вихревого расходомера основана на явлении, называемом дорожкой Кармана [1, 2, 3], которая представляет собой периодическую последовательность чередующихся вихрей, образующихся попеременно с разных сторон неподвижного тела обтекания. Важнейшим для вихревой расходомерии свойством дорожки Кармана является ее стабильность (стационарность). Частота образования вихрей прямо пропорциональна скорости набегающего потока

$$f = St \frac{v}{d}, \quad (1)$$

где St — число Струхала, v — скорость потока среды, d — ширина тела обтекания.

При малых (порядка десятков) значениях числа Рейнольдса (Re) течение будет ламинарным, и измерение потока с помощью данного вида расходомеров становится невозможным. По мере приближения к этой зоне процесс вихреобразования делается нестабильным и нарушается периодичность следования вихрей. Вопрос о влиянии температуры на динамический диапазон измерений рассматривался в [4]. Проводились исследования процесса вихреобразования при повышенной внешней турбулентности потоке и в условиях турбулизации пограничного слоя. Важнейшим остается вопрос о выборе такого тела обтекания, которое будет обеспечивать стабильное образование вихрей при максимально малых значениях Re . При этом число Струхала должно меняться незначительно при изменении числа Рейнольдса, так как именно в таком случае обеспечивается постоянство преобразования скорости потока в частоту следования вихрей в дорожке Кармана. Поскольку число Струхала для разных тел обтекания ведет себя по-разному, то точность измерения расхода, которую можно достичь на данном вихревом расходомере при прочих равных условиях определяется формой тела обтекания. В работе [5] рассматривался выбор оптимальной формы тела обтекания для волокнистых суспензий в процессах целлюлозно-бумажного производства.

Высокий уровень развития численных методов гидродинамического моделирования позволяет решать задачи оптимизации формы тела обтекания с помощью компьютерного моделирования. В работах [6, 7] представлены подходы к моделированию турбулентных течений.

Выбор тел обтекания и исходные данные

В существующих конструкциях в качестве элемента, генерирующего вихри, используют плохо обтекаемые тела, расположенные поперек потока. Работа такого генератора вихрей оптимальна при следующих требованиях к телу обтекания [1]: ширина плоскости тела обтекания, перпендикулярной потоку, $d \approx D/3$ (D — диаметр трубы); длина тела обтекания $l \approx d/3$; тело обтекания должно иметь острые кромки: тело обтекания должно располагаться вдоль диаметра трубы и не иметь зазоров между трубой и своей торцевой частью.

В данной работе исследовались потоки, формируемые тремя видами тел обтекания: 1) тело в форме сглаженного треугольника, для краткости далее называемое «киль», 2) тело дельтаобразного сечения, для краткости далее называемое «трапеция», 3) тело сложного сечения, имеющего шляпку и ножку, для краткости далее называемое «гриб» (рис. 1).

Все тела идентичны по площади перекрытия потока. Измеряемая среда — вода пресная. Работа вихревого расходомера моделировалась в диапазоне скоростей 0,15...5,61 м/с, что исходя из геометрических размеров зоны протекания, соответствовало объемным расходам 0,7...25 м³/ч. Давление в потоке на выходе составляло 1 МПа, температура — 20 °С, вязкость — 1,004 сПз,

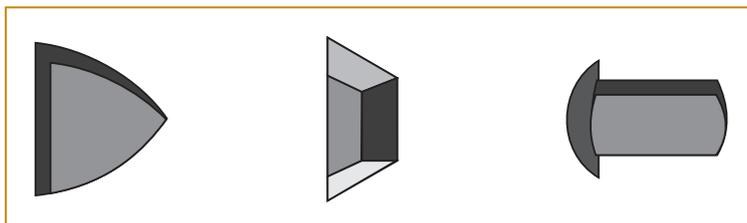


Рис. 1. Тела обтекания (слева — направо) «киль», «трапеция» «гриб»

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации проекта по Постановлению Правительства № 218 от 9 апреля 2010 г., по договору № 02. G 25.31.0020 ОАО "ГМС Нефтемаш" совместно с ФГБОУ ВПО "Тюменский государственный университет".

Таблица. Граничные условия

Параметр	Входной участок трубы	Выходной участок трубы	Стенки
U – скорость	$U = U_{вх}$	$\frac{\partial U}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial U}{\partial n} = 0$
p – давление	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$p = p_{вых}$	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$

Модель турбулентности

Для решения поставленных задач проводился динамический расчет движения однофазной среды (воды) в расчетной области вихревого расходомера. Использовался динамический решатель PimpleFoam (ПО OpenFOAM) для несжимаемого турбулентного потока с реализацией Pimple-алгоритма для совместного решения уравнений для скорости и давления.

Учет турбулентности проводился в рамках RANS-модели (модели напряжений Рейнольдса). Использовалась SST модель турбулентности. Эта модель показала хорошие результаты при расчете течений в зоне отрыва и при сильном продольном градиенте давления [8]. Она учитывает перенос напряжения трения в пограничном слое.

Использованные при расчетах граничные условия приведены в таблице. На вход расходомера подавалась жидкость с постоянной скоростью U , на выходе задавалось постоянное давление. Все стенки считались гидравлически гладкими с условием прилипания.

Методика исследования

Структура моделируемого потока представлена чередующимися вихрями, имеющими противоположное направление вращения. Это порождает осциллирующее поведение скорости и основных характеристик потока как во времени, так и в пространстве. Анализ осциллирующих сигналов удобно проводить методом дискретного Фурье-анализа. При этом рассчитывались частоты и амплитуды гармоник, с выделением доминирующих. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) сигнала позволяет судить о качестве сигнала (его зашумленности). Анализ вихреобразования в модели строился на основе изучения осцилляций «завихренности» ($rot(v)$ – ротор скорости) потока, которая пропорциональна угловой скорости вращения потока и является надежным индикатором вихревого движения. При этом рассматривалось два типа распределений: 1) пространственное рас-

пределение завихренности вдоль центральной оси потока и 2) временное распределение «завихренности» в фиксированной точке на оси трубы в непосредственной близости от тела обтекания (на расстоянии 5 мм от конца тела обтекания). Пространственное распределение позволяет оценить амплитуду сигнала и область существования вихрей. Временное распределение позволяет оценивать форму сигнала, его устойчивость и качество. В данной серии расчетов исследовалась зависимость амплитуды и частоты вихрей от скорости потока. В ходе расчетов определялась зона локализации вихрей. Значение амплитуды определялось как максимальное значение завихренности среди множества распределений, найденных для различных моментов времени с шагом от 0,1 с на минимальной скорости и до 0,001 с на максимальной. Временной шаг для каждого режима рассчитывался в соответствии с теоремой Котельникова.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведено распределение завихренности в центральном продольном сечении канала на режиме 12,5 м/с для различных тел обтекания.

Как следует из рис. 2, структура потока весьма чувствительна к форме тела обтекания. Наиболее выраженная структура на данном режиме характерна для тел «трапеция» и «гриб».

На рис. 3 приведена зависимость от расхода потока частоты доминирующих по амплитуде гармоник, найденных методом Фурье — анализа временных сигналов в заданной точке.

На основании частной характеристики была построена зависимость критерия Струхала от числа Рейнольдса потока (рис. 4).

Как следует из рис. 3 и 4 наибольшую стабильность критерия Струхала показывает тело обтекания «гриб», что соответствует линейному характеру зависимости частоты от скорости потока.

Анализ амплитуд гармоник показал их монотонное возрастание при увеличении скорости потока только для тела обтекания «гриб».

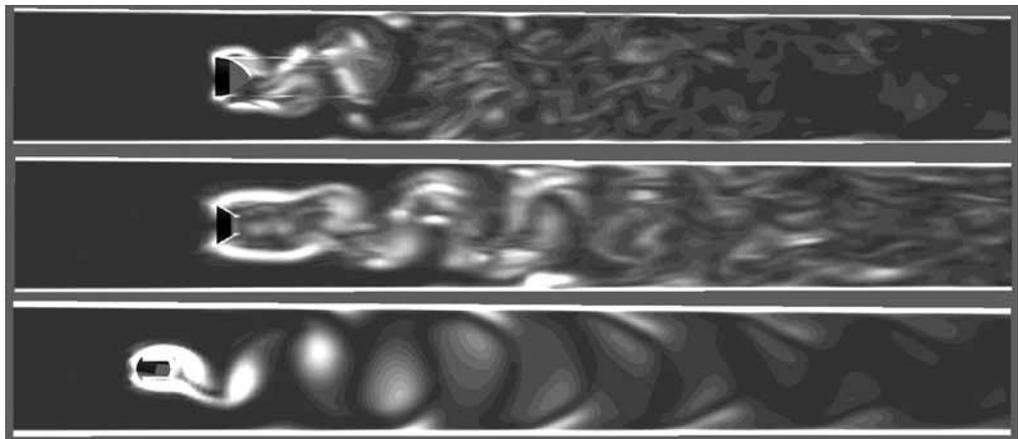


Рис. 2 Поле завихренности, скорость 2,8 м/с (12,5 м3/ч), тела обтекания (сверху-вниз) «киль», «трапеция», «гриб»

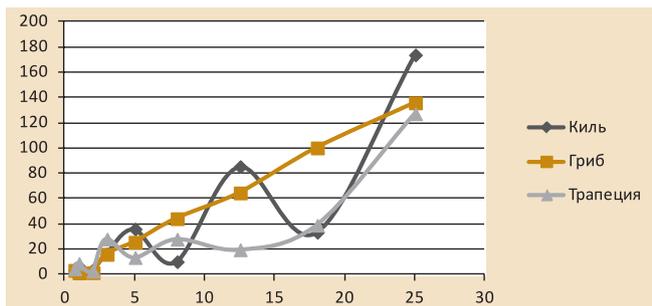


Рис. 3. Зависимость частоты следования вихрей от объемного расхода для тел обтекания «киль», «трапеция», «гриб»

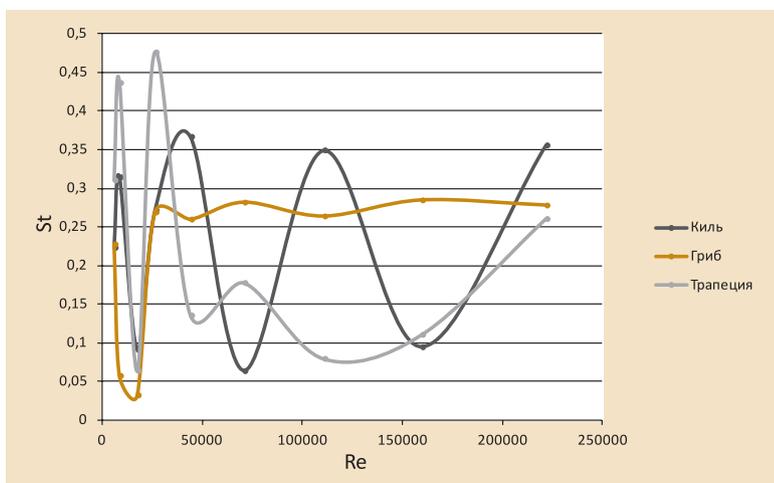


Рис. 4. Зависимость критерия Струхала от числа Рейнольдса для всех тел обтекания

Для тел обтекания «киль» и «трапеция» расчет дает сильную нелинейную зависимость амплитуды доминирующей гармоники от объемного расхода.

Анализ результатов расчета выявил индивидуальные особенности течения в случае различных тел обтекания.

«Киль»

1) Дорожка Кармана характеризуется неустойчивостью положения зоны формирования вихря. При увеличении скорости потока зона активного вихреобразования смещается в направлении движения потока. Максимум сигнала в зависимости от режима меняет свое положение в пределах 0...0,1 м от конечной точки тела обтекания.

2) Форма временного сигнала меняется в зависимости от режима, оставаясь гармонической на всех режимах.

«Гриб»

1) Максимум вихреобразования приходится на зону, непосредственно примыкающую к телу обтекания (для тела «киль» зона максимума амплитуды сигнала находится на некотором удалении от самого тела обтекания). Это связано по всей видимости с вытянутостью тела обтекания.

2) Амплитуда колебания сигнала монотонно спадает по мере удаления от тела обтекания.

3) АЧХ на всех режимах демонстрирует наличие выраженного максимума. Это говорит о близости сигнала к гармоничной форме, его низкой зашумленности посторонними гармониками. Подобный тип сигнала хорошо детектируется и лишен проблем нечеткого определения частоты.

4) На режимах 8 м³/ч и 18 м³/ч возникают бивибения с низкочастотной гармоникой большой амплитуды, что, возможно, связано с резонансными явлениями.

«Трапеция»

1) Дорожка Кармана характеризуется неустойчивостью положения зоны формирования вихря. На малых скоростях вихревая дорожка практически отсутствует, и течение переходит в ламинарный режим. При увеличении скорости потока зона активного вихреобразования смещается в направлении движения потока. Максимум сигнала в зависимости от режима меняет свое положение в пределах 0...0,1 м от конечной точки тела обтекания.

2) Форма временного сигнала в целом сходна с сигналом, полученным для тела обтекания «киль».

3) АЧХ демонстрирует нестабильность. На ряде режимов (5 м³/ч, 12,5 м³/ч) наблюдается высокая зашумленность сигнала, при которой присутствует несколько равновеликих по амплитуде гармоник, что ведет к неопределенности при обработке сигнала с датчиков прибора. На тех режимах, где сигнал близок к гармоническому, амплитуда гармоник демонстрирует немонотонную зависимость от расхода потока. Это может быть связано с возникновением резонансных явлений на данных расходах.

Выводы

Расчеты показали, что вихреобразование на теле обтекания «гриб» создает более стабильную по форме дорожку Кармана. Временное распределение завихренности на оси потока вблизи тела обтекания стремится к гармоническому в широком диапазоне скоростей потока. Это свойство потока позволяет снизить вероятность ошибки при расчете частоты сигнала в приборе. Кроме того, число Струхала для тела обтекания «гриб» претерпевает наименьшие изменения при варьировании скорости потока (изменения числа Рейнольдса). Это позволяет повысить точность определения расхода за счет использования более гладкой функции преобразования частотного сигнала в расход потока.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и разработке вихревых расходомеров с улучшенными метрологическими характеристиками (класс точности и ширина диапазона измерения расхода).

Список литературы

1. *Кремлевский П.П.* Расходомеры и счетчики количества: Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд. 1989. 701 с.
2. *Киясбейли Л.М., Лифшиц Л.М.* Первичные преобразователи систем измерения расхода и количества жидкостей. М. «Энергия», 1980. 76 с.
3. *Айфичер Э.С., Джервис Барри У.* Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание.: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс». 2004. 992 с.
4. *Лапин А.П. и др.* Анализ зависимости числа Струхалея в уравнении измерения вихреакустического расходомера // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2013. №4. С.70-77.
5. *Лурье М.С.* Оптимизация тел обтекания вихревых расходомеров для целлюлозно-бумажного производства // Химия растительного сырья. 2010. №4. С.173-176.
6. *Иевлев В.М.* Численное моделирование турбулентных течений. М.: Наука, 1990. 216 с.
7. *Белов И.А., Исаев С.А.* Моделирование турбулентных течений. СПб.; Балт. гос. техн. ун-т., 2001. 108 с.
8. *Юн А.А.* Теория и практика моделирования турбулентных течений. URSS. Москва, 2009.

Авторы выражают благодарность сотрудникам главного вычислительного центра и технопарка Тюменского государственного университета, оказывавшим научную и техническую поддержку при проведении данного исследования.

***Вершинин Владимир Евгеньевич** – старший преподаватель кафедры моделирования физических процессов и систем, **Полковников Федор Иванович** – магистрант Физико-технического института Тюменского государственного университета.
Контактный телефон (3452) 59-74-70.
E-mail: vvershinin@list.ru, fip93@yandex.ru*