

Использование метода ВВТД для решения задач термогидродинамики

Я.А. Дынников, Т.В. Малахова
НИИ механики МГУ

Введение. Методы вязких вихревых и вихре-тепловых доменов (ВВД и ВВТД) основаны на разработанных в МГУ [1–4] бессеточных подходах к численному моделированию произвольных плоских движений вязкой несжимаемой жидкости и движений погруженных в нее тел с учетом теплопередачи и тепловой конвекции. К настоящему времени данный подход успешно апробирован на примерах решения ряда модельных задач, имеющих аналитические и экспериментальные аналоги.

Авторы настоящей работы занимаются разработкой универсального программного комплекса для суперкомпьютерного моделирования на базе методов ВВД/ВВТД. Первая версия кодов этого комплекса – программный комплекс «VVDFlow» запатентован [5]. С помощью этих кодов исследован ряд новых задач, имеющих фундаментальное и прикладное значение, в том числе осуществлено моделирование эффектов нестационарной теплопередачи при отрывном обтекании колеблющегося цилиндра и моделирование явлений самодвижения биоподобных подводных объектов за счет деформации формы их поверхности.

Интенсификация теплоотдачи нагретого цилиндра. Поперечное обтекание нагретых цилиндров является одним из основных процессов при работе многих теплообменных аппаратов [6].

В ряде случаев, например, при повышении расхода жидкости через теплообменник, возникают упругие автоколебания цилиндрических элементов, что может приводить к существенным изменениям структуры течения и интенсивности теплопередачи. В литературе известны некоторые численные исследования влияния осцилляций цилиндра на характер нестационарных отрывов потока и структуру соответствующих вихревых систем, однако влияние этих явлений на теплопередачу не выяснено.

Расчеты [7-8], выполненные с помощью метода ВВТД, указывают на значительное влияние вторичных отрывов на величину нестационарной теплоотдачи. Этот факт проиллюстрирован на рис. 1, где показаны поля температур неподвижного цилиндра (слева) и цилиндра, колеблющегося поперек потока (справа). Данные результаты соответствуют обтеканию цилиндра диаметром 10 см водой со скоростью 10 см/с. Слева на рис. 1 – неподвижный цилиндр, справа – колеблющийся с амплитудой 4 см и частотой 0.5 Гц. Теплоотдача при таких колебаниях увеличилась на 20%. Видно значительное изменение картины течения. Точками на поверхности отмечены мгновенные положения границ отрыва и присоединения вторичных пограничных слоев на цилиндре.

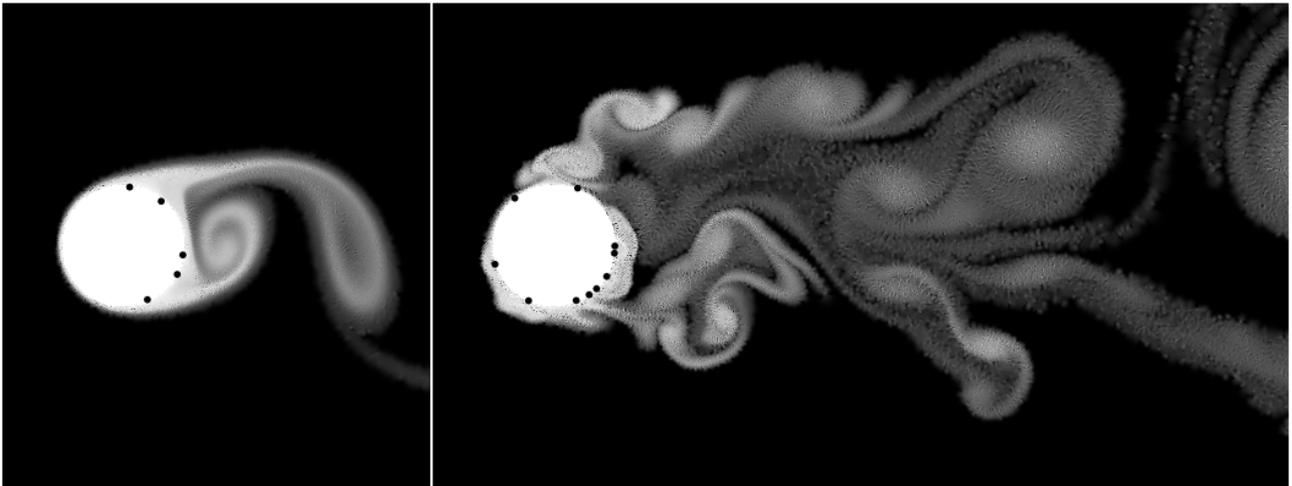


Рис. 1. Мгновенные поля температур около неподвижного (слева) и вертикально колеблющегося (справа) цилиндров при числе Рейнольдса $Re = 1000$ и числе Прандтля $Pr = 1$.

Задача об обтекании нагретого колеблющегося цилиндра является многопараметрической. Существенное влияние оказывают направление колебаний, числа Рейнольдса и Прандтля, амплитуда и частота колебаний. Это затрудняет представление и интерпретацию получаемых зависимостей. Важным методическим результатом анализа стала возможность введения одного комплексного параметра, названного эффективным числом Рейнольдса $Re^* = Re \sqrt{\langle (\mathbf{V}_\infty - \mathbf{u}_c)^2 / V_\infty^2 \rangle}$, где \mathbf{V}_∞ – скорость набегающего потока, а \mathbf{u}_c – мгновенная скорость цилиндра, угловые скобки означают осреднение по времени на нескольких периодах колебаний цилиндра. Физический смысл Re^* заключается в том, что число Рейнольдса вычисляется не по скорости набегающего потока \mathbf{V}_∞ , а по среднеквадратичной относительной скорости в системе отсчета, связанной с цилиндром.

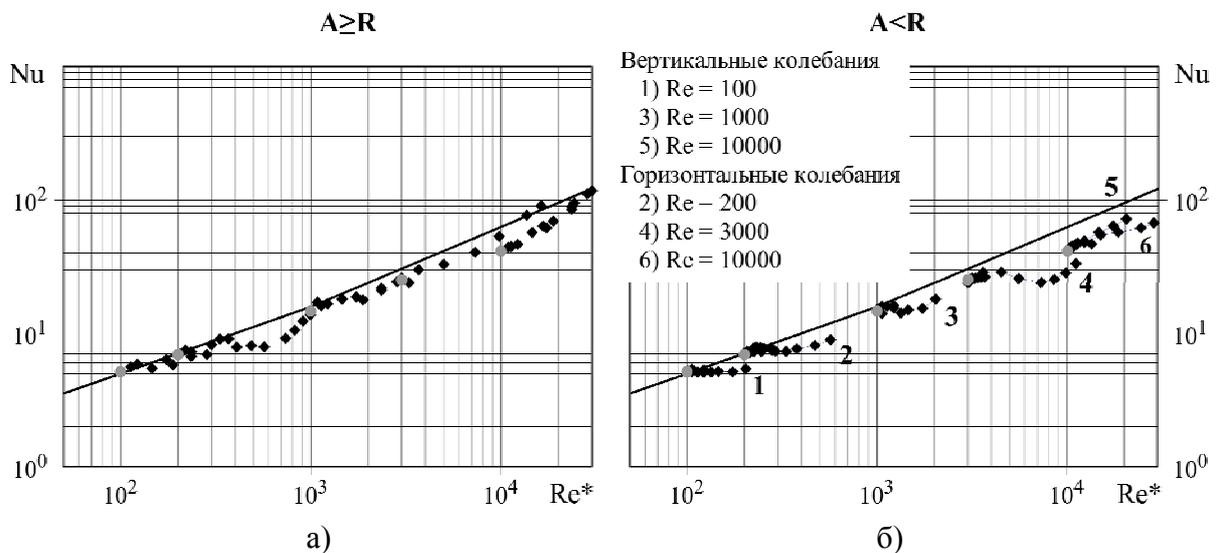


Рис. 2. Зависимость числа Нуссельта Nu от Re^* . Сплошная кривая – эмпирическая зависимость [9], серые точки – результаты расчетов для неподвижного цилиндра, черные маркеры – для колеблющегося цилиндра.

При такой замене параметра, оказывается, что при $A \geq R$ результаты хорошо ложатся на известную эмпирическую кривую $Nu(Re)$ [9] (рис. 2а). Колебания цилиндра приводят к увеличению относительной скорости набегающего потока, и, следовательно, к интенсификации теплообмена. При $A < R$ роста теплоотдачи при колебаниях практически не наблюдается (рис 2б).

Исследование самодвижения некоторых подводных объектов.

Одним из преимуществ бессеточных методов является возможность легко моделировать обтекание произвольно движущихся тел, и в том числе, деформирующихся. Это позволяет ставить и удобно решать сопряженные задачи, когда поток среды влияет на движение тела, а тело – на движение среды. Особенностью данного метода, в отличие от многих известных, является возможность одношагового совместного решения уравнений гидродинамики в частных производных и обыкновенных дифференциальных уравнений движения тела. Благодаря этому становится возможным, в частности, рассчитывать обтекание тел с пренебрежимо малыми инерционными свойствами (массой и моментом инерции).

Построены численные решения модельных задач о самодвижении плоских тел в виде медузы, головастика и рыбы в воде за счет заданных деформаций их тела [10-11].

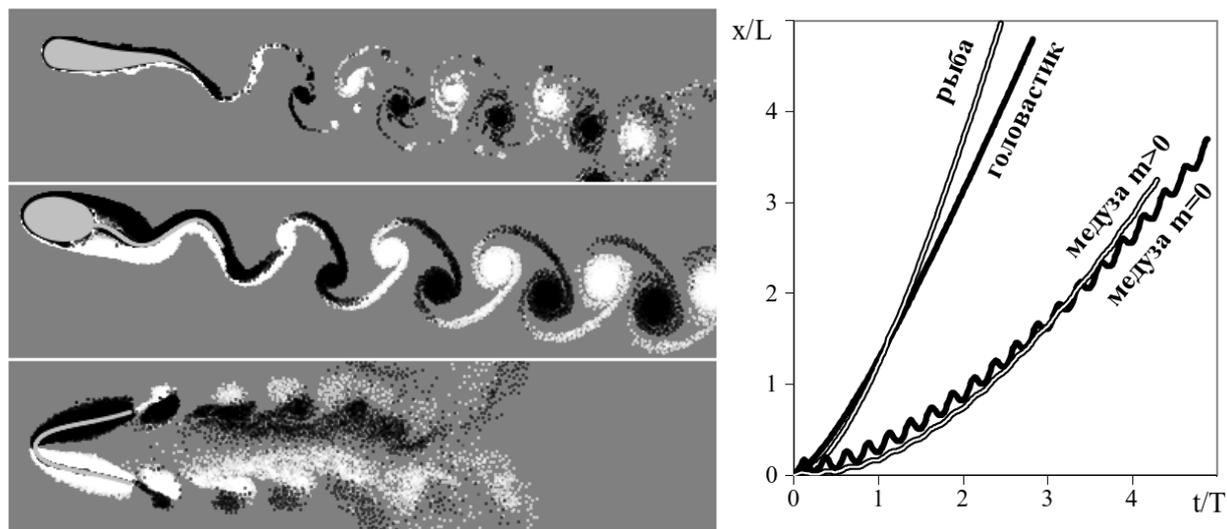


Рис. 3. Движение различных биоподобных тел в жидкости. Слева – формирующиеся вихревые системы, Справа – характеристики результирующего перемещения объектов с течением времени, начиная с момента старта из состояния покоя.

Более детально была рассмотрена упрощенная задача о прямолинейном самодвижении головастика (рис. 4а) в результате взмахов плоским недеформируемым хвостом с разной частотой и амплитудой. Преследовалась цель нахождения параметров колебаний хвоста, при котором для достижения заданной скорости головастик будет потреблять наименьшую мощность (задача на нахождение условного экстремума). Было рассчитано множество режимов движения (пример показан на рис. 4б), исследованы зависимости потребляемой мощности и развиваемой скорости, и было найдено, что при рассмотренных

геометрических параметрах оптимальный режим достигается, когда головастик отклоняет хвост примерно на половину ширины тела (рис. 5).

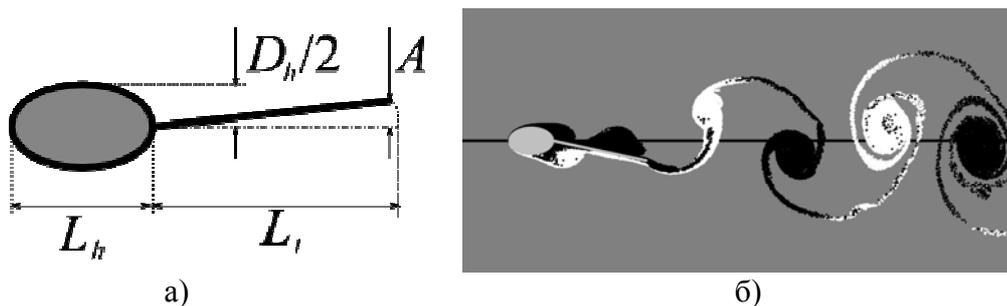


Рис. 4. а) Исследуемая модель головастика. б) Пример обтекания головастика при $\bar{f} = 4$, $2A/D_h = 1.6$

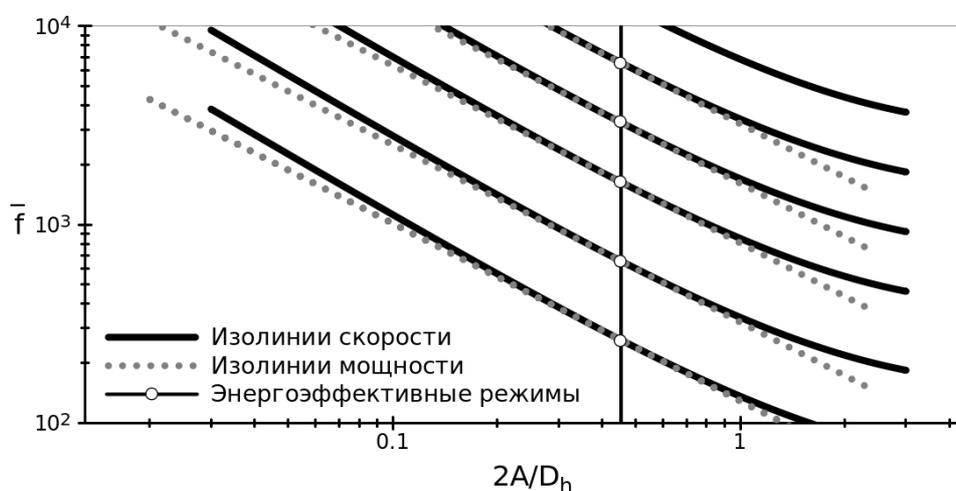


Рис. 5. Изолинии скорости и затрачиваемой мощности в координатах частоты и амплитуды колебаний.

Заключение.

Методы ВВД и ВВДТ являются мощным и удобным инструментом решения широкого класса сопряженных задач динамики и гидродинамики движения тел в сплошной среде, а также нестационарных задач теплофизики. Разработка и реализация соответствующих универсальных вычислительных кодов бессеточного моделирования для суперкомпьютерных платформ актуальна с точки зрения приложений в ряде фундаментальных и инженерных направлений механики.

Список литературы:

1. Дынникова Г. Я. Лагранжев подход к решению нестационарных уравнений Навье-Стокса. / ДАН. 2004. т.399, №1, с.1-5.
2. Андронов П.Р., Гувернюк С.В., Дынникова Г.Я. Вихревые методы расчета нестационарных гидродинамических нагрузок. — М.: Изд-во Моск. унта, 2006. — 184 с.
3. Лагранжев численный метод решения двумерных задач свободной конвекции / П.Р. Андронов, С.В. Гувернюк, Г.Я. Дынникова ; Труды четвёртой

Российской национальной конференции по теплообмену, т.3. Москва, Издательский дом МЭИ, 2006. С. 38-41.

4. Гувернюк С.В., Дынникова Г.Я. Моделирование обтекания колеблющегося профиля методом вязких вихревых доменов / Изв. РАН. Механ. жидкости и газа. 2007. № 1. С. 3–14.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010616504 «VVHDFlow»

6. Быстров Ю.Ф., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб – СПб: Судостроение, 2005. – 392с.

7. Малахова Т.В. Численное моделирование влияния осцилляций нагретого цилиндра на его сопротивление и теплоотдачу / Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах (25-29 октября 2010г., Москва). Т. 2. Вынужденная конвекция однофазной жидкости. - М.: Издательский дом МЭИ, 2010. - с. 173-176.

8. T. Malakhova, G. Dynnikova, S. Guvernuyuk. Investigation of the heat transfer from oscillating cylinders by the VVHD Method / The 5th International Conference of Vortex Flows and Vortex Models. Caserta : 2010 - ISBN 978-88-905218-6-7.

9. Теория тепломассообмена / под ред. А. И. Леонтьева. – М.: Высшая школа. 1979. 496с.

10. Ya. Dynnikov, P. Andronov, S. Guvernuyuk, G. Dynnikova. Numerical Simulation of the Flow-Structure Interaction by the VVD Method / The 5th International Conference of Vortex Flows and Vortex Models. Caserta : 2010 - ISBN 978-88-905218-6-7.

11. Dynnikova G.Ya., Guvernuyuk S.V., Dynnikov Y.A. Modelling locomotion of quasi-biological objects in viscous fluid. / Сборник трудов симпозиума "Taiwan-Russian Bilateral Symposium on Problems in Advanced Mechanics". Под редакцией профессора Ю.Г. Мартыненко. – М.: Изд-во Московского университета, 2010. - с. 58-64.