О.В. Митрофанова¹, Л.С. Кокорев¹, Ю.Н. Токарев², В.А. Тумольский¹, Т.Е. Шишкина¹

Московский инженерно-физический институт (государственный университет), Россия (1) Московский энергетический институт (технический университет), Россия (2)

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ Закрученных течений в каналах сложной геометрии

АННОТАЦИЯ

Разработана методика экспериментальных измерений, позволяющая выявить элементы вихревой структуры закрученного течения. В результате проведенных экспериментальных исследований определена толщина зоны пристенного течения с отличной от нуля радиальной скоростью, измерены поля давления и скорости в области присоединения вихря к твердой поверхности вблизи торцевой стенки вихревой камеры и на удалении от неё во внутренней части объёма камеры. На примере использования пакета FLUENT рассмотрена возможность применения стандартных алгоритмов численных методов для расчета сложных вихревых течений в коллекторных системах корпусных ядерных реакторов. Целью предпринятых в настоящей работе экспериментальных исследований является выявление общих закономерностей сложных вихревых течений для разработки адекватных физических моделей, применение которых позволит получить замыкающие соотношения в математической формулировке задач гидродинамики и теплообмена закрученных потоков.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение вихревой структуры сложных турбулентных закрученных потоков имеет актуальное значение для различных областей современной энергетики. В работах [1,2] систематизированы результаты исследований, позволяющих выявить связь вихревой структуры потока с физическими особенностями турбулентных закрученных потоков в каналах с завихрителями, используемыми для интенсификации процессов тепломассообмена в ядерных реакторах и теплоэнергетических аппаратах. Опыт эксплуатации ядерно-энергетических установок показывает [3,4], что при организации циркуляции теплоносителя, характеризуемой сочетанием опускных и подъемных участков движения теплоносителя, применением закручивающих устройств, наличием резких поворотов теплогидравлического тракта и изменением его проходного сечения, обнаруживается детерминированная вихревая структура потока, указывающая на наличие устойчивых крупномасштабных вихреобразований.

К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал по исследованию влияния геометрических и режимных параметров коллекторных систем ядерных реакторов типа БН и ВВЭР с жидкометаллическим и водяным охлаждением на процессы генерации крупномасштабных вихрей, приводящих к неравномерности расхода теплоносителя в активных зонах реакторов [5,6], снижению интенсивности перемешивания петлевых потоков теплоносителя и их угловому смещению [7]. Выявленное экспериментально секторное течение теплоносителя с угловым поворотом петлевых потоков свидетельствует о существовании нерасчетного режима течения с крупномасштабной циркуляцией теплоносителя в активной зоне.

Анализ и обобщение экспериментальных данных показывают, что для развития теоретических представлений в моделировании сложных вихревых течений важное место занимает более глубокое экспериментальное изучение вихревой структуры приповерхностных слоёв закрученных течений и пространственных зон, разделяющих области течения, соответствующие закономерностям квазитвердого вращения и квазипотенциального течения в закрученных потоках. Проведению исследований в данной области и посвящена настоящая работа.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

С целью экспериментального исследования закрученного течения была выбрана конструкция вихревой камеры, схема которой показана на рис. 1, создан экспериментальный стенд, изготовлены измерительные зонды и разработана методика экспериментальных измерений.



Рис. 1. Схематическое устройство вихревой камеры с выбранной системой координат

Основными элементами экспериментальной установки являются: вихревая камера, газодувка, ресивер, поворотное и поступательное микрометрические устройства для перемещения измерительных зондов, измерительная система.

Вихревая камера представляет собой цилиндр с внутренним радиусом R = 100 мм и высотой $H = 70 \div 200$ мм. Донное отверстие диаметром 12 мм соединяет камеру с объёмом ресивера, разряжение в котором создаётся газодувкой. Закручивание потока осуществляется четырьмя соплами, через которые поступает воздух в камеру из помещения. Ширина выходной щели сопл составляет 2 мм.

В процессе измерений было выявлено, что поскольку скорость на выходе из сопл (входе в вихревую камеру) значительно превышает среднюю скорость течения на периферии камеры, то помимо общего закручивания потока происходит генерация вихрей, пространственный масштаб которых соизмерим с шириной сопловой щели. Направление результирующего вектора завихрённости в этих вихрях совпадает с направлением угловой скорости вращения осреднённого потока в вихревой камере (см. рис. 1).

Устройство измерительных зондов представляет собой цилиндрическую капиллярную трубку диаметром 2 мм с отверстием диаметром 0,5 мм (или 0,25 мм) для отбора давления, зафиксированную таким образом, чтобы её передвижение обеспечивалось поворотным и поступательным микрометрическими механизмами. Тарировка зондов осуществлялась в прямолинейном канале с сечением 8×90 мм.



Рис. 2. Развертка давления на поверхности измерительного зонда (а) и положение реперных точек для определения направления вектора полной скорости потока (б).

В тарировочных испытаниях была получена развёртка давления на поверхности измерительной трубки при её вращении на 360°. На рис. 2 (а) представлена зависимость показаний манометра l (манометрическая жидкость - этиловый спирт) от угла поворота измерительного отверстия зонда φ . Полученная зависимость показывает, что закон параболичности изменения избыточного давления по углу соответствует области $-72 \le \phi \le +72^{\circ}$. Существование симметричной параболической зависимости для кривой давления дает возможность использовать методику измерения локальной скорости потока по четырём точкам (рис. 2, б), соответствующим минимальному (точка 2), максимальному (точка 1) перепадам давления на зонде и двум одинаковым промежуточным значениям перепада давления (точки 3, 4). Данная методика измерений позволяет установить значение и направление полной скорости потока, определив перепад давления и связав его с силой лобового сопротивления цилиндра. Измерение положения лобовой точки (угла φ , соответствующего точке 1) даёт возможность определить составляющие скорости потока в точке измерения. Таким образом, посредством трубчатого зонда были определены как значение скорости, так и её направление в области пристенного течения и в зоне центрального вихря.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерений, представленные на рис. 3–8, показывают, что в закрученном потоке внутри вихревой камеры четко выделяются две области регулярного течения: а) пристенный слой с интенсивным радиальным течением (рис. 3) и нарастающей по толщине тангенциальной скоростью (рис. 4) и б) струйное течение в центре камеры, восходящее от торцевой стенки при z = 0 и направленное к выходному отверстию камеры.

В обеих областях основному течению, направленному к выходу камеры, сопутствует отчётливо выраженная зона возвратного течения.



Рис. 3. Изменение радиальной компоненты скорости *u_r* при удалении от стенки



Рис. 4. Изменение тангенциальной компоненты скорости *u*₀ при удалении от стенки

На рис. 5 представлены результаты измерений предельных значений угла, характеризующего направление вектора полной скорости потока вблизи стенки в области, которую мы условно называем «областью присоединения вихря к твёрдой поверхности». В данном случае речь идет о торцевой поверхности вихревой камеры напротив выходного отверстия. Как показали измерения, на расстоянии h = 0,25 мм от торцевой поверхности (это расстояние ограничивалось величиной отверстия измери-

тельного зонда для отбора давления), угол φ составляет $\approx 45^{\circ}$, что соответствует приблизительно равной величине радиальной u_r и тангенциальной u_{φ} компонент осреднённой скорости потока. Экспериментальные кривые, представленные на рис. 3 и 4 указывают значения этих компонент скорости при $z \rightarrow 0$ на границе вязкого подслоя и переходной области.



Рис. 5. Направление течения в пристенной области для различных значений координаты *х*

Рис. 6 иллюстрирует изменение направления вектора полной скорости потока при удалении от торцевой поверхности для двух значений поперечной координаты x = 8 мм и x = 10 мм при радиусе выходного отверстия вихревой камеры, равном 6 мм.



Рис. 6. Направление течения (угол, характеризующий максимальное значение скорости) в зависимости от координаты z при x = 8 мм и x = 10 мм

Экспериментально измеренные распределения радиальной u_r , окружной u_{ϕ} и продольной u_z компонент скорости указывают на то, что за пределами пограничного слоя и центральной струи поток имеет форму квазипотенциального течения, занимающего основной объём вихревой камеры. На фоне квазипотенциального течения в опытах обнаружены интенсивные вихри малого поперечного масштаба, стягивающиеся к основанию центральной струи. На рис. 7 приведены координаты точек, в которых отмечены локальные разрежения давления, соответствующие местоположению этих вихрей.



Рис. 7. Координаты точек, в которых были зафиксированы скачки давления и разрывы тангенциальной и радиальной компонент скорости

Механизм генерации и роль таких вихреобразований представляют интерес для дальнейших исследований. Предположительно, в данном случае эти вихри генерируются на свободной границе плоских струй, истекающих из четырех входных сопл (см. рис. 1). При этом кинетическая энергия струй преобразуется во вращательную и поступательную энергию вихрей.

Другим источником завихренности может служить вязкий подслой в турбулентном пограничном слое. Именно в вязком подслое осуществляется максимальная концентрация завихренности, диссипация энергии в теплоту и генерация микровихрей [8], слияние и трансформация которых может приводить к образованию пристенных макровихрей.



Рис. 8. Изменение интенсивности локальной завихренности закрученного течения в вихревой камере при удалении от торцевой поверхности

На рис. 8 представлены экспериментальные значения тангенциальной $\omega_{\varphi} = rot_{\varphi}\vec{u}$ и продольной $\omega_z = rot_z\vec{u}$ компонент завихренности осредненного потока при удалении от стенки в зоне присоединения вихря к твердой поверхности. Представленные результаты показывают, что величина тангенциальной компоненты завихренности ω_{φ} растет при удалении от стенки, достигая максимального по модулю значения на границе пристенного слоя при $z \approx 3$ мм. За пределами этого слоя ω_{φ} уменьшается и становится знакопеременным. В то же время, вертикальная компонента завихренности ω_z , оставаясь незначительной по величине в пристенной области

при z < 3 мм, за пределами этой области приблизительно сохраняет свое значение, плавно уменьшаясь с увеличением координаты z. Такие результаты могут свидетельствовать о наличии крупномасштабных вихреобразований в пристенной области течения и системы сопутствующих спиральных вихрей меньшего масштаба на границе пристенной зоны.

В настоящее время при использовании численных методов для моделирования сложных вихревых течений вопрос о сопоставимости результатов расчёта с реальной картиной течения существенным образом зависит от способа замыкания расчётных уравнений, т.е. выбора модели турбулентности, постановки граничных условий, описания пристеночных функций и внесения эмпирических поправок. Поэтому введение замыкающих моделей, основанных на более глубоком понимании физики закрученных течений, даст возможность более эффективного использования современных программных продуктов типа пакета FLUENT.

Полученные в опытах результаты о влиянии интенсивности завихренности на формирование крупномасштабных вихревых структур позволили более точно сформулировать постановку задачи для расчета течения в коллекторной системе корпусного ядерного реактора. Расчеты проводились с помощью пакета FLUENT для упрощённой осесимметричной модели коллектора. Количество расчетных ячеек составляло 8·10⁵, минимальный и максимальный линейные размеры ячеек при разбиении составили 2·10⁻⁷ и 6·10⁻⁴ м соответственно. Для повышения точности расчётов вблизи обтекаемых поверхностей создавались сгущения расчётной сетки. Для замыкания использовалась модель турбулентности для рейнольдсовых напряжений RSM (Reynolds Stress Model). Рассматривалось несколько тестовых задач, соответствующих случаям течения в коллекторной системе быстрого реактора.

В качестве примера расчета приведем случай течения в коллекторе с вводом одинакового расхода жидкометаллического теплоносителя (натрия) через 4 входных патрубка. Условие осесимметричного подвода теплоносителя осложнено тем, что в правом боковом патрубке (рис. 9, а) течение имеет закрутку, т.е. отличную от нуля радиальную (относительно цилиндрической системы координат, связанной с коллектором), составляющую завихрённости ($\omega_r = rot_r \vec{u} \neq 0$). Течение в трёх остальных подводящих патрубках соответствует условию $\omega_r = 0$.

На рис. 9, б представлено скоростное распределение в потоке натрия в вертикальном цилиндрическом слое с радиусом, соответствующим середине опускной щели коллектора на уровне правого входного патрубка с закруткой потока.

Как видно из рис. 9, б, помимо явно выраженного струйного течения с правовинтовой закруткой, переходящего затем в опускное течение, наблюдается менее интенсивное подъёмное течение. Число Рейнольдса, соответствующее средней расходной скорости потока при опускном течении натрия в кольцевой щели, составляло 5·10⁶.



Рис. 9. Результаты расчета скоростного поля потока во входной части коллектора:

а – скоростное поле в поперечном сечении коллектора на уровне подводящих трубопроводов (в правом входном патрубке поток закручен, в остальных трёх – прямолинейное движение); б – фрагмент скоростного распределения в вертикальном сечении коллектора, соответствующем середине ширины опускной щели на уровне расположения входного патрубка с закруткой потока

На рис. 10, а, б показаны скоростные распределения в нижней и верхней частях напорного коллектора. Результаты численного расчета показывают (рис. 10, а), что на дне напорного коллектора возникает интенсивное закрученное течение, что указывает на формирование вихря с вертикальной осыю. В то же время, на выходе из коллектора перед входом в активную зону, как показывает рис. 10, б, помимо подъёмного вертикального течения теплоносителя, формируется горизонтальное течение, направленное в сторону входного патрубка с закруткой потока (см. рис. 9, а).

Приведенные ниже иллюстрации демонстрируют качественное совпадение результатов расчётов с наиболее типичными картинами вихреобразований, наблюдаемыми в экспериментах [3 - 6]. В расчётах варьировались геометрические параметры проточной части коллекторной системы: изменялось соотношение высоты нижнего напорного коллектора и ширины опускной щели, менялась геометрия входного участка и конфигурация днища. Полученные результаты подтверждают экспериментально установленные в работах [3 - 6] закономерности влияния геометрии коллекторных систем на процесс вихреобразования.





Рис. 10. Скоростные распределения при закрутке потока в правом входном патрубке:

а – в нижней (донной) части напорного коллектора;
δ – в верхней части напорного коллектора перед входом в активную зону

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика экспериментальных измерений полей давления и скорости в пристенном слое закрученного потока и во внутренней области объёма вихревой камеры. Результаты измерений радиальной и окружной компонент скорости потока показывают, что вблизи торцевой стенки вихревой камеры отчетливо проявляются турбулентный пограничный слой и зона возвратного течения за пределами пограничного слоя. Наблюдаемая картина соответствует экмановской форме дрейфового течения [9].

При помощи гидравлических зондов удается также уточнить структуру течения в центральной части вихревой камеры, определить местоположение вращающегося твердотельного ядра и окружающего его слоя спиральных вихрей, обнаруживающихся по разрывной форме течения. Локальные измерения статического давления в объеме камеры позволяют установить координаты и ориентацию спиральных вихрей. Таким образом, использование гидравлических зондов дает возможность получать обширную информацию о структуре закрученного течения.

С помощью пакета FLUENT проведены численные расчёты тестовых задач, соответствующих сложным вихревым течениям однофазного теплоносителя в коллекторных системах корпусных ядерных реакторов.

Работы в области моделирования сложных вихревых и закрученных течений выполняются при поддержке Программы по развитию системы ведущих научных школ – грант РИ-112/001/524 и РФФИ – грант 05-08-01511-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах с завихрителями (Аналитический обзор) // Теплофизика высоких температур, 2003. Т. 41. № 4. С. 587-633.
- Митрофанова О.В. Методы математического моделирования гидродинамики и теплообмена закрученных потоков в каналах с завихрителями. Дисс. ... доктора техн. наук. М.: МИФИ. 2002. 321 с.
- Гидродинамика и безопасность ядерных энергетических установок: Сборник трудов ФЭИ в трех томах. Том 2. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 1999. 388 с.
- Гусев Б.Д., Калинин Р.И., Благовещенский А.Я. Гидродинамические аспекты надёжности современных энергетических установок. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 216 с.
- Патрашев А.Н. Турбулентные течения в потоках жидкости с крупными локальными вихреобразованиями / Механика турбулентных потоков, 1980. С. 166-187.
- 6. Влияние геометрических и режимных параметров цилиндрического раздаточного коллектора на выходную неравномерность профиля расхода теплоносителя /Г.Ф. Ипатов, А.С. Трофимов, В.Ю. Лихашва и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерная техника и технология. М.: ЦНИИатоминформ, 1989. Вып. 3. С. 51-58.
- Безруков Ю.А., Драгунов Ю.Г., Логвинов С. А., Ульяновский В.Н. Исследование перемешивания потоков теплоносителя в корпусе ВВЭР // Атомная энергия. 2004. Т. 96. Вып. 6. С. 432 - 440.
- Кантуэл Б.Дж. Организованные движения в турбулентных потоках.// Вихри и волны: Сб. статей: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. С. 9-79.
- 9. Перри А.Х., Уокер Дж. М. Система океан-атмосфера: Пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 195 с.