УДК 532.529.5

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ CFD КОДА SIGMAFLOW ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Минаков А.А.

Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Данная работа посвящена новым возможностям программы SigmaFlow для моделирования течений в микроканалах, закрученных течений, кавитационных течений и течений со свободной поверхностью.

ВВЕДЕНИЕ

Рыночные отношения все больше заставляют промышленные предприятия обращать внимание на эффективное использование имеющегося технологического оборудования. Инженерные подходы для оптимизации режимов работы оборудования уже не достаточны и поэтому все чаще привлекаются в качестве дополняющих или альтернативных методы математического моделирования. На данный момент в мире существует достаточно большое количество зарубежных «универсальных» коммерческих программных продуктов, позволяющих проводить моделирование гидродинамических и теплофизических процессов, таких как STAR-CD, Fluent, CFX и др., однако, их распространение в России сдерживают достаточно большие финансовые затраты, которые связаны не только с покупкой самой программы, но и с обучением и сопровождением программы. В связи с этим разработка и развитие возможностей собственных программ, позволяющих эффективно решать инженерные задачи, является по-прежнему актуальной задачей.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ SIGMAFLOW

Программа SigmaFlow – это универсальный некоммерческий программный продукт для решения широкого класса задач гидродинамики, тепломассообмена и горения, развиваемый 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 и 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;
- химическое реагирование и процессы смешения в многокомпонентных смесях;
- горение газообразного, жидкого и твердого топлива;
- движение дисперсной фазы в несущем потоке (твердые частицы, капли, пузыри);
- процессы сушки и пиролиза, химического реагирования дисперсной фазы;
- задачи со свободными границами;
- движение твердых тел в газовом потоке;
- деформация твердого тела;
- течения с фазовыми переходами (плавление – кристаллизация);
- кавитационные течения;
- течения с объемными силами.

Программа SigmaFlow, как и все универсальные программы, позволяет формировать геометрию расчетного объекта, готовить расчетные сетки, выполнять собственно вычисления и проводить анализ результатов моделирования с использованием графических средств. Последние версии программы позволяют выполнять высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах под управлением Windows или Linux операционных систем.

Численная методика, заложенная в программу, основывается на методе конечного объема для неструктурированных сеток, что обеспечивает кон-

© Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Минаков А.А.

сервативность алгоритма и позволяет моделировать процессы в геометрически сложных объектах. Для аппроксимации дифференциальных уравнений используются устойчивые схемы высокого порядка точности. Связь между полями скорости и давления реализуется при помощи процедуры расщепления. Системы разностных уравнений решаются итерационным способом с применением многосеточных методов.

Коллективом разработчиков программы SigmaFlow накоплен большой опыт расчета «реальных» прикладных задач:

- в энергетике при моделировании аэродинамики, горения и теплообмена в топочных камерах, при исследовании потока газа в газоходных системах, при оптимизационном моделировании с целью снижения экологически вредных выбросов, при расчетной оптимизации горелочных устройств для сжигания пылеугольного топлива, при расчете пылегазовых потоков в циклонных аппаратах, сепараторах, при анализе нестационарных и кавитационных течений в проточных трактах гидротурбин и насосной техники;
- в металлургии при моделировании устройств с факельным горением, при оптимизации работы горелок по дожиганию электролизных газов, при моделировании МГД-течений расплава металла, при кристаллизации слитков, при совершенствовании газоотсосных систем корпусов, при моделировании аэродинамики запыленных потоков, при комплексном расчетном исследовании газоходной системы цеха с моделированием характеристик оборудования (вращающиеся печи, холодильные камеры, котлы утилизаторы, батарейные циклоны), при оптимизации режимов работы компрессорных установок;
- в химических технологиях при расчете аэродинамики и смешения газов в химических реакторах, при анализе гидравлических клапанов резервуаров нефтепродуктов, при моделировании физико-химических процессов в пористых средах, при исследовании течения в вихревых аппаратах;
- в экологии и безопасности производств при исследовании распространения вредных выбросов в промышленных корпусах, при оптимизации режимов вентиляции помещений и зданий, при моделировании развития пожаров в помещениях, при исследовании вероятностей возгорания строений и т.д.

Существует учебная версия программы, предназначенная для обучения основным навыкам работы с современными CFD программами. Она позволяет проводить расчетные исследования пространственных ламинарных и турбулентных изотермических потоков. Учебная версия программы сопровождается методическим материалом, включающим в себя описание физико-математических моделей, методы и алгоритмы, реализованные в программе, инструкции по работе с графическим интерфейсом, построению геометрии и расчетной сетки.

Ниже описаны новые модели, реализованные в программе SigmaFlow, и приведены примеры их использования.

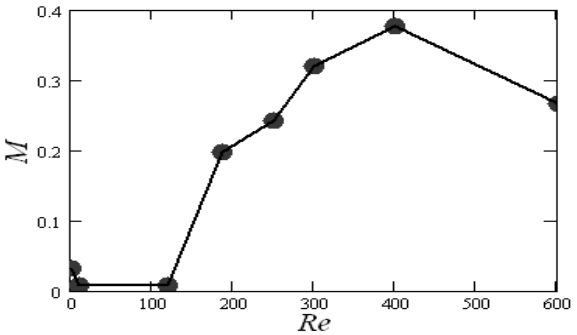
ТЕЧЕНИЯ В МИКРОКАНАЛАХ

Бурное развитие изучения микротечений жидкости и газа, наблюдающееся в последнее двадцатилетие, мотивировано появлением большого числа микроэлектромеханических систем (МЭМС), а позднее и нанотехнологий, в которых микротечения являются важным элементом.

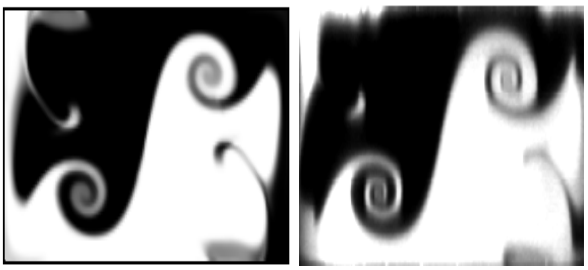
В настоящей работе течение в микроканалах моделируется посредством численного решения уравнений Навье – Стокса. Оценки показывают, что такое описание адекватно для микроканалов с минимальным характерным размером порядка 50÷100 мкм. Тестирование применимости данного подхода было проведено на большом числе задач гидродинамики в микроканалах. Показано хорошее согласование.

При помощи численного моделирования проведено изучение процесса смешения в пассивных T, Y, Z - образных микромиксерах. Выполнена оптимизация процесса смешения в пассивном T-образном миксере. Существенно повысить скорость смешения удалось за счет введения в микроканал вставок прямоугольного сечения. При этом исследовано влияние количества вставок, их взаимного расположения и размера на характеристики смешения и сопротивления канала. В целях уменьшения сопротивления микроканала было изучено влияние гидрофобных и ультрагидрофобных покрытий стенок канала. Показано существенное падение сопротивления при практически неизменных характеристиках смешения.

Тем не менее, эффективность смешения в подобного рода устройствах продолжает оставаться низкой. В работе Хоффмана [1] экспериментально было показано резкое увеличение скорости перемешивания жидкостей в T- образном миксере в переходных режимах течения ($150< Re< 700$). При помощи численного моделирования были исследованы переходные режимы течения и смешения в T - образном микромиксере. На рисунке 1 приведена картина смешения жидкостей в T - образном микромиксере размерами 300×600×2000 мкм в переходном режиме. Как видно из рисунка, такой режим течения приводит к существенному увеличению скорости смешения. Получены зависимости эффективности смешения от числа Рейнольдса и диффузионного числа Пекле. Получено хорошее качественное и количественное согласование с экспериментальными данными [1].



Зависимость эффективности смешения от числа Re



Концентрация краски в поперечном сечении канала: слева – расчет, справа -эксперимент

Рис.1. Перемешивание жидкостей в Т - образном микроканале

ЗАКРУЧЕННЫЕ ТУРБУЛЕНТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ

Закрученные потоки находят широкое применение в различных технологических процессах, например, для стабилизации пламени, улучшения смешения, сепарации частиц, в элементах проточного тракта гидравлических электростанций. Получившее широкое распространение в инженерных расчетах двухпараметрические RANS модели турбулентности плохо описывают такие течения. Для улучшения моделирования турбулентных закрученных течений пытаются, как модифицировать существующие RANS модели, так и использовать методы, в которых разрешаются крупномасштабные турбулентные вихри (LES, DES).

В работе [2] была предложена поправка к модели Спаларта-Алмароса (SARC). Впоследствии в работе [3] эта поправка была обобщена на k-ω SST модель Ментера (модель k-ω SST-CC). Данная поправка состоит в коэффициенте, ограничивающем генерацию турбулентности в областях закрученного течения.

Метод DES сочетает подходы RANS и LES. В областях потока, где размер вычислительной сетки Δ достаточен для разрешения энергонесущих вихрей, применяется метод LES, а в остальной области – RANS.

Указанные модели турбулентности реализованы в программном комплексе SigmaFlow.

Для анализа применимости этих моделей рассмотрен ряд закрученных турбулентных течений: концентрированный вихрь в трубе, закрученное течение в круглом прямом диффузоре и вихревое течение после внезапного расширения.

Турбулентное вихревое течение в трубе представляет собой эволюцию концентрированного вихря в канале. Число Рейнольдса составляло $\mathrm{Re} = 5 \cdot 10^4$ и $\mathrm{Re} = 3 \cdot 10^5$. Параметр закрутки на входе составлял Sw = 0,17.

Результаты расчетов с использованием двухпараметрических моделей (стандартная k-ε, k-ε модель Чена и k-ω SST) почти не отличаются друг от друга. Использование модели Спаларта-Алмароса существенно сказывается на течении вблизи вихревого ядра: уменьшается радиус вихря и, соответственно, увеличивается максимальная тангенциальная скорость. Использование поправок, предложенных в [2] и [3], позволяет улучшить согласие с экспериментом. Наилучшие результаты из всех подходов получаются при использовании модели SARC.

Clausen рассмотрел вихревое течение в круглом прямом диффузоре. Закрутка потока составляла Sw ≈ 0,3. При данных параметрах закрутки и угла расширения поток не отрывается от стенок диффузора, и, в то же время, не образуется зона рециркуляции на оси течения. Сравнение различных моделей турбулентности показывает, что профили компонент скорости практически не отличаются друг от друга, различие проявляется только ближе к концу диффузора. Можно отметить, что модель k-ω SST лучше воспроизводит профиль тангенциальной скорости. Модель SA также хорошо воспроизводит профиль тангенциальной компоненты скорости V, но завышает компоненту скорости W на оси.

Для исследования прецессии вихревого ядра в работе [4] были проведены измерения закрученного турбулентного потока в канале с внезапным расширением. В данных расчетах проводилось моделирование закрученного потока при числе Рейнольдса Re = 30000 и параметре закрутки Sw = 0,6.

В данной задаче рассчитанные по RANS моделям профили компонент скорости во всех сечениях существенно отличается от экспериментальных. Использование поправки на кривизну линий тока несколько улучшает совпадение с экспериментом, но профили компонент скорости всё равно остаются достаточно далекими от эксперимента. Только расчет с помощью метода DES позволяет получить хорошее совпадение с экспериментом.

КАВИТАЦИОННЫЕ ТЕЧЕНИЯ

Кавитационные режимы течения жидкости формируются в широком классе технологических устройств – форсунки, насосы, гидротурбины. Кавитация может приводить к негативному влиянию на оборудование (кавитационная эрозия поверхностей), а может использоваться для эффективного измельчения твердых материалов.

В программе SigmaFlow моделирование кавитационного турбулентного течения проводится в рамках приближения квазигомогенной двухфазной среды. Для описания переноса паровой фазы выбран ряд моделей, апробированных для задач кавитационных течений с хорошо обтекаемыми профилями (лопасти, гидрокрылья).

Моделирование турбулентного течения двухфазной среды базируется на нестационарной формулировке RANS подхода и на гибридном DES методе. Для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений движения используются двухпараметрические модели турбулентности: модифицированная k-ε модель и двухслойная k-ω модель Ментера.

Отлажен эффективный метод моделирования стационарных и нестационарных кавитационных течений на основе методики расщепления, позволяющий описывать сильные нелинейные связи между полями давления, плотности и скорости.

Тестирование программы проводилось на задачах стационарного кавитационного обтекания гидрокрыла и цилиндрических тел.

Выполнено численное исследование течения при обтекании гидрокрыла, предсказывающее развитие автоколебательного режима кавитационного обтекания (рис.2). На стороне разрежения гидрокрыла вблизи головной части формируется кавитационная каверна (пленочный режим). В хвосте каверны наблюдается возвратное течение, приводящее к отрыву паровой каверны и развитию пузырькового режима обтекания.

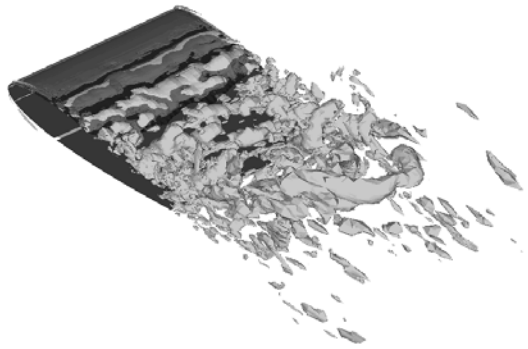


Рис.2. Паровые облака и вихревые структуры (λ2)

Полученные численные результаты сопоставляются с имеющимися экспериментальными данными по распределению поля давления, по числу Струхаля и максимальной длины присоединенной паровой каверны.

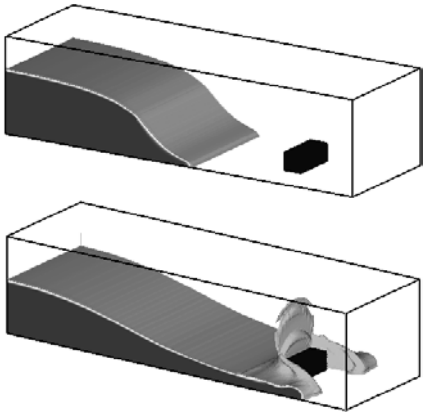
ТЕЧЕНИЯ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Течения несжимаемой жидкости с подвижными границами широко распространены как в природных явлениях, так и в различных технологических процессах. С практической точки зрения наибольший интерес представляют два вида течений с подвижной границей: течения со свободной поверхностью и течения с движущимися телами. Течения жидкости со свободной поверхностью играют огромную роль в природе и технике: поверхностные волны, капли, струи, пузыри, пленки. Процессы, связанные с течениями жидкости с движущимися твердыми телами, имеют большое значение в промышленности и встречаются в различных устройствах: турбины, клапаны, насосы, миксеры, корабельная и авиационная техника. Экспериментальное исследование подобного рода задач сопряжено со значительными трудностями и затратами, поэтому разработка эффективного и надежного численного алгоритма, способного достоверно описывать течения жидкости с подвижными границами раздела, является актуальной задачей.

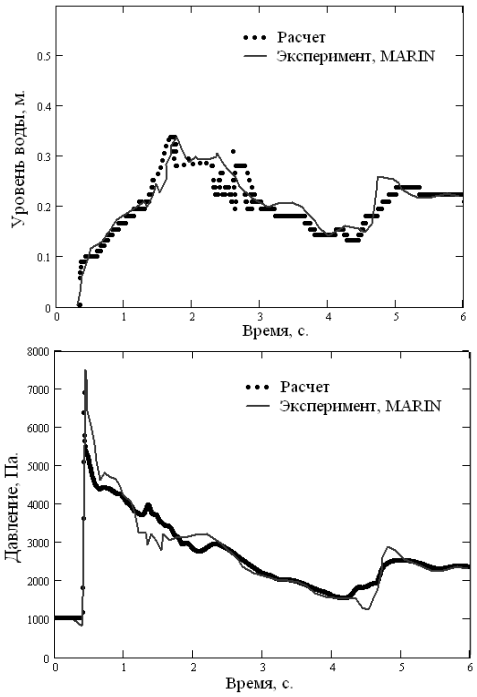
Для моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости с движущимися твердыми телами предложен алгоритм переноса объемной доли твердого тела в расчетной ячейке. Данный алгоритм можно рассматривать как расширение классического метода жидкости в ячейках Хирта [5] на решение задач с подвижными телами.

Задача о разрушении дамбы является одним из самых распространенных тестов для алгоритмов решения задач со свободной поверхностью. Постановка этой задачи следующая. Стенка ограничивает столб, в начальный момент расчета стенка мгновенно удаляется, и под действием силы тяжести жидкость растекается по расчетной области. Трехмерность задачи обусловлена наличием препятствия конечного размера, установленного на пути движущейся воды [6]. На рис.3а приведена качественная картина течения жидкости в различные моменты времени после начала движения.

Количественное сравнение с экспериментом приведено на рис.3б. Сопоставление проводилось по уровню жидкости над точкой, расположенной на дне бассейна около бруска, а также по давлению в точке, расположенной на левой грани бруска.



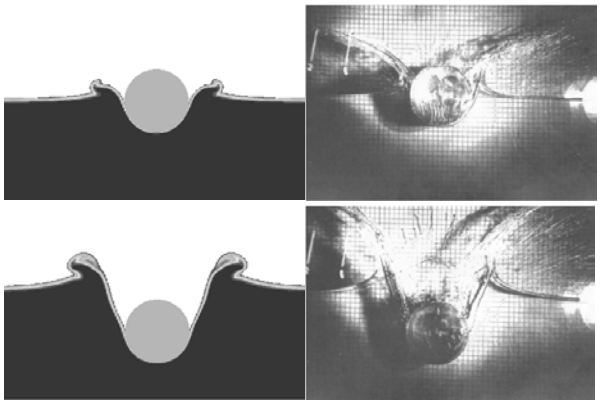
а) форма свободной поверхности воды в моменты времени 0.25с и 0.6с



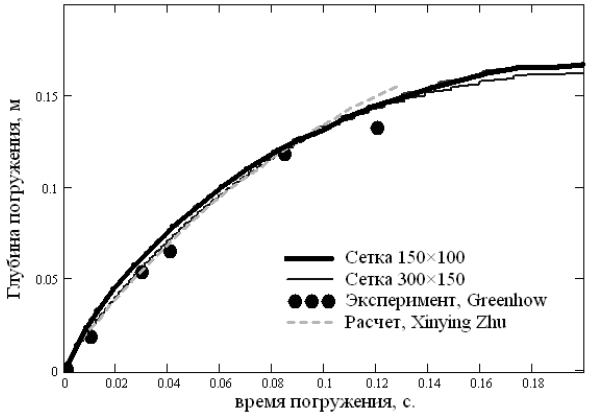
б) сопоставление с экспериментом

Рис.3. Результаты моделирования разрушения дамбы

Тестирование предложенного алгоритма для движущегося тела, взаимодействующего с жидкостью со свободной поверхностью, проведено на примере погружения и всплытия твердого круглого цилиндра. Результаты численного решения этих задач были сопоставлены с экспериментальными данными Greenhow M. и Lin W.M [7]. Качественное сопоставление результатов расчета с экспериментальными фотографиями приведено на рис.4а. Видно, что качественно расчетные изолинии повторяют очертания свободной поверхности воды на экспериментальных фотографиях. Существенные различия наблюдаются в области выплескивания жидкости, где образуется множество мелких капелек и струй (брызги), для разрешения которых требуется очень детальная расчетная сетка.



а) форма поверхности воды в моменты времени 0.03с и 0.085с



б) сопоставление результатов расчетов всплытия цилиндра с экспериментом и расчетами других авторов

Рис.4. Результаты моделирования погружения и всплытия цилиндра

На рис.4б приведено количественное сравнение результатов расчетов погружения цилиндра с экспериментом и результатами расчетов Xinying Zhu [8]. В обоих случаях согласование достаточно хорошее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены новые модели и алгоритмы, реализованные в универсальной программе SigmaFlow. Представлены результаты тестирования программы на примерах задач движения жидкости в микроканалах, закрученных потоков, кавитационных течений и течений со свободной поверхностью. Представленные примеры подтверждают эффективность реализованных моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. M.Hoffmann, M.Schluter, N.Rabiger. Experimental investigation of liquid–liquid mixing in T-shaped micro-mixers using μ-LIF and μ-PIV. Chemical Engineering Science. 2006. Vol. 61. P.-2968 – 2976
2. Spalart P.R., Shur, M.L. On the Sensitization of Turbulence Models to Rotational and Curvature // Aerospace Science and Technology. – 1997. – Vol. 1, No 5. – pp. 297 – 302.
3. Smirnov P., Menter F. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term // Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air, GT 2008, Germany, Berlin, June 9-13, – 2008.
4. Dellenback P.A. Measurments in turbulent swirling flow through an abrupt expansion // AIAA J. – 1988. – Vol. 26, № 6. – pp. 669 –681.
5. C.W.Hirt, B.D.Nichols. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. J. Comput. Phys., 39:201-225, 1981.
6. R.Wemmenhove. Numerical simulation of two-phase flow in offshore environments. / R. Wemmenhove // Proefschrift rijksuniversiteit Groningen. 2008. P.-141.
7. M.Greenhow. Water entry and exit of a horizontal circular cylinders. / M. Greenhow, S. Moyo // Phil. Trans. R. Soc. Vol. 355. P.-551-563.
8. Xinying Zhu. Application of the CIP Method to Strongly Nonlinear Wave-Body Interaction Problems Doctoral thesis for the degree of doktor ingeniør Trondheim. 2006.