

Отзыв

официального оппонента о диссертации Рождественской Т.И. «Численное исследование свойств неоднородных жидкостей при обтекании ими кругового цилиндра», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

В диссертации Рождественской Т.И. изучены двумерное и трёхмерное течения стратифицированной (неоднородной в поле силы тяжести) жидкости при обтекании круглого цилиндра с применением разработанного автором комплекса программ для ЭВМ с параллельной архитектурой.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во Введении формулируются цель исследования, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту; достоверность, личный вклад автора, апробация работы, краткое содержание диссертационной работы.

В первой главе диссертации дан обзор известных теоретических и экспериментальных исследований и сделан вывод о недостаточной изученности задачи обтекания прямого кругового цилиндра потоком вязкой стратифицированной жидкости. Представлена постановка задачи и изложены метод расчета и его реализация. В связи с тем, что рассматриваются слабостратифицированные течения, применяются уравнения Навье-Стокса в приближении Обербека-Буссинеска. Выполнено обезразмеривание задачи, в результате чего отмечены основные параметры течения - числа Рейнольдса, Пекле и Фруда. Плотность жидкости считается линейно зависящей от солёности. Детально обсуждаются результаты экспериментальных исследований задачи обтекания, выполненных в Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. Отмечается ограниченность имеющихся аналитических методов исследования. Делается вывод о целесообразности развития метода расщепления по физическим процессам (Белоцерковский, Гуцин, Коньшин) с целью детального исследования тонкой структуры исследуемого течения. Построена

модификация метода расщепления, основанная на явной гибридной конечно – разностной схеме, обладающей свойствами монотонности, минимальными схемной вязкостью и дисперсией и вторым порядком аппроксимации по пространственной переменной. Применяются полярная (двумерная постановка) и цилиндрическая системы координат (трехмерная постановка); осуществляется переход к новой системе координат, в которой расчетные сетки являются равномерными (в исходной системе координат сетки сгущаются в окрестности цилиндра). Разработан комплекс программ, позволяющий проводить расчеты на параллельных компьютерах.

Во второй главе выполнены детальные тестовые расчёты для сравнения с экспериментальными данными ИПМех РАН (лаборатория Чашечкина) двумерных течений с различными значениями параметров Re и Fr . В вычислительном (как и в лабораторном) эксперименте обнаружено, что заблокированная жидкость перед цилиндром окружена полем нестационарных волн, фазовые поверхности которых располагаются на наклонных лучах. Наблюдающиеся в экспериментах высокоградиентные прослойки в следе позади цилиндра впервые выявлены в вычислительном эксперименте.

В третьей главе, в рамках построенной численной модели, осуществлено сравнительное исследование двумерных течений стратифицированной жидкости при обтекании кругового цилиндра с различными значениями периода Вайсяля-Брента, характеризующего стратификацию среды. В ходе численных экспериментов варьировалось также число Рейнольдса (за счет скорости набегающего потока). Показано, что увеличение числа Рейнольдса приводит к уменьшению и исчезновению области блокировки и появлению симметричных зон возвратно-циркуляционного течения. В численных экспериментах наблюдаются прослойки плотности, размывающиеся с ростом числа Рейнольдса. Детально исследуется форма профилей солёности.

Четвертая глава посвящена исследованию эффектов трехмерности при обтекании прямого кругового цилиндра потоком вязкой неоднородной несжимаемой жидкости. Как уже отмечалось выше, вводилась цилиндрическая система координат. В ходе численных экспериментов анализировались мгновенные линии тока в двумерных сечениях. Расчеты проводились до значений 10 периодов плавучести Вайсяля-Брента. Выполненные параметрические численные эксперименты позволили указать диапазон значений чисел Рейнольдса и Фруда, при которых течение остается двумерным. Указаны также параметры течения, при котором оно носит существенно трехмерный характер. В ходе численных экспериментов исследовалась зависимость положения углов отрыва течения от переменной z , направленной по оси цилиндра. Существенно варьировался размер области интегрирования по этой переменной.

Таково краткое содержание диссертации и перечень ее основных результатов.

Актуальность темы диссертации. Течения стратифицированной жидкости играют существенную роль при обтекании тел, в задачах энергетики, экологии, океанографии и геофизики; они являются классическим объектом исследования теоретической, вычислительной и прикладной гидродинамики. Интересным примером стратифицированного течения, имеющего важные приложения, является течение, возникающее при обтекании цилиндра потоком вязкой несжимаемой стратифицированной жидкости. Аналитические методы исследования стратифицированных течений ограничены; экспериментальные исследования очень часто дорогостоящи и далеко не всегда могут дать полную картину течения. Поэтому для их детального исследования необходимо создание численных моделей, и, в частности, методов визуализации структуры и особенностей таких течений.

Основные результаты, защищаемые положения и выводы работы являются **новыми**. Метод Белоцерковского-Гущина-Коньшина (метод

расщепления по физическим факторам для несжимаемой жидкости с явной гибридной конечно-разностной схемой) был модифицирован автором диссертации для расчётов течений неоднородной жидкости. Для программной реализации этого метода был разработан эффективный механизм параллельного счёта. Для двумерных течений впервые были численно промоделированы слои повышенной плотности за телом, возникающие при обтекании его неоднородной жидкостью. Ранее они были обнаружены только экспериментально. Были также промоделированы другие особенности течений неоднородной жидкости (застойная зона - блокировка жидкости перед препятствием и возникновение внутренних волн за счет воздействия силы тяжести). Результаты численных расчётов находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными. Кроме того, в рамках построенной численной модели, обнаружена необычная, в виде "гребня", форма линий равной солёности в опережающем возмущении течения перед цилиндром, и застойные зоны в следе за цилиндром при малых скоростях течения.

В трёхмерных течениях при отсутствии экспериментальных данных были обнаружена зависимость размера области, занятой внутренними волнами в набегающем потоке вверх от передней критической точки (линии) цилиндра, от числа Рейнольдса Re . Исследована зависимость значения угла отрыва течения от положения точки на образующей цилиндра. На основе полученной зависимости сделано предположение о периодичности течения при больших числах Re (по аналогии с однородной жидкостью).

Обоснованность и достоверность полученных результатов, выводов и выносимых на защиту положений обеспечивается глубокой проработкой научной литературы, корректностью математического описания, детальными численными экспериментами, сопоставлением результатов работы с известными теоретическими и экспериментальными результатами.

Практическая значимость и рекомендации по использованию заключаются в том что разработанные численная модель и комплекс

программ могут быть применены при обработке результатов известных экспериментальных исследований и планировании новых экспериментов; при создании и тестировании новых комплексов программ расчета течений вязких несжимаемых жидкостей. Разработанная численная модель (включающая в себя постановку задачи, метод решения и программную реализацию) позволяет детально исследовать стратифицированные течения, труднодоступные или недоступные в настоящее время для экспериментальных измерений. Положительный богатый опыт численного моделирования диссертационной работы представляет интерес в связи с решением других задач гидродинамики несжимаемых жидкостей.

Основные результаты диссертации опубликованы в ведущем научном журнале, входящем в Перечень ВАК. Результаты диссертационной работы докладывались на ведущих отечественных и международных конференциях и научных семинарах.

По диссертационной работе Т.И. Рождественской нет замечаний принципиального характера, которые могли бы поставить под сомнение общую положительную оценку диссертации как квалификационной работы. Следует, тем не менее, отметить некоторое количество погрешностей оформления. В частности:

1. На стр. 12 диссертации приводится обезразмеренная модель течения- уравнения Навье-Стокса в приближении Обербека-Буссинеска. В уравнениях импульсов появилась безразмерная векторная величина \mathbf{e} . Координаты этого вектора не приведены. По-видимому, $\mathbf{e}=\mathbf{g}/|g|$, \mathbf{g} – вектор ускорения силы тяжести. Вместе с тем, на стр. 14 диссертации и стр. 8 автореферата в обезразмеренных уравнениях импульсов вместо величины \mathbf{e} появляется величина \mathbf{g} .

2. На стр. 5 автореферата в разделе «Публикации» говорится о «16-ти опубликованных работах, список которых приведен в конце автореферата». Однако таковых в конце автореферата четыре. На стр. 14 автореферата диссертации приведен рис. 6, подрисуночная подпись к которому

разместилась на стр. 15 автореферата. Неясен смысл прямой горизонтальной линии на этом рисунке(см. также рис. 27, 28 в диссертации).

Указанные замечания ни в коей мере не снижают общей высокой положительной оценки диссертационной работы Рождественской Т.И. Автореферат диссертации адекватно передает ее основные результаты.

В связи с вышеизложенным считаю, что диссертационная работа «Численное исследование свойств неоднородных жидкостей при обтекании ими кругового цилиндра» отвечает критериям, установленным в п.п. 9-11, 13-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением №842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г., а соискатель, Рождественская Татьяна Ивановна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы.

гл. научн. сотр.

д.ф.-м.н. профессор

12 октября 2015года

/Г.Г. Черных/

Служебный адрес: 630090 Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 6

Тел.(сл): 8(383) 3-308-570, e-mail:chernykh@ict.nsc.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт вычислительных технологий Сибирского отделения

Российской академии наук, лаборатория математического моделирования

Подпись главного научного сотрудника Института вычислительных технологий СО РАН доктора физико-математических наук профессора Черных Геннадия Георгиевича удостоверяю

Ученый секретарь ИВТ СО РАН

к.ф.-м.н.

12 октября 2015 года



/Д.В. Есипов/