

УДК 621.671.22

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ НАСАДКИ И СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Краева Е.А., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»*

*Артемов А.В., аспирант
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»*

*Мулярчик И.Г., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,*

*Научный руководитель: Ломакин В.О., к.т.н., ассистент
ale10@ramler.ru*

Введение

На кафедре «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика» МГТУ им. Н.Э. Баумана широко используется гидродинамическое моделирование потока в программном пакете STAR CCM+ 8.02.009 в хорошо обтекаемых телах, таких, как проточная часть центробежного насоса. Однако, для дросселя, который является плохо обтекаемым элементом гидравлической системы, этот подход не был широко применен.

В целях получения экспериментальных данных были проведены исследования процесса истечения воды в атмосферу из дроссельного канала цилиндрической формы (рис. 1). Модель дроссельного устройства изготовлена из полированного оргстекла.

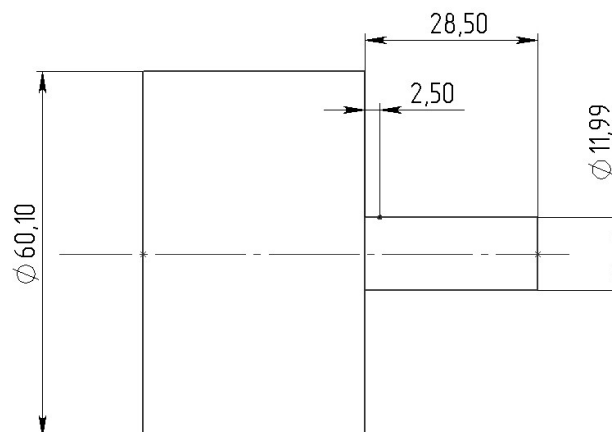


Рис. 1. Чертеж дроссельного канала

Экспериментальная установка состоит из насоса, измерительного бака, манометра и вакуумметра. В процессе эксперимента при неизменном расходе и изменяющемся давлении на входе измерялись избыточное давление на входе в дроссель ($P_{вх}$), величина вакуума в точке на поверхности стенки дросселя и атмосферное давление.

Избыточное давление измерялось с помощью образцовых манометров класса точности 0.4, а вакуум с помощью образцового вакуумметра класса точности 0.25. Для измерения атмосферного давления применялся образцовый барометр.

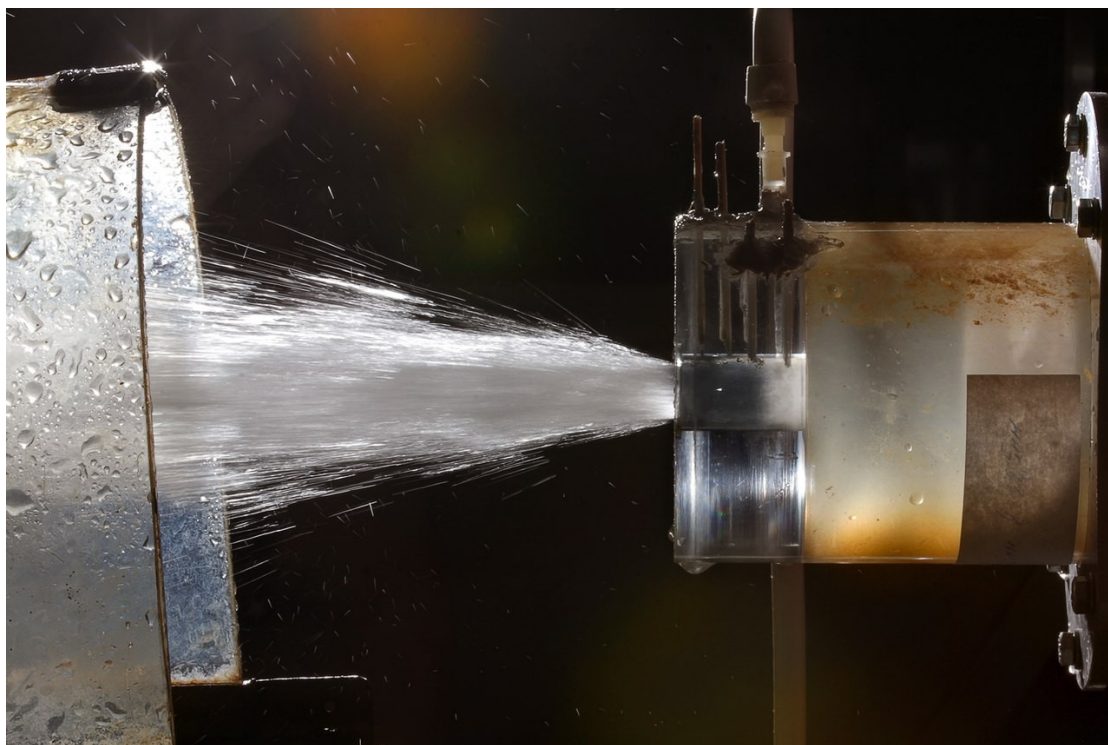


Рис. 2. Истечение жидкости из дросселя в атмосферу

В таблице 1 приведены экспериментальные значения избыточного давления на входе $P_{вх}$, величины вакуума в точке P_1 и коэффициента расхода μ .

Таблица 1

Результаты эксперимента

Порядковый номер опыта	$P_{вх}$, КПа	P_1 , КПа	μ
1	42,3	38,9	0,83
2	52,3	47,4	0,82

3	62,3	55,6	0,83
4	74,3	66,4	0,83
5	90,3	81,4	0,83
6	118,3	97,2	0,81

Для проведения гидродинамического моделирования потока жидкости в программном пакете STAR CCM+ 8.02.009, проходящего через плохо обтекаемое тело, была использована трехмерная модель для расчета в осесимметричной постановке задачи, включающая в себя канал дросселя и воздушное пространство, в которое происходит истечение (рис. 2).

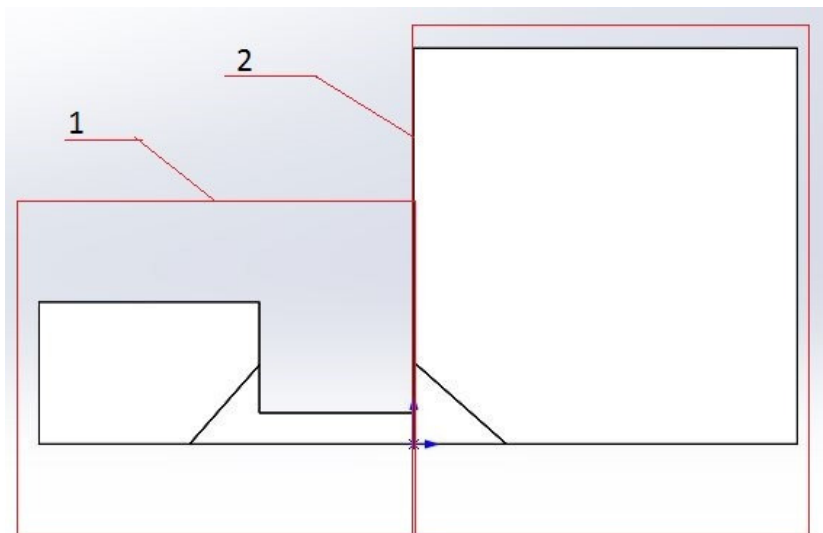


Рис. 3. 3-D модель дроссельного канала (1- дроссельный канал; 2- воздушное пространство)

Метод численного моделирования основан на решении дискретных аналогов базовых уравнений гидродинамики. В случае модели несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$) это:

Уравнение сохранения массы (уравнение неразрывности):

$$\text{div } \mathbf{v} = 0,$$

Уравнение сохранения количества движения (осреднение по Рейнольдсу):

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right].$$

Для проведения численного моделирования использовалась осесимметричная постановка задачи. На исходной 3-D модели дросселя была построена направленная сетка. В осесимметричной постановке задачи 3-D модель преобразуется в 2-D. В пристенном слое суженной части дросселя сетка измельчалась для получения более точного значения давления в точке на стенке канала (рис.3). Для расчета модели в прямой постановке необходимо использовать очень мелкую расчетную сетку, настолько мелкую, что современные вычислительные ресурсы не позволяют разрешить задачу. Поэтому при данном расчете использовались уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу, и дополнительные два дифференциальных уравнения, отвечающие за моделирование турбулентности. В данной задаче использовалась модель k- ω SST модель турбулентности.

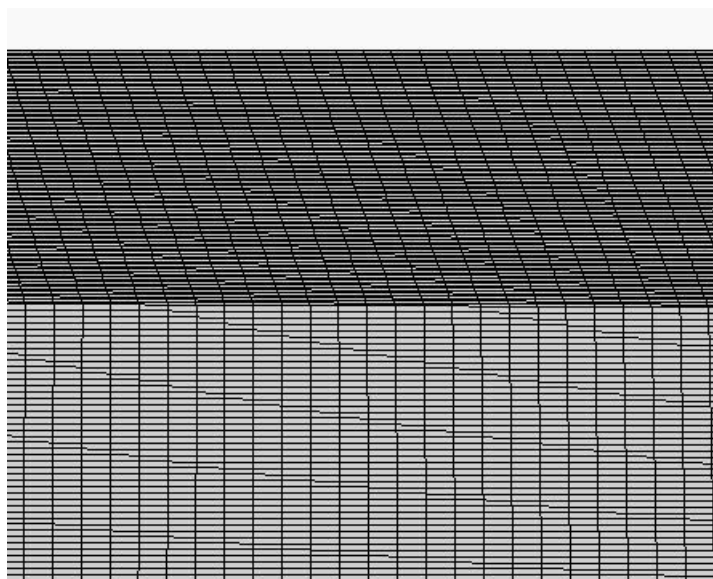


Рис. 4. Расчетная сетка в пристенном слое суженной части дросселя

Поток жидкости, протекающего через дроссельный канал, моделировался в нестационарной постановке. При расчете использовалась многофазная модель потока, учитывающая две фазы: вода и воздух. В программном пакете STAR CCM+ 8.02.009 для этого используется метод VOF(Volume Of Fraction).

В методе VOF многофазная среда рассматривается, как одиночная текучая среда, чьи свойства изменяются согласно объемной доле каждой из присутствующих фаз:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V};$$

Уравнение для массовой концентрации каждой из ф

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla * (\alpha_i \rho_i V) = 0$$

Распределение объемов, полученное при одном из давлений в ходе расчета, приведено на Рис.4 .

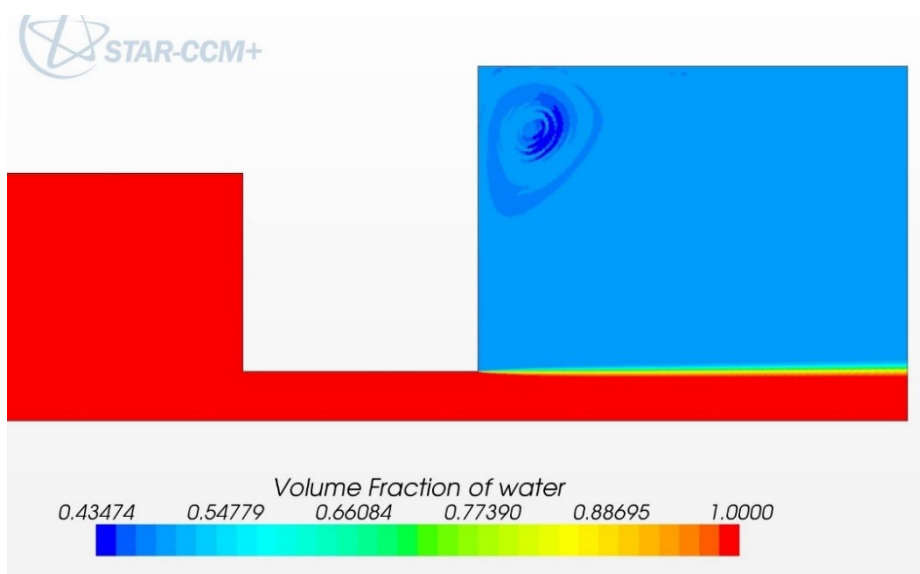


Рис. 5. Распределение объемов

В качестве начальных условий задавалась скорость на входе и давление на выходе дросселя.

Скалярное поле давлений в сечении дроссельного канала представлено на Рис.5 .

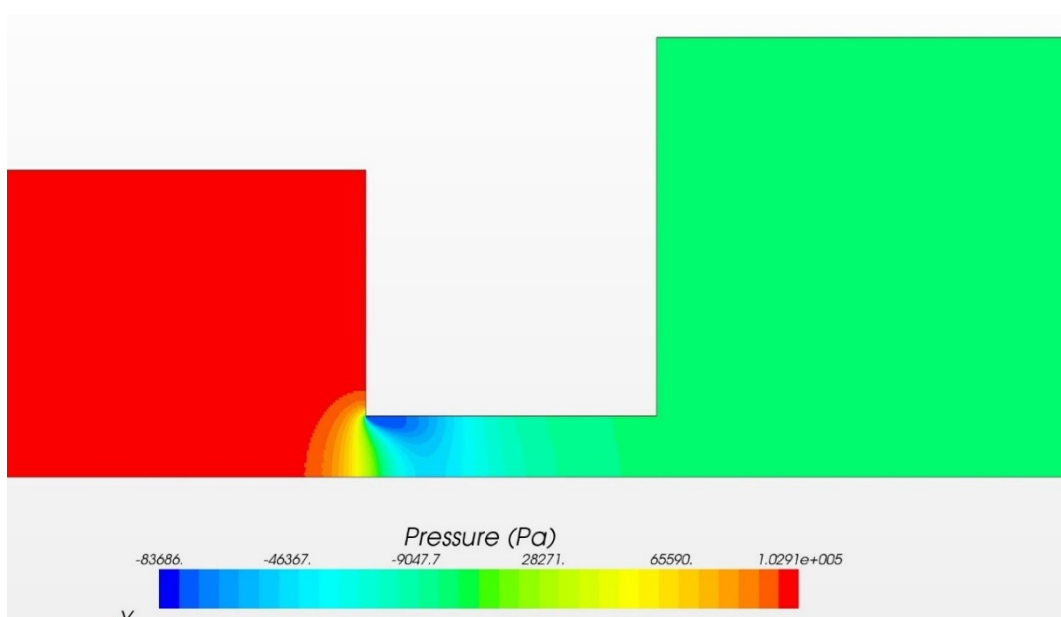


Рис. 6. Поле давлений в сечении дросселя

Результаты расчета (Таблица 2):

Таблица 2

Результаты расчета

Рвх, КПа	Р1, КПа	μ
42,3	34,9	0,79
52,3	42,15	0,79
62,3	52,0	0,79
74,3	61,7	0,78
90,3	75,0	0,78
118,3	91,5	0,78

Сравнение расчетного и измеренного давлений на входе в дроссель (Таблица 3):

Таблица 3

Сравнение расчетного и измеренного давления на входе

Подача Q, л/с	Расчетные значения давления Рвх, КПа	Экспериментальные значения давления Рвхэ, КПа	Погрешность, %
0,86	42,3	47,7	12,7
0,94	52,3	56,7	8,4
1,05	62,3	70,7	13,4
1,14	74,3	84,7	13,9
1,26	90,3	103,7	14,8
1,41	118,3	127,7	7,9

Сравнение расчетных и измеренных значений давлений (Таблица 4):

Таблица 4

Сравнение расчетного и измеренного давлений в точке на стенке канала дросселя

Q, л/с	Расчетные значения давления P, КПа	Экспериментальные значения давления P _{1э} , КПа	Погрешность, %
0,86	38,9	34,9	10,3
0,94	47,4	42,15	11,0
1,05	55,6	52,0	6,5
1,14	66,4	61,7	7,0
1,26	81,4	75,0	7,8
1,41	97,2	91,5	5,8

Сравнение расчетного и измеренного значений коэффициента расхода через дроссель (Таблица 5):

Таблица 5

Сравнение расчетного и измеренного значений коэффициента расхода через дроссель

Подача Q, л/с	Расчетные значения давления μ	Экспериментальные значения давления μ _э	Погрешность, %
0,86	0,83	0,79	4,8
0,94	0,82	0,79	3,6
1,05	0,83	0,79	4,8
1,14	0,83	0,78	6,0
1,26	0,83	0,78	6,0
1,41	0,81	0,78	3,7

Значения расчетных параметров отличаются от экспериментальных данных на величину погрешности. Этому есть две причины:

1. Погрешность численного эксперимента, связанная с дискретизацией исходных непрерывных уравнений гидродинамики и применение моделей турбулентности, которые являются упрощённым представлением реальных

гидродинамических процессов. С этой погрешностью трудно бороться, так как ее уменьшение требует значительного увеличения вычислительных ресурсов и

экономически не обосновано. Более того погрешность носит систематический характер и может быть учтена применением поправочных коэффициентов.

2. Погрешность, связанная с неполным учётом в модели факторов, присутствующих в физическом эксперименте, в частности, таких как кавитация, угол входа жидкости в дроссель, многофазность жидкости.



Рис. 7. Сравнение результатов испытания и расчета по коэффициенту расхода

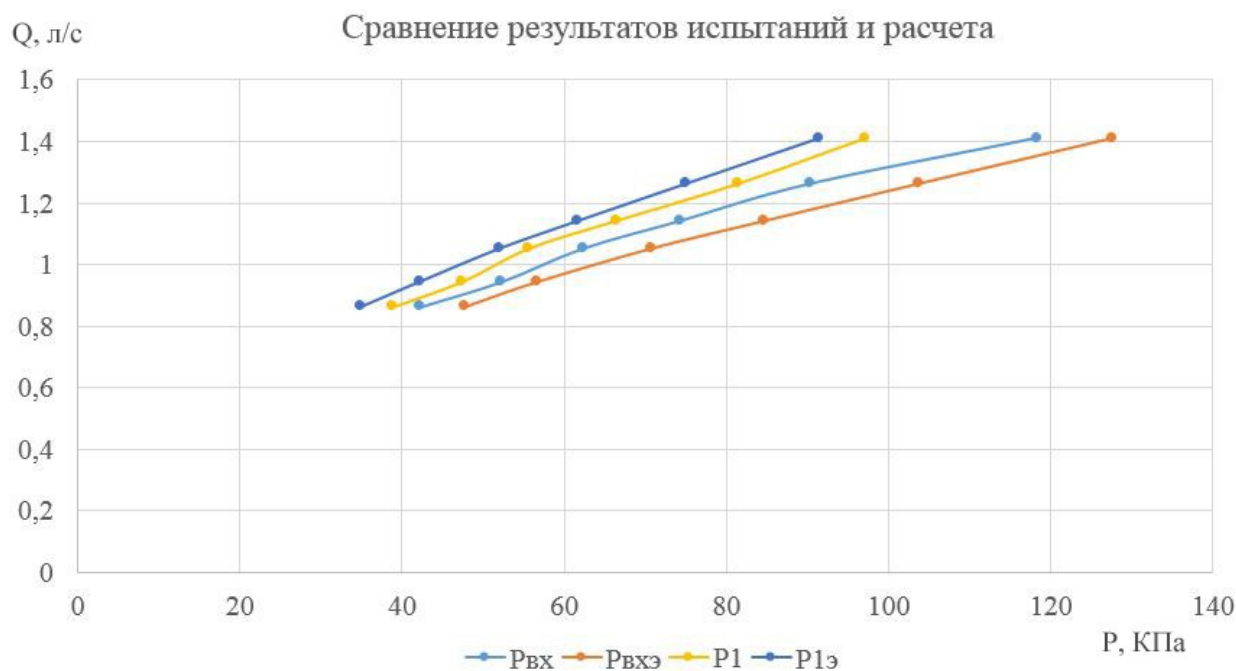


Рис. 7. Сравнение результатов испытания и расчета по давлению
на входе в дроссель и в точке на стенке канала

Из графика видно, что погрешность расчета носит систематический характер и в дальнейшем может быть учтена поправочным коэффициентом. Причины появления данной систематической погрешности могут быть выявлены в ходе дальнейших испытаний и моделирования.

Список литературы

1. С. Патанкар Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости – New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
2. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы – Москва: Машиностроение, 1982.
3. Ломакин В.О., Петров А.И. Численное моделирование проточных частей макетов насосов и верификация результатов моделирования путем сравнения экспериментально полученных величин с расчетными. Наука и Образование, 05/12, DOI: 10.7463/0512.0356070.