

Сравнительный анализ пакетов программ fluent и sigmaflow на примере решения ламинарных задач гидродинамики

Д.В. Платонов

Сибирский федеральный университет, Красноярск

e-mail: platonov-08@yandex.ru

А.В. Минаков

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Методы вычислительной гидродинамики (*CFD*) находят все более широкое применение для изучения характеристик течений при проведении, как академических исследований, так и при оптимизации режимов работы технологических устройств.

На данный момент в мире существует ряд универсальных прикладных программных продуктов (таких как “*Fluent*”, “*CFX*”, “*STAR-CD*”, и др.), позволяющих проводить моделирование широкого класса физических процессов в научных и инженерных областях.

Целью данной работы являлось сравнение двух программных комплексов, широко известного во всем мире *CFD* пакета *Fluent* и разрабатываемого в красноярском филиале института теплофизики СО РАН программного пакета *SigmaFlow*, сопоставить полученные результаты.

1. Математическая модель

Согласно современным представлениям достаточно реалистическая картина многомерных течений жидкости или газа может быть получена на основе решения уравнений динамики вязкого газа. Для ламинарного режима течения такие уравнения могут быть записаны в форме уравнений Навье-Стокса.

Уравнение неразрывности имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

Уравнения баланса количества движения по каждой из трех осей координат

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{ux}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{uy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{uz}}{\partial z} + S_u, \\ \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{vx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{vy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{vz}}{\partial z} + S_v, \\ \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{wy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{wz}}{\partial z} + \rho g + S_w, \end{aligned}$$

Составляющие тензора вязких напряжений τ_{ij} находятся по соотношениям:

$$\begin{aligned} \tau_{ux} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, & \tau_{uy} &= \tau_{vx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \\ \tau_{vy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}, & \tau_{vz} &= \tau_{wy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right), \\ \tau_{wz} &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}, & \tau_{uz} &= \tau_{wx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right). \end{aligned}$$

2. Численный алгоритм

Для компьютерной реализации математической модели, как уже было сказано выше, были выбраны два программных комплекса, *Fluent* и *SigmaFlow*.

В расчётах использовались многоблочные однородные прямоугольные структурированные сетки. Для дискретизации уравнений гидродинамики на выбранной сетке используется широко известный метод контрольного объема, суть которого заключается в интегрировании исходных дифференциальных уравнений по каждому контрольному объему для получения конечно разностных соотношений. Для аппроксимации конвективных членов уравнений $\nabla(\rho v \cdot v) = -\nabla p + \nabla(\tau)$ используется широко известная в *CFD* квадратичная противопоточная интерполяция (*QUICK*) предложенная Леонардом. Данная схема имеет второй порядок аппроксимации и обладает высокой скоростью сходимости, чем и объясняется ее широкое применение при решении задач гидродинамики.

Диффузионные потоки и источниковые члены аппроксимируются со вторым порядком точности. Связь между полями скорости и давления реализуется при помощи SIMPLEC-подобной процедуры на совмещенных сетках.

Стоит отметить, что при решении каждой задачи решатели обоих программных комплексов настраивались одинаково, чтобы получить более достоверное сравнение.

3. Ламинарное течение в двумерной каверне

В качестве примера внутренней задачи динамики вязкой несжимаемой жидкости рассмотрим модельную задачу о стационарном ламинарном течении вязкой несжимаемой жидкости в квадратной каверне (полости), верхняя стенка которой движется с постоянной скоростью $U=1\text{м/с}$.

Жидкость, целиком заполняющая каверну, вовлекается в движение силами вязкости. Такая постановка, будучи геометрически крайне простой, позволяет отразить многие характерные черты задач, описываемых уравнениями Навье-Стокса, например различные соотношения между инерционными и вязкими силами и т.п. Кроме того, такого рода течения широко распространены в природе и различных промышленных процессах. Поэтому при численном моделировании в качестве тестовой задачи широко распространена задача о течении в каверне.

Расчет течения в каверне будем проводить при значениях числа Рейнольдса $Re = \frac{U \cdot L}{\mu}$ равном 3200 и 1000. Число Рейнольдса менялось путем варьирования динамической вязкости, при этом плотность оставалась постоянной 1кг/м^3 .

Моделирование проводилось на двух типах сетки, 30×30 и 100×100 узлов.

Ниже приведены графики вертикальной компоненты скорости в среднем горизонтальном сечении при числе Рейнольдса 3200 (рис.1) а также расчеты U.Ghia, K.N.Ghia, and C.T.Shin [1]. Решение [1] это расчеты, которые были получены на очень подробной сетке – 257×257 узлов при помощи многосеточного метода и считаются эталонным решением данной задачи.

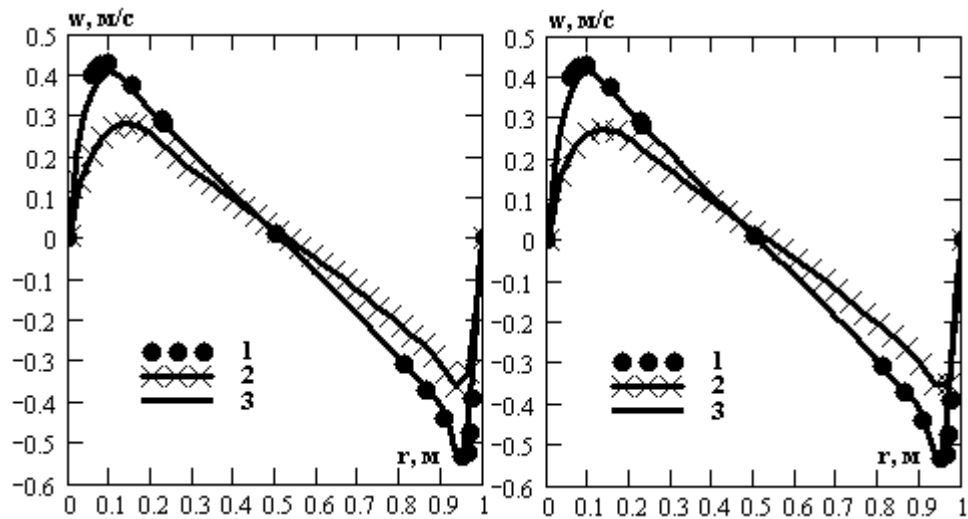


Рис. 1. Вертикальная скорость в центральном горизонтальном сечении каверны $Re = 3200$: 1 – расчет U.Ghia, K.N.Ghia, and C.T.Shin, 2 – сетка 30×30 , 3 – сетка 100×100 (слева – SigmaFlow, справа – Fluent)

4. Ламинарное закрученное течение в банке

Рассматривается ламинарное закрученное течение в закрытом цилиндре с вращающейся верхней крышкой.

Закрученное течение с концентрированным вихрем на оси цилиндра образуется путем вращения крышки с угловой скоростью Ω . От крышки вращательное движение за счет сил трения передается жидкости, а разрежение на оси вращения приводит к появлению осевого движения жидкости к центру вращающегося диска и возвратного течения у стенок цилиндра. При определенных режимах возможен распад вихря на оси цилиндра. В работах Vogel и Escudier было показано, что характер распада вихря зависит от числа Рейнольдса $Re = \Omega R^2 / \nu$ и отношения H/R , где H – высота, а R – радиус. В зависимости от этих параметров Escudier [3] была построена карта режимов, дополненная в последующих работах. Доминирующим типом распада является пузырьковый с одним пузырьком. Внутри зоны однопузырькового распада лежит область существования двух пузырей, и в очень узком диапазоне параметров возможно появление трех пузырей. При повышении числа Рейнольдса картина становится неустойчивой, причем, в зависимости от отношения H/R эта неустойчивость проявляется различным образом. При $H/R < 3$ начинаются осесимметричные колебания, а при $H/R > 3.1$ – прецессия вихря вокруг оси.

В данной работе проводится исследование режима без распада, $H/R = 1$, $Re = 1800$, экспериментальные данные профилей скорости взяты из примера [4] полученные Michelsen;

Высота цилиндра $H = 1$ м, его радиус $R = 1$ м., плотность жидкости 1 кг/м^3 , вязкость зависит от числа Рейнольдса, верхняя крышка вращается со скоростью $\Omega = 1$ рад/с.

Граничные условия: на неподвижных стенках ставится условие прилипания, верхняя стенка объявляется областью закрутки потока. Расчёты проводились на двух сетках 47 тысяч и 620 тысяч узлов.

Сопоставление численных результатов с экспериментом показаны на рис. 2-3.

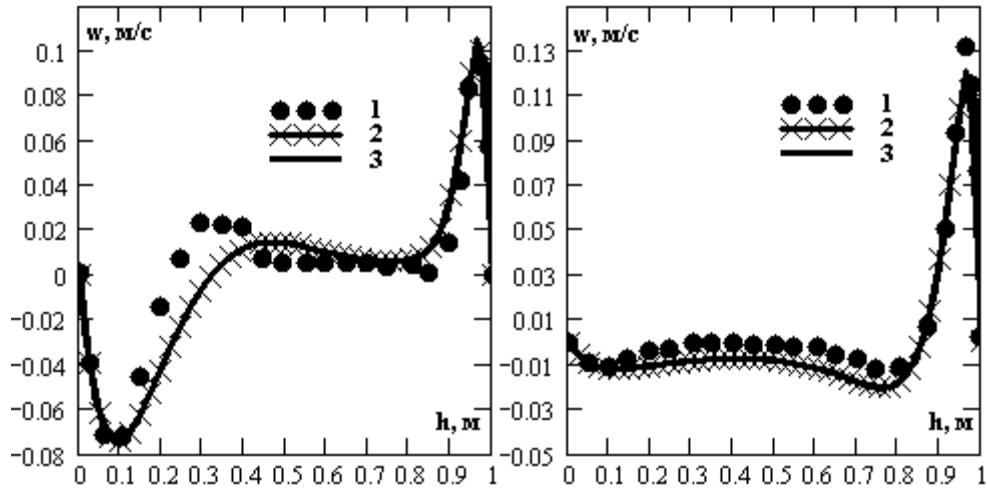


Рис. 2. Распределения радиальной компоненты скорости: 1 – эксперимент, 2 – Fluent, 3 – SigmaFlow (справа – вдоль линии $r = 0.6$, слева – $r = 0.9$)

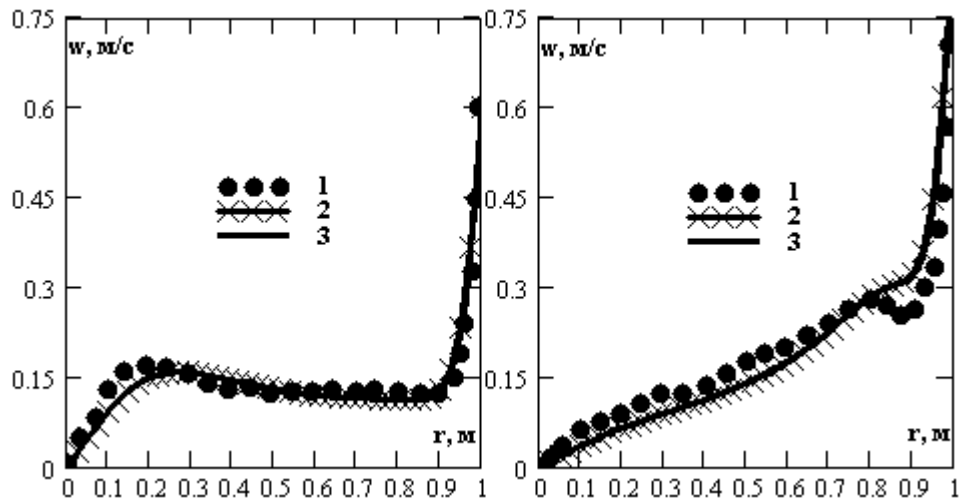


Рис. 3. Распределения тангенциальной компоненты скорости: 1 – эксперимент, 2 – Fluent, 3 – SigmaFlow (справа – вдоль линии $r = 0.6$, слева – $r = 0.9$)

5. Ламинарное течение в изогнутой на 90 градусов трубе круглого сечения

Рассматривается ламинарное течение жидкости в круглой трубе, изогнутой под углом 90 градусов. В гидравлике такие изогнутые каналы принято называть гибом. Особенностью течений в гибом является возникновение продольной завихренности, обусловленной центробежными силами, которые генерируют вторичное течение и перераспределение продольной составляющей скорости. Возникающая при этом сложная структура течения идеально подходит для тестирования расчетных алгоритмов. Для рассматриваемой задачи сопоставление расчетных результатов проводилось с данными эксперимента, взятыми из отчета [5].

Геометрия гибом представлена на рис. 4а. Длина вертикального участка канала 212 мм. Длина горизонтального участка 480 мм. Средний радиус гибом $R = 134.4$ мм. Диаметр канала всюду одинаков и равен $D = 48$ мм.

На входе в гибом задавался представленный на рис. 4б. профиль скорости, взятый из эксперимента. Видно, что данный профиль не является параболическим. Объясняется это тем, что в эксперименте вода на вход в измерительный участок подается из большого бака и профиль скорости “не успевает” установиться. Величина расхода жидкости для данного профиля равна примерно 0.02 кг/с, что соответствует числу Рейнольдса 500 (плотность жидкости 1000 кг/м^3 , динамическая вязкость $0.001 \text{ Па}\cdot\text{с}$).

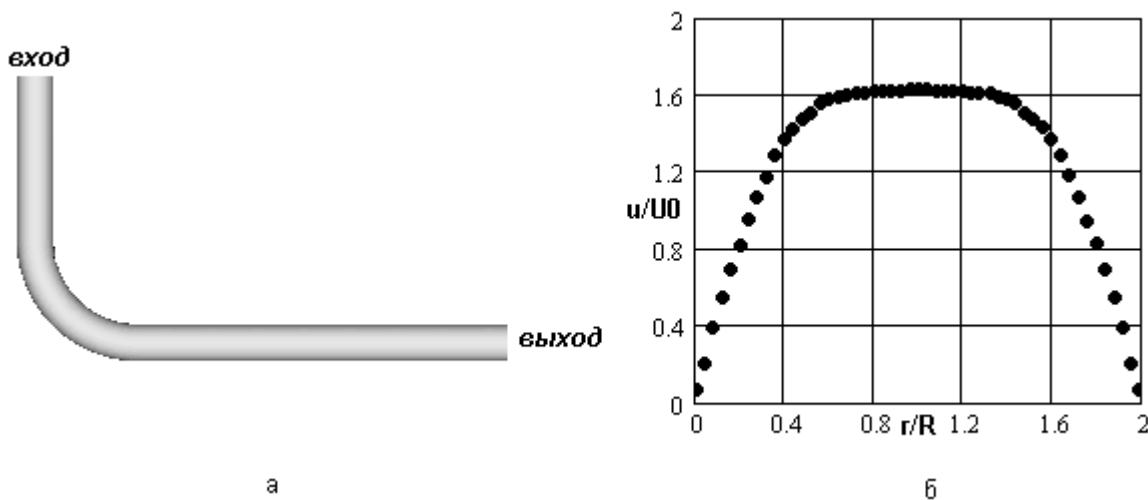


Рис. 4. Геометрия канала и профиль скорости на входе в гибом

На выходе из гибом задавались условия Неймана (равенство нулю производных по нормали к поверхности выхода от всех компонент скорости).

Все приведенные в работе профили скорости обезразмерены на величину среднерасходной скорости $U_0 = 0.0105 \text{ м/с}$. По оси X на графиках отложено, обезразмеренное на радиус трубы $R = 24 \text{ мм}$, расстояние между стенками канала. Расчёты проводились на сетке содержащей 432 тысячи узлов.

На рисунках 6 и 7 приведены результаты численного моделирования и сопоставление их с экспериментальными данными.

Проведено тестирование двух численных алгоритмов, на примере нескольких ламинарных задач. Представлено сравнение двух численных решений между собой, а также с экспериментальными данными.

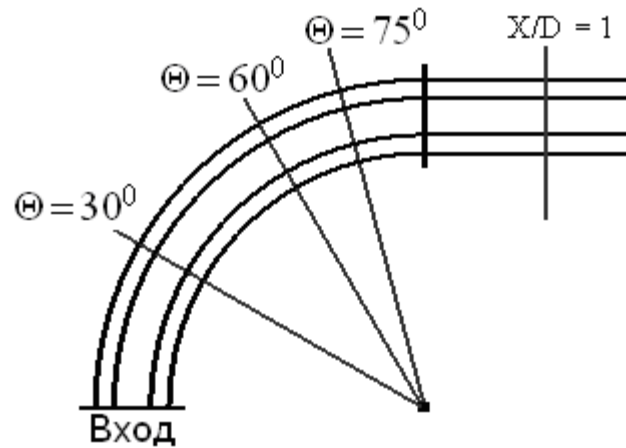


Рис. 5. Схема сечений в которых проводилось измерение скорости

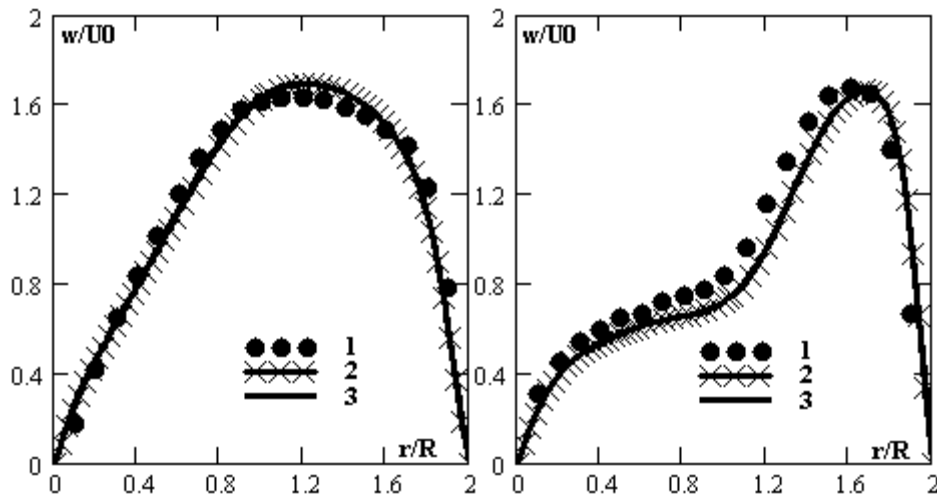


Рис. 6. Профиль модуля скорости в центральном поперечном сечении гiba: 1 – эксперимент, 2 – Fluent, 3 – SigmaFlow (слева – угол 30° , справа – угол 60°)

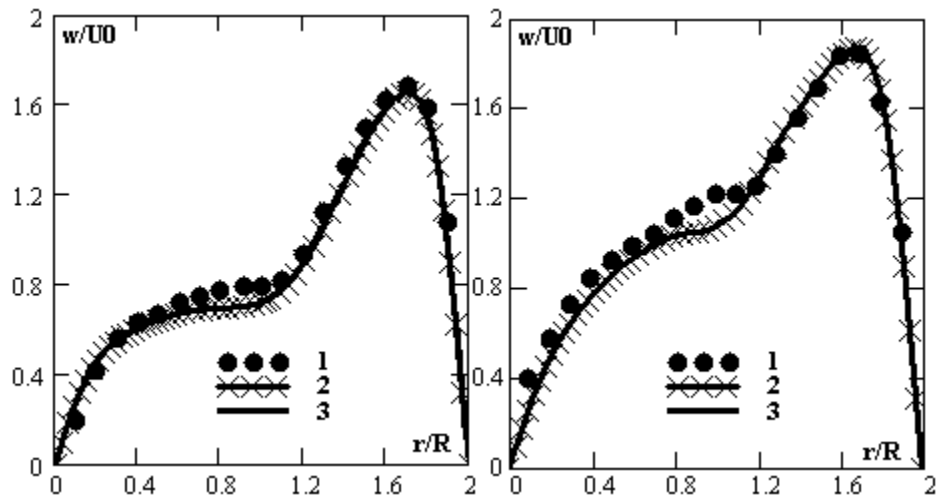


Рис. 7. Профиль модуля скорости в центральном поперечном сечении гiba: 1 – эксперимент, 2 – Fluent, 3 – SigmaFlow (слева – угол 75° , справа – $x/D = 1$)

Тестирование показало высокую производительность и точность обоих программных комплексов. Численное решение всех рассмотренных задач хорошо качественно и количественно согласуется с экспериментальными данными. Решения, полученные при помощи пакета программ *SigmaFlow*, практически совпадают с решениями, полученными при помощи *Fluent*. Достаточно близкие результаты наблюдаются и при сравнении быстродействия программ.

Список литературы

- [1] GHIA U., GHIA K.N., SHIN C.T. High-Re Solutions for Incompressible Flow Using the Navier-Stokes Equations and a Multigrid Method // Journal of computational physics 48 (1987) 378–411.
- [2] ИСАЕВ С.А. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб //СПб.: Судостроение (2005).
- [3] ESCUDIER M.P. Observations of the flow produced in a cylindrical container by a rotating endwall // Exp. In Fluids. Vol.2, N4. (1984).
- [4] MICHELSEN J.A. Modeling Incompressible Rotating Fluid Flow //Ph.D. Dissertation, Department of Fluid Mechanics, Technical University of Denmark (1986).
- [5] ENAYET M. M., GIBSON M. M. Laser Doppler measurements of laminar and turbulent flow in pipe bend // NASA contractor report 3551. (1982).
- [6] Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа //М.: Наука (1970).