

ГИБРИДНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ИССЛЕДОВАНИИ НАПОРНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ

Представлены результаты совместных экспериментальных гидравлических исследований и численного моделирования полей давлений и скоростей в равнопроходных нестандартизованных тройниках при отсутствии бокового расхода.

Известно, что наибольшее искажение скоростного поля и связанных с ним гидродинамических характеристик потока происходит вблизи местных сопротивлений (арматуры), расположенных в напорном водоводе в пределах зоны влияния местного сопротивления. Доказано, что механизм локализации внутренней язвенной коррозии тесно связан с особенностями течения жидкости в трубопроводе [2]. Определение давления, расхода и средней скорости движения потока в напорном трубопроводе при использовании современных измерительных устройств не вызывает затруднений. Для определения гидродинамического давления вблизи стенок водовода по его трассе или построения эпюр распределения скоростей необходимо знать распределение местных скоростей по сечениям, что является достаточно сложной задачей даже в настоящее время. В действующих гидротехнических водоводах, имеющих достаточно большие размеры (до нескольких метров) внесение измерительных устройств для определения местной скорости внутрь напорного потока трудно осуществить технически. В моделях сооружений, имеющих скорости турбулентного потока порядка 3-5 м/с, любое измерительное устройство, даже крайне малых размеров, будет являться обтекаемым телом, создающим отдельное местное сопротивление. Согласно требованиям стандарта, регламентирующего методику измерений расхода воды в напорных трубопроводах, при загрузке измерительного сечения средствами измерений более чем на 6% измерения проводить не допускается [1]. Возможно проведение исследований скоростей течения жидкости с помощью доплеровских датчиков. В Европейской Лаборатории по Нелинейной Магнитоакустике (LEMAC) была создана экспериментальная установка, использующая параметрическое магнито-акустическое устройство с обращенным волновым фронтом [3]. Этот способ требует наличия достаточно дорогого оборудования и специальных устройств, что, к сожалению, приемлемо не для всех лабораторий.

При определении местных скоростей напорного турбулентного потока альтернативным методом может служить сочетание гидравлического и численного эксперимента. Известно, что при установившемся напорном движении жидкости компоненты скорости и давления зависят от пространственных координат точки. Наиболее общим уравнением, из которого принципиально возможно получить закон распределения скоростей в напорных трубопроводах, является система дифференциальных уравнений Навье-Стокса, которая содержит четыре неизвестных, подлежащих определению, но даже дополненная четвертым уравнением – уравнением неразрывности, не может быть решена аналитически. Это связано как с чисто математическими трудностями интегрирования нелинейных уравнений второго порядка в частных производных, так и с отсутствием достоверных сведений о законе распределения турбулентной вязкости.

Численные модели выражают турбулентные свойства вблизи пограничного слоя через функции стенки, что является определенным приближением, точность которого определяется адекватностью всей совокупности допущений и приближений, заложенных в эти функции для описания реальной картины явления. Именно правильный выбор используемой при численных расчетах модели турбулентности обеспечит достаточное совпадение значений гидравлических параметров, полученных численно, и значений,

измеренных в результате гидравлического эксперимента.

В мировой практике используется термин CFD — Computational Fluid Dynamics, или вычислительная гидродинамика [5]. Вычислительная гидродинамика – наука, рожденная в результате соединения вычислительных методов (прикладной математики) и математических моделей гидромеханики, претерпела стремительное развитие в 20 веке, прежде всего, благодаря бурному прогрессу вычислительной техники. Спектр прикладных программ, в которых возможна реализация численного моделирования гидродинамических процессов, достаточно широк – FLOW-3D®, EPANET, MIKE URBAN, STAR-CD и т.д. В области анализа гидрогазодинамических процессов и тепломассопереноса в России нашли распространение такие коммерческие пакеты, как STAR-CD/STAR-CCM+, Fluent, CFX, FlowVision и Gas Dynamics Tool. Наиболее мощными и универсальными средствами моделирования являются первые три программных продукта. В пакетах STAR-CD, Fluent и CFX моделирование осуществляется на основе численного решения полных трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса. Пакеты обеспечивают возможность анализа течений вязкой ньютоновской и неньютоновской жидкости и газа в широком диапазоне скоростей от ползучих до гиперзвуковых течений при ламинарном и турбулентном режимах. Для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса при моделировании турбулентных течений эти программные комплексы содержат достаточно обширные каталоги полуэмпирических моделей турбулентности. Разностные схемы первого, второго и третьего порядков в пакетах STAR-CD, Fluent и CFX сконструированы с применением метода конечного объема для дискретизации исходных уравнений. Пакеты сертифицированы по международной системе качества ISO, а также имеют различные национальные и отраслевые сертификаты.

Сочетание физического и численного экспериментов получило условное название гибридного моделирования, возможности которого стремительно расширяются и тесно связаны с развитием средств вычислительной техники и прикладного программного обеспечения. В 1982 году в Имперском колледже Лондона (Великобритания) были проведены эксперименты по определению двух ортогональных компонент скорости и связанных с ними напряжений Рейнольдса в прямоугольных отводах с углом гиба 90^0 при использовании лазерного доплеровского velocиметра для чисел Рейнольдса 790 и $4 \cdot 10^4$ [7]. Данные позволили выполнить оценки точности существующих численных методов и применяемых при этом моделей турбулентности. В 1991 году в департаменте гидротехники университета Цинхуа г.Пекин (КНР) проводились исследования течения потока в симметричных и несимметричных диффузорах при значениях чисел Рейнольдса $Re = 1,2 \cdot 10^6$, в ходе которых сравнивались профили скоростей, полученные численными методами, и экспериментально полученные значения [8]. В 2009 году были опубликованы результаты исследований университета Пенсильвании (США), посвященные вопросам оценки точности моделей, описывающих отрывные течения вблизи уступов шероховатости в пределах пограничного слоя в турбулентном потоке [6].

Под руководством автора в 2008-2010 годах с помощью гибридного моделирования (при использовании пакета STAR-CD) были изучены пространственные кинематические характеристики потока в боковых ответвлениях равнопроходных тройников квадратного сечения при отсутствии расхода притока [4]. В работах А.С. Прузнера и А.Д. Альтшуля отмечено наличие в ответвлении вихря, вызывающего местное сжатие струи, идущей в прямой проход, и являющегося причиной местных потерь напора. Целью исследований было не только определение коэффициента сопротивления так называемых ниш, но и выяснение картины распределения скоростей в боковом ответвлении и прямом проходе тройника с применением гибридного эксперимента.

Физическая модель водовода размещалась в гидравлическом лотке шириной 600 мм и длиной 14915 мм, рабочей жидкостью служила пресная вода. Конструкция модели

представляла собой трубопровод квадратного сечения с внутренним линейным размером 85x85 мм, выполненный из оргстекла толщиной 5 мм, отдельные секции модели соединялись между собой квадратными фланцами. Для работы установки вода из бассейна подавалась насосом в напорный бак, к которому был присоединен трубопровод, и после прохождения модели вновь сбрасывалась в бассейн. На расстоянии $36d$ от входного сечения модели (где d – высота входного сечения водовода), выполнялись ответвления под углом $\alpha=30^0, 60^0, 90^0, 120^0, 150^0$ в зависимости от серии опытов. Потери напора на местных сопротивлениях определялись методом эквивалентных сечений. Давление измерялось с помощью пьезометров и вакуумметров.

Данные гидравлического эксперимента затем были использованы в численном моделировании. Весь напорный поток в математической модели разбивался на сетку, основное назначение которой – описание граничных поверхностей расчетных областей и разбиение этих объемов на подобласти или ячейки, используемые для численного решения дифференциальных уравнений Навье-Стокса. В созданных моделях сетка потока состояла из 50 тысяч элементов, представляющих собой усеченные многогранники. Первыми граничными условиями стали экспериментально полученные поля давлений по трассе водовода. Верификация численной модели производилась сопоставлением полей давлений, полученных численно, с полями давлений, замеренных в ходе проведения гидравлического эксперимента.

Один из вариантов полученных в результате математического моделирования скалярных полей скоростей в пределах боковых ответвлений квадратного сечения при значениях $Re = 2 \cdot 10^5$ и $\lambda = 0,018$ приведен на рис.1.

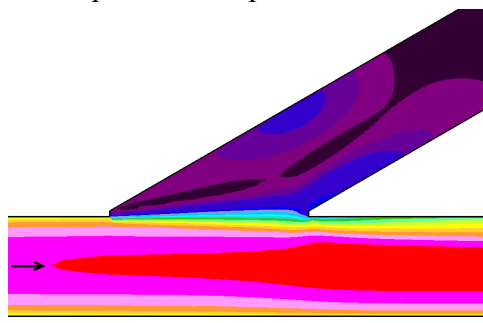


Рис.1. Скоростные поля в ответвлениях равнопроходного тройника при отсутствии бокового расхода угол $\alpha=150^0$.

Анализ скоростных полей показал все большее распространение потока в ответвление при увеличении его угла α . Для углов 30^0 это $1,4d$, для 60^0 – $1,6d$, для 90^0 – $1,9d$, для 120^0 – $2,3d$, для 150^0 – $2,5d$. Одновременно с увеличением угла ответвления наблюдается уменьшение площади сечения, занимаемого ядром потока. Для угла 30^0 скорости в ядре снижаются на участке подхода к ответвлению, в конце него ядро скоростей занимает $0,6d$; для угла 90^0 – $0,35d$; для угла 120^0 – $0,3d$ и для угла 150^0 – $0,2d$. Для всех случаев наблюдалось три ярко выраженных зоны образования вихрей – на ближней и дальней гранях по направлению к течению потока и в нижней части области ответвления. Была выявлена закономерность протяженности вихревых зон в отрезках – с увеличением угла длина вихря, примыкающего к ближней грани, растет от $0,7$ до $3,2d$, в то время как длина вихря, образующегося на дальней грани, практически не изменяется ($1,7 \div 2,3d$). Область ответвления, занимаемая вихрями, увеличивается с ростом угла ответвления. Следует отметить, что максимальные скорости в вихрях достигали до 25% от величины скорости ядра потока.

Полученные в результате гибридного моделирования векторные и скалярные поля скоростей и поля давлений в пределах отрезков равнопроходных тройников квадратного сечения могут быть полезны при выполнении прочностных расчетов арматурных элементов и стенок трубопроводов, а также при размещении стыковых соединений,

попадание которых в зону неравномерных скоростей вызывает усиленный износ материала.

Литература

1. ГОСТ 8.439-81 Государственная система обеспечения единства измерений. Расход воды в напорных трубопроводах. Методика выполнения измерений методом площадь – скорость. - М.: Изд-во стандартов, 1985. – 47 с.
2. Ковалев-Кривоносов, П.А. Рекомендации по компоновке отводов и арматуры в составе блоков и агрегатов судовых систем / П.А. Ковалев-Кривоносов, В.А. Зюбан, М.-Р.А. Умбрасас // Сб. НТО им. А.Н.Крылова. – Вып. 285. - Л.: Судостроение, 1979. - С. 95-100.
3. Пыльнов Ю.В. Нелинейная ОВФ–акустоскопия. Научный вестник МИРЭА №1 2006. С.76-87.
4. Снежко В.Л., Палиивец М.С. К вопросу определения гидравлических сопротивлений тройников. //Естественные и технические науки, № 5 (49), 2010. - С. 592-599.
5. Ferziger J. H. Recent Advances in Large-Eddy Simulation, Engineering Turbulence Modelling and Experiments 3, proceeding of the Third International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, 1996.
6. Lyons, C. D., Peltier, L. J., Zajaczkowski, F. J., Paterson, E. G. Assessment of DES Models for Separated Flow From a Hump in a Turbulent Boundary Layer / D. C. Lyons, L. J. Peltier, F. J. Zajaczkowski, E. G. Paterson // J. Fluids Eng. – 2009. – Volume 131. – P. 150-159. – doi:10.1115/1.4000376.
7. Taylor, A. M. K. P., Whitelaw, J. H., Yianneskis, M. Curved Ducts With Strong Secondary Motion: Velocity Measurements of Developing Laminar and Turbulent Flow [Text] / A. M. K. P. Taylor, J. H. Whitelaw, M. Yianneskis // J. Fluids Eng. – 1982. – Volume 104. – P. 220 – 230. – doi:10.1115/1.3241850.
8. Yuan, M. , C. S. Song, C., He, J. Numerical Analysis of Turbulent Flow in a Two-Dimensional Nonsymmetric Plane-Wall Diffuser / M. Yuan, C. C. S. Song, J. He // J. Fluids Eng. – 1991. – Volume 113. – P. 120 – 126. – doi:10.1115/1.2909482.