

УДК 532.5

Д.В. Платонов, А.В. Минаков, А.А. Дектерев, Е.Б. Харламов**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ CFD-ПАКЕТОВ SIGMAFLOW
И ANSYS FLUENT НА ПРИМЕРЕ РЕШЕНИЯ
ЛАМИНАРНЫХ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ**

В данной работе представлен сравнительный анализ двух программных комплексов для решения задач вычислительной гидродинамики SigmaFlow и Fluent. При помощи данных программ проведено решение нескольких ламинарных тестовых задач. Полученные результаты сопоставлены между собой, а также с экспериментальными данными и расчётами других авторов.

Ключевые слова: *вычислительная гидродинамика, Fluent, SigmaFlow, уравнения Навье – Стокса, CFD-пакеты, ламинарное течение.*

Появление быстродействующих ЭВМ, а также необходимость скорейшего решения острых проблем (создание ядерного оружия, покорение космоса) в середине прошлого века дало мощный толчок развитию вычислительных методов. Прогресс в совершенствовании вычислительной техники и самих численных методов резко изменил характер применения основных принципов исследований в теоретической гидродинамике и теплопередаче при решении инженерных задач. Наряду с традиционными методами исследований, такими, как аналитические и экспериментальные методы, сформировался третий метод исследований – вычислительная гидродинамика (CFD). Сам термин «вычислительная гидродинамика» или «CFD» сегодня рассматривается гораздо шире и включает себя не только методы расчета течений жидкости и газа, но и методы моделирования сложного теплообмена, химического реагирования, многофазных сред, сопряженных задач. Методы вычислительной гидродинамики нашли очень широкое применение для изучения характеристик течений и теплообмена как при проведении академических исследований, так и при оптимизации режимов работы технологических устройств. Пожалуй трудно найти область человеческой деятельности, где бы не нашли применения методы CFD. Продолжая непрерывно развиваться и совершенствоваться, уже сегодня эти методы могут выступать в качестве альтернативы натурного эксперимента при решении очень многих практически важных задач.

На данный момент в мире существует ряд универсальных коммерческих программных продуктов для решения задач вычислительной гидродинамики. Среди ведущих зарубежных коммерческих пакетов можно выделить такие, как «ANSYS FLUENT» и «ANSYS CFX» корпорации ANSYS Inc, «STAR-CD/STAR-CCM+» компании CD-adapco Group, позволяющие проводить моделирование широкого класса физических процессов в научных и инженерных областях. Существуют и отечественные универсальные коммерческие пакеты: Flow Vision компании ТЕ-СИС, Gas Dynamics Tool компании GDT Software Group.

Помимо коммерческих пакетов существует очень большое количество некоммерческих, так называемых «in-house» кодов. За рубежом практически каждый крупный университет или научно-исследовательский институт имеет собственные

разработки в области создания CFD-кодов. По своим возможностям и быстрдействию некоторые из них могут существенно опережать коммерческие коды. Однако, как правило, они имеют менее удобный и развитый интерфейс и требуют существенно более квалифицированного пользователя.

Среди отечественных некоммерческих кодов можно назвать VP2/3, SINF, SigmaFlow. Что же касается заложенных в эти пакеты математических моделей и численных алгоритмов, то в целом они соответствуют мировому уровню, а по некоторым аспектам существенно его превосходят.

Программа SigmaFlow – это универсальный некоммерческий программный продукт для решения широкого класса задач гидродинамики, теплообмена и горения, разрабатываемая специалистами Красноярского филиала Института теплофизики СО РАН, кафедры теплофизики Сибирского федерального университета и фирмы ООО «ТОРИНС». Программа SigmaFlow является развитием программы AeroChem, разрабатываемой с 1993 года. Специализированные версии программы используются рядом научно-исследовательских и проектных организаций, а также в учебном процессе. Развитие программы происходит в рамках выполнения проектов по грантам и договорам на выполнение НИР. Программа SigmaFlow позволяет моделировать следующие процессы: стационарные и нестационарные течения жидкости и газа; течения неньютоновских жидкостей; турбулентные течения с использованием RANS- и гибридных RANS/LES-моделей; конвективный, кондуктивный и радиационный теплообмен.

Важный вопрос любого численного исследования – это оценка адекватности численных прогнозов. Чтобы ответить на него, надо произвести тестирование пакета на совокупности задач как модельного плана, так и таких, для которых имеются надежные экспериментальные данные.

Целью данной работы являлся сравнительный анализ вычислительной эффективности широко известного во всем мире программного комплекса FLUENT и разрабатываемого в Красноярском филиале Института теплофизики СО РАН программного пакета SigmaFlow на решении нескольких задач ламинарной гидродинамики.

Математическая модель и численный алгоритм

В данной работе рассматривались изотермические, ламинарные, стационарные течения несжимаемой жидкости с постоянной плотностью. В этой постановке течение описывается уравнениями Навье – Стокса

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \rho \mathbf{v} &= 0, \\ \nabla \cdot \rho \mathbf{v} \mathbf{v} &= -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \rho \mathbf{g}, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости, \mathbf{v} – вектор скорости, p – давление, $\mathbf{T} = 2\mu\mathbf{D}$ – тензор напряжений, μ – коэффициент вязкости, \mathbf{g} – вектор силы тяжести.

$$\mathbf{D} \equiv \mathbf{D}_{ij} = \frac{1}{2}(\partial v_i / \partial x_j + \partial v_j / \partial x_i)$$

– тензор скоростей деформации.

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

Подробное описание численного алгоритма программы SigmaFlow можно найти в работах [1–3]. Здесь лишь отметим основные моменты численной методики. Разностный аналог уравнений Навье – Стокса (1) находится с помощью метода конечного объема [4, 5] для многоблочных сеток. В этом случае полученная схема оказывается автоматически консервативной. Суть метода заключается в разбиении расчетной области на контрольные объемы и интегрировании исходных уравнений сохранения по каждому контрольному объему для получения конечно-разностных соотношений. Аппроксимация конвективных членов уравнений переноса осуществляется с помощью противопоточной схемы второго порядка [6]. Диффузионные потоки и источниковые члены аппроксимируются конечно-объемными аналогами центрально-разностных соотношений со вторым порядком точности. Связь между полями скорости и давления, обеспечивающая выполнение уравнения неразрывности, реализуется при помощи SIMPLEC-процедуры на совмещенных сетках [5]. Для устранения осцилляций поля давления используется подход Рхи – Чоу, заключающийся во введении монотонизатора в уравнение для поправки давления [5].

В рамках SIMPLEC-процедуры полное давление представляется в виде суммы гидростатического и гидродинамического давления. Поскольку в данной работе рассматриваются только изотермические течения с постоянной плотностью, то гидростатическое давление не представляет особого интереса и может быть найдено как $p = \rho g z$, где z – высота относительно начала координат. Гидродинамический перепад давления согласно SIMPLEC-процедуре, определяется из решения уравнения на поправку давления, при этом на границах задавалось условие отсутствие градиента давления. Для замыкания системы уравнений и получения единственного решения необходимо задание значения фиксированного давления в какой либо из точек расчетной области. В случае постоянной плотности расположение этой точки и значение фиксированного давления в ней не имеет принципиального значения. В данной работе величина фиксированного давления задавалась равной нулю и точка располагалась в начале координат расчетной области. Такой подход является на сегодняшний день общепринятым и реализован во всех пакетах программ, использующих метод контрольного объема и SIMPLEC-процедуры.

Полученные в результате дискретизации исходной системы дифференциальных уравнений разностные уравнения решаются итерационным способом с применением алгебраического многосеточного решателя.

При проведении расчетов при помощи пакета Fluent использовалась версия 6.23 с академической лицензией, приобретенной Сибирским федеральным университетом в 2007 г. Подробное описание численных алгоритмов этого пакета можно найти в его документации [5]. В пакете программ Fluent реализован очень большой выбор численных методик решения и способов дискретизации уравнений Навье – Стокса. В данной работе при решении задач для корректности сравнения использовались, насколько это возможно, те же самые алгоритмы, методики и параметры, что реализованы в пакете SigmaFlow. А именно: segregated pressure-based solver, SIMPLE-C-процедура для связи скорости и давления, схема аппроксимации QUICK на конвективные члены уравнений переноса, Green-Gauss Cell-метод аппроксимации градиентов, коэффициент релаксации в уравнении на давление задавался равным 1, коэффициент релаксации в уравнениях на компоненты вектора скоростей равным 0,8, многосеточные-AMG решатели с параметрами, выбранными по умолчанию.

Ламинарное течение в двумерной каверне

Тестирование расчетного алгоритма начнем с самого распространенного в вычислительной гидродинамике теста – задачи о стационарном ламинарном течении вязкой несжимаемой жидкости в квадратной каверне. Задача о каверне в вычислительной гидродинамике является своеобразным испытательным полигоном, на котором проходят тестирование новые численные алгоритмы и процедуры. Начиная с появления первых вычислительных машин до сегодняшних дней по данной задаче накоплен огромный вычислительный материал [7, 8].

Каверна представляет собой замкнутую квадратную полость, заполненную вязкой несжимаемой жидкостью. Верхняя стенка каверны движется с постоянной скоростью $U = 1$ м/с. Движение от стенки за счет вязкого трения передается к жидкости, и в зависимости от величины числа Рейнольдса в каверне формируется сложное циркуляционное течение. 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.

Расчет течения в каверне был проведен в широком диапазоне значений числа Рейнольдса от 100 до 10000. Число Рейнольдса менялось путем варьирования динамической вязкости, при этом плотность и скорость крышки каверны оставались постоянными. Расчеты проводились на равномерных декартовых сетках с детализацией 30×30 и 100×100 узлов.

Картину течения в каверне для числа Рейнольдса 3200 можно представить себе из данных на рис. 1. Структура течения в каверне при данных числах Рейнольдса характеризуется наличием развитого центрального вихря и нескольких вторичных вихрей в углах каверны. С увеличением числа Рейнольдса происходит интенсификация течения в первичном и вторичных вихрях, которые увеличиваются в размерах. При этом с ростом числа Рейнольдса наблюдается процесс растягивания и дробления вторичных вихрей в нижних углах каверны. Данная тенденция сохраняется и при дальнейшем увеличении числа Рейнольдса. При приближении числа

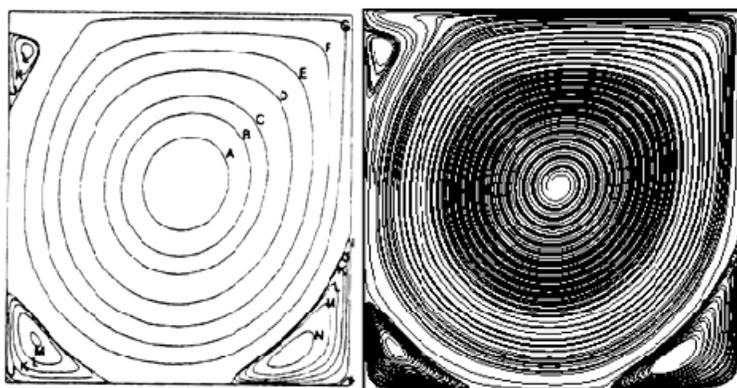


Рис. 1. Линии тока в квадратной каверне для $Re=3200$. Левый рисунок – результаты из работы [9], правый рисунок – результаты, полученные при помощи пакета *SigmaFlow*

Рейнольдса к значению 10 000 течение в плоской каверне становится нестационарным. На рис. 1 для сравнения также приведены результаты расчетов из работы [9]. Видно, что в целом структура течения в обоих расчетах качественно согласуется. Стоит сказать, что линии на правых рисунках не являются в строгом смысле линиями тока, фактически эти линии являются траекториями частиц маркеров, которые для стационарной задачи должны совпадать с линиями тока.

Количественное сопоставление результатов расчетов будем проводить по распределению вертикальной компоненты скорости в центральном горизонтальном сечении каверны. На рис. 2 приведены графики вертикальной компоненты скорости в среднем горизонтальном сечении для значения числа Рейнольдса 3200, полученные при помощи программ FLUENT и SigmaFlow на различных по детализации сетках.

Для сопоставления также приводим данные из работы U.Ghia, K.N.Ghia, and C.T.Shin [10], которые были получены на очень подробной сетке – 257×257 узлов и считаются эталонным решением данной задачи.

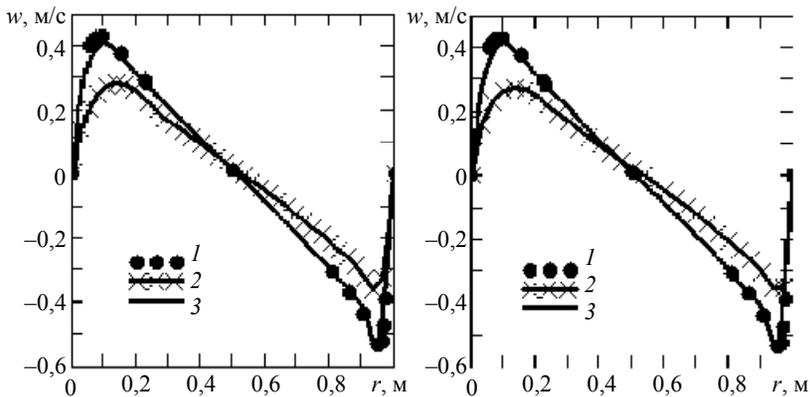


Рис. 2. Вертикальная скорость в центральном горизонтальном сечении каверны $Re = 3200$: 1 – расчет U.Ghia, K.N.Ghia, and C.T.Shin, 2 – сетка 30×30 , 3 – сетка 100×100 (слева – SigmaFlow, справа – FLUENT)

Как видно из графиков, решение, полученное на детальной сетке, для обеих программ хорошо согласуется с эталонным решением U. Ghia, K.N. Ghia и C.T. Shin. Сопоставление решений друг с другом показало, что они практически полностью совпадают. Максимальное отклонение двух решений по форме профиля скорости друг от друга составляет порядка 0,5 % на грубой сетке. На детальной сетке это отклонение уменьшается.

Ламинарное закрученное течение в банке

В следующей задаче рассмотрено 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 [12] 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 [12] 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 проведены расчеты режима без распада, $H/R = 1$, $Re = 1800$, экспериментальные данные профилей скорости взяты из работы [13] полученные Michelsen;

При моделирование задавались следующие параметры: высота цилиндра $H = 1$ м, его радиус $R = 1$ м, плотность жидкости $\rho = 1$ кг/м³, вязкость зависит от числа Рейнольдса, верхняя крышка вращается со скоростью $\Omega = 1$ рад/с. В результате исследования влияния детализации сетки на сходимость задачи была выбрана трехмерная сетка 580 тысяч узлов.

Картина течения в банке при данных параметрах показана при помощи изолинии модуля скорости в центральном вертикальном сечении банки на рис. 3. Как видно из сравнения изолиний модуля скорости, структура потока, полученная в расчетах при помощи различных пакетов, очень похожа.

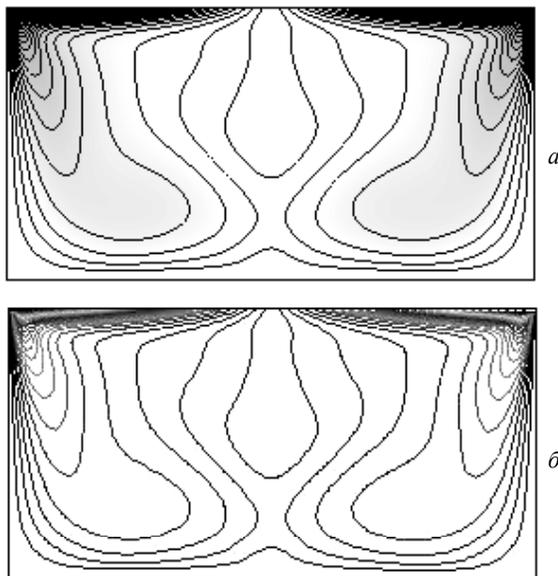


Рис. 3. Изолинии модуля скорости:
a – SigmaFlow; *б* – FLUENT

Количественное сопоставление численных результатов, полученных на сетке 580 тыс. ячеек, друг с другом и экспериментом [13], показаны на рис. 4, 5.

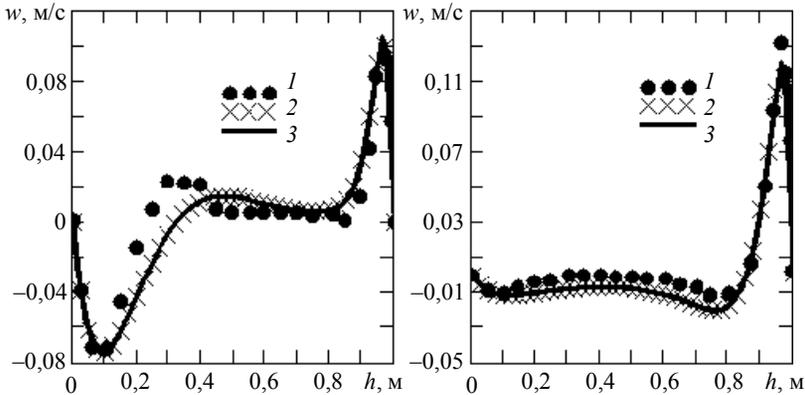


Рис. 4. Распределение радиальной компоненты скорости вдоль вертикальной линии $r = 0.6$ (левый рисунок) и $r = 0.9$ (правый): 1 – эксперимент, 2 – FLUENT, 3 – SigmaFlow

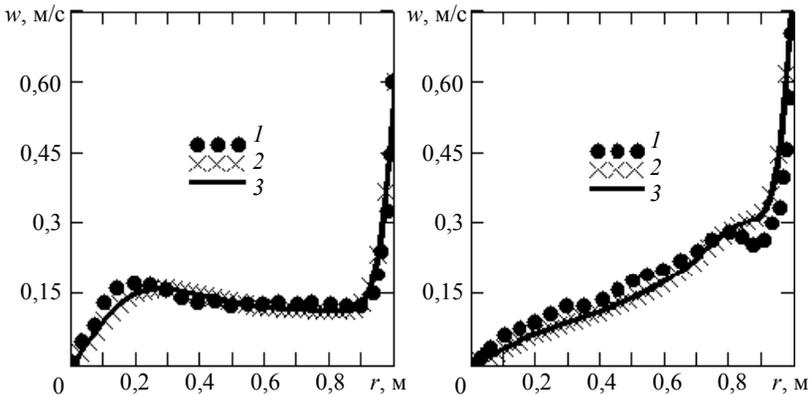


Рис. 5. Распределение тангенциальной компоненты скорости вдоль вертикальной линии $r = 0,6$ (левый рисунок) и $r = 0,9$ (правый): 1 – эксперимент, 2 – FLUENT, 3 – SigmaFlow

Как видно из представленных графиков, результаты расчетов, полученные, при помощи SigmaFlow и FLUENT, практически совпадают друг с другом и хорошо описывают данные эксперимента [13].

Сравнение быстродействия программных комплексов представлено на рис. 6 и в таблице. На рис. 6 приведено сравнение графиков невязки модуля скорости при сходимости задачи к стационарному решению. Количественно сравнение невязок проводить некорректно, потому что в разных программах эти величины нормируются по-разному, но тем не менее видно, что динамика итерационного процесса в обоих пакетах сходная. Кроме того, полная сходимость итерационного процесса для SigmaFlow и FLUENT достигается примерно за одинаковое количество итераций (порядка 2000). В таблице приведено время, за которое для данной задачи выполняется определенное количество итераций. Расчеты проведены на машине Core2 Duo 6600 с частотой 2400 МГц с 2 ГБ оперативной памяти в однопроцессорном режиме. Видно, что решение данной задачи в программе SigmaFlow на 15 % превосходит по скорости счета пакет FLUENT.

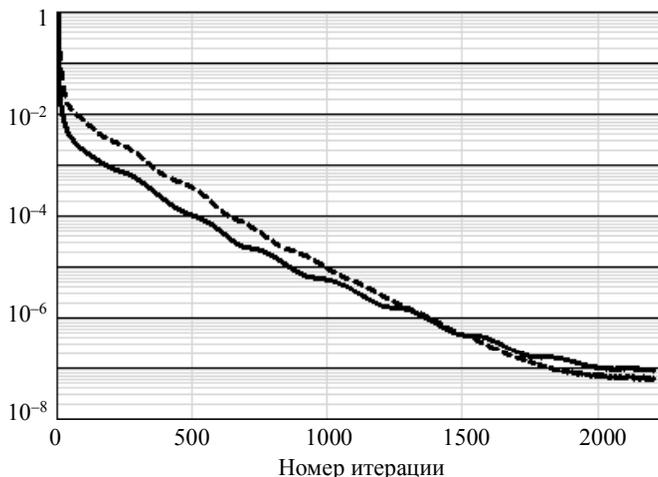


Рис. 6. График сходимости компоненты скорости, сетка 580 тысяч узлов (сплошная – Fluent; пунктир – SigmaFlow)

Сравнение быстродействия программ

Количество итерации	Время, с		
	FLUENT	SigmaFlow	Различие, %
600	4018	3506	15
700	4725	4105	15
800	5462	4700	16
1000	6856	5869	17

Ламинарное течение в изогнутой на 90° градусов трубе круглого сечения

В следующей задаче рассматривается ламинарное течение жидкости в круглой трубе, изогнутой под углом 90°. В гидравлике такие изогнутые каналы принято называть гibaми. Особенностью течений в гibaх 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 [14].

Геометрия гiba представлена на рис. 7. Длина вертикального участка канала 212 мм. Длина горизонтального участка 480 мм. Средний радиус гiba $R = 134,4$ мм. Диаметр канала всюду одинаков и равен $D = 48$ мм.

На входе в гиб задавался представленный на рис. 7. 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/м³, динамическая вязкость 0,001 Па·с). В задаче рассматривается однофазное течение с постоянной плотностью, без учёта силы тяжести.

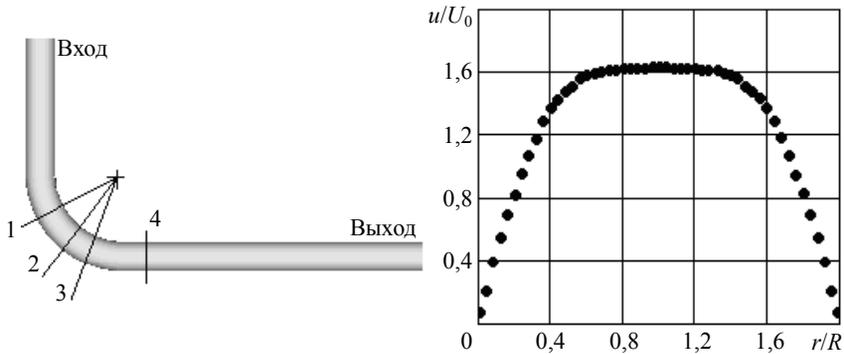


Рис. 7. Геометрия канала со схемой сечений для измерения (1 – 30° , 2 – 60° , 3 – 75° , 4 – $x/D = 1$) и профиль скорости на входе в гиб

На выходе изгиба 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 $U_0 = 0,0105$ м/с. По оси X на графиках отложено, обезразмеренное на радиус трубы $R = 24$ мм, расстояние между стенками канала. В ходе предварительных тестовых расчетов было показано, что для данной задачи удовлетворяет сетка 430 тысячи узлов.

На рис. 8, 9 приведены результаты численного моделирования и сопоставление их с экспериментальными данными [14].

Как видно из представленных графиков, численные решения, полученные при помощи SigmaFlow и FLUENT, близки к экспериментальным данным и практически полностью совпадают с друг другом. Максимальное отклонение двух решений по форме профиля скорости друг от друга не превышает 0,2 %. Анализ вычислительной производительности показал, что полная сходимость итерационного процесса для обеих программ достигается примерно за одно и то же количество итераций (около 1500), времена счета также близкие (SigmaFlow на 10 % быстрее).

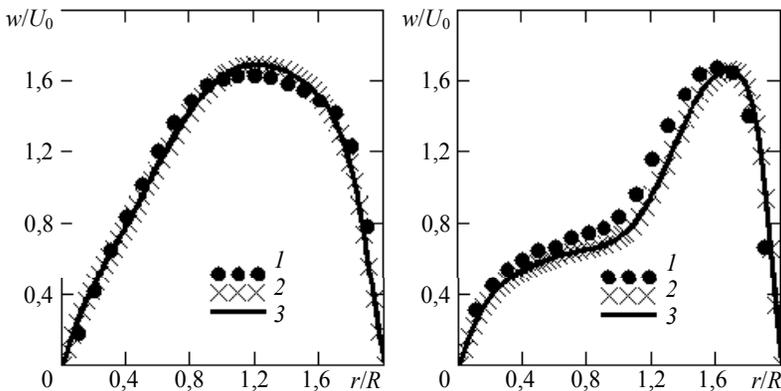


Рис. 8. Профиль модуля скорости в центральном поперечном сечениигиба: 1 – эксперимент, 2 – FLUENT, 3 – SigmaFlow (слева – угол 30° , справа – угол 60°)

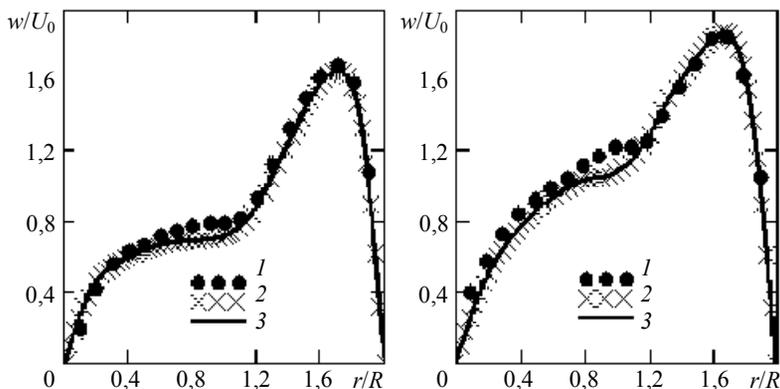


Рис. 9. Профиль модуля скорости в центральном поперечном сечении гiba: 1 – эксперимент, 2 – FLUENT, 3 – SigmaFlow (слева – угол 75° , справа – $x/D = 1$)

Заключение

Таким образом, в данной работе проведено тестирование прикладных пакетов программ SigmaFlow и FLUENT на ряде классических тестовых ламинарных задачах.

Как видно из результатов сравнения двух программных комплексов, результаты расчётов практически совпадают между собой, можно сказать, что отклонения незначительны и находятся в пределах погрешности методов. Из сравнения результатов быстродействия видно, что специализированный CFD-пакет SigmaFlow считает подобного рода задачи примерно на 10–15 % процентов быстрее, чем универсальный пакет FLUENT.

Вполне удовлетворительное согласие численных прогнозов, полученных на различных сетках и различных программах, с имеющимися экспериментальными данными служит не только достаточным основанием для верификации пакета SigmaFlow, но и в целом повышает доверие к полученной расчетной информации. А также говорит об адекватности разработанных численных методик решений уравнений Навье – Стокса и иллюстрирует приемлемость данных программных продуктов для описания ламинарных течений.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что специализированные программные комплексы, разрабатываемые отдельными научными группами, институтами, заслуживают своего внимания. У них существует ряд преимуществ перед универсальными коммерческими пакетами, это, в первую очередь, гибкость расчётного алгоритма и программного обеспечения, которые могут настраиваться на определённый круг задач по мере необходимости. Как показывают результаты данной работы, специализированные программные комплексы не уступают универсальным пакетам, как в точности, так и в производительности. Также к плюсам можно отнести относительную доступность данных кодов, так как, как правило, подобного рода софт является полукommerческим и может находиться в свободном доступе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилов А.А., Минаков А.В., Дектерев А.А., Рудяк В.Я. Численный алгоритм для моделирования ламинарных течений в кольцевом канале с эксцентриситетом // Сиб. журн. индустр. матем. 2010. Т. 13. № 4. С. 3–14.

2. *Minakov A.V., Rudyak V.Ya., Gavrilov A.A., Dekterev A.A.* On optimization of mixing process of liquids in microchannels // *J. Siberian Federal University. Mathematics & Physics.* 2010. V. 3(2). P. 146–156.
3. *Рудяк В.Я., Минаков А.В., Гаврилов А.А., Дектерев А.А.* Моделирование течений в микромиксерах // *Теплофизика и аэромеханика.* 2010. Т. 17. № 4. С. 601–612.
4. *Patankar S.V.* Numerical heat transfer and fluid flow. Washington, DC, Hemisphere, 1980. P. 180.
5. *Ferziger J.H. and Peric M.* Computational methods for fluid dynamics. Berlin: Springer Verlag, 2002. P. 423.
6. *Leonard B.P.* A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation // *Comp. Math. Appl. Mech. Eng.* 1979. V. 19. P. 59–98.
7. *Белов И.А.* Моделирование турбулентных течений: учеб. пособие БГТУ. 2001. Вып. 10. С. 107.
8. *Быстров Ю.А.* Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев. М.: Судостроение, 2005. С. 389.
9. *Kim S.-W.* A velocity-pressure integrated, mixed interpolation, Galerkin finite element method for high Reynolds number laminar flows / S.-W. Kim // NASA. Report CR-179264. 1988. P. 1988.
10. *Ghia U., Ghia K.N., and Shin C.T.* High-Re solutions for incompressible flow using the Navier – Stokes equations and a multigrid method // *J. Computational Physics.* 1982. V. 48. P. 378–411.
11. *Исаев С.А.* Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев. СПб.: Судостроение, 2005. 392 с.
12. *Escudier M.P.* Observations of the flow produced in a cylindrical container by a rotating endwall // *Exp. in Fluids.* 1984. V. 2. No. 4. P. 189–196.
13. *Michelsen J.A.* Modeling Incompressible Rotating Fluid Flow, AFM 86-05, Ph.D. Dissertation, Department of Fluid Mechanics, Technical University of Denmark, 1986.
14. *Enayet M.M., Gibson M.M.* Laser Doppler measurements of laminar and turbulent flow in pipe bend // NASA contractor report 3551. 1982.
15. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970. 840 с.

Статья поступила 09.04.2012 г.

Platonov D.V., Minakov A.V., Gavrilov A.A., Dekterev A.A., Kharlamov E.B. COMPARATIVE ANALYSIS OF CFD SIGMAFLOW AND FLUENT PACKAGES BY THE EXAMPLE OF SOLVING LAMINAR TEST PROBLEMS. This paper presents a comparative analysis of two software systems for solving computational fluid dynamics: SigmaFlow and Fluent. With the help of the programs, several laminar test problems were solved. The results are compared with each other and with experimental data and calculations of other authors.

Keywords: Computational fluid dynamics, Fluent, SigmaFlow, Navier-Stokes equations, CFD packages, laminar flow.

PLATONOV Dmitriy Viktorovich (Siberian Federal University)

E-mail: platonov-08@yandex.ru

MINAKOV Andrey Viktorovich (Siberian Federal University)

E-mail: tov-andrey@yandex.ru

KHARLAMOV Yegor Borisovich (Heat and mass transfer department of Siberian branch of Russian science academy)

DEKTEREV Aleksandr Anatolievich (Siberian Federal University)

E-mail: dekterev@mail.ru