

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию В.В.Денисенко
«Прямое численное моделирование вихрей
в потоках нормальной идеальной среды»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и
плазмы

Диссертация посвящена численному исследованию крупных вихрей, поведение которых, в отличие от мелкомасштабных вихревых структур, слабо зависит от коэффициента вязкости. Если не интересоваться процессом образования крупных вихрей, который может существенно зависеть от вязкости, их можно исследовать в рамках уравнений для невязких течений. В качестве дополнительного аргумента в пользу такого подхода укажем на содержащие вихрь известные аналитические решения двумерных стационарных уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости, кинематическая часть которых (зависимость скорости от координат) удовлетворяет одновременно уравнениям Эйлера (Шмыглевский Ю.Д. Аналитические исследования динамики газа и жидкости. М.: Эдиториал УРСС, 1999). Укажем также на содержащие вихрь автомодельные решения двумерной задачи о распаде разрыва для уравнений газовой динамики (Георгиевский В.П., Левин В.А., Сутырин О.Г. // МЖГ. 2010, №2, 126-134).

Моделирование вихрей выполняется в рамках нестационарных уравнений газовой динамики. Рассматривается как идеальная среда, так и вязкий, теплопроводный, двухкомпонентный газ в газоразделительной центрифуге. В качестве начальных данных выбирается известное решение стационарных уравнений со специально подобранной возмущающей добавкой, обеспечивающей образование содержащего вихрь так называемого вторичного течения. Исследование ограничено случаем двумерного вторичного течения, зависящего от двух пространственных цилиндрических координат, r и φ или r и z .

Рассмотрены течения, являющиеся вторичными по отношению к трем следующим стационарным течениям: течению Куэтта между двумя цилиндрами, сдвиговому протеканию газа через цилиндрический канал и вращению газа в центрифуге (твердотельному с постоянной температурой или так называемому упругому, учитывающему вязкий нагрев).

Следует отметить большой объем работы диссертанта по разработке численных методов. Для первых двух задач развита явная квазимоноотонная схема второго порядка точности типа Годунова (которую можно трактовать и как вариант сеточно-характеристического метода) на основе известных монотонизаторов, метода Роу приближенного решения задачи о распаде разрыва и схемы Рунге-Кутты второго порядка для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Для моделирования газоразделительной центрифуги с учетом вязкости, теплопроводности и диффузии компонент развита аналогичная неявная схема с возможностью эффективного ускорения

сходимости к стационарному решению и эффективным алгоритмом распараллеливания вычислений.

Рассмотренное в диссертации течение Куэтта с неподвижным внутренним цилиндром устойчиво к малым возмущениям, по крайней мере для уравнений несжимаемой жидкости (т.е. для соленоидального поля скорости возмущающей добавки). Поэтому нахождение возмущающей добавки к этому решению, которая не приводила бы к возврату решения нестационарных уравнений обратно к течению Куэтта, и тем более приводила бы к появлению течения с ярко выраженными вихрями, является непростой проблемой. Диссертанту удалось вначале справиться с этой проблемой, а затем исследовать зависимость возникающего вторичного течения от параметров течения Куэтта, возмущающей добавки и разностной сетки.

В качестве сдвигового течения в цилиндрическом канале выбрана наиболее простая зависимость скорости протекания от радиуса с линейным возрастанием или убыванием на некотором интервале и постоянными значениями вне его. В качестве возмущающей добавки задается зависящая от радиуса угловая (в цилиндрических координатах) компонента скорости, обеспечивающая начальную закрутку течения. На торцах цилиндра ставятся периодические условия. Показано, что убывающая или возрастающая по радиусу скорость протекания в первичном течении дает вторичное течение, содержащее шаровой, или, соответственно, тороидальный вихрь. Скорость образования тороидального вихря определяется величиной градиента скорости протекания в первичном течении. Показано также, что вторичное течение с крупными вихрями можно получить возмущая радиальную, а не угловую компоненту скорости.

Математическая модель газоразделительной центрифуги описывает основные черты работы реального устройства – высокоскоростное механическое вращение, тепловой эффект от вязкого нагрева газа и теплопроводности, двухкомпонентность среды, системы подачи и отвода газа. В качестве первичного течения используется твердотельное или упругое вращение газа. Вторичное течение содержит так называемый противопоточный вихрь, который, наряду с центростремительной силой, является механизмом разделения компонент смеси. В случае твердотельного вращения переход в нужное вторичное течение происходит как после механического (замедление скорости вращения одного из торцевых дисков), так и после теплового (определенные граничные условия для уравнения теплопроводности) возмущений. Упругое вращение переходит в течение с противопоточным вихрем самопроизвольно. Исследована структура противопоточного вихря. Продемонстрирована возможность получить два вихря с противоположным вращением, задавая специальные граничные условия для уравнения теплопроводности.

Сделаем два замечания, которые в большей степени являются пожеланиями.

1. При исследовании устойчивости течения Куэтта между двумя цилиндрами рассматривается задача с начальными данными, периодическими по углу φ с периодом $2\pi/n$, где $n > 0$ – целое число. Решение такой задачи можно искать в виде периодических функций с тем же периодом. Выполненное в диссертации численное исследование задачи на интервале $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ с $n=11$ можно было бы дополнить исследованием задачи на интервале $0 \leq \varphi \leq 2\pi/n$ на более подробных сетках.

2. При моделировании течения в высокоскоростной центрифуге в рамках уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа используется условие прилипания на границе вращающегося цилиндра. Применительно к основной задаче диссертации, которой является исследование вихревых течений, такое граничное условие вполне оправдано. Однако при моделировании реальной центрифуги условие прилипания может оказаться слишком грубым. Возможно, более адекватным является условие скольжения, см., например, «Коган М.Н. Динамика разреженного газа. М.: Наука, 1967; стр. 329», где это условие получено на основе асимптотического анализа решения уравнения Больцмана в слое Кнудсена у стенки.

Сделанные замечания носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации. Обоснованность и достоверность полученных результатов следует из тщательного тестирования используемых методов на известных задачах, сравнительном анализе результатов, полученных на разных сетках. Результаты диссертации своевременно опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

В целом работа является законченным исследованием, удовлетворяющим требованиям ВАК к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, а ее автор – Владимир Викторович Денисенко – заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Сл

Чарахчян Александр Агасиевич
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,
зав. отделом.

Тел. 8499 1356498. E-mail: chara@ccas.ru

24 августа 2015 г.

Федеральное государственное учреждение “Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” Российской академии наук”.

119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2.

ВЦ РАН, отдел механики сплошных сред.

Подпись Чарахчяна А. А. и заверено
Учебный секретарь ФИЦ ИУ РАН
У.Т.Н.



В.Н. Захаров