Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) Федеральный Университет»

ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ

КАФЕДРА АЭРОГИДРОМЕХАНИКИ

Направление: 010900.68 – механика и математическое моделирование

Специализация: механика жидкости, газа и плазмы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

ТЕМА

Численное моделирование потока воды в ротаметре с помощью CFD-пакета Fluent

Работа завершена:

"___"_____ 2014 г. _____ (Р.Р. Зарипов)

Работа допущена к защите:

Научный руководитель,
кандидат ф.–м. наук

"___"_____ 2014 г. _____ (К.А. Поташев)

Заведующий кафедрой,
доктор ф.–м. наук, профессор

"___"_____ 2014 г. _____ (А.Г.Егоров)

Казань – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ РОТАМЕТРА 4
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ 8
РАСЧЕТНАЯ ОБЛАСТЬ 10
ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ 11
ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ 11
ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕНИЯ 13
РЕЗУЛЬТАТЫ 14
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 27
ЛИТЕРАТУРА 29
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 30
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 34

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении курсовой работы на третьем курсе, посвященной изучению характеристик гидравлического стенда ТМЖ-2, используемого в учебном процессе Института математики и механики им. Н.И. Лобачевского КФУ, и соответствующих измерительных приборов, экспериментально была составлена таблица показаний ротаметров при различных величинах расхода воды. Для ее объяснения с точки зрения гидродинамики в рамках настоящей дипломной работы выполняется численное моделирование потока воды в ротаметре с помощью CFD-пакета Fluent.

ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ РОТАМЕТРА

Ротаметр – прибор для определения объемного расхода газа или жидкости в единицу времени. Ротаметр состоит из конической трубки, расходящейся вверх, внутри которой перемещается поплавок-индикатор. Измеряемый поток жидкости или газа проходит через трубку снизу вверх и поднимает поплавок. Чем выше поплавок, тем больше площадь вокруг него, через которую может течь поток. Поднявшись настолько, что сила тяжести уравновешивает подъёмную силу со стороны потока, поплавок останавливается. Таким образом, каждому положению поплавка соответствует определённый расход — определение этого соответствия называется градуировка (калибровка).

Достоинством ротаметров является простота устройства и легкость в эксплуатации, наглядность показаний, надежность в работе, удобство применения для измерения расходов различных жидкостей, значительный диапазон измерения и достаточно равномерная шкала. Но так же присутствуют и недостатки, основным из которых является свойство хрупкости, так же непригодности для измерения расхода веществ, имеющих значительные давления и непригодность для измерения больших расходов[1].

На рис. 1 представлена конструкция ротаметра [2]. В патрубках 1, 8, соединенных друг с другом болтовыми стержнями 5, с помощью накидных гаек 6 и сальниковых уплотнений закреплена коническая стеклянная трубка 3. Для ограничения хода поплавка 4 служат верхние и нижние упоры 2 и 7 соответственно.

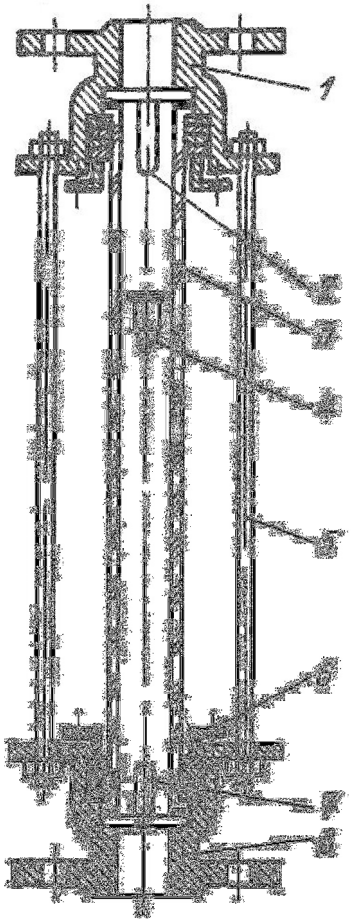


Рис 1. Конструкция ротаметра [2].

В меньшей степени влияние вязкости сказывается при катушечной форме поплавка (Рис. 2, в), которая находит теперь основное применение. Еще сильнее влияние вязкости устраняется при дисковой тарельчатой форме поплавков, когда основное трение потока происходит на очень небольшой боковой поверхности диска. Но такие поплавки неустойчивы и во избежание перекоса и трения о стенку трубки их необходимо снабжать направляющими. Последние могут быть трех видов: направляющие, связанные с поплавком и перемещающиеся вместе с ним (Рис. 2, г); неподвижные центральные штоки, проходящие через осевые отверстия поплавков (Рис. 2, д); направляющие кольца, укрепляемые обычно в верхней или нижней части поплавков (Рис. 2, е, ж).

Формы поплавка бывают весьма разнообразны. Классическая его форма показана на Рис. 2, а. Поплавок имеет конусную нижнюю часть (иногда с несколько скругленным носом), цилиндрическую среднюю часть и дисковый верх. Существенный недостаток рассмотренной формы поплавка – сильная зависимость градуировочной характеристики от вязкости измеряемого вещества. Для снижения этой зависимости полезно уменьшать высоту верхней дисковой части поплавка и диаметр цилиндрической его части с тем, чтобы он был не более 0.6-0.7 от диаметра верхнего диска (Рис. 2, б).

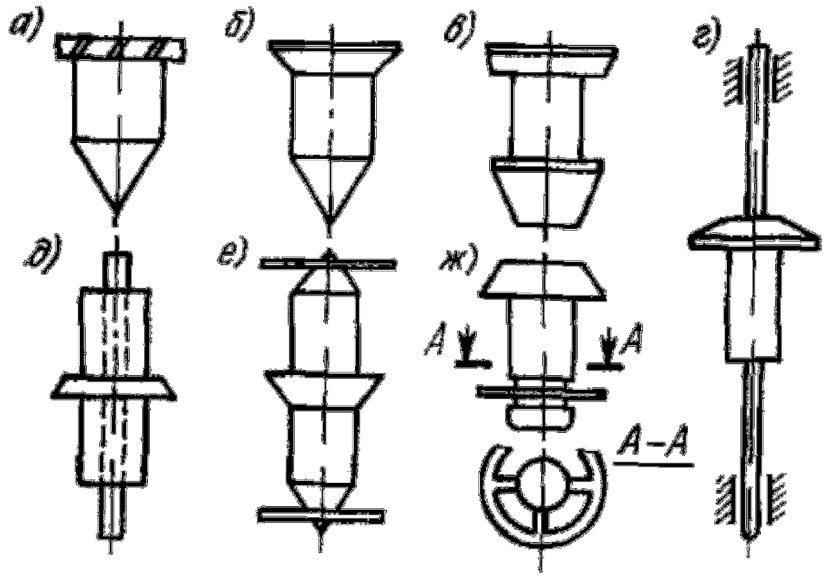


Рис 2. Формы поплавков [2]

На Рис. 3 представлена фотография поплавка, исследуемого в настоящей работе.

Рис 3. Вид исследуемого поплавка ротаметра

Путем обычного эксперимента была произведена тарировка ротаметров гидравлического стенда (табл. 1).

Таблица 1. Таблица расходов по ротаметрам стенда ТМЖ-2М (измерения проведены при температуре 20 ºС [3]

	Ротаметр 1	Ротаметр 2
Максимальный расход	1.877, $м^3/ч$	2.905, $м^3/ч$
Отметка ротаметра	Расход воды, $м^3/ч$	
10	**0.272** ± 0.04	**0.399** ± 0.003
20	**0.425** ± 0.001	**0.657** ± 0.016
30	**0.587** ± 0.002	**0.890** ± 0.016
40	**0.751** ± 0.009	**1.136** ± 0.006
50	**0.921** ± 0.003	**1.409** ± 0.025
60	**1.008** ± 0.010	**1.640** ± 0.027
70	**1.273** ± 0.008	**1.939** ± 0.039
80	**1.475** ± 0.021	**2.221** ± 0.023
90	**1.649** ± 0.005	**2.520** ± 0.024
100	**1.858** ± 0.019	**2.847** ± 0.058

По результатам данной таблицы был построен график зависимости расхода от метки M ротаметра, который представлен на Рис 4 [4].

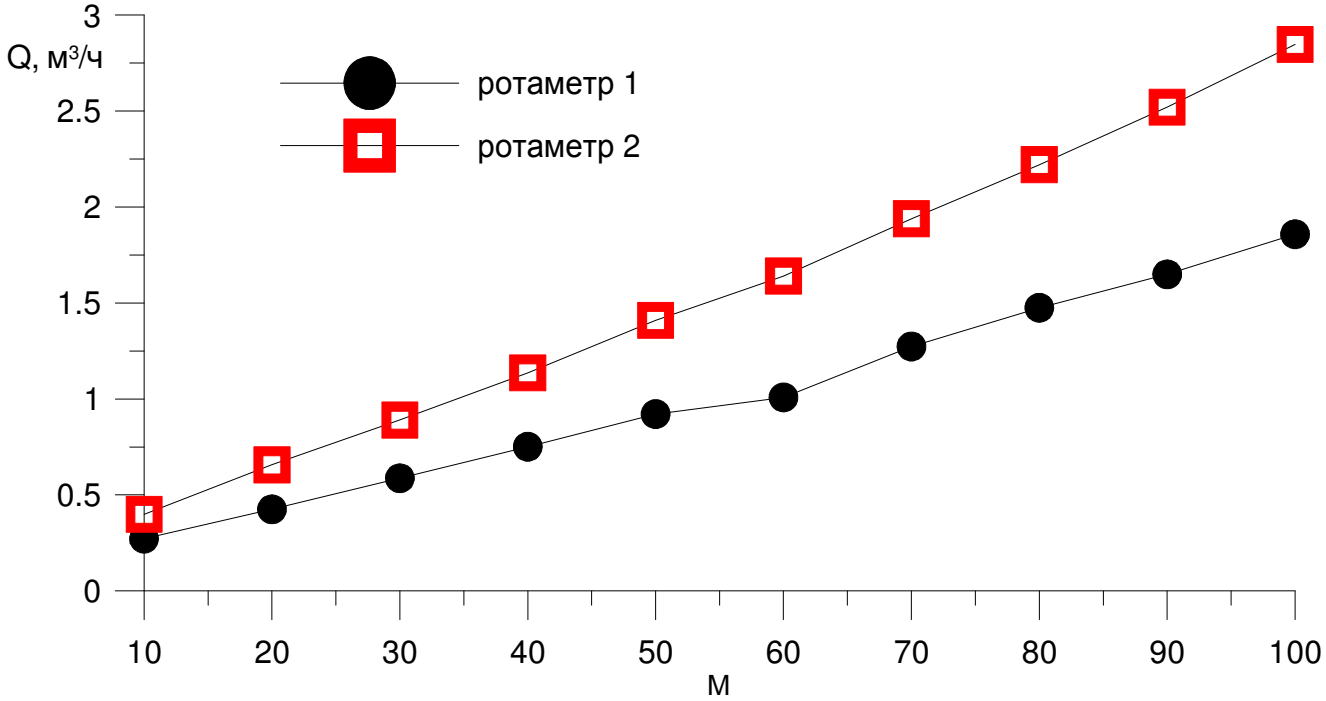


Рис 4. График зависимости расхода от показаний ротаметров

При детальном рассмотрении можно заметить, что единой линейной зависимости для каждого из ротаметров нет. Кроме того, вблизи отметки 60 наблюдается некий излом обеих кривых. Попробуем объяснить данное поведение

на основе анализа структуры потока. Для этого выполним численное моделирование течения воды в ротаметре с помощью CFD-пакета Fluent.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Зная геометрию канала ротаметра и его поплавка, а также массу поплавка, необходимо определить равновесное положение поплавка при различных значениях объемного расхода воды.

Ротаметр состоит из измерительного конуса и поплавка, которые представлены на Рис. 5.

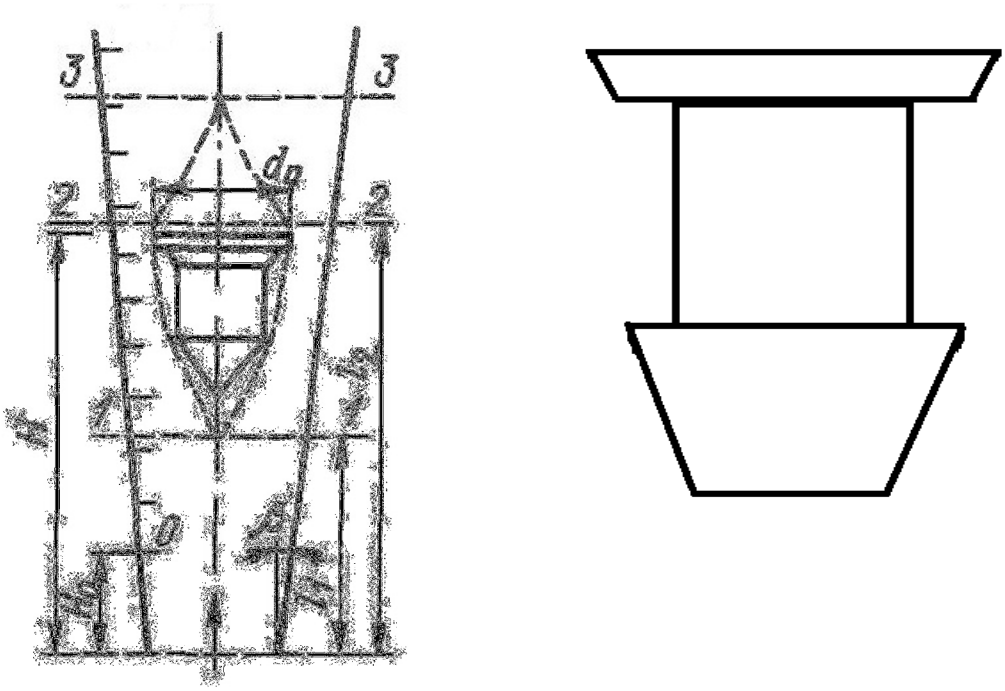


Рис 5. Схема ротаметра

В ротаметре (Рис. 5) можно выделить три сечения 1-1, где начинает сказываться возмущающее действие поплавка на поток; 2-2 – узкое кольцевое сечение потока, где достигается максимальная скорость; 3-3, в котором кончается возмущающее действие поплавка на поток. Стандартное описание принципа действия ротаметра следующее. На поплавок действует три силы:

1) **разность статических давлений** на носовую и кормовую поверхность поплавка, возникающая вследствие перехода части потенциальной энергии в кинетическую в узком сечении 2-2; эта разность равна $(p_1 - p_2)f$, где f - площадь наибольшего поперечного сечения поплавка;

2) **динамическое давление** W потока, определяемое по формуле

$$W = c\rho v^2 f / 2,$$

где c - коэффициент сопротивления поплавка; ρ и v - плотность и характерная скорость потока соответственно;

3) **сила трения** N потока о поверхность f_σ поплавка.

Сумма этих трех сил уравновешивается весом G поплавка

$$G = V_n \rho_n g = m_n g,$$

где V_n, ρ_n и m_n - объем, плотность и масса поплавка соответственно.

Из уравнения равновесия справедлива следующая формула

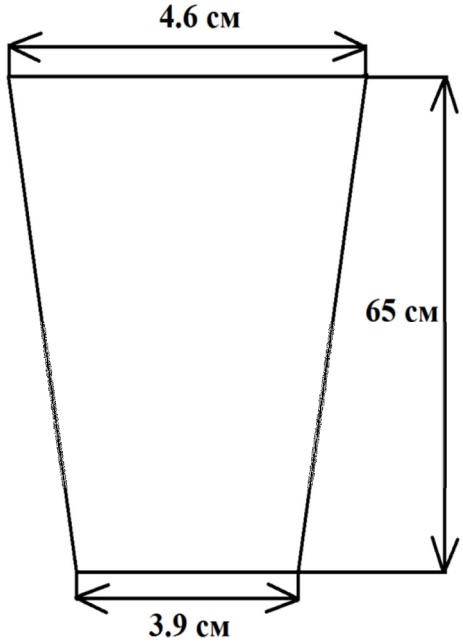
$$p_1 - p_2 = (G - W - N) / f.$$

Если пренебречь силами W и N, то получим

$$p_1 - p_2 = G / f = const.$$

Это стало основанием считать ротаметр расходомером постоянного перепада давления. Но это постоянство лишь приближенное, потому что с увеличением расхода возрастают как динамическое давление, так и сила трения. Следовательно, с увеличением расхода перепад давления на поплавке должен уменьшаться, хотя общий перепад на ротаметре с учетом потери в штуцерах при этом и возрастает.[2]

Ниже на Рис. 6 и Рис. 7 приведены размеры конической трубки и поплавка



.

Рис 6 Схема трубки ротаметра

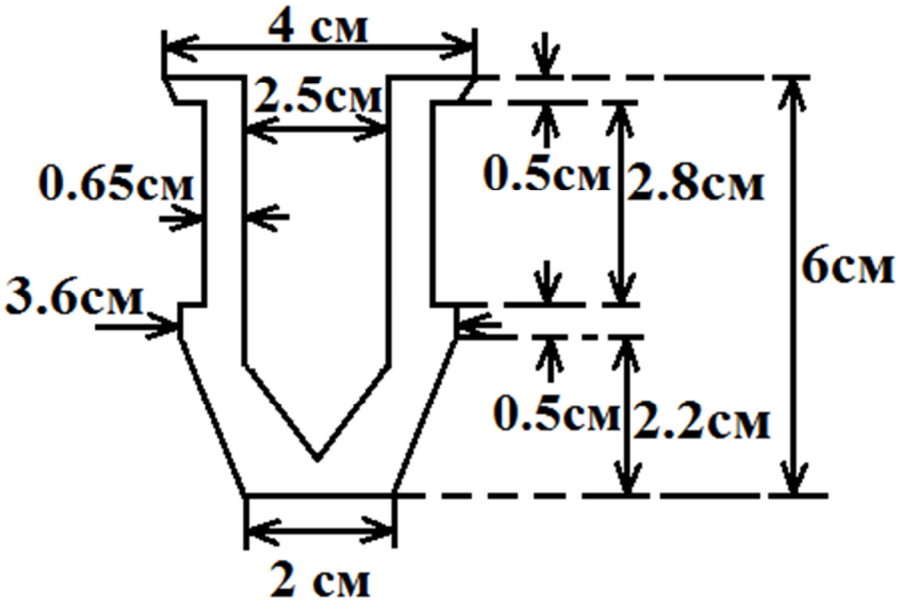


Рис 7. Схема поплавка ротаметра

Масса поплавка составляет 112 г. Его объем (согласно измеренной геометрии) – 14.2 куб.см. При таких величинах расчетная плотность материала поплавка составляет 7.88 г/куб.см, что вполне согласуется с величинами плотности для стали [5].

РАСЧЕТНАЯ ОБЛАСТЬ

Пренебрегая радиальным перемещением поплавка и учитывая наличие единой оси симметрии для канала и поплавка ротаметра, будем считать задачу осесимметричной, решение которой строится в плоскости (r, z) (Рис. 8). Геометрия расчетной области приведена на Рис. 8.

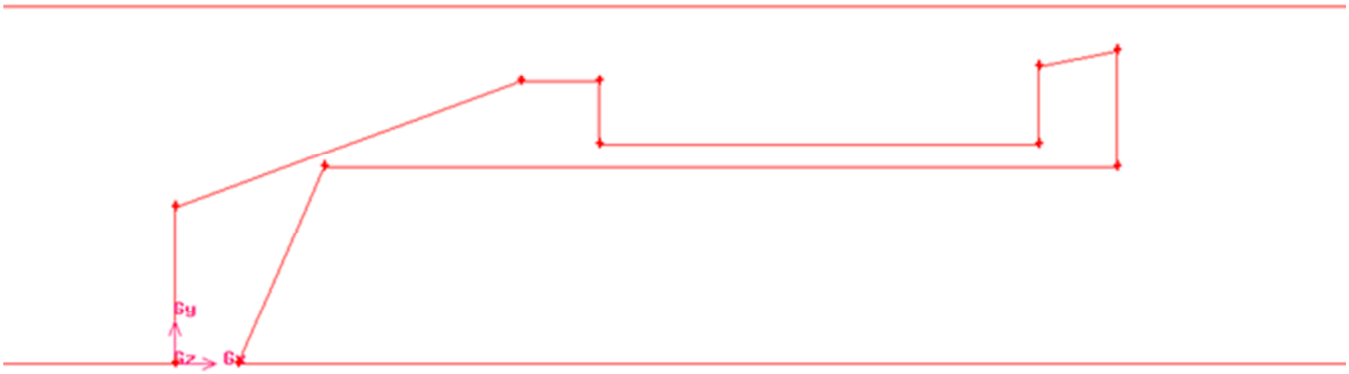


Рис 8. Геометрия поплавка в канале ротаметра

Рассмотрим коническую трубку ротаметра. Зная нижний и верхний диаметры этой трубки и ее длину, можно подсчитать ее конусность. Конусность — отношение диаметра окружности основания конуса к его высоте для полных конусов или отношение разности двух торцевых поперечных сечений конуса к

расстоянию между ними для усеченных конусов. Конусность C с верхним d_1 и нижним d_2 диаметрами и длиной L усеченного конуса равна

$$C = \frac{d_1 - d_2}{L}.$$

Либо можно подсчитать угол вершины конуса α по следующей формуле

$$\alpha = arctg(\frac{d_1 - d_2}{2L}).$$

Из значений $d_1 = 4.6см$, $d_2 = 3.9см$ и $L = 65см$. Находим, что $C = 0.0108$, $\alpha \approx 0.31°$.

В силу малости угла раствора при численных расчетах будем им пренебрегать, моделируя течение в каналах постоянного радиуса вокруг поплавка с истинной геометрией.

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Как показано на Рис. 9 слева при входе задавалось условие «velocity inlet» - это означает, что на входе задавалась скорость потока. На верхней границе области (стенке трубки ротаметра) и на поверхности поплавка задавалось условие «wall» – условие прилипания на непроницаемой поверхности. На нижней границе области задавалось условие «axis» – ось симметрии. На правой границе задавалось условие «outflow» – условие вытекания жидкости.

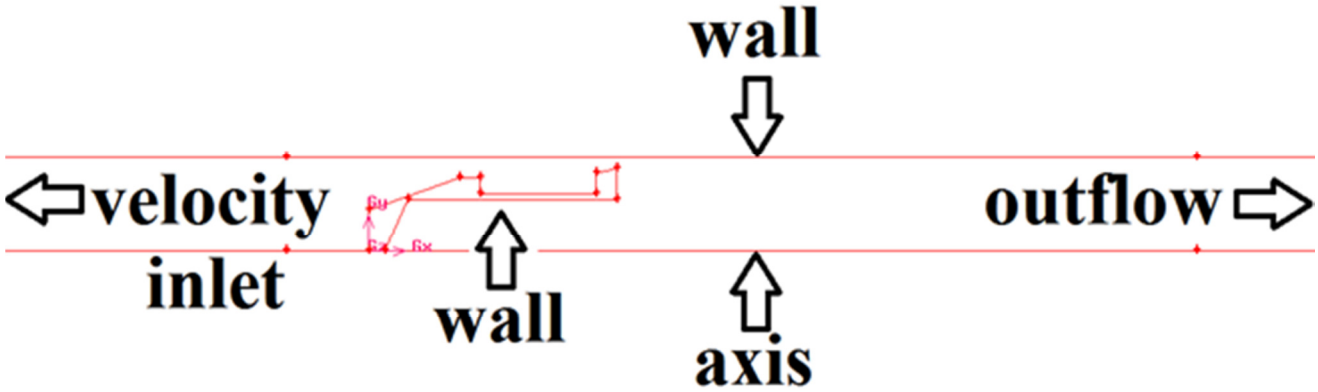


Рис 9. Граничные условия

ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ

Построение расчетной сетке в пакете Gambit представлен в приложении 2.

При построении расчетной сетки рассматривалось три участка: $L_1 - L_2$, $L_3 - L_4$ и $L_5 - L_6$ так как показано на Рис. 10.

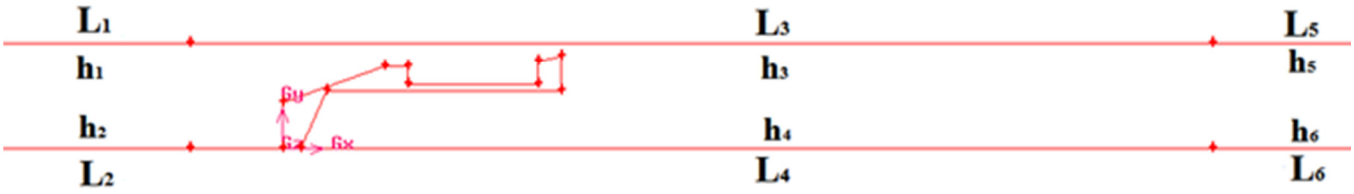


Рис 10 Различные участки дискретизации расчетной области

Шаг расчетной сетки изменялся на различных участках границы расчетной области (рис. 11).

Обозначим на участке L_i шаг сетки h_i. А границу поплавка разобьем с шагом сетки h.

При этом соотношения шагов зададим следующим образом $h_1 = h_5 = 2h$, $h_2 = h_6 = 4h$, $h_3 = h$, $h_4 = 2h$.

При анализе сходимости решения по шагу сетки расчеты проводились для следующих значений h – 0.004, 0,002 0.001, 0.0005. Примеры соответствующих сеток представлены на Рис. 11 и Рис. 12.

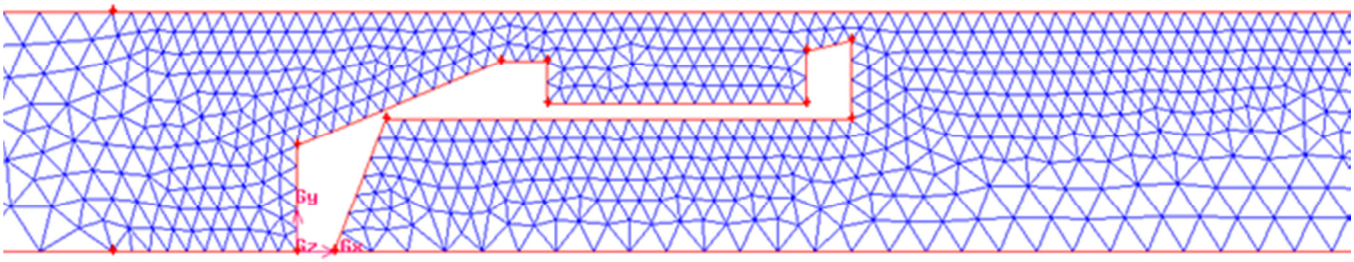


Рис 11. Фрагмент расчетной сетки с шагом $h = 0.002$.

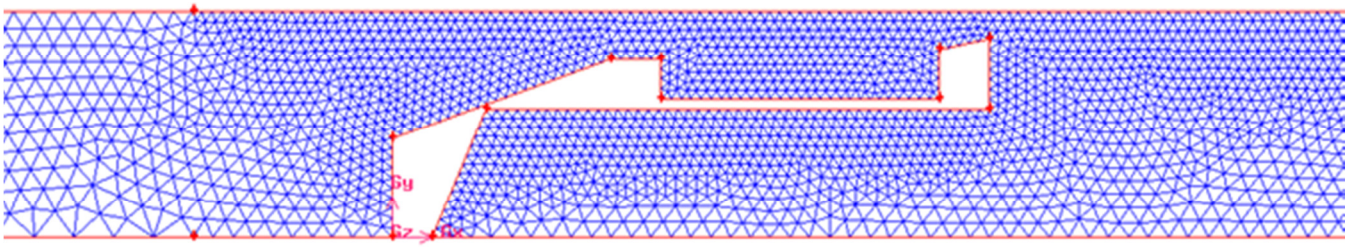


Рис 12. Фрагмент расчетной сетки с шагом $h = 0.001$.

На рис. 13 показана сходимость решения при измельчении шага h расчетной сетки. В качестве параметра анализа использовалось среднеквадратическое отклонение R2 от 1/h для действующей силы на поплавок.

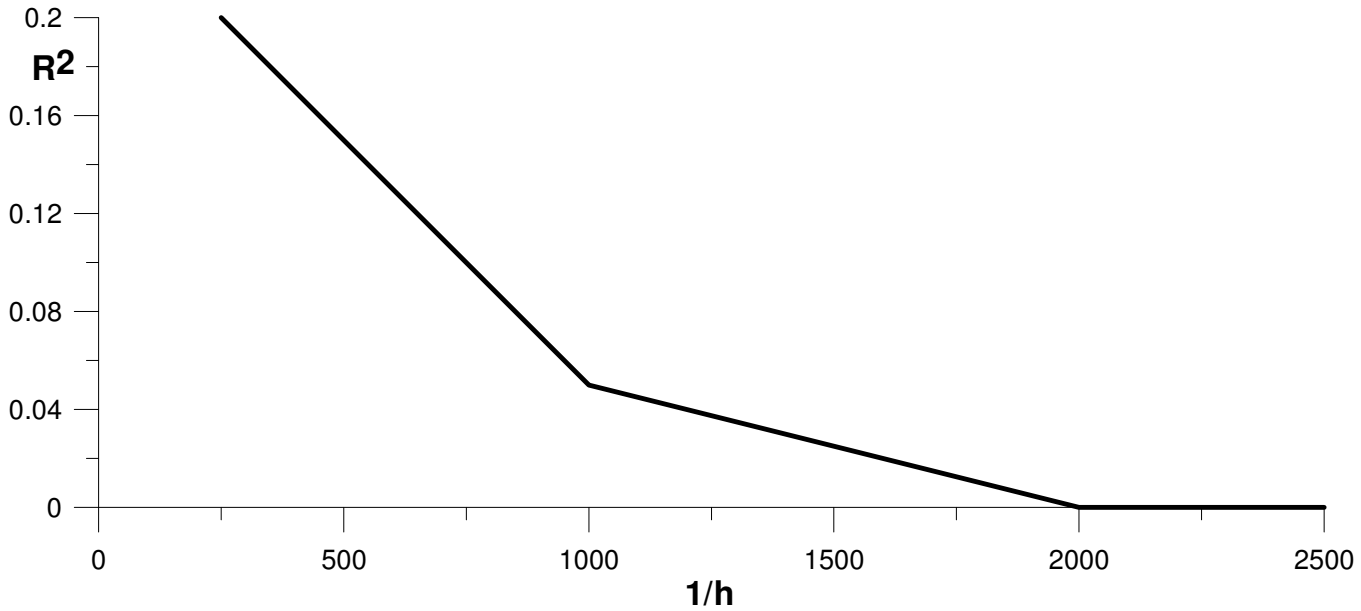


Рис 13 Сходимость решения при измельчении шага сетки

Из Рис. 13 видно, что расчеты можно проводить на сетке, построенной с шагом h=0.0005.

ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕНИЯ

Перечень всех параметров, использованных при численном моделировании в пакете FLUENT, приведен в приложении 1.

Расчеты выполнялись по следующей схеме. Для каждого значения расхода моделировалось осесимметричное обтекание поплавка ротаметра в каналах различных радиусов. Далее отыскивался тот радиус канала, который обеспечивает подъемную силу, равную весу поплавка[6]

$$P = m_n g = 112\text{гр} \bullet 9.81 \, {}^{м}\!/_{c^2} = 1.09 H \, .$$

Таким образом, определялось положение поплавка в конической трубке ротаметра при заданном расходе воды.

Расчеты в CFD-пакете Fluent проводились с использованием трёх моделей:

1. модель ламинарного течения,
2. модель Spalart-Allmaras,
3. модель Reynolds Stress.

При выборе ламинарной модели решаются нестационарные уравнения Навье-Стокса усредненные по Рейнольдсу, но полагается, что турбулентная вязкость равна нулю. Это подходит для ламинарных потоков, однако можно считать и турбулентные – там, где турбулентной вязкостью можно пренебречь. Можно использовать для расчета начального приближения или в том случае, когда расчет по другой модели неустойчив.

В модели Spalart-Allmaras (одной из наиболее простых моделей турбулентности) решается одно дополнительное уравнение переноса коэффициента турбулентной вязкости.

Что касается модели Reynolds Stress (одной из наиболее сложных моделей, использующих осредненные уравнения Рейнольдса) - это стандартная модель напряжений Рейнольдса. В данной модели решаются 6 уравнений для напряжений Рейнольдса и уравнения для ε для замыкания [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Используя расчетные данные, построим график зависимости силы, действующей на поплавок, от расхода для всех δ_i. Там же отметим линию веса поплавка и пересечение ее с линиями для каждой δ_i. На Рис. 14 представлена ламинарная модель (Lam), на Рис. 15. представлена модель Spalart-Allmaras (S-A) и на Рис. 16 представлена модель Reynolds Stress (R-S).

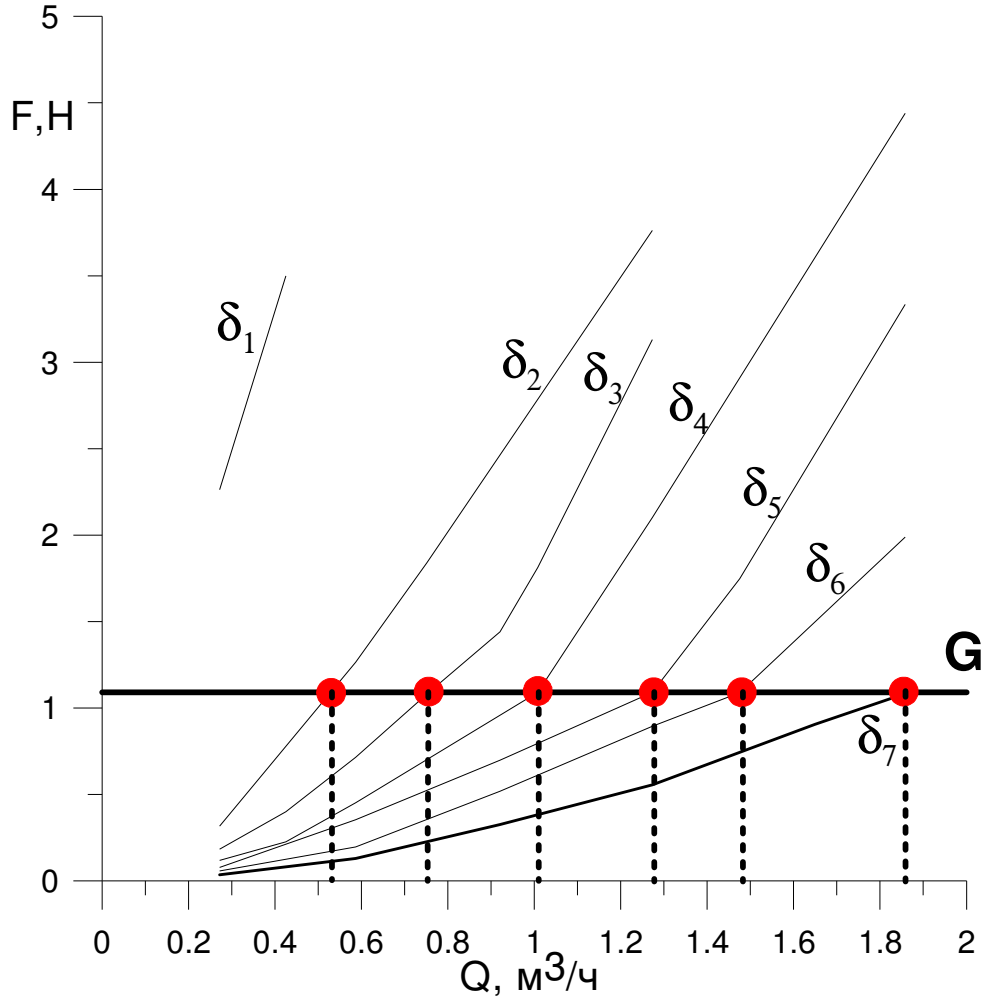


Рис 14. График зависимости подъемной силы от расхода(Lam).

Здесь δ_i изменяются в диапазоне от R_1 до R_2. $\delta_1 = 2.04$ см, $\delta_2 = 2.09$ см, $\delta_3 = 2.13$ см, $\delta_4 = 2.16$ см, $\delta_5 = 2.18$ см, $\delta_6 = 2.2$ см, $\delta_7 = 2.8$ см.d

Для δ_2 будет соответствовать расход 0.52 $м^3/ч$, для δ_3 - 0.75 $м^3/ч$, δ_4 - 1 $м^3/ч$, δ_5 - 1.27 $м^3/ч$, δ_6 - 1.47 $м^3/ч$, δ_7 - 1.86 $м^3/ч$.

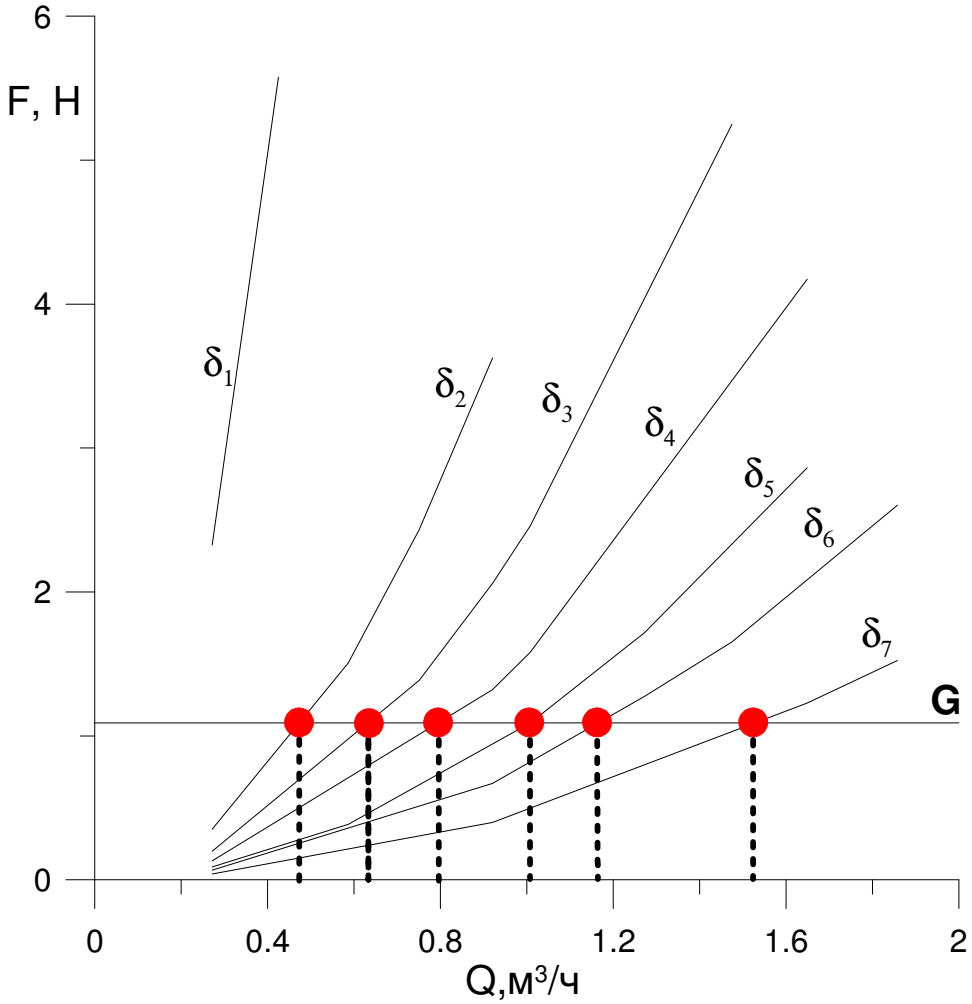


Рис 15. График зависимости подъемной силы от расхода (S-A).

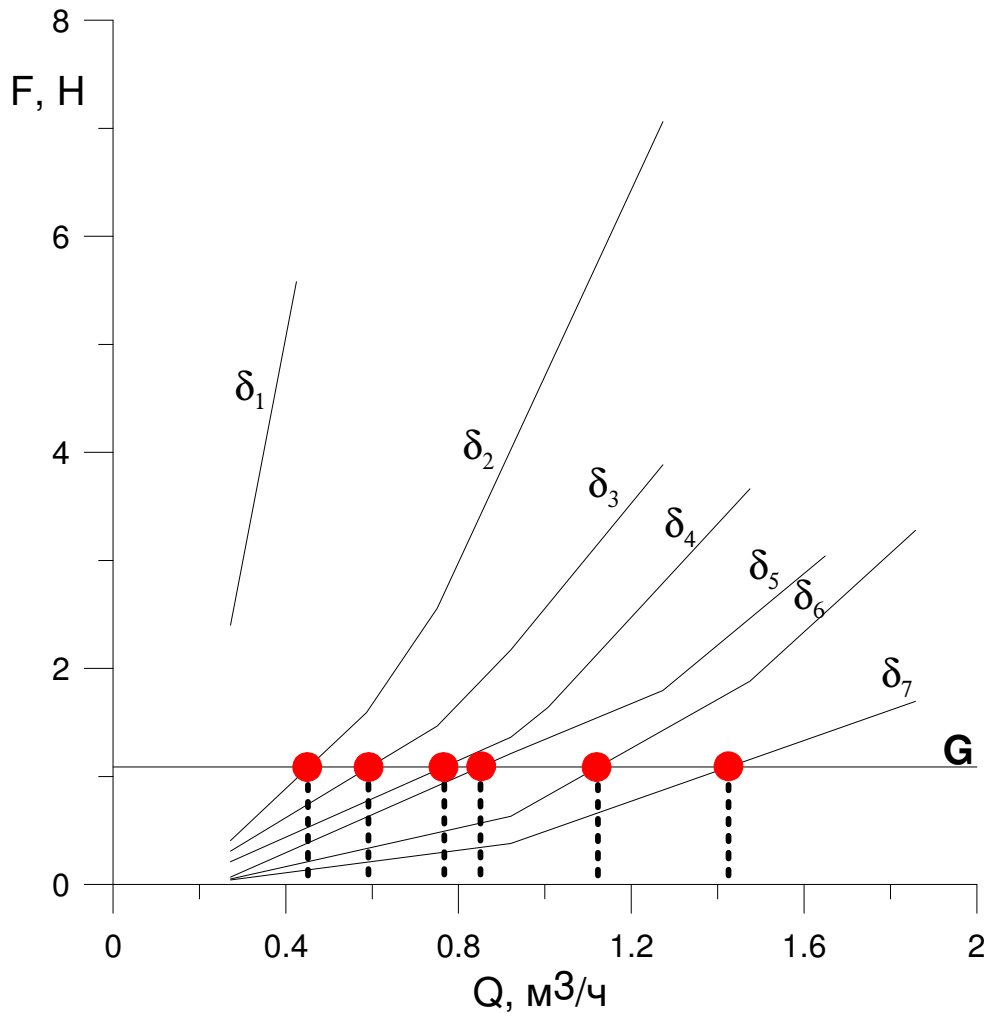


Рис 16. График зависимости подъемной силы от расхода (R-S).

В таблице 4 приведены данные, полученные с помощью расчета в пакете программы Fluent, и экспериментальные данные.

Таблица 2

Метка ротаметра	Расход, $м^3/ч$			
	Fluent			эксперимент
	Lam	A-S	R-S	
10				0.272
20				0.425
30				0.587
40	0.52	0.48	0.45	0.751
50	0.75	0.68	0.6	0.921
60	1	0.8	0.78	1.008
70	1.27	1.01	0.85	1.273
80	1.47	1.16	1.12	1.475
90	1.66	1.34	1.27	1.649
100	1.86	1.52	1.42	1.858

На рис. 17 приведено сопоставление расчетных значений и полученных лабораторным путем. Для меток 10-30 соответствует большая подъемная сила нежели фактическая, поэтому используя все значения расходов табл. 1 не удалось построить график зависимости сил действующих на поплавок от расходов.

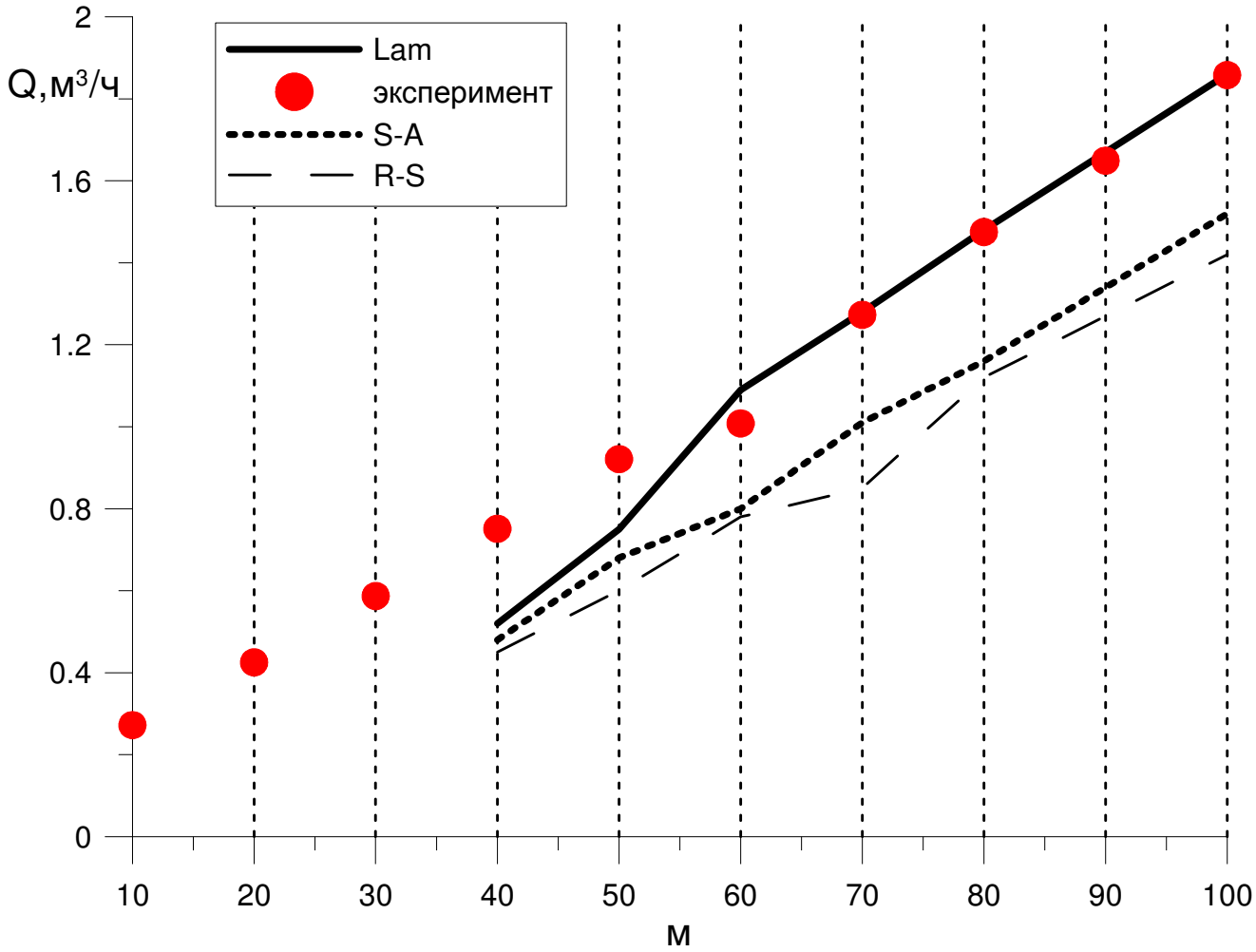


Рис 17. Шкала расхода по меткам ротаметра

Из Рис. 14-17 видно, что все три модели при малых расходах одинаково завышают подъемную силу, поэтому расходам соответствуют большие метки ротаметра по сравнению с фактическими, а начиная отметки ротаметра 60 ситуация меняется для ламинарной модели. Расчетные данные, полученные этой моделью, практически совпадают с экспериментом. А обе модели турбулентности S-A и R-S не меняют своего качества поведения. Для них также получается завышение расхода.

Рассмотрим далее, как выглядит структура потока. Для этого приведены линии тока, вдоль которых цветом указан модуль скорости.

На Рис. 18-20 представлены линии тока для трех моделей (метки ротаметра 50).

Рис 18. Lam. M 50.

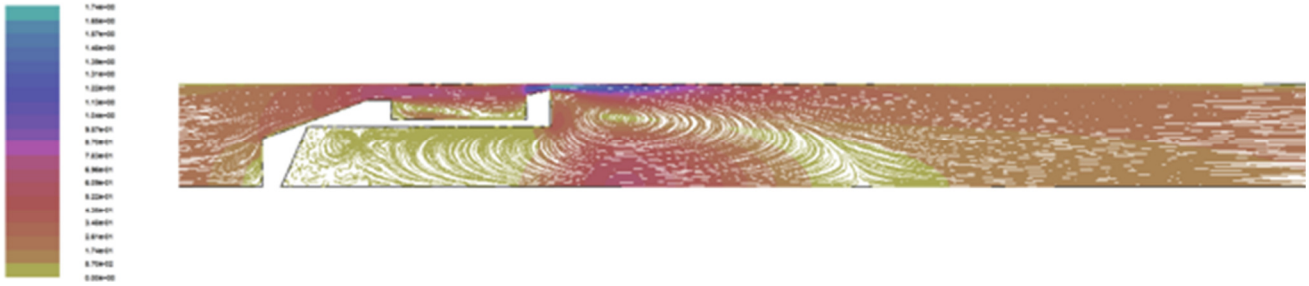


Рис 19. S-A. M 50.

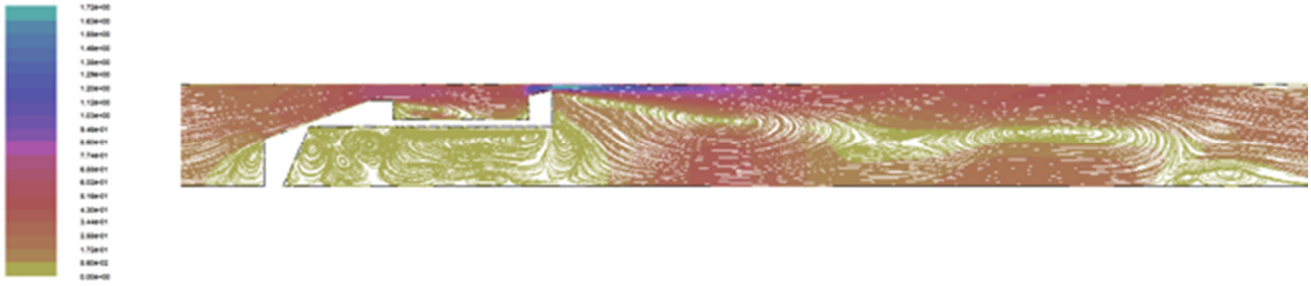


Рис 20. R-S. M 50.

На Рис. 21-23 представлены линии тока вблизи поплавка для трех различных моделей (метки ротаметра 50).

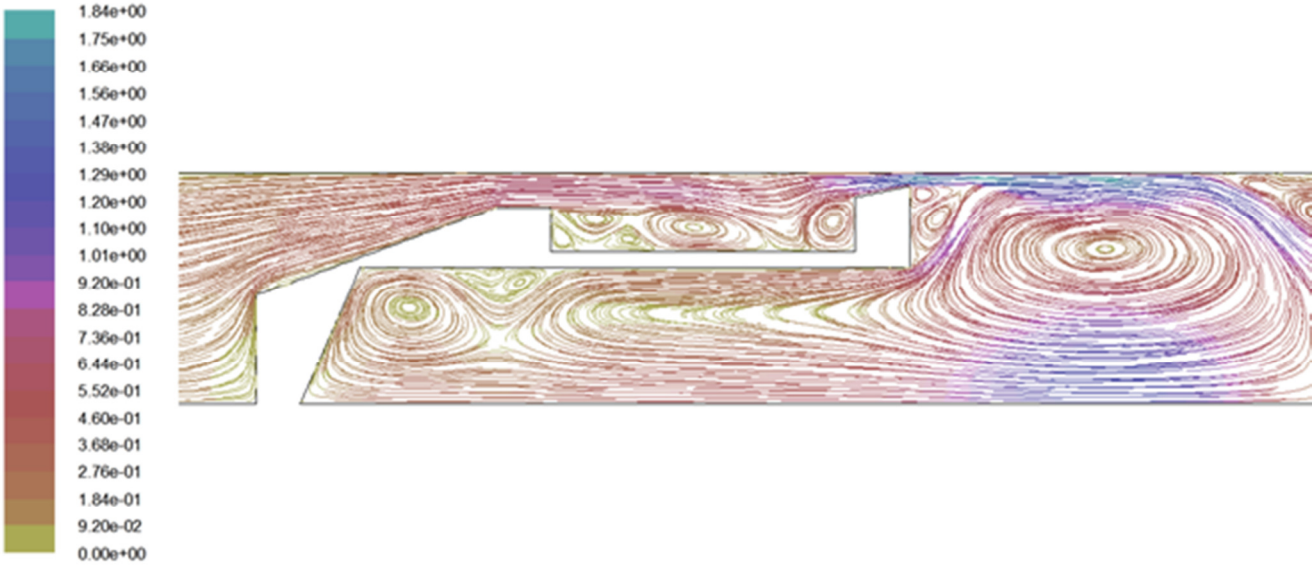


Рис 21. Lam. M 50.

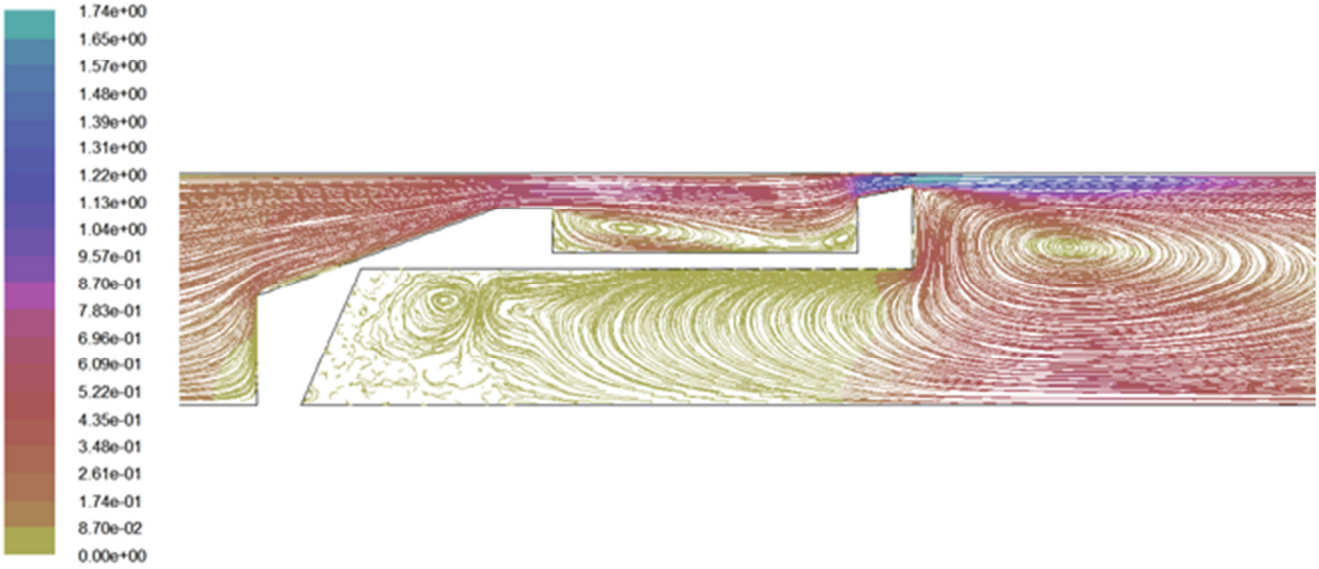


Рис 22. S-A.50

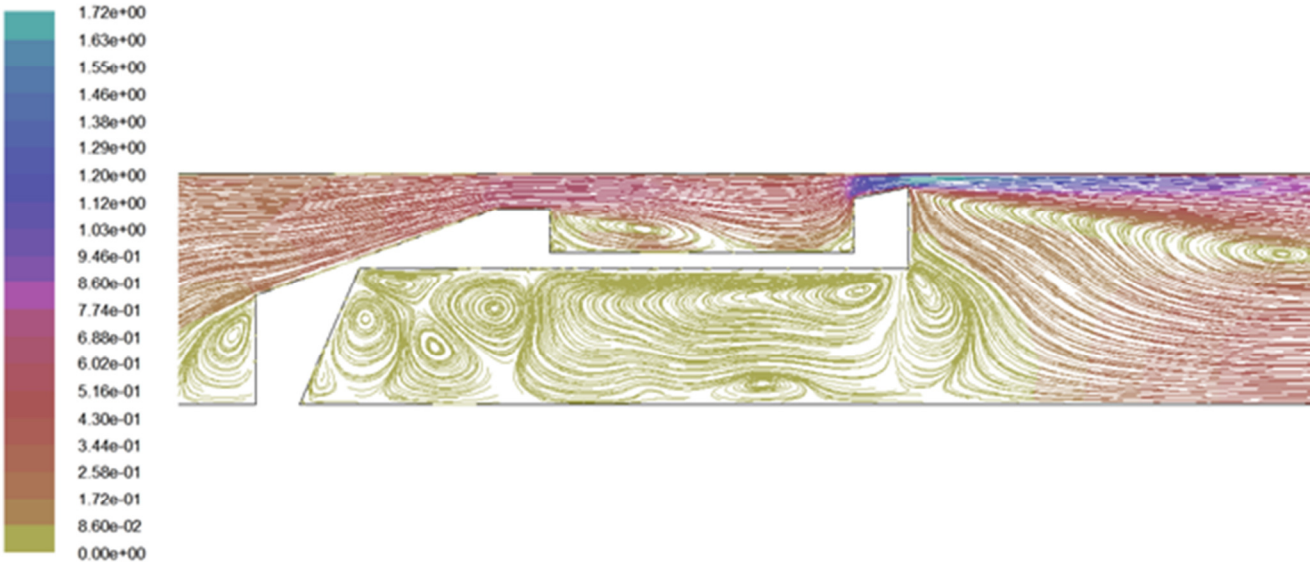


Рис 23. R-S. M 50.

На Рис. 24-26 представлены линии тока для трех моделей (M=60).

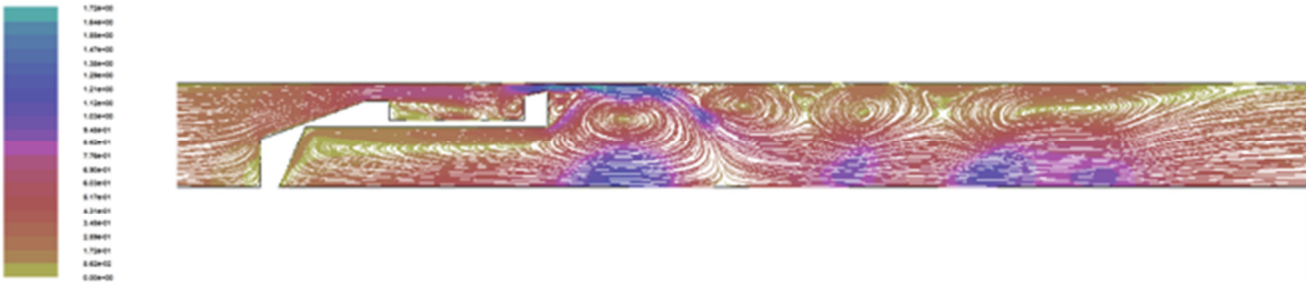


Рис 24. Lam. M 60.

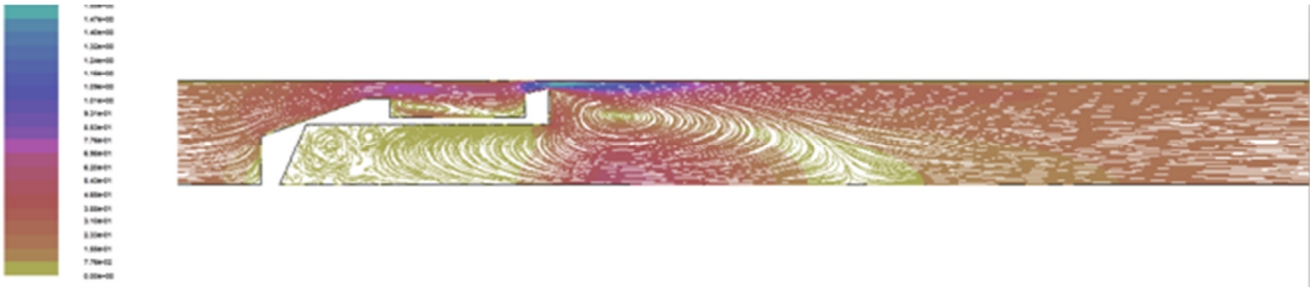


Рис 25. S-A. M 60.

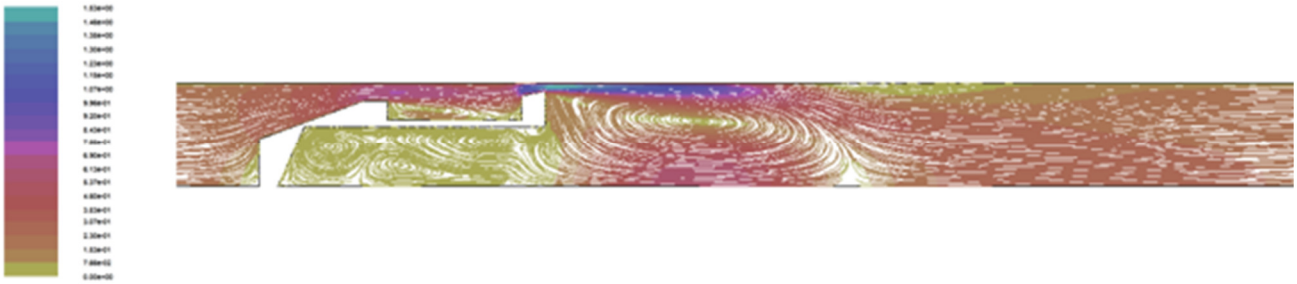


Рис 26. R-S. M 60.

На Рис. 27-29 представлены линии тока вблизи поплавка для трех различных моделей (метки ротаметра 60).

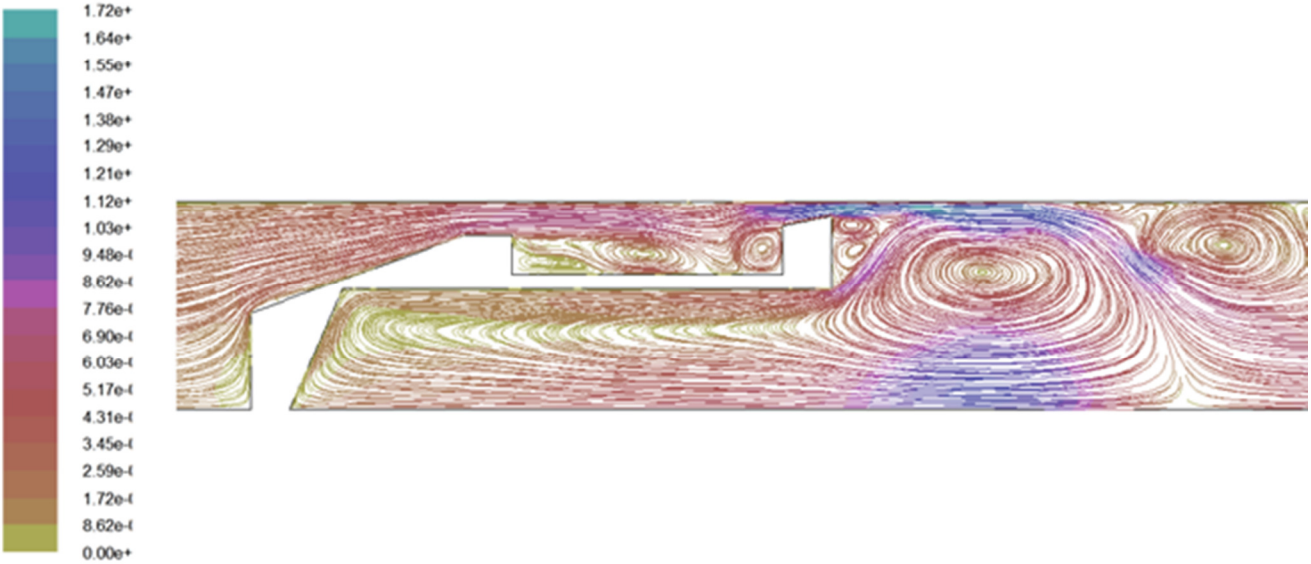


Рис 27. Lam. M 60.

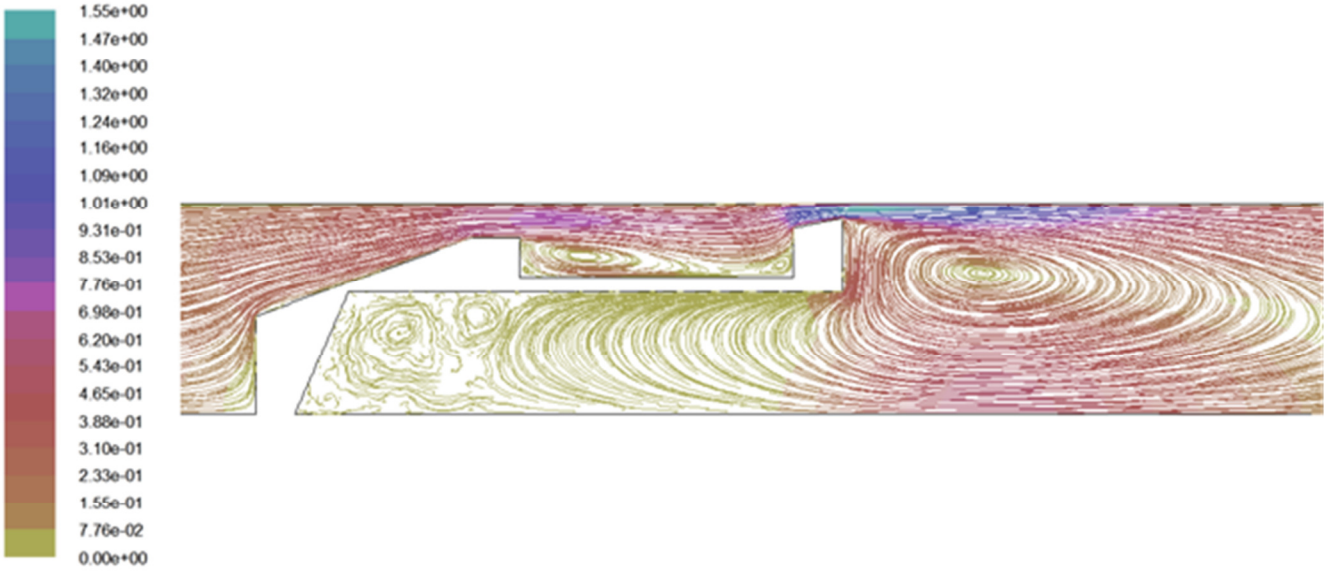


Рис 28. S-A. M 60.

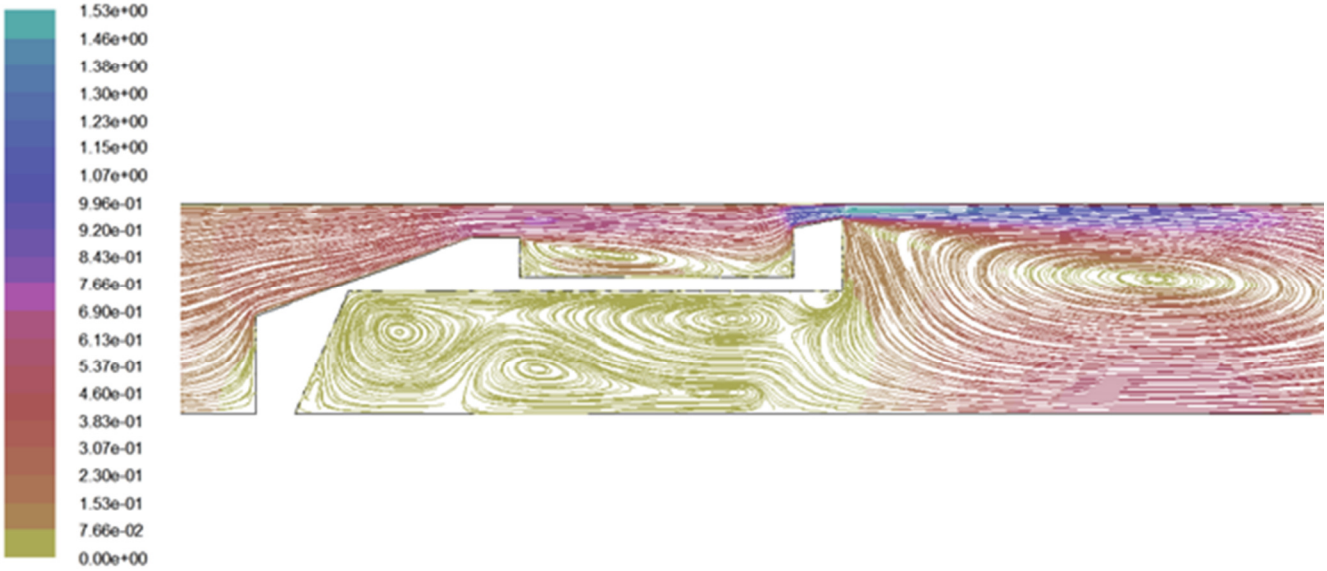


Рис 29. R-S. M 60.

На Рис. 30-32 представлены линии тока для трех моделей (метки ротаметра 70).

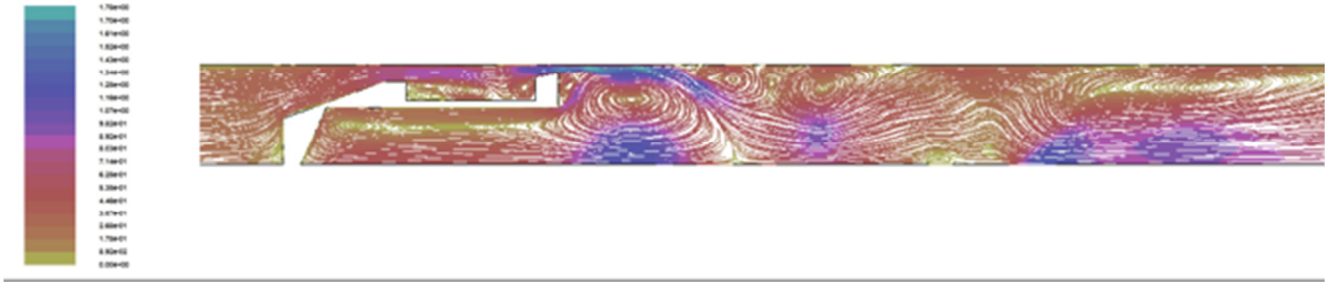


Рис 30. Lam. M 70.

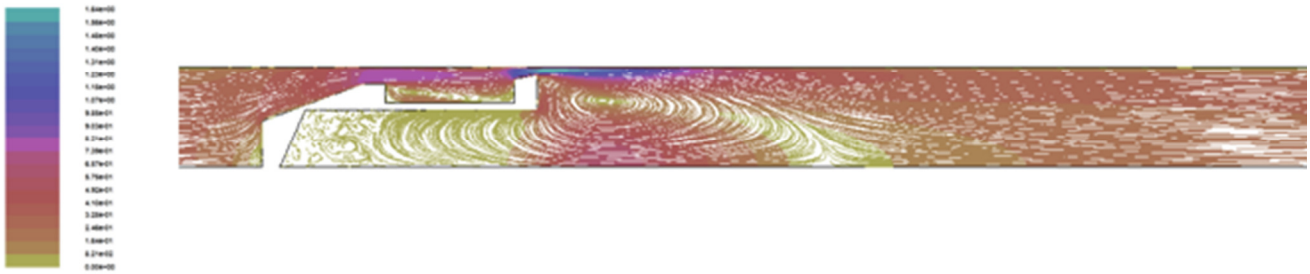


Рис 31. S-A. M 70.

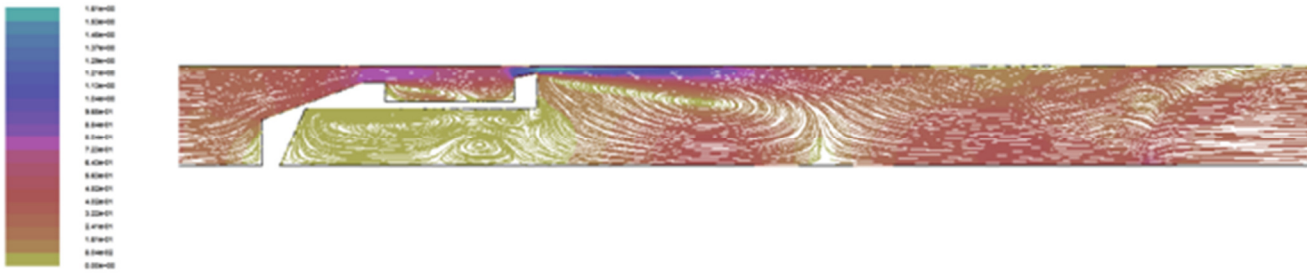


Рис 32. R-S. M 70.

На Рис. 33-35 представлены линии тока вблизи поплавка для трех различных моделей (метки ротаметра 70).

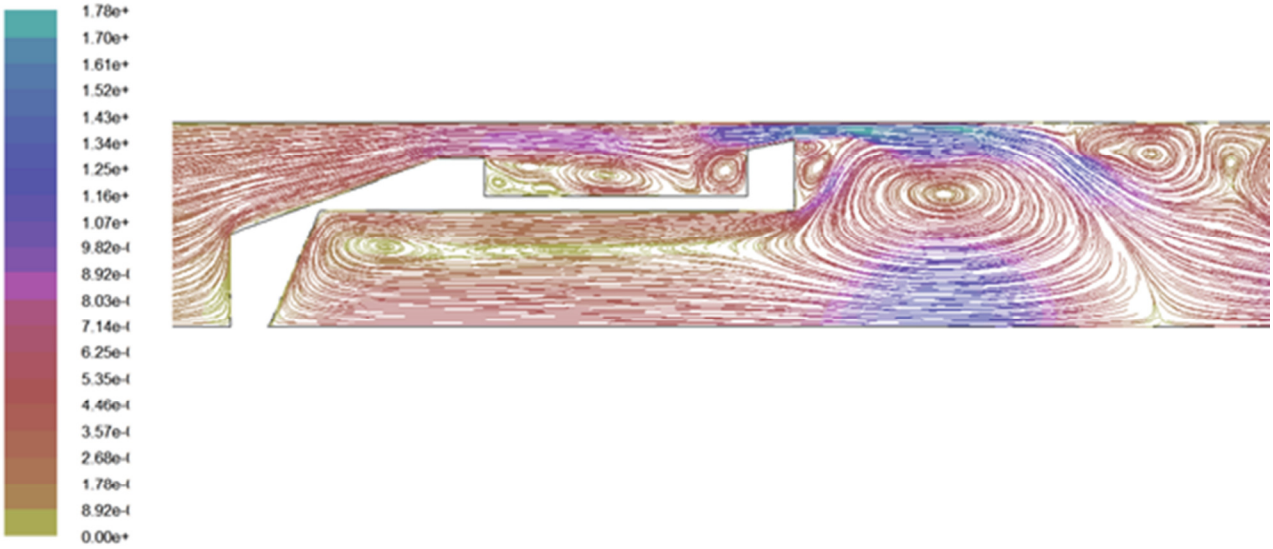


Рис 33. Lam. M 70.

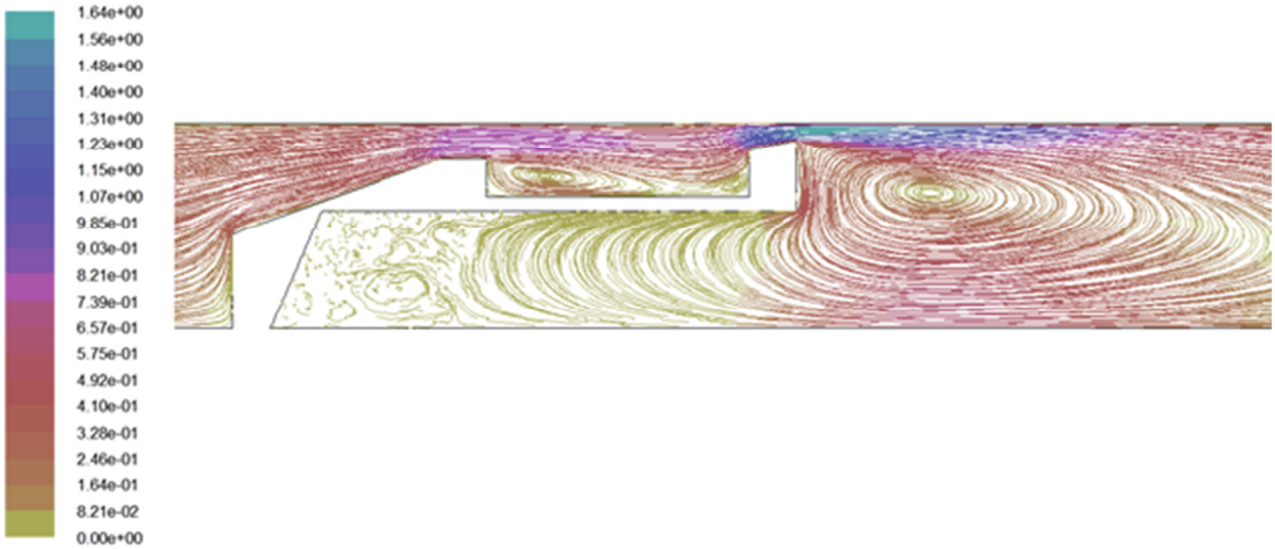


Рис 34. S-A.M 70.

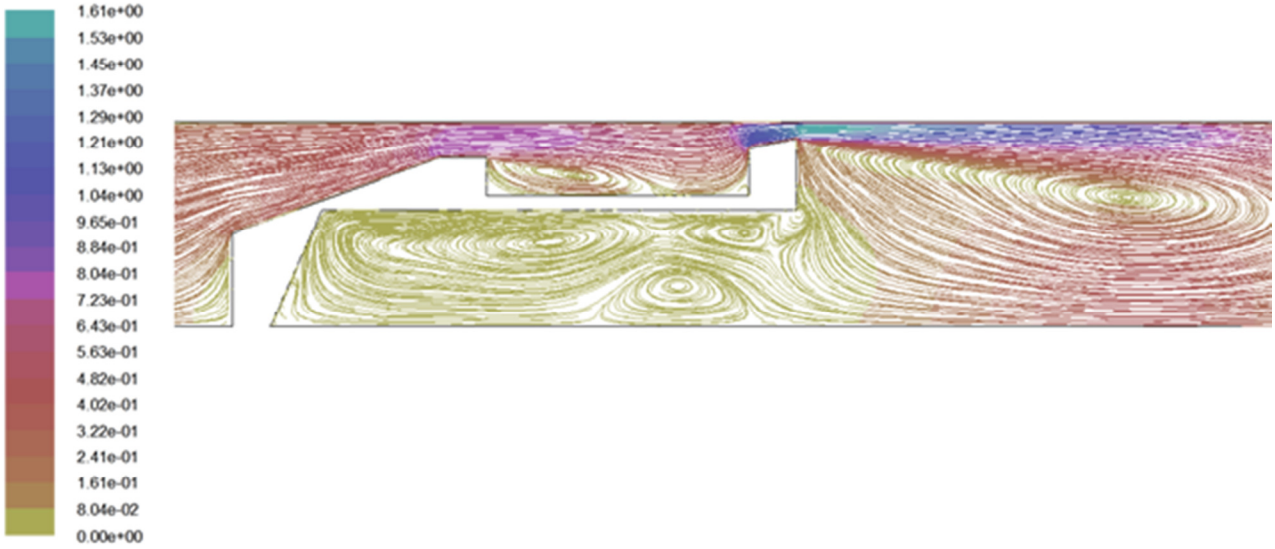


Рис 35. R-S. M 70.

Из Рис. 17 видно, что для ламинарной модели при метке ротаметра 60 и выше график зависимости метки ротаметра от расхода совпадает с графиком, полученным экспериментальным путем. Поэтому, для сравнения трех моделей в качестве участка возьмем М 70. Сравнивая карту линий тока модели Lam (Рис. 30 и Рис. 33) с моделями S-A (Рис. 31 и Рис. 34) и R-S (Рис. 32 и Рис. 35), придем к выводу, что модель Lam отличается от моделей S-A и R-S. В модели Lam вихри образуются на боковой стенке цилиндрической части поплавка и сразу над верхним диском поплавка, которых мы не видим в моделях S-A и R-S.

Теперь сравним линии тока построенных по ламинарной модели. Начиная с М 60, по мере увеличения скорости, пропадают все дополнительные вихри во внутренней полости поплавка как раз, когда начинается совпадение графика Lam с экспериментальным графиком. А по моделям турбулентности (S-A и R-S) эти завихренности есть всегда и они всегда одинаково расходятся. Изменение

структуры потока в трех моделей привело к несовпадению с экспериментом (Рис. 17).

На Рис. 36 представлены эпюры давлений для трех моделей (метки ротаметра 50).

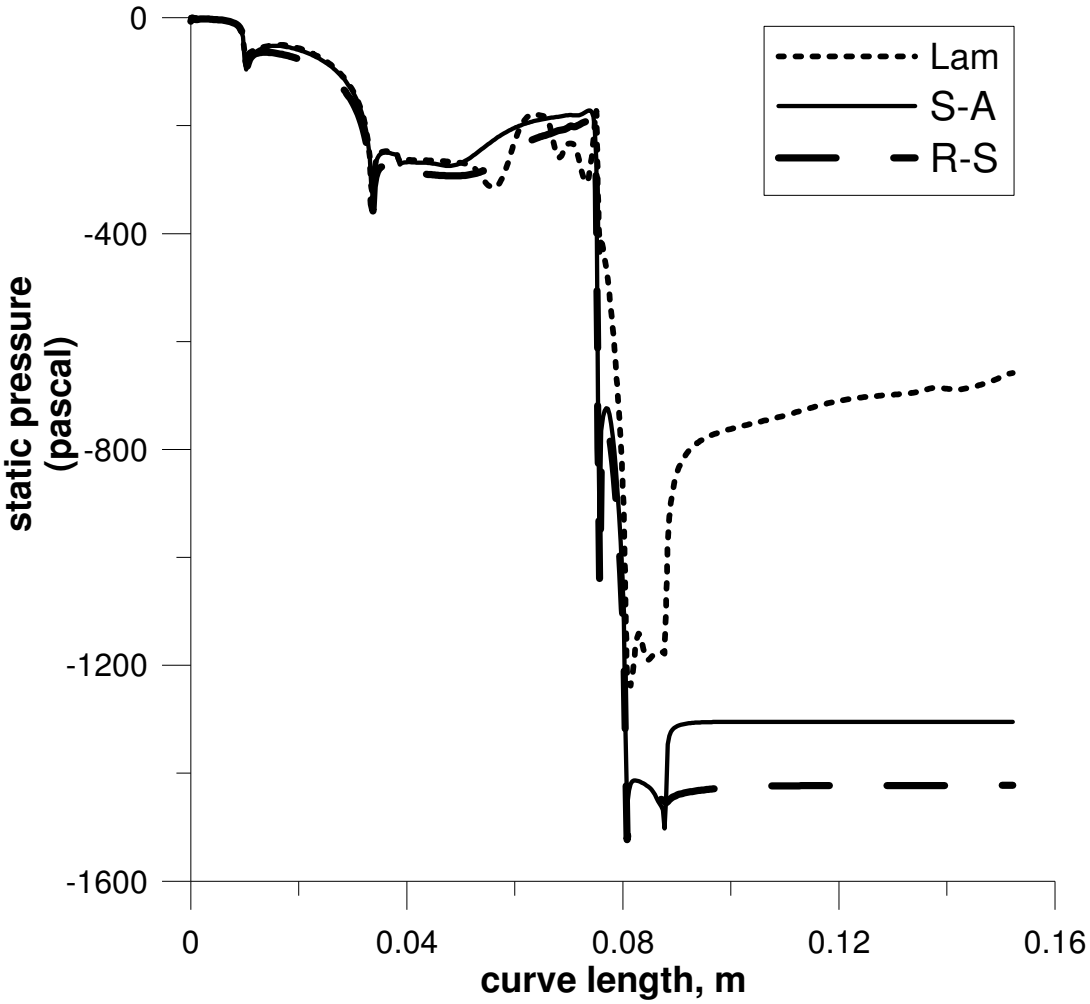


Рис 36. Эпюры давлений по трем моделям при M=50

На Рис. 37 представлены эпюры давлений для Lam модели (метки ротаметра 50, 60, 70 и 100).

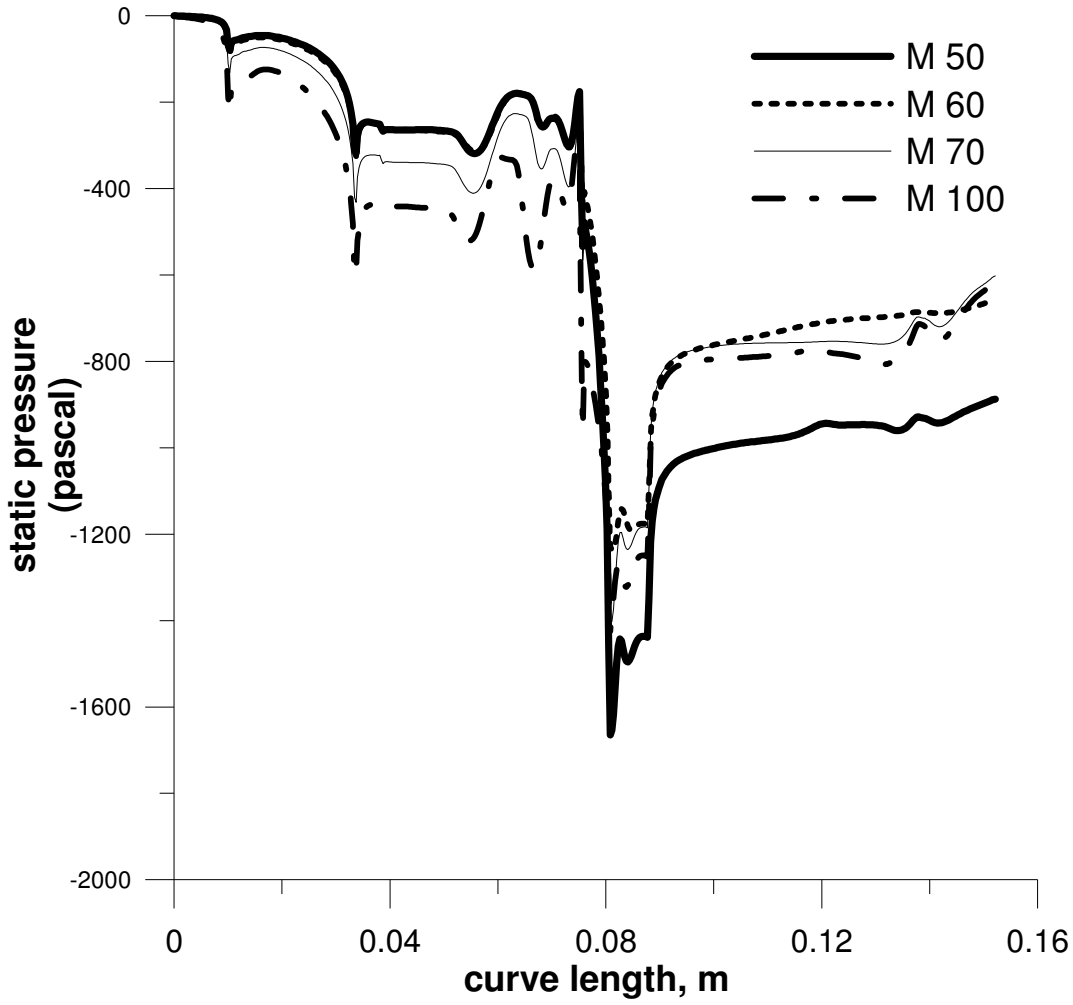


Рис 37. Эпюры давлений по модели Lam при различных метках ротаметра

На Рис. 38 представлены эпюры давлений для S-A модели (метки ротаметра 50, 60, 70 и 100).

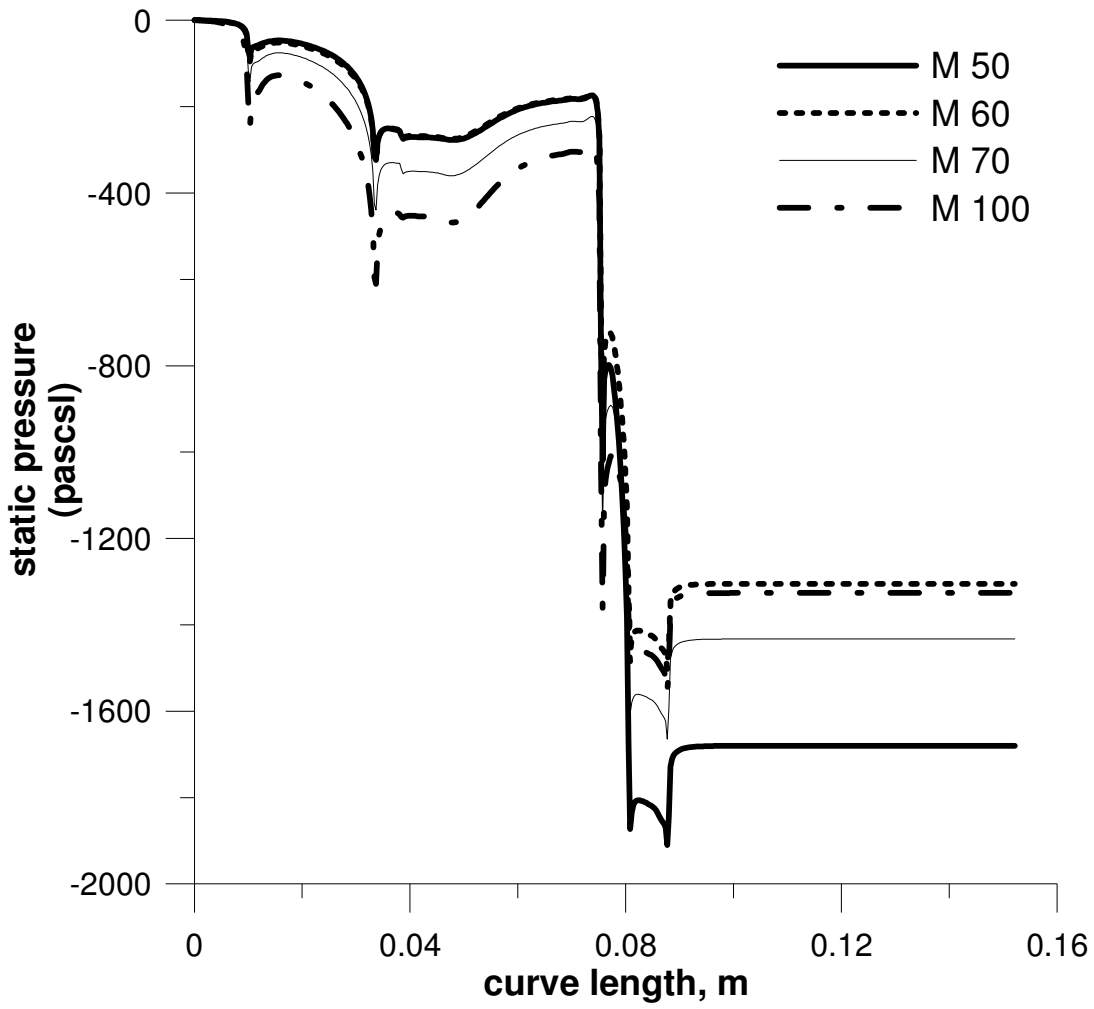


Рис 38. Эпюры давлений по модели S-A при различных метках ротаметра

На Рис. 39 представлены эпюры давлений для R-S модели (метки ротаметра 50, 60 и 70).

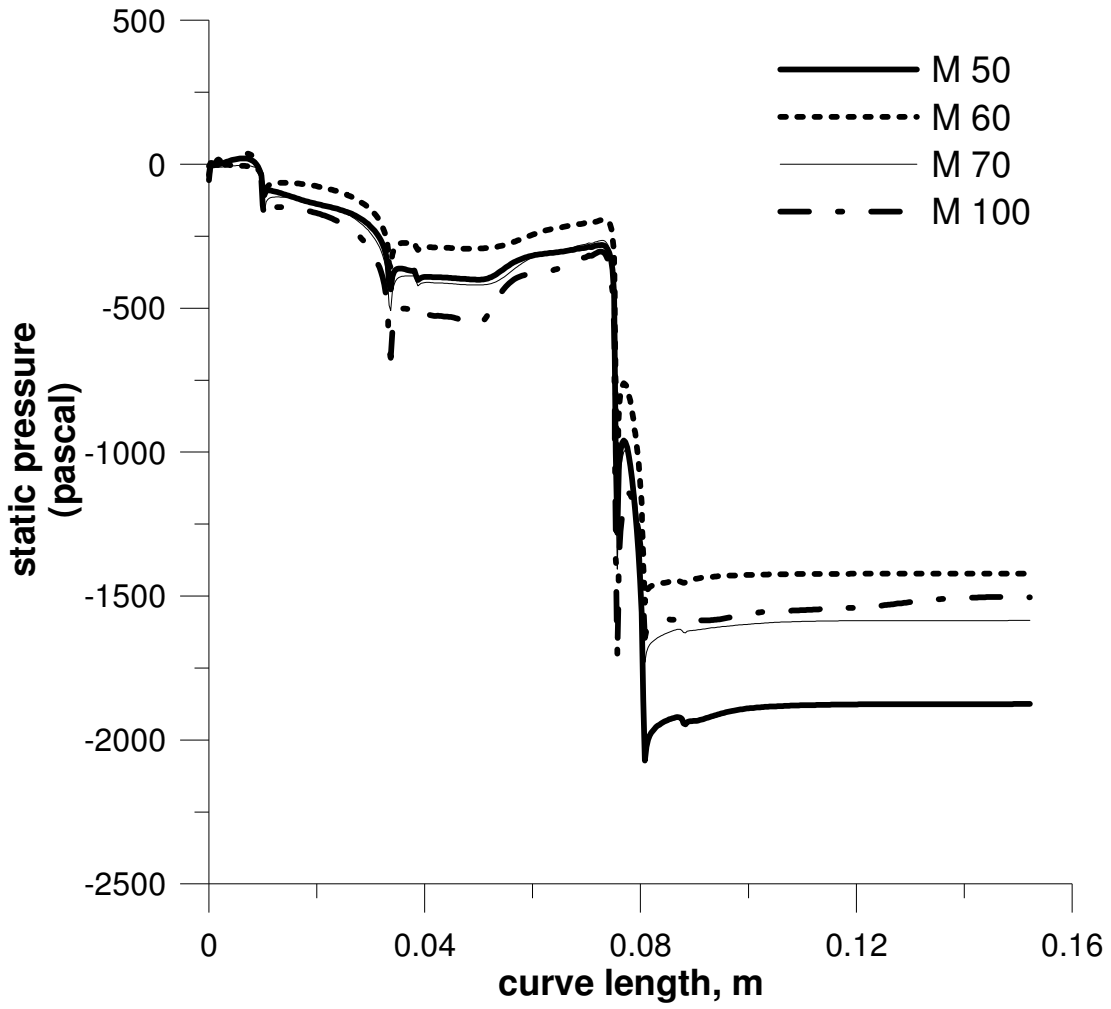


Рис 39. Эпюры давлений по модели RS при различных метках ротаметра

На Рис. 37-39. числа Рейнольдса принимают следующие значения: для М 50 $Re_{50} = 7650$, для М 60 $Re_{60} = 8270$, М 70 $Re_{70} = 10312$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено численное моделирование потока воды в ротаметре с помощью CFD-пакета Fluent. Получена зависимость метки ротаметра от расхода для трех моделей Laminar, Spalart-Allmaras и Reynolds Stress При выборе ламинарной модели решаются нестационарные уравнения Навье-Стокса усредненные по Рейнольдсу, но полагается, что турбулентная вязкость равна нулю. Это подходит для ламинарных потоков, однако можно считать и турбулентные – там, где турбулентной вязкостью можно пренебречь. В модели Spalart-Allmaras решается одно дополнительное уравнение переноса коэффициента турбулентной вязкости.
В модели Reynolds Stress решаются 6 уравнений для напряжений Ренольдса и уравнения для ε для замыкания.

Сравнивание расчетных и экспериментальных данных показало, что, начиная с метки ротаметра 60, ламинарная модель течения практически совпадает с

экспериментальными данными, что нельзя сказать для меток ниже 50. Модели Spalart-Allmaras и Reynolds Stress завышают силу действующею на поплавок по сравнению с фактическими данными на всем интервале показаний ротаметра.

Анализ структуры потока показал, что одной из причин данного расхождения расчетных и фактических данных могут быть дополнительные вихревые структуры, образующиеся, согласно расчетам, во внутренней полости поплавка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Монахов В.И. измерение количества жидкости, газа и пара. М. – Л. Госэнергоиздат. 1962. – 128 с.
2. Кремлевский П.П. Расходометры и счетчики количества: Справочник. Машиностроение. 1989. – 701 с.
3. К.А. Поташев, А.Б. Мазо, Р.Р. Зарипов. Руководство к проведению физико-механического практикума по гидравлике: учеб.-метод. пособие. Казань: Казан. ун-т. 2013. – 44 с.
4. К.А. Поташев, Р.Р. Зарипов. Гидравлика: рабочая тетрадь. Казань: Казан. ун-т. 2013. – 13 с.Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред. М.: «Мир». 1974. – 320 с.
5. В.А. Большаков. Справочник по гидравлике. 1976. – 279 с.
6. К.А. Поташев, Р.Р. Зарипов. Гидравлика. Физико-механический практикум: учеб.-метод. пособие. Казань: Казан. ун-т. 2013. – 28 с.
7. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т.1.2. М.: Наука. 1978.
8. Мазо А.Б. Гидродинамика: учеб. Пособие для студентов нематематических факультетов / А.Б. Мазо, К.А. Поташев. – Казань: Казан. ун-т, 2013. – 2-е изд. – 128 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

FLUENT

Version: axi, pbns, lam (axi, pressure-based, laminar)
Release: 6.3.26
Title:
Models
Model Settings

Space	Axisymmetric
Time	Steady
Viscous	Laminar
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Boundary Conditions

fluid.6

Condition	Value
Material Name	water-liquid
Specify source terms?	no
Source Terms	((mass) (x-momentum) (y-momentum))
Specify fixed values?	no
Fixed Values	((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile)))
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone (m/s)	0
Y-Velocity Of Zone (m/s)	0
Rotation speed (rad/s)	0
Deactivated Thread	no
Porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	0
Relative Velocity Resistance Formulation?	yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m2)	0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m2)	0
Choose alternative formulation for inertial resistance?	no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m)	0
Direction-2 Inertial Resistance (1/m)	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

wall.5

Condition	Value
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0

X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Rotation Speed (rad/s)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

wall.4

Condition	Value
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Rotation Speed (rad/s)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

axis.3

Condition Value

velocity_inlet.2

Condition	Value
Velocity Specification Method	1
Reference Frame	0
Velocity Magnitude (m/s)	0
Axial-Velocity (m/s)	0.31900001
Radial-Velocity (m/s)	0
Axial-Component of Flow Direction	1
Radial-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Y-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Z-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Angular velocity (rad/s)	0
is zone used in mixing-plane model?	no

outflow.1

Condition	Value
Flow rate weighting	1

Solver Controls

Equations

Equation Solved

Flow	yes

Numerics

Numeric	Enabled
Absolute Velocity Formulation	yes

Relaxation

Variable	Relaxation Factor
Pressure	0.3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.7

Linear Solver

Variable	Solver Type	Termination Criterion	Residual Reduction Tolerance
Pressure	V-Cycle	0.1	
X-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7

Pressure-Velocity Coupling

Parameter	Value
Type	SIMPLE

Discretization Scheme

Variable	Scheme
Pressure	Standard
Momentum	First Order Upwind

Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5e+10
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000

Material Properties

Material: water-liquid (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	998.20001
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	4182
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.6
Viscosity	kg/m-s	constant	0.001003
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	18.0152
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	0

L-J Energy Parameter	k	constant	0
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Speed of Sound	m/s	none	#f

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

```
$h=0.005
face create width 1 height 0.022736 xyplane rectangle
face move "face.1" offset 0 0.011368 0
face move "face.1" offset 0.3 0 0
vertex create coordinates 0 0.01 0
vertex create coordinates 0.022 0.018 0
vertex create coordinates 0.027 0.018 0
vertex create coordinates 0.027 0.014 0
vertex create coordinates 0.055 0.014 0
vertex create coordinates 0.055 0.019 0
vertex create coordinates 0.06 0.02 0
vertex create coordinates 0 0 0
vertex create coordinates 0.004 0 0
vertex create coordinates 0.06 0.0125 0
vertex create coordinates 0.0095 0.0125 0
edge create straight "vertex.12" "vertex.5"
edge create straight "vertex.5" "vertex.6"
edge create straight "vertex.6" "vertex.7"
edge create straight "vertex.7" "vertex.8"
edge create straight "vertex.8" "vertex.9"
edge create straight "vertex.9" "vertex.10"
edge create straight "vertex.10" "vertex.11"
edge create straight "vertex.11" "vertex.14"
edge create straight "vertex.14" "vertex.15"
edge create straight "vertex.15" "vertex.13"
edge create straight "vertex.13" "vertex.12"
face create wireframe "edge.5" "edge.6" "edge.7" "edge.8" "edge.9" "edge.10" \
  "edge.11" "edge.12" "edge.13" "edge.14" "edge.15" real
face subtract "face.1" faces "face.2"
edge split "edge.1" percentarclength 0.9 connected
edge split "edge.3" percentarclength 0.82 connected
edge split "edge.3" percentarclength 0.73170732 connected
edge split "edge.16" percentarclength 0.24623116 connected
undo begingroup
edge picklink "edge.28"
edge mesh "edge.28" successive ratio1 1 size 2*$h
undo endgroup
undo begingroup
edge picklink "edge.1"
edge mesh "edge.1" successive ratio1 1 size 4*$h
undo endgroup
sfunction create sourceedges "edge.28" startsize 4*$h growthrate 1.1 \
  sizelimit 2*$h attachedges "edge.4" fixed
undo begingroup
edge picklink "edge.4"
sfunction bgrid attachedges "edge.4"
edge mesh "edge.4"
undo endgroup
undo begingroup
edge picklink "edge.29"
edge mesh "edge.29" successive ratio1 1 size *$h
undo endgroup
undo begingroup
edge picklink "edge.16"
edge mesh "edge.16" successive ratio1 1 size 2*$h
undo endgroup
```

```
undo begingroup
edge delete "edge.27" keepsettings onlymesh
edge picklink "edge.27"
edge mesh "edge.27" successive ratio1 1 size 2*$h
undo endgroup
undo begingroup
edge delete "edge.3" keepsettings onlymesh
edge picklink "edge.3"
edge mesh "edge.3" successive ratio1 1 size 2*$h
undo endgroup
undo begingroup
edge delete "edge.30" keepsettings onlymesh
edge picklink "edge.30"
edge mesh "edge.30" successive ratio1 1 size 4*$h
undo endgroup
sfunction create sourceedges "edge.3" startsize 4*$h growthrate 1.1 \
  sizelimit 2*$h attachedges "edge.2" fixed
undo begingroup
edge delete "edge.2" keepsettings onlymesh
edge picklink "edge.2"
sfunction bgrid attachedges "edge.2"
edge mesh "edge.2"
undo endgroup
undo begingroup
edge delete "edge.17" "edge.20" "edge.25" "edge.22" "edge.21" "edge.23" \
  "edge.26" "edge.24" "edge.19" "edge.18" keepsettings onlymesh
edge picklink "edge.18" "edge.19" "edge.24" "edge.26" "edge.23" "edge.21" \
  "edge.22" "edge.25" "edge.20" "edge.17"
edge mesh "edge.17" "edge.20" "edge.25" "edge.22" "edge.21" "edge.23" \
  "edge.26" "edge.24" "edge.19" "edge.18" successive ratio1 1 size *$h
undo endgroup
face mesh "face.1" triangle
physics create btype "OUTFLOW" edge "edge.2"
physics create btype "VELOCITY_INLET" edge "edge.4"
physics create btype "AXIS" edge "edge.30" "edge.16" "edge.27" "edge.1"
physics create btype "WALL" edge "edge.3" "edge.29" "edge.28"
physics create btype "WALL" edge "edge.17" "edge.20" "edge.25" "edge.22" \
  "edge.21" "edge.23" "edge.26" "edge.24" "edge.19" "edge.18"
physics create ctype "FLUID" face "face.1"
solver select "FLUENT 5/6"
```