МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

11, ноябрь 2015

УДК 532.5-1/-9

Верификация численного расчета течения жидкости при внезапном расширении

Кутовой Е.Г., студент Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им.Н.Э. Баумана, кафедра «Гидромеханика, гидромашины и гидро-пневмоавтоматика»

Научный руководитель: Ломакин В.О., к.т.н. Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им.Н.Э. Баумана, кафедра «Гидромеханика, гидромашины и гидро-пневмоавтоматика» <u>lomakin@bmstu.ru</u>

Введение

Все чаще, в связи с удорожанием стоимости эксперимента, характеристики центробежные насосов рассчитывают с помощью численного моделирования. Подобные задачи с успехом решаются на кафедре «Гидромеханика, гидромашины и гидро-МГТУ им. пневмоавтоматика» (Э-10) Н.Э. Баумана. Результаты численного моделирования отлично согласуются с результатами стендовых испытаний.

Высокая точность моделирования, отчасти, связана с тем, что переходы между поверхностями в центробежных насосах довольно гладкие. Однако с конструкторской точки зрения бывает нужда использовать резкие переходы между поверхностями. На кафедре возникла необходимость проверить возможность и точность расчёта резких переходов между поверхностями с помощью численного моделирования.

Результаты гидродинамического моделирования и эксперимент, проведенного на стенде по внезапному расширению потока, сравнивались по коэффициенту сопротивления *ζ*.

1. Математическая модель

Математическая модель взята из статей Ломакина В.О.[2], [3]. Для расчета коэффициента расширения использовались приведенные ниже уравнения гидродинамики. Уравнение неразрывности жидкой среды имеет вид

$$\frac{\partial \overline{u_x}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u_y}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u_z}}{\partial z} = 0$$

где $\overline{u_x}$ – осредненные по времени проекции скоростей жидкости на соответствующие оси.

Так как для моделирования турбулентного течения в данной работе использовалась модель турбулентности RANS (модели турбулентности на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса), все рассчитываемые величины являются осредненными по времени.

Уравнение изменения количества движения, осредненное по времени, имеет вид

$$\rho \left[\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} \right] = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[T_{ij}^{(\nu)} - \rho \langle u_i u_j \rangle \right]$$

где $\bar{u}_i \bar{p}$ – осредненные скорость и давление, $\tilde{T}_{ij}^{(\nu)} = 2\mu \tilde{s}_{ij}$ – тензор вязких напряжения для несжимаемой жидкости, $\rho \langle u_i u_j \rangle$ – Рейнольдсовы напряжения. Система уравнений Рейнольдса является незамкнутой в связи с наличием неизвестных Рейнольдсовых напряжений. Замыкание системы производится с использованием $k - \omega$ модели турбулентности. Эта модель хорошо себя зарекомендовала себя ранее при проведении расчетов насосов на кафедре.

При численном моделировании, для получения дискретных аналогов исходных непрерывных уравнений использует метод контрольного объема. Исходная 3D-модель внезапного расширения (см. рис. 1) разбивается автоматическим сеткогенератором на совокупность конечных элементов (ячеек), для каждой из которых составляются дискретные аналоги непрерывных уравнений. Совокупность всех дискретных аналогов образует замкнутую систему алгебраических уравнений.



Рис. 1. Исходная 3D-модель внезапного расширения

Расчетная сетка имеет различную топологию. В ядре потока ячейки представляют из себя многогранники различной формы и размеров (см. рис.3) вблизи твердых стенок ячейки представляют из себя многогранные призмы, вытянутые в направлении перпендикулярном стенке (такой подход при построении сетки позволяет рационально распределить расчетные ячейки вблизи твердых стенок, где наблюдается изменение скорости потока с большим градиентом в перпендикулярном стенке направлении).

Для выбора оптимальных параметров расчетной сетки было произведено исследование сеточной сходимости.



Рис. 2. Расчетная сетка

Таблица 1

Параметры расчетных сеток

Базовый размер	5 мм	3 мм	1 мм
Число призматических слоев	5	5	30



Рис. 3. Расчетная сетка с базовым размером 5 мм (50 000 ячеек)



Рис. 4. Расчетная сетка с базовым размером 3 мм (81 000 ячеек)



Рис. 5. Расчетная сетка с базовым размером 1 мм (2 700 000 ячеек)

2. Расчет коэффициента сопротивления

2.1. Экспериментальный расчет

Для оценки точности применяемой математической модели, коэффициент сопротивления, полученный расчетным путем, был сравнен с экспериментальными данными.

Эксперимент проводился на гидравлическом стенде кафедры Э10 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Испытывалась труба с внезапным расширением потока.



Рис. 6. Чертеж испытываемой трубы



Рис. 7. Лабораторный стенд

В ходе эксперимента жидкость протекала по трубе с постоянным расходом 20 $\frac{\pi}{_{MИH}}$.

Таблица 2

парамстры трубы в сечения.	Γ	Іараме	гры	трубы	В	сечения
----------------------------	---	--------	-----	-------	---	---------

	d=10 мм	d=19,5 мм
Скорость, в м/с	4,24	1,11
Re	42400	21645

Давление в 12 точках было измерено с помощью пьезометрических гибких трубок. Расчетной величиной являлся величина столба жидкости, потерянная жидкостью при внезапном расширении.



Рис. 8. Показания пьезометров

$$Z_{1} + \frac{P_{1}}{\rho g} + \frac{\alpha_{1}V_{1}^{2}}{2g} = Z_{2} + \frac{P_{2}}{\rho g} + \frac{\alpha_{2}V_{2}^{2}}{2g} + h_{\text{пот}} (1)$$
$$h_{\text{пот}} = H_{1} - H_{2} + \frac{V_{1}^{2} - V_{2}^{2}}{2g},$$

где H1 – высота столба жидкости в 3-ем пьезометреH2 – высота столба жидкости во 9-ом пьезометре V1 – скорость в первом сеченииV2 – скорость во втором сечении α_1 , α_2 – коэффициенты Кориолиса (ввиду их трудного определения, были приняты равными единице, как при развитом турбулентном течении)



Рис. 9. Показания пьезометров

Расчет потерь столба жидкости:

$$\Delta H = H_{max} - H_{min} = 396 - 85 = 311$$
 мм = 0,311 м;
 $\Delta H_{v} = \frac{V1^{2} - V2^{2}}{2 * g} = \frac{4,24^{2} - 1,11^{2}}{2 * 9,81} = 0,853$ м;
 $h_{\text{пот}} = \Delta H_{v} - \Delta H = 0,853 - 0,311 = 0,542$ м;
Коэффициент сопротивления найдем по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$H_{\rm потерь} = \zeta \frac{\vartheta^2}{2g} \ (2)$$

$$\zeta_{\mathsf{ЭКСП}} = \frac{2 * g * h_{\text{потерь}}}{V1^2} = \frac{2 * 9,81 * 0,542}{4,24^2} = 0,591$$

2.2. Теоретический расчет

Согласно формуле Борда, найдем коэффециент сопротивления:

$$\zeta_{\rm reop} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 = 0,543$$

2.3. Расчет при помощи численного моделирования

Расчеты производились на сетке с базовым размером 1 мм (2 700 000 ячеек).



Рис. 10. Распределение скоростей в трубе

Полученное распределение скоростей в трубе с внезапным расширением, полученное методами численного моделирования, идеально сопоставимо с полученным экспериментально распределением представленным в справочнике по гидравлическим сопротивлениям И.Е. Идельчика [5].



Рис. 11. Распределение скоростей в трубе

При внезапном расширении сечения трубы образуется струя, отделенная от остальной среды поверхностью раздела, которая распадается и свертывается в мощные вихри (рис. 10 и 11). Длина участка l_2 на котором происходит вихреобразование, постепенное рассасывание вихрей и полное растекание потока по сечению, примерно составляет 8-12 гидравлических диаметров широкого сечения.

В эксперименте, длина между пьезометрами наблюдения составила 196 мм, что составляет 10 гидравлических диаметров. Контрольные сечения были проставлены на месте 3-го и 9-го пьезометров, т.е. так же на расстоянии 196 мм. Измеряя давление в этих сечениях, был определен столб потери жидкости, согласно формуле (1), а затем и коэффициент сопротивления, по формуле (2). Результаты представлены в таблице 3 [5].

Таблица З

	<i>Р</i> ₁ , Па	<i>P</i> ₂ , Па	$h_{ m notepb}$	ζ
1 мм	6200	713	0,559	0,61
3 мм	6216	714	0,561	0,612
5 мм	6237	727	0,565	0,613

Результаты численного моделирования

В итоге получим коэффициент сопротивления *ζ* = 0,61. Однако, как видно из таблицы 3, столь точная сетка не требуется для расчёта подобных задач.

2.4. Анализ полученных результатов

Таблица 4

Коэффициенты сопротивления

Формула Борда	Эксперимент	Численное моделирование
0,543	0,591	0,61

Отличие данных, полученных при численном моделировании и при эксперименте, составляет около 3-х процентов.

Заключение

В ходе работы показана положительная возможность численного моделирования при расчете внезапного расширения потока жидкостей.

Работа производилась на кафедре Э-10 МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках научноисследовательского проекта.

Список литературы

- 1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа, 2003. 840 с. (Классики отечественной науки).
- Ломакин В.О., Петров А.И., Кулешова М.С. Исследование двухфазного течения в осецентробежном колесе методами гидродинамического моделирования // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 9. DOI: 10.7463/0914.0725724.
- Ломакин В.О., Петров А.И., Степанюк А.И. Оптимизация геометрических параметров отвода нефтяного магистрального насоса типа НМ // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 3. С. 10. Режим доступа: <u>http://technomag.edu.ru/doc/347727.html</u> (дата обращения 17.05.15).
- Stian Ripegutu Johannessen .Use of CFD to Study Hydrodynamic Loads on Free-Fall Lifeboats in the Impact Phase. Available at: <u>http://www.diva-</u> portal.org/smash/get/diva2:566079/FULLTEXT01.pdf, accessed 17.05.15.
- 5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 3-изд, испр. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
- 6. Patankar S. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197 p.