

Санкт-Петербургский государственный университет

**Всероссийская конференция по аэрогидродинамике,
посвященная 100-летию со дня рождения
Сергея Васильевича Валландера**

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Под редакцией Е.В. Кустовой, Е.А. Нагнибеда

23-25 октября 2017 г.
Санкт-Петербург

УДК 532+533
ББК 22.253.3
В85



Всероссийская конференция по аэрогидродинамике, посвященная 100-летию со дня рождения Сергея Васильевича Валландера, проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-01-20393)

Всероссийская конференция по аэрогидродинамике, посвященная 100-летию со дня рождения Сергея Васильевича Валландера: Тезисы докладов / под ред. Е.В. Кустовой, Е.А. Нагнибеда. — СПб.: С.-Петербург. гос. ун-т, 2017. — 106 с. ISBN 978-5-288-05773-1

В сборник включены тезисы докладов, представленные на Всероссийской конференции по аэрогидродинамике, посвященной 100-летию со дня рождения Сергея Васильевича Валландера (1917–1975), проходившей 23 октября – 25 октября 2017 г. в Санкт-Петербурге. Обсуждаются современные проблемы динамики разреженных газов, физико-химической кинетики в газодинамике, процессов переноса и релаксации, экспериментальной газовой динамики, а также вычислительной гидроаэродинамики.

ISBN 978-5-288-05773-1

© Коллектив авторов, 2017
© Санкт-Петербургский
государственный университет, 2017

СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ВАЛЛАНДЕР И ЕГО НАУЧНАЯ ШКОЛА

Е.А. Нагнибеда

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: e_nagnibeda@mail.ru*

21 июня 2017 года исполняется 100 лет со дня рождения выдающегося ученого и талантливого педагога чл.-корр. АН СССР, профессора Сергея Васильевича Валландера. В докладе освещаются основные этапы его жизни, научная, педагогическая, научно-организационная деятельность, а также развитие созданной им научной школы.

С 1934 г. по 1939 г. С.В. Валландер – студент математико-механического факультета Ленинградского государственного университета, с 1939 г. аспирант кафедры гидроаэромеханики.

В 1941 г. С.В. Валландер ушел из аспирантуры в действующую армию и с первых дней войны служил офицером военно-воздушных сил Балтийского флота: штурманом самолета, штурманом отряда, флагманским штурманом полка. В конце войны он был штурманом отряда, совершавшего трансокеанские перелеты, доставляя в СССР самолеты союзников. За заслуги в годы войны С.В. Валландер был награжден орденами Красного Знамени, Красной Звезды и медалями.

Вернувшись в университет после окончания войны, в 1946 г. Сергей Васильевич защитил кандидатскую диссертацию, в 1949 г. – докторскую, результаты которой внесли значительный вклад в газовую динамику. В 1950 г. С.В. Валландер возглавил кафедру гидроаэромеханики ЛГУ и заведовал ей до последнего дня своей жизни 19 июня 1975 г.

Научную и педагогическую деятельность С.В. Валландер совмещал с большой административной работой и оказал огромное влияние на жизнь кафедры, факультета, университета. В 1952-1956 гг. он проректор по научной работе Ленинградского государственного университета, в 1957 – 1963 гг. – директор Научно-исследовательского института математики и механики ЛГУ, в 1965 – 1973 гг. – декан математико-механического факультета ЛГУ. Большой вклад внес С.В. Валландер в развитие науки и образования в нашей стране. Талант, широта интересов, уникальная научная интуиция проявлялись во всех видах его деятельности.

Обращаясь к актуальным задачам механики, С.В. Валландер получал фундаментальные результаты, открывающие пути дальнейшего развития науки в исследуемой им области. Так в 50-х годах появился цикл работ по теории турбин и решеток, выполненных под руководством С.В. Валландера по заказу Центрального котлотурбинного института и Ленинградского механического завода. Его результаты в сверхзвуковой и гиперзвуковой газовой динамике вошли в учебники и используются до настоящего времени. В конце 50-х С.В. Валландер обратился к новому научному направлению – к кинетическому описанию течений разреженного газа, а затем к применению молекулярного подхода к задачам аэродинамики. Его идеи в этой области оказали существенное влияние на развитие динамики разреженных газов в нашей стране. Научная школа, созданная Валландером, в настоящее время включает уже несколько поколений ученых-механиков. Результаты представителей этой школы в области физико-химической и космической аэродинамики подтверждают продуктивность его идей, постоянно докладываются на российских и международных конференциях, опубликованы в ряде книг и большом числе статей, имеют высокий рейтинг в нашей стране и за рубежом. Многие из этих результатов будут представлены на предстоящей конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Сергея Васильевича Валландера.

Н-ТЕОРЕМА ПО БОЛЬЦМАНУ И ПУАНКАРЕ

С.З. Аджиев¹, В.В. Веденяпин², В.В. Казанцева²

¹Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
Россия, Москва, 119991, Ленинские горы, 1

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
Россия, Москва, 125047, Миусская пл., 4

E-mail: vicveden@yahoo.com

H-теорема впервые была рассмотрена Больцманом в [1]. Эту теорему, обосновывающую сходимость решений уравнений типа Больцмана к максвелловскому распределению, Больцман связал с законом возрастания энтропии [2]. Доказательство *H*-теоремы не только обосновывает 2-е начало термодинамики, но и делает поведение решения уравнения понятным, так как позволяет узнать, куда сходится решение для данного уравнения при времени, стремящемся к бесконечности.

Мы рассматриваем обобщения уравнений химической кинетики, включающие в себя классическую и квантовую химическую кинетику [3]. *H*-теорема для этих обобщений уравнений химической кинетики в случае непрерывного времени исследовалась [3]. Были изучены **обобщенное условие детального равновесия (баланса)** и **обобщенное условие динамического равновесия** (или обобщенное условие Штюкельберга–Батищевой–Пирогова), при выполнении которых справедлива *H*-теорема. В работах [4], [5] было показано, как выполняется закон роста энтропии для уравнений Лиувилля: энтропия временного среднего больше или равна энтропии начального распределения, хотя вдоль решения она сохраняется. В работах [6], [7] показано, что временные средние для уравнения Лиувилля совпадают с экстремалью Больцмана, там, где достигается условный максимум энтропии при фиксированных законах сохранения. Мы доказываем это совпадение для представлений групп, вводя энтропию и изучая ее свойства в теории представлений. Потом мы выясняем, что дает это для эргодической проблемы, получая обобщение и уточнение эргодических теорем Рисса, Биркгофа–Хинчина, фон Неймана и Боголюбова с единой точки зрения.

Литература

1. *Больцман Л.* Дальнейшие исследования теплового равновесия между молекулами газа // Избранные труды. М.: Наука, 1984. С. 125–189.
2. *Больцман Л.* О связи между вторым началом механической теории теплоты и теорией вероятностей в теоремах о тепловом равновесии // Избранные труды. М.: Наука, 1984. С. 190–235.
3. *Веденяпин В.В., Аджиев С.З.* Энтропия по Больцману и Пуанкаре // Успехи математических наук. 2014. Т. 69. № 6. С. 45–80.
4. *Пуанкаре А.* Замечания о кинетической теории газов // Пуанкаре А. Избранные труды. Т. 3. М.: Наука, 1974.
5. *Козлов В.В., Трещев Д.В.* Слабая сходимость решений уравнения Лиувилля для нелинейных гамильтоновых систем // ТМФ. 2003. Т. 134. № 3. С. 388–400.
6. *Веденяпин В.В.* Кинетическая теория по Максвеллу, Больцману и Власову. Конспект лекций. М.: МГОУ, 2005.
7. *Веденяпин В.В.* Временные средние и экстремали по Больцману // Доклады Академии Наук. 2008. Т. 422. № 2. С. 161–163.

ЭКСТРЕМАЛИ БОЛЬЦМАНА И ЭРГОДИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА ПО ПУАНКАРЕ И ГИББСУ

С.З. Аджиев¹, В.В. Веденяпин², В.В. Казанцева²

¹Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
Россия, Москва, 119991, Ленинские горы, 1

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
Россия, Москва, 125047, Миусская пл., 4
E-mail: vicveden@yahoo.com

H -теорема впервые была рассмотрена Больцманом в [1]. Эту теорему, обосновывающую сходимость решений уравнений типа Больцмана к максвелловскому распределению, Больцман связал с законом возрастания энтропии [2]. Доказательство H -теоремы не только обосновывает 2-е начало термодинамики, но и делает поведение решения уравнения понятным, так как позволяет узнать, куда сходится решение для данного уравнения при времени, стремящемся к бесконечности.

Мы рассматриваем обобщения уравнений химической кинетики, включающие в себя классическую и квантовую химическую кинетику [3]. H -теорема для этих обобщений уравнений химической кинетики в случае непрерывного времени исследовалась [3]. Были изучены **обобщенное условие детального равновесия (баланса)** и **обобщённое условие динамического равновесия** (или обобщенное условие Штюккельберга–Батищевой–Пирогова), при выполнении которых справедлива H -теорема. В работах [4], [5] было показано, как выполняется закон роста энтропии для уравнений Лиувилля: энтропия временного среднего больше или равна энтропии начального распределения, хотя вдоль решения она сохраняется. В работах [6], [7] показано, что временные средние для уравнения Лиувилля совпадают с экстремалью Больцмана, там, где достигается условный максимум энтропии при фиксированных законах сохранения. Мы доказываем это совпадение для представлений групп, вводя энтропию и изучая ее свойства в теории представлений. Потом мы выясняем, что дает это для эргодической проблемы, получая обобщение и уточнение эргодических теорем Рисса, Биркгофа-Хинчина, фон Неймана и Боголюбова с единой точки зрения. Это обосновывает, проясняет и уточняет метод Гиббса. Это также по-новому проясняет проблемы необратимости, в частности, парадоксы Лошмидта и Пуанкаре.

Литература

1. *Больцман Л.* Дальнейшие исследования теплового равновесия между молекулами газа // Избранные труды. М.: Наука, 1984. С. 125–189.
2. *Больцман Л.* О связи между вторым началом механической теории теплоты и теорией вероятностей в теоремах о тепловом равновесии // Избранные труды. М.: Наука, 1984. С. 190–235.
3. *Веденяпин В.В., Аджиев С.З.* Энтропия по Больцману и Пуанкаре // Успехи математических наук. 2014. Т. 69. № 6. С. 45–80.
4. *Пуанкаре А.* Замечания о кинетической теории газов // Пуанкаре А. Избранные труды. Т. 3. М.: Наука, 1974.
5. *Козлов В.В., Трещев Д.В.* Слабая сходимость решений уравнения Лиувилля для нелинейных гамильтоновых систем // ТМФ. 2003. Т. 134. № 3. С. 388–400.
6. *Веденяпин В.В.* Кинетическая теория по Максвеллу, Больцману и Власову. Конспект лекций. М.: МГОУ, 2005.
7. *Веденяпин В.В.* Временные средние и экстремали по Больцману // Доклады Академии Наук. 2008. Т. 422. № 2. С. 161–163.

О ВЛИЯНИИ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА НА ЭВОЛЮЦИЮ ФРОНТА СКАЧКА УПЛОТНЕНИЯ В НЕОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА

А.Л. Адрианов

Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева,
Россия, Красноярск, 660037, проспект им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: adrian58al@gmail.com

На основе дискретно-аналитического подхода [1] изучается эволюция фронта скачка уплотнения (СУ) при совместном действии нескольких факторов: *краевого эффекта* (КЭ) за СУ, неоднородности натекающего потока, вязкости-теплопроводности (ВТ). Фактор ВТ, точнее, фактор вязкости и механизм теплопроводности, учитывается в рамках *обобщенных дифференциальных соотношений* (ОДС) на СУ асимптотически ($Re \rightarrow \infty$) [1–3]. Необходимость введения и использования термина «КЭ» вызвана, прежде всего, нестандартной (не краевой) постановкой задачи для исследуемого стационарного *ударного течения* и лишь частичным смысловым совпадением с общепринятым термином «*краевое (граничное) условие*», используемым обычно при решении краевых (начально-краевых) задач. КЭ за СУ имеет производный (дифференциальный) смысл от термина «*краевое условие*» применительно к задней поверхности скачка; КЭ имеет смысл локального источникового члена в каждой расчетной точке задней поверхности СУ, схематизированной поверхностью *сильного газодинамического разрыва*. Величина КЭ никак не связана с текущей интенсивностью СУ: например, при обтекании бесконечного клина сверхзвуковым потоком, КЭ за СУ будет нулевым при конечной интенсивности присоединенного плоского скачка и, наоборот, в другой задаче КЭ может быть весьма значительным даже при малой текущей интенсивности СУ. Незначительные допущения и соответствующая постановка задачи позволяет рассматривать фронт СУ, проникающий в слой идеального или вязкого теплопроводного газа при больших числах Рейнольдса, как траекторию условной «частицы» в *подходе Лагранжа* и произвести редукцию исходной начально-краевой задачи для уравнений *Эйлера* или *Навье-Стокса* к задаче *Коши* для системы ОДУ [1, 3]. В процессе ее интегрирования удается обойтись без поточечной постановки обычных или *обобщенных условий* на СУ, которые будут выполняться уже автоматически: постановка их требуется только в начальной точке СУ, откуда начинается его эволюция.

В рамках невязкой газодинамической модели многочисленные задачи интерференции *сильных, слабых и тангенциальных разрывов* детально исследованы *Владимиром Николаевичем Усковым* (например, [4, 5]); там же вводится понятие *обобщенной ударно-волновой структуры*, где возмущения в виде *сильных и слабых разрывов* могут иметь как встречный, так и догоняющий характер. Однако в случае вязкого теплопроводного газа понятие газодинамического разрыва отсутствует. И, если, несмотря на это, СУ конечной интенсивности удастся все-таки корректно ($Re \rightarrow \infty$) схематизировать поверхностью *сильного газодинамического разрыва*, то, как быть со «*слабыми разрывами*», точнее с высокими градиентами газодинамических параметров и их производных по обе стороны СУ, которые совместно с фактором ВТ могут в значительной степени определять эволюцию скачка?

В отличие от более ранних исследований в данном направлении [1–3], в настоящей работе основной упор сделан на попытку синхронизации (в пространственном смысле) возмущений по обе стороны СУ. Как представляется автору доклада, произвести подобные исследования (расчеты) в рамках краевой постановки задачи, имея даже мощные вычислительные средства, крайне затруднительно.

Литература

1. Адрианов А.Л. Математическое моделирование ударных течений идеального и вязкого теплопроводного газа на основе дискретно-аналитического подхода: монография / А. Л. Адрианов. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 216 с.
2. Адрианов А.Л. Обобщенные дифференциальные соотношения на скачке уплотнения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2009. Вып. 4. С. 22–30.
3. Адрианов А.Л. Математическое моделирование ударных течений вязкого теплопроводного газа на основе асимптотической модели // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2010. Вып. 4. С. 10–26.
4. Усков В.Н. Интерференция стационарных газодинамических разрывов // Сверхзвуковые газовые струи: Сб. ст. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. С. 22–46.
5. Адрианов А.Л., Старых А.Л., Усков В.Н. Интерференция стационарных газодинамических разрывов. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1995. 180 с.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В БГТУ – «ВОЕНМЕХ»

Г.А. АКИМОВ

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова,
Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-я Красноармейская, 1
E-mail: akimov32@mail.ru*

Начало масштабных исследований 1946 год – создание факультета реактивного вооружения. Исследования возглавил профессор Исаак Павлович Гинзбург (1910–1979), который стал заведующим первой кафедрой «Проектирования и технологии производства ракет» (совмещающая работу в «Военмехе» и ЛГУ).

И.П. Гинзбург руководил этой кафедрой в течение тех лет, обеспечив подготовку первого выпуска специалистов и первые газодинамические исследования.

1949 год – создание кафедры аэрогазодинамики и динамики полета летательных аппаратов (ЛА). За 30 лет своей деятельности И.П. Гинзбург показал себя выдающимся организатором научных исследований. На кафедре было защищено 120 кандидатских диссертаций; 14 человек стали докторами наук.

Основные направления исследований:

- сверхзвуковые газовые струи (одиночные, составные (блочные), со спутным потоком, встречные);
- взаимодействие струи с преградами (элементами конструкции ЛА) – сферическими, коническими, плоскими (под разными углами);
- ударно-волновые структуры;
- течение в следе за ЛА;
- турбулентные сверхзвуковые струи;
- формы головных частей ЛА;

Исследования успешно продолжаются в настоящее время.

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИГАУССОВСКОЙ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РАЗРЕЖЕННОМ ГАЗЕ

О.А. Аксенова¹, И.А. Халидов²

¹Санкт-Петербургский Военно-Морской Политехнический Институт ВУНЦ ВМФ ВМА, Россия, Санкт-Петербург, 197045, Ушаковская наб., 17/1

²Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, 29
E-mail: olga.a.aksenova@gmail.com, iskander.khalidov@gmail.com

Рассматривается предложенная нами в [1], [2] модель влияния шероховатости на аэродинамические характеристики поверхности при взаимодействии с разреженным газом на базе полигауссовских случайных процессов и полей. Для многих распространенных на практике способов обработки поверхностей моделирование негауссовскими профилями гораздо лучше отвечает реальности, чем моделирование гауссовскими полями или фрактальными структурами [3]. Это подтверждается как экспериментальными измерениями статистических параметров, так и сопоставлением измеренных статистических показателей с результатами численных расчетов [4]. Совместная плотность распределения значений случайного процесса (или поля) в n точках x_1, \dots, x_n , отвечающих моментам времени t_1, \dots, t_n , для полигауссовской модели приобретает вид

$$P_{t_1, t_2, \dots, t_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{|R_n(v)|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - \sigma(v))R_n^{-1}(v)(x - \sigma(v))^T\right) dF(v),$$

где $\sigma(v)$ и $R_n(v)$ – векторное математическое ожидание и корреляционная матрица ($|R_n(v)|$ – определитель) значений процесса в заданных точках, $F(v)$ – неубывающая на $[0; \infty)$ весовая функция, удовлетворяющая требованию сходимости несобственного интеграла. В работе [4], ориентированной на приложения к рассеянию света на шероховатой поверхности, выращиванию тонких пленок в микроэлектронике, диагностике поверхности методами электронной спектроскопии и контактным явлениям (в частности, трению и износу изделий в машиностроении), продемонстрирована возможность достаточно точной аппроксимации реальных микрорельефов, полученных в ряде технологических процессов. На рис. 1 приведены результаты применения предложенной модели на гладкой и шероховатой поверхностях из каптона (применяемого для изготовления реальных поверхностей летательных аппаратов, движущихся в верхних слоях атмосферы – в частности, изоляторов и солнечных парусов).

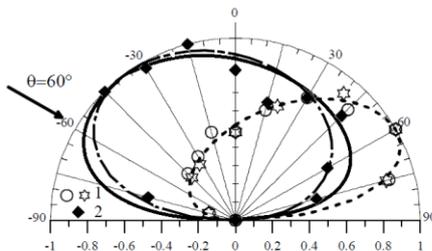


Рис. 1. Сопоставление результатов расчетов индикатрисы рассеяния на гладкой и шероховатой поверхностях с экспериментальными результатами для разреженного потока аргона [5].

Литература

1. Akse nova O.A., Khalidov I.A. Analytic Model of the Effect of Poly-Gaussian Roughness on Rarefied Gas Flow near the Surface // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1786. P. 1000071-1000078.
2. Халидов И.А. Применение полигауссовских случайных процессов к моделированию обтекания шероховатой поверхности потоком разреженного газа // Вестник Санкт-Петербургского государственного Университета, Серия 1. 2014. № 3. С. 428-436.
3. Аксенова О.А., Халидов И.А. Шероховатость поверхности в аэродинамике разреженного газа: фрактальные и статистические модели. Издательство ВВМ С. Петербургского ун-та, 2004. 120 с.
4. Литвак М.Я., Малюгин М.И. Полигауссовские модели негауссовской случайно-шероховатой поверхности // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. № 4. С. 99-107.
5. Erofeev A.I., Friedlander O.G. et al. The Influence of Roughness of the Surface on the Interchange of Momentum between Gas Flow and Solid Surface // AIP Conference Proceedings. 2012. Vol. 1501. P. 1168-1174.

АЭРОДИНАМИКА УПРАВЛЯЕМОГО СНАРЯДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ

М.М. Алексеева, М.С. Яковчук

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова,
Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-я Красноармейская, 1
E-mail: amara96@mail.ru

При создании управляемого снаряда большую роль играют решение задач точности, устойчивости полета и управляемости, которые определяют основные характеристики снаряда и его компоновку.

В настоящей работе на первом этапе работы проводится численный расчет обтекания упрощенной модели управляемого снаряда (рис. 1) в пакете ANSYS и сравнение с результатами лабораторной работы «Определение аэродинамических характеристик осесимметричного тела».

В физическом эксперименте определяется силовое воздействие дозвукового потока на модель конусообразного снаряда большим стабилизатором при разных углах атаки.

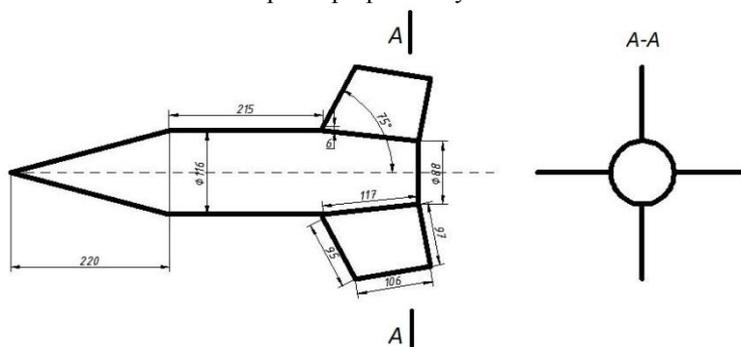


Рис. 1. Геометрические характеристики модели снаряда.

Для численного решения поставленной задачи используется пакет ANSYS с применением модуля Workbench. Вычислительный эксперимент проводился в трехмерной стационарной постановке с применением граничных условий:

- на входной границе расчетной области задано условие «pressure inlet», число Маха набегающего потока $M = 0,3$, давление $p = 0$ ати (101325 Па), поток направлен вдоль оси x , направление вектора скорости в плоскости xz ;
- на поверхности обтекаемого тела заданы условия стенки, включающие в себя условия прилипания и непротекания.

На графиках (рис. 2 и рис. 3) показано сравнение физического и численного экспериментов.

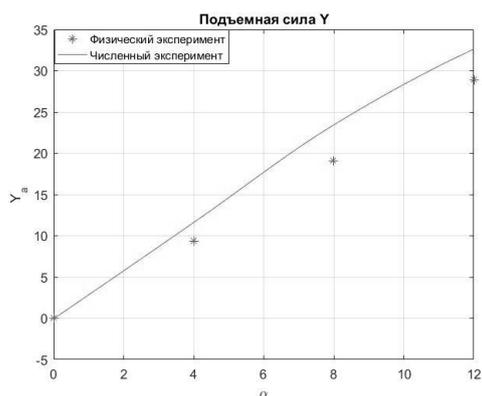


Рис. 2. Изменение подъемной силы

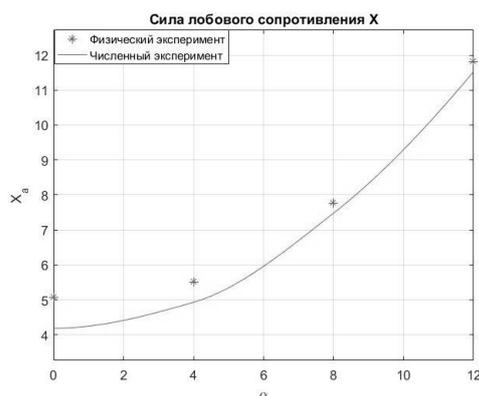


Рис. 3. Изменение силы лобового сопротивления

В исследованном диапазоне углов погрешность расчета сил является приемлемой.

На втором этапе работы рассматриваются более приближенные к действительным модели для определения влияния органов управления на силовые характеристики. Органы управления и стабилизации, которые создают управляющие моменты, размещаются в носовой или кормовой части летательного аппарата, вдали от его центра масс. В расчетах исследуется влияние аэродинамических рулей на подъемную силу.

НЕКЛАССИЧЕСКИЙ ПЕРЕНОС В ЗАДАЧАХ ДЛЯ КИНЕТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ С НЕРАВНОВЕСНЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

В.В. Аристов, С.А. Забелок, А.А. Фролова

*Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук
Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук,
Россия, Москва, 119333, ул. Вавилова, 40
E-mail: aristovvl@yandex.ru*

Рассматривается ряд задач динамики разреженных газов, для которых ставятся неравновесные граничные условия для конечных или полубесконечных областей. Для изучения и сравнения используются два метода динамики разреженных газов. Здесь обнаружен ряд интересных неклассических закономерностей, имеющих отчетливо кинетический характер. В задачах о неоднородной релаксации (ЗНР), в которой характерное число разреженности порядка единицы, изучены неравновесные течения для сверхзвукового и дозвукового режимов. В различных режимах выявлены нетрадиционные свойства переноса, нарушающие привычные соотношения Стокса и Фурье. В частности, получено, что тепловой поток имеет такой же знак, как и градиент температуры. Решения прямым методом для уравнения Больцмана и по DSMC (Бондарь, Коханчик) показали хорошее согласие результатов. Изучаются также течения при других постановках задач. Решения в задаче о теплопередаче с неравновесными граничными условиями демонстрируют сходное поведение с неклассическим переносом для чисел Кнудсена порядка 1. Результаты частично представлены в [1]. Обсуждаются условия экспериментального тестирования эффектов (связанных в основном с техникой оптических решеток), а также возможные области приложений.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 14-11-00870.

Литература

1. *Аристов В.В., Забелок С.А., Фролова А.А.* Возможность аномального теплопереноса в течениях с неравновесными граничными условиями // Докл. РАН. 2017. Т. 473. № 3. С. 286-290.

УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ

О.В. Барина, Р.Н. Мирошин

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: barinova.o.v@bk.ru, miroshin-roman1938@yandex.ru*

Найденные ранее из нелинейного уравнения Колмогорова-Чепмена две плотности вероятности перехода для марковского процесса с непрерывным временем используются при выводе линейных уравнений типа Колмогорова. При этом применяются методы асимптотического анализа интегралов. Форма одного из уравнений отлична от стандартных, полученных в предположениях чисто разрывных или непрерывных траекторий процесса, а второго - описывает движение броуновской частицы вместе с граничным условием поглощения на границе.

В частности, есть метод решения уравнения Больцмана разреженного газа, при котором на каждом шаге приближения решается уравнение для марковского процесса с разрывными траекториями (метод Хэвилленда-Левина).

Литература

1. *Мирошин Р.Н.* О некоторых решениях интегрального уравнения Колмогорова-Чепмена // Вестн. С.-Петерб. Ун-та. Сер. 1: Математика, механика, астрономия. 2007. Вып. 4. С. 22-29.
2. *Мирошин Р.Н.* Уравнения Колмогорова в дробных производных для вероятностей перехода некоторых марковских процессов с непрерывным временем // Вестн. С.-Петерб. Ун-та. Сер. 1: Математика, механика, астрономия. 2017. Вып. 4. С. 32-38.
3. *Гнеденко Б.В.* Курс теории вероятностей. М.: Книжный дом «ЛИБРИКОМ», 2011. 488 с.
4. *Ламперти Дж.* Вероятность. М.: Наука, 1973. 184 с.
5. *Эрдеи А.* Асимптотические разложения. М.: ФМ, 1962. 127 с.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВБЛИЗИ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

А.С. Барышников¹, И.В. Басаргин¹, Н.О. Безверхний², С.В. Бобашев^{1,2}, Н.А. Монахов¹, П.А. Попов¹, В.А. Сахаров¹, М.В. Чистякова¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Россия, Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, 26

²Санкт-Петербургский государственный университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, 29

E-mail: nm1988@mail.ru

В последнее время активно исследуются возможности использования низкотемпературной плазмы для управления сверхзвуковыми потоками и модификации аэродинамических характеристик летательных аппаратов [1-3]. В данной работе экспериментально исследовано взаимодействие ударной волны с плазмой поперечного тлеющего разряда. Разряд зажигался между двумя коническими электродами, расположенными на расстоянии 100 мм друг от друга в рабочей камере в воздушной среде при давлении 4 кПа. Разрядный ток был равен 1 А при напряжении между электродами 680 В. Ударная волна генерировалась при помощи электроразрядной ударной трубы, скорость ударной волны при входе в плазму была равна 1000 м/с, что соответствовало числу Маха $M=3$. Для определения параметров плазмы в нестационарном газодинамическом процессе был использован двойной электрический зонд.

В данной работе был надежно подтвержден эффект снижения проводимости плазмы до прихода ударной волны в точку измерения, ранее обнаруженный и описанный в [4-7]. Измерения концентрации заряженных частиц в различных точках разрядной плазмы показали, что это снижение происходит одновременно во всем объеме плазмы. В результате исследования показано, что перед фронтом ударной волны в неравновесной плазме наблюдается немонотонное изменение концентрации ионов со значительными по величине локальными экстремумами, тогда как за фронтом ударной волны плотности ионов изменяется плавно в отличие от изменения плотности нейтральной компоненты.

Физический механизм, определяющий сложный характер изменения концентрации ионов в окрестности фронта ударной волны, возможно, связан с неравновесным состоянием плазмы тлеющего разряда и требует дальнейшего исследования.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-06280.

Литература

1. Bletzinger P., Ganguly B.N., Van Wie D., and Garscadden A. Plasmas in high speed aerodynamics // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38. R33-R57.
2. Adamovich I.V. Plasma Dynamics and Flow Control Applications // Encyclopedia of Aerospace Engineering. John Wiley & Sons Ltd, 2010.
3. Starikovskiy A., Aleksandrov N. Nonequilibrium Plasma Aerodynamics // Aeronautics and Astronautics. InTech. 2011. P. 55-96.
4. Baryshnikov A.S., Basargin I.V., Bobashev S.V., Monakhov N.A., Popov P.A., Sakharov V.A., and Chistyakova M.V. Peculiarities of Interaction of a Shock Wave with Gas Discharge Plasma // Technical Physics Letters. 2015. Vol. 41. N 8. P. 753-755.
5. Basargin I.V., Mishin G.I. Probe Studies of Shock Waves in the Plasma of a Transverse Glow Discharge // Soviet Physics - Technical Physics Letters. 1985. Vol. 11. N 11. P. 535-538.
6. Ershov A.P., Klishin S.V., Kuzovnikov A.A., Ponomareva S.E., Pyt'ev Y.P. Application of the Reduction Method to the Microwave Interferometry of Shock Waves in Weakly Ionized Plasma // Soviet Physics - Technical Physics. 1989. Vol. 34. N 8. P. 936-937.
7. Baryshnikov A.S., Basargin I.V., Bobashev S.V. et al. Study of the Effect of Decrease in the Conductivity Ahead of a Shock Wave in a Glow-Discharge Plasma // J. Eng. Phys. Thermophys. 2016. Vol. 89. N 3. P. 565-568.

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА ДИНАМИКУ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДИФФУНДИРУЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА

А.Н. Бестужева¹, А.Л. Смирнов²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения,
Россия, Санкт-Петербург, 190031, Московский пр., 9

²Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: bes_alla@inbox.ru, a_l_smirnov@mail.ru

В докладе обсуждается вопрос влияния формы начального распределения диффундирующего вещества на характеристики области загрязнения. Предполагается, что в начальный момент времени на свободную поверхность безграничной жидкости попадает диффундирующее вещество, плотность которого меньше плотности воды. Считается, что жидкость идеальная, отсутствуют поверхностные (ветровые) и внутренние течения, нет источников и стоков жидкости. Задача состоит в определении времени жизни и зависимости от времени радиуса «пятна загрязнения» (области свободной поверхности, занимаемой диффундирующим веществом, с концентрацией выше пороговой). Используются предположения о том, что коэффициент горизонтальной диффузии много больше коэффициента вертикальной диффузии и является постоянным. В этом случае математическая модель представляет собой краевую задачу для двумерного уравнения диффузии.

В статье [1] для функции концентрации диффундирующего вещества в безразмерных переменных была получена формула

$$c(r, t) = \int_0^{\infty} e^{-\lambda^2 t} J_0(\lambda r) F(\lambda) \lambda d\lambda, \quad F(\lambda) = \int_0^{\infty} f(\xi) J_0(\lambda \xi) \xi d\xi.$$

Здесь функция $f(\xi)$ описывает распределение вещества в начальный момент времени, а $J_0(x)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

В статье [1] был рассмотрен пример, в котором диффундирующее вещество в начальный момент времени равномерно распределено по области начального загрязнения в виде круга радиуса 1. В докладе рассматриваются другие виды начального распределения концентрации диффундирующего вещества: линейная, квадратичная и т.д. Для таких функций начального распределения были получены выражения для зависимости концентрации диффундирующего вещества от времени в любой точке свободной поверхности.

Делается вывод о том, что для больших значений времени начальная форма мало влияет на распространение пятна загрязнения диффундирующего вещества. Для малых значений пороговой концентрации были получены асимптотические оценки параметров области загрязнения: время жизни пятна загрязнения для различных форм начального распределения диффундирующего вещества и максимальный радиус этого пятна. Анализ был выполнен с помощью асимптотического метода для вычисления интегралов в правой части (интегралы Лапласа) выражений. Во всех случаях начального распределения диффундирующего вещества первые приближения для времени жизни пятна одинаковы и совпадают с найденными в статье [1]. Влиянием следующих членов при весьма малых пороговых значениях концентрации можно пренебречь. Что касается определения максимального значения радиуса пятна загрязнения, была показана важная роль второго члена разложения. Сравниваются результаты асимптотического анализа и численного интегрирования.

Литература

1. *Bestuzheva A.N. and Smirnov A.L.* Propagation dynamics of a diffusing substance on the surface and in the bulk of water // Vestnik St. Petersburg University: Mathematics. 2015. Vol. 48, Issue 4. P. 262-270.

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕНОМ И ТРЕНИЕМ НА ПРОНИЦАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Г.Г. Бильченко, Н.Г. Бильченко

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева,
Россия, Казань, 420111, К. Маркса, 10
E-mail: ggbil2@gmail.com, bilchnat@gmail.com*

В работах [1-7] рассмотрены некоторые одномерные и двумерные **обратные** задачи (ОЗ) тепломассообмена. Приведём по [5] постановку ОЗ по управлению – вдуву $m(x)$ в ламинарный пограничный слой на поверхности ГЛА, где $x \in X = [0;1]$ (ось x направлена вдоль контура тела). Пусть **заданы**: 1) сетка *управления* $X_1: x_0^\wedge = 0 < x_1^\wedge < \dots < x_{n_1}^\wedge = 1$; 2) сетка *наблюдения* $X_2: x_0^\vee = 0 < x_1^\vee < \dots < x_{n_2}^\vee = 1$; 3) непрерывно-дифференцируемое управление $\tau(x)$ – температурный фактор (ТФ); 4) непрерывное управление $s(x)$ – магнитное поле; 5) ограничения $I_{j,k}^m = [b_{j,k}^m; t_{j,k}^m]$, $j=1, \dots, n_1$, $k=0, \dots, v_1^m$, $v_1^m \geq 0$; 6) «контрольные» значения локального теплового потока $q^\vee = (q_j^\vee)_{j=0, \dots, n_2}$. Требуется **найти** непрерывное на X управление $m^\sim(x)$, задаваемое [8] элементами $m^\sim(x) = m_j^\sim(x)$, удовлетворяющими условиям

$$(m^\sim)^{(k)}(x) \in I_{j,k}^m \text{ для } x \in [x_{j-1}^\wedge; x_j^\wedge], \quad (1)$$

такое, что вычисленные на X_2 значения $q^\sim = (q_j^\sim)_{j=0, \dots, n_2}$, $q_j^\sim = q(x_j^\vee; m^\sim, \tau, s)$, *близки* к q^\vee , т.е.

$$q^\vee \rightarrow m^\sim, \quad (m^\sim, \tau, s) \rightarrow (q^\sim \approx q^\vee, f^\sim). \quad (2)$$

Вместо q^\vee могут быть заданы значения локального напряжения трения $f^\vee = (f_j^\vee)_{j=0, \dots, n_2}$:

$$f^\vee \rightarrow m^\sim, \quad (m^\sim, \tau, s) \rightarrow (q^\sim, f^\sim \approx f^\vee), \quad (3)$$

где $f^\sim = (f_j^\sim)_{j=0, \dots, n_2}$, $f_j^\sim = f(x_j^\vee; m^\sim, \tau, s)$.

Аналогичным образом формулируются ОЗ по ТФ [5] и двумерные ОЗ (по вдуву и ТФ) [7]. Обсуждаются результаты вычислительных экспериментов по восстановлению управлений для ОЗ в интерполяционной и аппроксимационной постановках. Построены области допустимых значений «тепло-трение».

Литература

1. Бильченко Г.Г., Бильченко Н.Г. Об одной обратной задаче тепломассообмена // «Герценовские чтения-2016. Некоторые актуальные проблемы соврем. математики и матем. образования» в электр. журнале “Диф. уравнения и процессы управления”. 2016. № 2. Ч.2. С. 50-56.
2. Bilchenko G.G., Bilchenko N.G. Inverse problem of heat and mass transfer // Proc. Int. Conf. “Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems”, Pyatnitskiy's Conf., Russia, Moscow, 2016.
3. Bilchenko G.G., Bilchenko N.G. On the possibility of control restoration in some inverse problems of heat and mass transfer // 11th Int. Conf. on “Mesh methods for Boundary-Value Problems and Applications”, 20-25 October 2016, Kazan, Russia. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 158. N 1. P. 012020.
4. Bilchenko G.G., Bilchenko N.G. On computational experiments in some inverse problems of heat and mass transfer // 11th Int. Conf. on “Mesh methods for Boundary-Value Problems and Applications”, 20-25 October 2016, Kazan, Russia. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 158. N 1. P. 012021.
5. Бильченко Г.Г., Бильченко Н.Г. Обратные задачи тепломассообмена на проницаемых поверхностях гиперзвуковых летательных аппаратов. I. О некоторых постановках и возможности восстановления управления // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2016. № 4. С. 5-12.
6. Бильченко Г.Г., Бильченко Н.Г. Обратные задачи тепломассообмена на проницаемых поверхностях гиперзвуковых летательных аппаратов. II. О некоторых вычислительных экспериментах // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2016. № 4. С. 13-19.
7. Бильченко Г.Г., Бильченко Н.Г. Обратные задачи тепломассообмена на проницаемых поверхностях гиперзвуковых летательных аппаратов. III. О постановке двумерных задач и областях допустимых значений «тепло-трение» // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 1. С. 18-25.
8. Бильченко Г.Г., Бильченко Н.Г. Классы решений задач оптимального управления пограничным слоем на проницаемых поверхностях гиперзвуковых летательных аппаратов // «ВЗМШ С.Г. Крейна-2016»: Материалы междунар. конф. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2016. С. 82-86.

ПРЯМЫЕ ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕНОМ И ТРЕНИЕМ НА ПРОНИЦАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Г.Г. Бильченко, Н.Г. Бильченко

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева,
Россия, Казань, 420111, К. Маркса, 10
E-mail: ggibil2@gmail.com, bilchnat@gmail.com

В работах [1-14] рассмотрены следующие **прямые** задачи. По **заданным** управлениям: $m(x)$ - вдуву в ламинарный пограничный слой (ПС) на поверхности ГЛА, $\tau(x)$ - температурному фактору: $\tau(x) = T_w(x)/T_{e_0}$, где T_w - температура стенки, а T_{e_0} - температура в точке торможения потока, и $s(x) = \sigma B_0^2(x)$ - магнитному полю, где $x \in X = [0;1]$, требуется **рассчитать** параметры модели ПС [12] (для обтекания боковой поверхности кругового цилиндра и поверхности сферического носка) и **найти**: локальные тепловой поток (ТП) $q(x; m, \tau, s)$ и напряжение трения $f(x; m, \tau, s)$, интегральные ТП $Q(m, \tau, s)$ и силу трения $F(m, \tau, s)$, мощность $N(m, \tau, s)$ системы, обеспечивающей вдув:

$$(m, \tau, s) \rightarrow (q, f; Q, F, N) . \quad (1)$$

В [3, 4, 6-9] для заданных τ и s оптимальное m построено, как решение **экстремальной** задачи

$$Q(m, \tau, s) \rightarrow \inf_m \quad (2)$$

(для непрерывных m), при наличии **ограничения**

$$N(m, \tau, s) \leq N_{\max} . \quad (3)$$

Приводятся результаты вычислительных экспериментов (для $M_\infty = 10$, $H = 10$ [км], $R = 0,1$ [м]).

Литература

1. Бильченко Н.Г., Гараев К.Г. О существовании первого интеграла в одной оптимальной задаче с распределёнными параметрами // Известия ВУЗов. Математика. 1993. № 12(379). С. 31-34.
2. Бильченко Н.Г., Гараев К.Г., Дербенёв С.А. К задаче оптимального управления пограничным слоем электропроводящей жидкости в магнитном поле // Известия ВУЗов. Авиационная техника. 1994. № 1. С. 23-27.
3. Bilchenko N.G., Garaev K.G. On optimum control of laminar boundary layer of electroconductive gas by supersonic flow conditions // Proc. of 12th NATIONAL HEAT TRANSFER CONFERENCE (UIT). L'Aquila, Italy. 1994. P. 213-224.
4. Бильченко Н.Г., Гараев К.Г. Об оптимальном управлении тепломассообменом в ламинарном пограничном слое диссоциирующего газа // Известия ВУЗов. Авиационная техника. 2000. № 3. С. 17-19.
5. Бильченко Н.Г. К задаче оптимального управления пограничным слоем неравновесно диссоциирующего замороженного газа // Известия ВУЗов. Авиационная техника. 2002. № 2. С. 12-15.
6. Гараев К.Г., Овчинников В.А., Бильченко Н.Г. Инвариантные вариационные задачи ламинарного пограничного слоя при различных режимах течения. Казань: Изд-во КГТУ, 2003. 123 с.
7. Бильченко Н.Г. Вычислительные эксперименты в задачах оптимального управления тепломассообменом на проницаемых поверхностях при гиперзвуковых режимах полёта // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика и математика. 2015. № 1. С. 83-94.
8. Бильченко Н.Г. Вычислительные эксперименты в задачах оптимального управления тепломассообменом на проницаемых поверхностях тел вращения при гиперзвуковых режимах полёта // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2015. № 1. С. 5-8.
9. Бильченко Н.Г. Вычислительные эксперименты в задачах оптимального управления тепломассообменом на проницаемых поверхностях при гиперзвуковых режимах полёта: сравнительный анализ применения "простых" законов вдува // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика. Математика. 2015. № 1. С. 95-102.
10. Bilchenko N.G. Permeable Surfaces Hypersonic Aircraft Optimal Heat Protection Mathematical Modeling // Proc. 2015 Int. Conf. "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov (SCP), Russia, Saint-Petersburg, October 5-9, 2015. P. 310-313.
11. Бильченко Н.Г. Метод А.А. Дородницына в задаче обтекания проницаемого цилиндра потоком "замороженного" газа // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2015. №4. С. 5-12.
12. Бильченко Н.Г. Метод А.А. Дородницына в задачах оптимального управления тепломассообменом на проницаемых поверхностях в ламинарном пограничном слое электропроводящего газа // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2016. №1. С.5-14.
13. Bilchenko G.G., Bilchenko N.G. Functional Extreme Values Range // Proc. Int. Conf. "Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems", Pyatnitskiy's Conf., Russia, Moscow, 2016.
14. Бильченко Н.Г. Вычислительные эксперименты в задачах оптимального управления тепломассообменом на проницаемых поверхностях в ламинарном пограничном слое электропроводящего газа // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2016. №3. С. 5-11.

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ИНТЕГРИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ ТЕЧЕНИЕ ГАЗА ЗА ФРОНТОМ СИЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

В.И. Богатко, Е.А. Потехина

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: aerovib@mail.ru, eap225@gmail.com

Решение задачи определения параметров течения газа за фронтом искривленной сильной ударной волны связано с необходимостью интегрирования системы нелинейных уравнений в частных производных. Однако, если в задаче может быть выделен малый параметр, то процесс построения решения можно упростить, так как искомые функции могут быть представлены в виде рядов по этому параметру. Если в полученной системе уравнений два уравнения могут быть решены независимо от остальных, и при этом одно из них записывается в дивергентном виде, то введение новой функции (аналога функции тока) позволяет свести решение задачи к интегрированию нелинейного уравнения второго порядка в частных производных.

В том случае, когда полученное уравнение имеет специальный вид [1],

$$\sum_{i,j} A_{ij}(U_{i,j}U_{tt} - U_{it}U_{jt}) + \sum_i B_i U_{it} + DU_{tt} - C = 0, \quad (1)$$

оно может быть с помощью преобразования Эйлера-Ампера сведено к квазилинейному уравнению для функции $V(x_i, q)$ ($U(x_i, t) = V(x_i, q) + qt$, $q = U_t$)

$$\sum_{i,j} A_{ij}V_{i,j} + \sum_i B_i V_{iq} + CV_{qq} + D = 0, \quad (3)$$

где A_{ij} , B_i , C и D – функции от q , x_i , V , V_q , V_i или, что то же самое, от t , x_i , U , U_t , U_i , а $U_{tt} \neq 0$.

Если в уравнении (1) коэффициенты A_{ij} , B_i , C и D зависят только от x_i и U_t , то соответствующее ему уравнение (2) будет линейным.

Естественным малым параметром в задачах газовой динамики с сильными ударными волнами является отношение плотностей газа перед фронтом ударной волны и непосредственно за ней. Параметры течения в возмущенной области вблизи фронта ударной волны могут быть представлены в виде рядов по степеням параметра $\varepsilon = (\gamma - 1)/(\gamma + 1)$ (γ — эффективный показатель адиабаты), характеризующего это отношение [2]. Применение такого подхода к широкому классу задач обычно приводит к ситуации, когда система уравнений для поправок первого приближения расщепляется и появляется возможность свести решение всей системы уравнений к решению одного нелинейного уравнения второго порядка в частных производных. Результаты, полученные в теории интегрирования нелинейных уравнений второго порядка [1], позволили решить ряд задач теории гиперзвукового обтекания тонкого крыла переменной формы [3-5], а также задач отражения и дифракции сильной ударной волны [6-8].

Литература

1. Богатко В.И., Гриб А.А., Колтон Г.А. Некоторые приближенные решения уравнений нестационарной гиперзвуковой газовой динамики // Вестник Ленинградского университета. Серия 1: мат., мех., астроном. 1976. Вып. 3. № 13. С. 51-56.
2. Черный Г.Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М.: Физматгиз., 1959. 220 с.
3. Богатко В.И., Гриб А.А., Колтон Г.А. Нестационарное обтекание тонкого крыла конечного размаха гиперзвуковым потоком газа // Докл. АН СССР. 1978. Т. 240. № 5. С. 1040-1041.
4. Богатко В.И., Потехина Е.А. О неустановившемся гиперзвуковом течении газа при обтекании тонкого крыла переменной формы // Вестник С.-Петербурга. ун-та. 1995. Сер. 1. Вып. 3. № 15. С. 73-78.
5. Богатко В.И., Колтон Г.А., Потехина Е.А. Определение параметров течения газа в ударном слое при обтекании тонкого крыла переменной формы, движущегося с большой переменной скоростью // Вестник С.-Петербурга. ун-та. 2002. Сер. 1. Вып. 2. № 9. С. 60 - 66.
6. Богатко В.И., Колтон Г.А. Нерегулярное взаимодействие сильной ударной волны с тонким профилем // Вестник Ленингр. ун-та. Сер. 1. 1989. Вып. 3. № 15. С. 45-49.
7. Богатко В.И., Колтон Г.А. Маховское отражение сильной ударной волны от тонкого тела вращения // Вестник Ленингр. ун-та. Сер. 1. 1989. Вып. 4. № 22. С. 40-44.
8. Богатко В.И., Колтон Г.А. К задаче о нелинейной дифракции сильных ударных волн // Вестник Ленингр. ун-та. Сер. 1. 1988. Вып. 3. № 15. С. 45-49.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Р.В. Богомолов

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, Санкт-Петербург,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: bogrusvik@yandex.ru

Исследования аэродинамики плохообтекаемых тел обоснованы широкой распространенностью объектов подобных форм в реальных условиях. Например, исследования необходимы для разработки методики транспортировки плохообтекаемых грузов, подвешенных под вертолетом.

Деревянный цилиндр удлинения $\lambda = 3$ был подвешен на упругой подвеске в потоке, создаваемом в рабочей части аэродинамической трубы АТ-12. Ось вращения проходила через центр цилиндра перпендикулярно оси цилиндра и перпендикулярно вектору скорости набегающего потока. К одному торцу цилиндра была прикреплена хвостовая державка, соединенная с двумя пружинами, к торцам цилиндра были прикреплены диски. Механизм изменения угла атаки позволял изменять равновесный угол атаки β^* в пределах нескольких градусов.

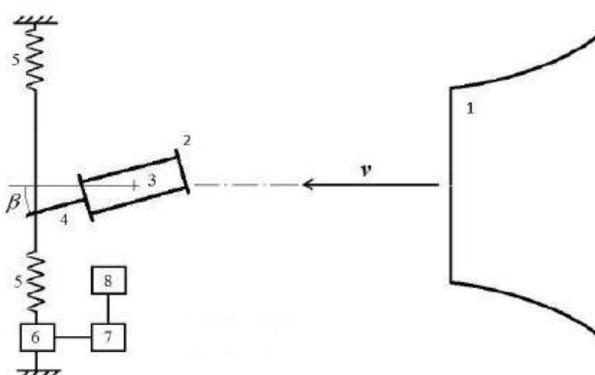


Рис. 1. Схема эксперимента в аэродинамической трубе:

1 – сопло трубы, 2 – концевой диск, 3 – ось вращения цилиндра, 4 – хвостовая державка, 5 – пружины,
6 – полупроводниковый тензопреобразователь С-50,
7 – РС-осциллограф Velleman PCS500, 8 – персональный компьютер.

Ранее проводились исследования вращательных колебаний круглого цилиндра удлинения $\lambda = 2$ без концевых дисков при разных равновесных углах атаки [1, 2, 3].

Нами было установлено, что цилиндр исследуемого удлинения $\lambda = 3$ без концевых дисков в потоке не колеблется. Присутствие дисков приводит к возникновению колебаний. Причем диапазон равновесных углов атаки, при которых существуют колебания, шире аналогичного диапазона углов атаки для цилиндров $\lambda = 2$ без концевых дисков. Оказалось, что амплитуда колебаний цилиндра с концевыми дисками слабо зависит от равновесного угла атаки в диапазоне $\beta^* \leq 4^\circ$.

Математическая модель, используемая для описания колебаний цилиндра без концевых дисков

$$\frac{A^2}{4} + \beta_*^2 = \frac{1}{\delta} - \frac{k_2 L}{\delta} \frac{1}{v} \quad (1)$$

для случая цилиндра с дисками не работает корректно для равновесных углов атаки $\beta_* \geq 2^\circ$.

Таким образом, присутствие дисков на торцах цилиндра приводит к колебаниям цилиндра в воздушном потоке. Диапазон равновесных углов атаки, при которых существуют колебания, увеличен по сравнению с цилиндрами без концевых дисков. Математическая модель, используемая для описания колебаний цилиндра без дисков, нуждается в корректировке.

Литература

1. Киселев Н.А., Рябинин А.Н. Исследование вращательных колебаний цилиндра в воздушном потоке // Естественные и математические науки в современном мире. 2014. № 15. С. 83-87.
2. Рябинин А.Н., Киселев Н.А. Влияние положения оси вращения цилиндра на его вращательные колебания в воздушном потоке // Вестник СПбГУ. Сер. 1. 2016. Т. 3. Вып. 2. С. 315-323.
3. Рябинин А.Н., Луценко И.В. Экспериментальные исследования колебаний цилиндра в воздушном потоке // Вестник СПбГУ. Сер. 1. 2007. Вып. 2. С. 120-123.

ПРЯМОЕ СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МАЛЫХ КЛАСТЕРОВ В СВОБОДНЫХ СТРУЯХ

Н.Ю. Быков¹, Ю.Е. Горбачев², С.А. Фёдоров¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, 29

²Коддан Текнолоджис, Россия, Санкт-Петербург, 197342, Белоостровская ул., 22
E-mail: nbykov2006@yandex.ru

Исследование процессов образования и роста кластеров в свободно расширяющихся струйных течениях представляет значительный интерес с точки зрения аэрокосмических и атмосферных приложений, оптимизации вакуумных технологий формирования наноматериалов и нанесения покрытий различного назначения.

В настоящей работе представлены результаты расчетов образования малых кластеров воды и металлов в струях пара, истекающего в вакуум из источника, температура и давление в котором поддерживаются постоянными. Условия истечения соответствуют околоконтинуальным и разреженным по числу Кнудсена режимам. Расчеты выполнены с помощью разработанного программного комплекса методом прямого статистического моделирования Монте-Карло (ПСМ) [1] на кластере “Политехник - РСК Торнадо” в Суперкомпьютерном центре “Политехнический”. Используемый параллельный алгоритм основан на принципе декомпозиции расчетной области.

В программном комплексе реализована модель образования кластеров, предложенная в работе [2]. Модель описывает всю цепочку формирования кластеров, включая процесс димеризации при парных/тройных столкновениях мономеров, процессы роста/распада кластеров в ходе столкновений мономер-кластер и мономолекулярного испарения кластеров, начиная с тримеров. Особенностью модели является использование равновесных распределений по размерам, не использующих понятия поверхностного натяжения [3]. Скорости прямых реакций ассоциации предполагаются известными [2], скорости обратных реакций столкновительного/мономолекулярного распада рассчитываются с использованием принципа детального баланса. Для метода ПСМ в рамках разработанной модели получены выражения для вероятностей соответствующих элементарных процессов ассоциации/распада кластеров как функции энергии относительного движения ассоциирующих частиц и их внутренней энергии [2].

С использованием разработанного программного комплекса получены данные о функциях распределений кластеров по размерам в источнике (камере) и в струе, приведены пространственные распределения концентраций, скоростей и внутренних энергий малых кластеров в поле течения. В работе обсуждаются вопросы влияния процессов кластерообразования на газодинамические параметры течения, влияния степени разреженности на динамику процесса конденсации. Представлены результаты сравнения с имеющимися в литературе данными о конечной мольной доле димеров в свободных струях водяного пара и паров металлов. Также авторами намечены перспективы распараллеливания программного комплекса для проведения вычислений на гетерогенных архитектурах.

Литература

1. Bird G.A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows. Oxford: Clarenton Press, 1994. 458 p.
2. Bykov N.Y., Gorbachev Yu.E. Mathematical models of water nucleation process for the direct simulation Monte Carlo method // Applied Mathematics and Computation. 2017. Vol. 296. P. 215-232.
3. Zhukhovitskii D.I. Size-corrected theory of homogeneous nucleation // J. Chem. Phys. 1994. Vol. 101. N 6. P. 5076–5080.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКЕ

К.Н. Волков¹, В.Н. Емельянов², И.В. Тетерина²

¹Университет Кингстона, Великобритания, Лондон, SW15 3DW, Friars Avenue, Roehampton Vale,

²Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-я Красноармейская, 1

E-mail: k.volkov@kingston.ac.uk, vlademelyanov@gmail.com, yaiv@mail.ru

Визуализация в вычислительной газовой динамике (Computational Fluid Dynamics, CFD) представляет собой заключительный этап моделирования, необходимый для анализа структуры течения и выяснения механизмов переноса в потоках жидкости и газа [1, 2]. Полученные в расчетах данные существуют в виде полей скалярных или векторных величин. Изображение линий уровня и заливка цветом, использование стрелок со своим масштабом и направлением, соответствующим представляемой векторной величине, и построение линий тока представляют собой графические технологии, наиболее широко используемые для изображения результатов расчетов. Использование цветных карт с переменными палитрами позволяет ориентироваться в структуре моделируемого течения при обработке результатов. Трехмерность моделируемого нестационарного течения создает существенные трудности для визуального представления результатов, затрудняя контроль и понимание численных данных, а также работу и обмен с полученной информацией о поле течения.

Рассматриваются концепции и методы визуального представления результатов численных исследований задач механики жидкости и газа. Обсуждаются подходы к визуализации вихревых течений, основанные на использовании градиентов основных и производных скалярных и векторных полей. Идентификация вихрей проводится по признаку распределения различных величин (нормированная спиральность, критерий Q , критерий λ_2 , критерий Δ) в области формирования вихревой линии или вихревой области течения. На основе вторичных векторных и скалярных полей создаются геометрические объекты (линии уровня, изоповерхности), дающие представление о вихревой структуре потока.

Расчеты проводятся с использованием подробных сеток и современных подходов к моделированию вихревых течений (прямое численное моделирование и моделирование крупных вихрей). Вихревую структуру струи показывает рис. 1. В сдвиговом слое струи присутствуют крупномасштабные вихревые структуры в форме тороидальных осесимметричных вихрей, зарождающихся на некотором расстоянии от среза сопла (порядка одного–двух его диаметров). В области начального участка характерный размер вихревых структур является достаточно малым. Вниз по потоку от начального участка характерный размер вихревых структур увеличивается, а обмен количеством движения между струей и окружающей жидкостью интенсифицируется. Контур когерентной структуры представляют собой эллипсы, что означает анизотропию турбулентных пульсаций. Генерация вихрей связана с неустойчивостью типа Кельвина–Гельмгольца сдвигового слоя. Максимумы и минимумы завихренности приблизительно соответствуют центрам вихрей.

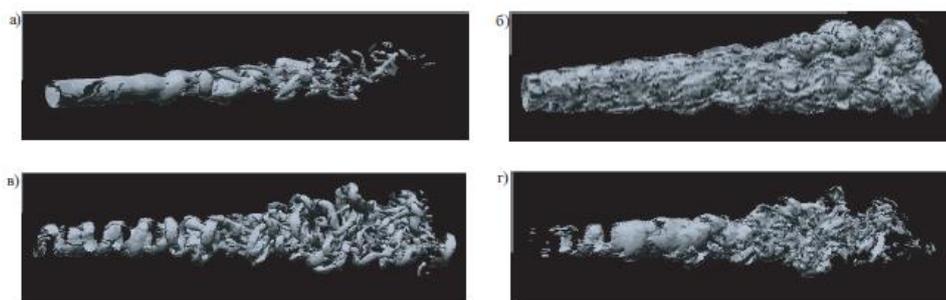


Рис. 1. Визуализация вихревого течения в струе на основе изоповерхностей максимальной завихренности (а), спиральности (б), критерия Q (в) и критерия λ_2 (г)

Литература

1. Бондарев А.Е., Галактионов В.А., Четкин В.М. Анализ развития концепций и методов визуального представления данных в задачах вычислительной физики // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2011. Т. 51. № 4. С. 669–683.
2. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Тетерина И.В., Яковчук М.С. Методы и концепции визуализации вихревых течений в задачах вычислительной газовой динамики // Вычислительные методы и программирование. 2016. Т. 17. № 1. С. 81–100.

УСТОЙЧИВОСТЬ И ПОДАВЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В РЕЛАКСИРУЮЩИХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ГАЗАХ

Ю.Н. Григорьев¹, И.В. Ершов^{1,2}

¹Институт вычислительных технологий СО РАН,
Россия, Новосибирск, 630090, пр. Ак. Лаврентьева, 6

²Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
Россия, Новосибирск, 630008, ул. Ленинградская, 113
E-mail: grigor@ict.nsc.ru, i_ershov@ngs.ru

В докладе представлены результаты исследования влияния релаксационных процессов в термически неравновесных молекулярных газах на устойчивость и диссипативные свойства течений. В качестве математической модели течений с релаксацией при умеренном уровне возбуждения используются полные уравнения Навье-Стокса вязкого теплопроводного газа с учетом объемной вязкости. Случай сильно неравновесного колебательно-возбужденного газа описывается полной системой уравнений двухтемпературной аэрогазодинамики, где релаксация колебательных мод моделируется уравнением Ландау-Теллера для колебательной температуры.

Анализ линейной устойчивости плоскопараллельных течений невязкого нетеплопроводного колебательно-возбужденного газа позволил получить обобщение первой и второй теорем Рэлея и теоремы Ховарда для таких течений. Исходя из уравнения энергетического баланса возмущений доказано, что термическая релаксация создает дополнительный диссипативный фактор, повышающий устойчивость потока. Приводятся расчетные данные о наиболее неустойчивых невязких модах с максимальными инкрементами нарастания. Проанализирована их зависимость от числа Маха несущего потока, времени колебательной релаксации и степени возбуждения колебательных мод. При исследовании линейной устойчивости вязких двумерных возмущений в сверхзвуковом плоском течении Куэтта совершенного и колебательно-возбужденного газов рассматривалась альтернатива, когда коэффициенты переноса либо принимались постоянными, либо зависящими от статической температуры потока. Для учета температурной зависимости сдвиговой вязкости использовалась модель Сазерленда. Показано, что «вязкая» стратификация значительно повышает устойчивость течения по сравнению со случаем постоянной вязкости. Вместе с тем простая модель постоянной вязкости сохраняет все характерные особенности развития вязких возмущений в модели Сазерленда. При учете температурной зависимости коэффициентов переноса диссипативный эффект возбуждения колебательной моды сохраняется. Соответствующее ему увеличение критического числа Рейнольдса для обеих моделей вязкости составляет примерно 12 %.

Энергетический анализ устойчивости сжимаемого течения Куэтта термически неравновесного двухатомного газа показал, что минимальные критические значения числа Рейнольдса Re_{cr} достигаются на модах продольных возмущений и возрастают с ростом коэффициента объемной вязкости, числа Маха, времени колебательной релаксации и степени возбуждения колебательных мод. Значения Re_{cr} увеличиваются при совокупном достижении предельных значений параметров неравновесности и числа Маха примерно в два с половиной раза. При этом основное влияние на возрастание Re_{cr} оказывает наиболее энергоемкая колебательная релаксация.

Результаты исследования влияния релаксационных процессов на эволюцию крупной вихревой структуры в плоском сдвиговом течении молекулярного газа показали заметное демпфирующее влияние термической неравновесности на нелинейную динамику возмущений при уровнях возбуждения, которые реально можно получить при течениях в соплах, недорасширенных струях или умеренной лазерной накачкой. Рассмотрено численное моделирование нелинейного развития неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца, которое достаточно полно воспроизводит локальный механизм начальной турбулизации свободного сдвигового течения. В качестве начальных возмущений использовались плоские волны, предварительно рассчитанные как собственные функции соответствующих линеаризованных систем невязких уравнений газовой динамики. Детально воспроизведена известная картина динамики развития крупной вихревой структуры «cat's-eye», характерная для возникновения и развития инерционной неустойчивости. Результаты расчетов показали, что при возрастании степени неравновесности внутренней энергии молекул в реальных для двухатомных газов пределах относительное увеличение диссипации кинетической энергии структуры, осредненное по времени ее «жизни», может достигать 12–15 %.

Таким образом, результаты исследований устойчивости сдвиговых течений термически неравновесного молекулярного газа позволяют сделать вывод о заметном демпфирующем влиянии релаксации возбужденных внутренних мод молекул на линейную и нелинейную динамику возмущений. Во всех выполненных исследованиях рассматривались уровни возбуждения, которые можно получить в двухатомных газах в течениях в соплах, недорасширенных струях или умеренной лазерной накачкой.

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА АТ-11: ИНТЕГРАЦИЯ PIV-МЕТОДА В АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В.Г. Габдылхакова, А.И. Цветков, Б.А. Щепанюк

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: gabd-venera@yandex.ru, acvetkov@yandex.ru, bschepan@gmail.com

Метод PIV (метод цифровой трассерной визуализации) - оптический метод измерения мгновенных полей скорости жидкости или газа в выбранном сечении потока.

В докладе представлена схема организации PIV-метода в открытой рабочей части промышленной аэродинамической трубы АТ-11.

Конструктивные особенности системы:

- сканируемый оптической системой объем: 1000 x 1000 x 1000 мм;
- длиннофокусные объективы для кросскорреляционных камер;
- в качестве трассеров в потоке – молекулы глицерина.

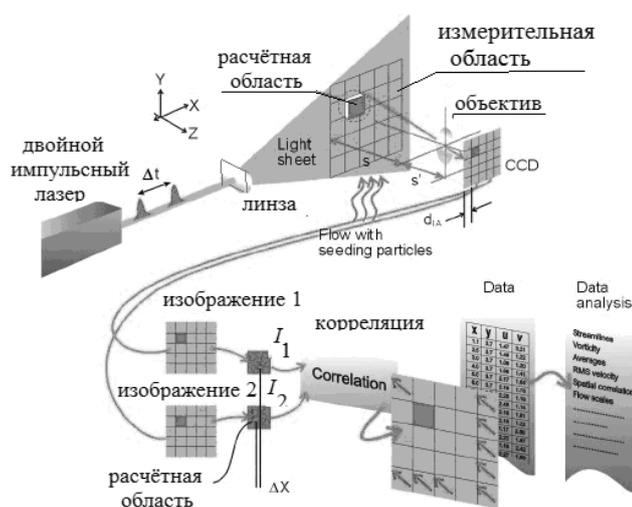


Рис. 1. Процедура работы PIV-метода

Примеры применения PIV-метода:

- течение потока под экраном;
- параметры дозвуковой струи;
- течение потока над поверхностью стола за различными преградами.

Обработка экспериментальных данных производилась с помощью ПО ActualFlow, пакета прикладных программ Matlab, а также программного пакета Tecplot 360.

Литература

1. Руководство пользователя программы «ActualFlow».
2. Руководство измерителя полей скорости «ПОЛИС»: Новосибирск. 2012.
3. Техническое описание измерительного комплекса «ПОЛИС».
4. Thielicke W., Stamhuis E.J. PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB // Journal of Open Research Software. 2014. Vol. 2: e30.

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА АТ-11: МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ПОТОКОВ В ДОЗВУКОВОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ С ОТКРЫТОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТЬЮ

В.Г. Габдылхакова, А.И. Цветков, Б.А. Щепанюк

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: gabd-venera@yandex.ru, acvetkov@yandex.ru, bschepan@gmail.com

Руководящими материалами для моделирования ветровых потоков являлись требования Еврокода [1] и национального приложения к Еврокоду [2]. Согласно этим материалам рассчитаны вертикальные профили скоростей и интенсивности турбулентности. На основе энергетического спектра Еврокода [1] определены требования к размерам продольного масштаба турбулентности и высотного масштаба сооружений.

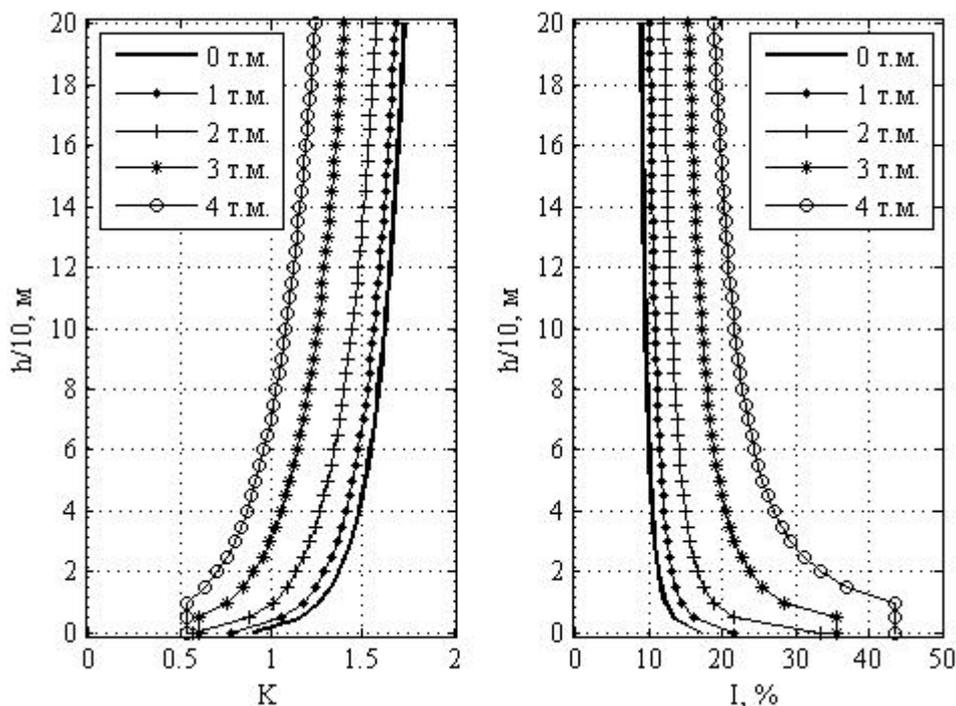


Рис. 1. Вертикальные профили средних безразмерных скоростей ветра и интенсивности турбулентности для различных типов местности

В аэродинамической трубе выполнены эксперименты по моделированию вертикальных профилей скорости и профиля интенсивности турбулентности в приземном ветровом слое, и вблизи экрана - аналога взлетно-посадочной полосы.

В ходе исследования определена возможность моделирования ветровых потоков в промышленных аэродинамических трубах замкнутого типа с открытой рабочей частью и определены условия для моделирования потоков для различных высотных сооружений.

Литература

1. Еврокод EN 1991-1-4:2003.
2. Национальное приложение к Еврокоду EN 1991-1-4.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ВИХРЕПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕЧЕНИЯ

А.М. Гайфуллин

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского,
Россия, Жуковский, 140180, ул. Жуковского, 1
E-mail: amgaif@mail.ru

При больших числах Рейнольдса существуют течения, в которых рециркуляционная область граничит с областью безвихревого течения. В стационарном случае для таких течений справедлива теорема Прандтля - Бэтчелора, согласно которой завихренность внутри рециркуляционной зоны есть величина постоянная, определяемая условием цикличности пограничного слоя вдоль границы зоны. В докладе будет построена теория нестационарных вихрепотенциальных течений, определены условия, при которых течение внутри рециркуляционной области будет автомодельным. Рассмотрено решение двух конкретных задач, связанных с эволюцией нестационарных рециркуляционных течений: о диффузии двух вихрей и о течении около полубесконечной пластины с движущейся против потока поверхностью. Обе эти задачи были поставлены выдающимися механиками.

Л.Н. Сретинским [1] была поставлена задача о диффузии двух противоположных вихрей равной интенсивности. В начальный момент времени вихри точечные. В докладе строится решение этой задачи. В зависимости от числа Рейнольдса определяется зависимость положения центров вихрей от времени. С течением времени скорость опускания вихрей уменьшается, расстояние между ними увеличивается, циркуляция вихрей - уменьшается. Выявлены два механизма диссипации циркуляции. На больших временах характеристики течения выходят на автомодельный режим.

Задача о течении около полубесконечной пластины с движущейся против потока поверхностью была поставлена в работах Дж.Б. Клемпа, А. Аквивоса [2,3] и Г.Г. Черного [4,5]. Авторы решали эту задачу с помощью автомодельного по пространству уравнения пограничного слоя с нулевым градиентом давления. Оказалось, что решение существует только при относительных скоростях движения поверхности меньших 0,3541. В докладе строится решение задачи при больших значениях скорости движения пластины. Задача разбивается на несколько асимптотических областей, среди которых выделим рециркуляционное течение, возникающее в области разворота потока.

Обе задачи решены с помощью асимптотического метода сращиваемых асимптотических разложений. Интересно отметить, что в обеих задачах размер рециркуляционной области растет как корень из времени, что является необходимым условием автомодельности вихрепотенциального течения. Циркуляция рециркуляционной области в первой задаче падает как корень из времени, а во второй - растет как корень из времени. Аналитическое решение обеих задач сравнивается с численным решением.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-01-00128).

Литература

1. Сретинский Л.Н. О диффузии вихревой пары // Изв. АН. СССР. Отделение технических наук. 1947. № 3. С. 271-300.
2. Klemm J.B., Acrivos A. A method for integrating the boundary-layer equations a region of reverse flow // J. Fluid Mech. 1972. V.53. Pt. 1. P. 177-191.
3. Klemm J.B., Acrivos A. A moving-wall boundary layer with reverse flow // J. Fluid Mech. 1976. V.76. Pt. 2. P. 363-381.
4. Черный Г.Г. Пограничный слой на движущейся поверхности // Избранные проблемы прикладной механики. Сборник работ, посвященный 60-летию академика В.Н. Челомея. М.: Наука, 1974. С. 709-719.
5. Черный Г.Г. Пограничный слой на движущейся поверхности // Аэромеханика. К 60-летию академика В.В. Струминского. М.: Наука, 1976. С. 99-104.

**РАСЧЕТ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ
СЛАБОИОНИЗОВАННОГО ГАЗА ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ
МОМЕНТНЫМ МЕТОДОМ
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

А.Б. Герасименко¹, И.А. Эндер², Л.А. Бакалейников¹, Е.Ю. Флегонтова¹

¹ *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Россия, Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, 26*

² *Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: gerasimenko.alexander@mail.ioffe.ru, bakal@ammp.ioffe.ru*

Рассмотрена задача о расчете функции распределения малой примеси ионов на фоне равновесно распределенных по скоростям атомов при наличии электрического поля. Расчет базируется на использовании моментного метода, заключающегося в разложении функции распределения по функциям Барнетта [1]. Разработанная нами рекуррентная процедура позволяет последовательно отыскивать коэффициенты разложения изотропных матричных элементов интеграла столкновений по омега-интегралам [2]. Найденные изотропные МЭ используются для построения неизотропных МЭ в ходе второй рекуррентной процедуры. Разработанный подход позволяет решать моментным методом целый класс кинетических задач для произвольных скоростных зависимостей сечений рассеяния.

В докладе представлены результаты расчетов ФР, а также первых ее моментов, для нескольких скоростных зависимостей сечения рассеяния и проведено сравнение с известными экспериментальными результатами. Проведен анализ сложности алгоритма и исследованы границы его применимости.

Литература

1. Эндер А.Я., Эндер И.А. Интеграл столкновений уравнения Больцмана и моментный метод. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2003. 224 с.
2. Эндер И.А., Бакалейников Л.А., Флегонтова Е.Ю., Герасименко А.Б. Рекуррентная процедура построения неизотропных матричных элементов интеграла столкновений нелинейного уравнения Больцмана // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 8.

УРАВНЕНИЯ НЕРАВНОВЕСНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ

Ю.Е. Горбачев

Коддан Текнолоджис, Россия, Санкт-Петербург, 197342, ул. Белоостровская, 22

E-mail: yuriy.gorbachev@gmail.com

Неравновесные химические эффекты играют важную роль в задачах физики, химии и биологии [1]. Используемые до настоящего времени уравнения для смеси химически реагирующих газов получены либо из феноменологических соображений, либо выведены из кинетических уравнений в приближении Пригожина [2]. В рамках подхода, предложенного Пригожиным с соавторами, часть интеграла столкновения уравнения Больцмана, ответственная за химические превращения, считается малым возмущением, то есть величиной порядка малого параметра теории – числа Кнудсена. Это предположение не выполняется для высокопороговых реакций, кроме того, теория мономолекулярных реакций не воспроизводится в рамках такого подхода. Для преодоления этих трудностей в [3] был предложен асимптотический метод решения уравнения Больцмана, базирующийся на трех основных моментах: (1) в интеграле столкновений все его части считаются одного порядка; (2) быстрые и медленные (газодинамические) переменные вводятся с использованием понятия приближенных сумматорных инвариантов (ПСИ) соответствующих интегралов столкновений – медленными переменными являются усредненные с функцией распределения ПСИ; (3) функция распределения представляется в виде суммы, первое слагаемое которой зависит только от медленных (газодинамических) переменных (квазиравновесное распределение, зависит от времени и координат только через газодинамические величины и, соответственно, являющееся медленной переменной), а второе слагаемое явно зависит от времени и координат и является быстрой переменной. Уравнения для быстрых и медленных переменных записываются в виде сингулярно-возмущенной системы уравнений, которая решается модифицированным методом Чепмена-Энскога [3].

В рамках этого подхода уже в эйлеровском приближении скорости химических реакций оказываются неравновесными и являются сложными функциями концентраций компонентов смеси (что обусловлено обменом энергией между различными степенями свободы – соответствующие члены отвечают за пространственно-однородную неравновесность) и содержат слагаемые, пропорциональные дивергенции газодинамической скорости (отвечающие за пространственно-неоднородную неравновесность). Развитие этого подхода [4-7] позволило записать скорости реакций $R = \{R_\alpha\}$ в ренормализованном виде: в виде произведения резольвенты ренормализационной матрицы $A = \{A_{\alpha\beta}\}$ и вектора из редуцированных скоростей реакций $R^0 = \{R^0_\alpha\}$: $R = (1-A)^{-1}R^0$. Редуцированные скорости реакций состоят из пространственно-однородной и пространственно-неоднородной частей: $R^0 = R^{h0} + R^{i0}$, $R^{h0} = R^{qe} + R^{neh0}$, $R^{i0} = R_d^0 \nabla u$, где R^{qe} равновесная константа, а R^{neh0} – неравновесная пространственно-однородная поправка. Матрица A и вектора R^{neh0} и R_d^0 определяются соответствующими частями функции распределения, для которых записаны соответствующие интегральные уравнения. В рамках сделанных приближений удастся элементы резольвенты матрицы A и векторов R^{neh0} и R_d^0 представить в виде комбинации равновесных констант реакций, скобочных интегралов для нереакционных процессов и коэффициентов передачи энергии. Таким образом, скорость реакции R_α для компонента α через элементы матрицы A зависит от скоростей всех остальных реакций компонентов, вступающих в реакции с компонентом α . Как показано в [6] на модельном примере, реакции могут сильно влиять друг на друга, вплоть до полной блокировки одной реакции другой.

Удастся показать, что редуцированные скорости реакций R^{h0}_α имеют те же условия равновесия, что и равновесные скорости реакций, в то время как пространственно-неоднородные неравновесные эффекты, приводят к сдвигу равновесия, что дает возможность течением управлять химическими реакциями.

Литература

1. Lu X., Naidis G.V., Laroussi M., Reuter S., Graves D.B., Ostrikov K. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects // Phys. Rep. 2016. Vol. 630. P. 1-84.
2. Prigogine I., Xhrouet E. On the perturbation of Maxwell distribution function by chemical reactions in a gas // Physica. 1949. Vol. 15. P. 913-932.
3. Kolesnichenko E.G., Gorbachev Yu.E. Gas-dynamic equations for spatially inhomogeneous gas mixtures with internal degrees of freedom. I. General theory // Appl. Math. Mod. 2010. Vol. 34. P. 3778-3790.
4. Kolesnichenko E.G., Gorbachev Yu.E. Gas-dynamic equations for spatially inhomogeneous gas mixtures with internal degrees of freedom. II. General representation for one-temperature reaction rates // Appl. Math. Mod. 2012. Vol. 37. P. 5304-53014.
5. Kolesnichenko E.G., Gorbachev Yu.E. Chemical reactions in non-equilibrium gas mixtures and mass action law breakdown // Shock Waves. 2013. Vol. 23. P. 635-648.
6. Gorbachev Yu.E. Gas-dynamic equations for spatially inhomogeneous gas mixtures with internal degrees of freedom. III. Renormalized reaction rates // Appl. Math. Mod. 2016. Vol. 40. P. 10131-10152.
7. Kolesnichenko, E.G., Gorbachev, Yu.E. Two-temperature Reaction and Relaxation Rates // Shock Waves. 2017. Vol. 27. P. 333-374.

НЕРАВНОВЕСНАЯ КВАЗИХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НУКЛЕАЦИИ

Ю.Е. Горбачев

Коддан Текнолоджис, Россия, Санкт-Петербург, 197342, ул. Белоостровская, 22

E-mail: yuriy.gorbachev@gmail.com

Квазихимическая модель нуклеации является одной из наиболее распространенных основ для построения классической теории конденсации [1-3]. При этом процесс нуклеации рассматривается как процесс присоединения мономера к g -меру. Классическая теория конденсации имеет ряд хорошо известных недостатков: (а) она базируется на жидко-капельной модели, в связи с чем некорректно описывает малые кластеры и не позволяет описывать ситуации при больших пересыщениях; (б) она подразумевает термическое равновесие пара и кластеров; (в) она не описывает влияния скорости изменения газодинамических параметров на процесс конденсации.

Метод, позволяющий описывать малые кластеры и не использующий понятия поверхностного натяжения был предложен в [4]. В [5,6] предложены подходы к учету влияния скорости изменения газодинамических параметров (прежде всего пересыщения) на ток зародышеобразования. Для учета влияния теплопереноса и уточнения влияния изменения газодинамических параметров на нуклеацию в данной работе система уравнений для концентраций g -меров выводится из соответствующей системы уравнений Больцмана для функций распределения g -меров на основе метода, предложенного в работах [7-10]. Он базируется, прежде всего, на отказе от предположения, сделанного Пригожиным с соавторами [11] о том, что «химическая» часть интеграла столкновений много меньше остальных. Двумя другими ключевыми моментами предложенной асимптотической процедуры являются: (1) разбиение переменных на быстрые и медленные на основе введения понятия приближенных сумматорных инвариантов (ПСИ) соответствующих интегралов столкновений – медленными переменными являются усредненные с функцией распределения ПСИ; (2) представление функции распределения в виде суммы, первое слагаемое которой зависит только от медленных (газодинамических) переменных (квазиравновесное распределение, зависит от времени и координат только через газодинамические величины и, соответственно, являющееся медленной переменной), а второе слагаемое явно зависит от времени и координат и является быстрой переменной. Уравнения для быстрых и медленных переменных записываются в виде сингулярно-возмущенной системы уравнений, которая решается модифицированным методом Чепмена-Энскога [7].

Полученная система для численных плотностей g -меров является обобщением системы уравнений квазихимической модели нуклеации. В отличие от традиционной модели, скорости проста/распада g -меров являются сложными функциями концентраций кластеров, их теплоемкостей и содержат члены, пропорциональные дивергенции скорости, отвечающие за пространственно-неоднородные эффекты [8-10].

Построенная модель, являясь однотемпературной, учитывает энергообмен между различными степенями свободы кластеров и, как следствие, влияние этого энергообмена на скорости роста/распада кластеров. В дальнейшем предполагается применение упомянутого выше асимптотического метода для решения системы уравнения неравновесной квазихимической модели.

Литература

1. *Abraham F.F.* Homogeneous nucleation theory. Academic Press, New York, 1974.
2. *Стернин Л.Е.* Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение, 1974.
3. *Гордиец Б.Ф., Шелепин Л.А., Шмоткин Ю.С.* Кинетика изотермических процессов гомогенной конденсации // Труды ФИАН. 1986. Т. 145. С. 189-219.
4. *Жуховицкий Д.И.* Теория гомогенной нуклеации с поправкой на размер кластеров // ТВТ. 1994. Т. 32. № 2. С. 261-266.
5. *Shneidman V.A.* Condensation process under the condition of fast gasdynamics // Sov. Phys. Technol. Phys. 1987. Vol. 32. P. 76-81.
6. *Горбачев Ю.Е., Никитин И.С.* Эволюция распределения кластеров по размерам в процессе нуклеации при быстром изменении газодинамических процессов // ЖТФ. 2000. Т. 70. С. 28-38.
7. *Kolesnichenko E.G., Gorbachev Yu.E.* Gas-dynamic equations for spatially inhomogeneous gas mixtures with internal degrees of freedom. I. General theory // Appl. Math. Mod. 2010. Vol. 34. P. 3778-3790.
8. *Kolesnichenko E.G., Gorbachev Yu.E.* Gas-dynamic equations for spatially inhomogeneous gas mixtures with internal degrees of freedom. II. General representation for one-temperature reaction rates // Appl. Math. Mod. 2012. Vol. 37. P. 5304-53014.
9. *Kolesnichenko E.G., Gorbachev Yu.E.* Chemical reactions in non-equilibrium gas mixtures and mass action law breakdown // Shock Waves. 2013. Vol. 23. P. 635-648.
10. *Gorbachev Yu.E.* Gas-dynamic equations for spatially inhomogeneous gas mixtures with internal degrees of freedom. III. Renormalized reaction rates // Appl. Math. Mod. 2016. Vol. 40. P. 10131-10152.
11. *Prigogine I., Xhrouet E.* On the perturbation of Maxwell distribution function by chemical reactions in a gas // Physica. 1949. Vol. 15. P. 913-932.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ

Ф.С. Горенский

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова,
Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-я Красноармейская, 1
E-mail: volkFG@yandex.ru

В современной энергетике загрязнение окружающей среды является важной проблемой. С каждым годом ужесточаются нормы по выбросам оксидов азота [1], что заставляет искать новые пути их снижения и анализа.

Данная работа посвящена моделированию работы горелочных устройств в составе трубчатых печей для определения содержания термических оксидов азота в продуктах сгорания средствами ANSYS FLUENT. А также анализу возможности использования инструментов данного программного комплекса для снижения выбросов оксидов азота.

Рассматриваемые задачи:

1. Сравнение расчетных моделей горения ANSYS FLUENT по точности определения содержания термических оксидов азота в продуктах сгорания.
2. Использование моделей ANSYS FLUENT для анализа влияний конструктивных изменений горелочных устройств с целью снижения содержания термических оксидов азота в продуктах сгорания.

Было проведено сравнение полученных результатов с заявленными характеристиками аналогичных по мощности устройств. Сравнение результатов показало, что некоторые модели горения с достаточной точностью позволяют определять содержание термических оксидов азота. На рисунке 1 показаны результаты численного моделирования данной задачи на примере модели non-premix-combustion.

Вторая задача заключалась в моделировании работы горелочного устройства со стандартной схемой сжигания, по результатам которого анализировались конструктивные способы снижения содержания оксидов азота. В частности, один из рассматриваемых способов – принцип разделения подачи топливного газа на две ступени. Полученное снижение содержания оксидов азота составило 24%, что для данной схемы сжигания совпадает с указанным значением в The John Zink combustion handbook[2].

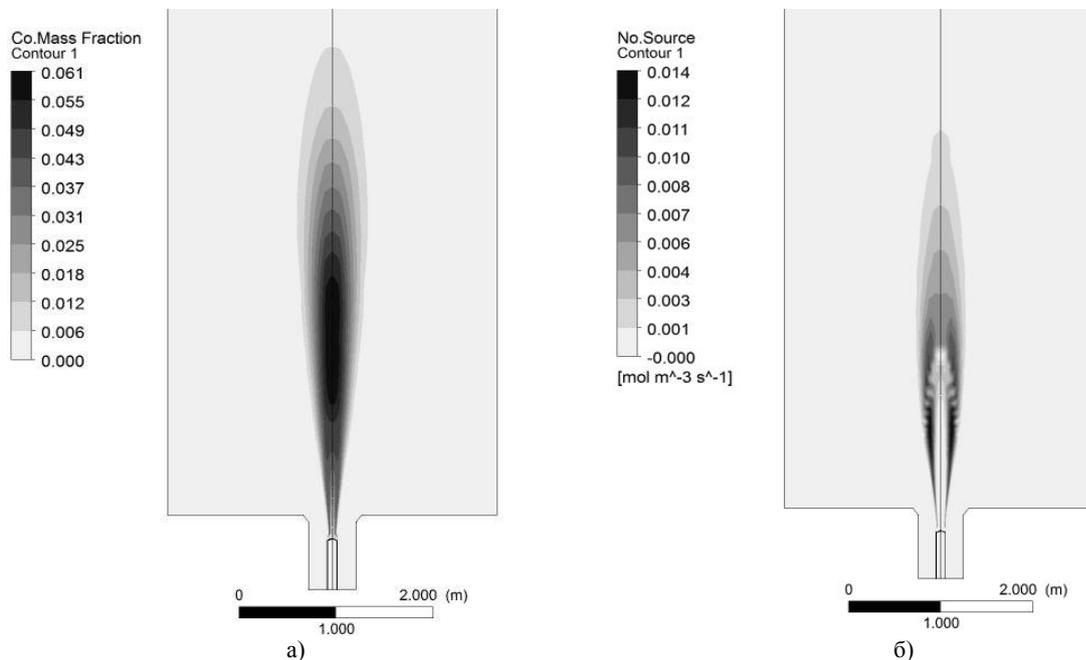


Рис.1. а – поле массовых долей CO, б – поле скоростей образования NO

Литература

1. Жидков А.Б., Герасимов Д.П., Денисов Д.Е., Кравченко С.А., Масько А.В., Чистяков К.В., Хухрин Е.А. Трубчатые нагревательные печи нефтепереработки и нефтехимии. СПб.: АртПроект, 2015. 104 с.
2. Bauckal C.E. The John Zink Combustion Handbook. CRC Press LLC, 2001. 750 p.

К ЗАДАЧЕ ОБТЕКАНИЯ БЕСКОНЕЧНОГО КЛИНА СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ГАЗА

К.С. Груздев

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7/9
E-mail: mycopka66@yandex.ru*

При обтекании клина сверхзвуковым потоком газа в зависимости от комбинации скорости набегающего потока и угла полураствора клина возможны два режима обтекания: с присоединенной к вершине клина головной ударной волной и с отошедшей ударной волной [1]. В случае режима обтекания с присоединенной ударной волной параметры течения в области между головной ударной волной и поверхностью обтекаемого клина, а также положение головной ударной волны определяются с помощью гипотезы сильных разрывов (ударной поляры), построенной на известной скорости набегающего потока. Пределы применимости такой модели обтекания бесконечного клина сверхзвуковым потоком газа зависят от максимально возможного угла поворота потока за поверхностью разрыва при данной скорости набегающего на клин сверхзвукового потока. Максимально возможный угол поворота потока за поверхностью разрыва будет также зависеть и от свойств газа. Если уравнение состояния взять в виде адиабаты Пуассона, то свойства набегающего газового потока будут определяться показателем адиабаты. Сопоставление численных расчетов с имеющимися точными решениями показывают, что влияние реальных свойств воздуха на газодинамические параметры за фронтом ударной волны достаточно хорошо можно учесть изменением отношения удельных теплоемкостей, то есть введением так называемого «эффективного показателя адиабаты» [2]. Кроме того, можно учитывать резкие изменения состояния среды с помощью разрыва показателя адиабаты на фронте головной ударной волны [3, 4].

В настоящей работе предполагается:

1. сравнить ударные поляры при разных показателях адиабаты для фиксированного значения числа Маха набегающего потока;
2. определить зависимость величины максимально возможного угла поворота потока за фронтом ударной волны от числа Маха набегающего потока и тем самым определить пределы применимости модели обтекания бесконечного клина сверхзвуковым потоком газа с присоединенной к вершине клина головной ударной волны.

Литература

1. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Том 2. М.: Физматгиз, 1963. 728 с.
2. Лунев В.В. Течение реальных газов с большими скоростями. М.: Физматлит, 2007. 760 с.
3. Богатко В.И., Потехина Е.А. Некоторые замечания об учете реальных свойств газа за фронтом ударной волны // Ученые записки ЛГУ. Сер. математических наук. 1977. Вып. 55. Сб. 5. № 393. С. 152-156.
4. Цибаров В.А. Кинетический метод в теории газозвесей. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1997. 192 с.

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗОЛИРОВАННЫХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ ЭМИССИИ В ГЛУБОКИЙ ВАКУУМ

Ю.Ф. Гунько¹, Н.А. Гунько²

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7/9

²Физико-Технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,
Россия, Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, 26
E-mail: yurigunko@gmail.ru, nataliagunko@gmail.com

В целом ряде явлений важно знание структуры электрических полей в окрестности изолированных тел в условиях эмиссии с их поверхности в глубокий вакуум. Самосогласованные электрические поля при этом определяют целый ряд особенностей поведения плазмы и прежде всего особенности движения заряженных частиц в приповерхностном слое. Заряженные частицы могут относиться как к основным компонентам, входящим в плазму, так и к вкрапленным в среду частицам нано- и микро-размеров. Подобная ситуация может иметь место в вакуумных приборах, устройствах электрической очистки, вблизи поверхности космических аппаратов, искусственных спутников Земли и безатмосферных небесных тел.

Как правило, определение структуры электрических полей проводится численно.

В данной работе рассмотрено аналитическое решение для потенциала электрического поля, основанное на результатах, полученных в работе [1], в которой проведено математическое исследование решения плоской одномерной задачи определения потенциала электрического поля при различных начальных условиях на поверхности эмитирующего тела.

Показано, что из всех возможных решений лишь одно удовлетворяет физическим условиям задачи об эмиссии с поверхности изолированного тела в глубокий вакуум.

Сформулированная задача решалась при следующих предположениях: рассматривалась плоская геометрия; эмиссия считалась стационарной; предполагалось, что частицы, вылетающие с поверхности, обладают одинаковыми энергиями и движутся в одном направлении; потенциал электрического поля считался непрерывной функцией, имеющей непрерывную производную по координате; потенциал окружающего пространства (вне зоны экранирования) полагался равным нулю.

На основе полученного решения, в частности, найдено выражение для толщины экранирующего слоя d :

$$d = \frac{1}{3\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{i}} \cdot \left(\frac{1}{2me^2} \right)^{1/4} W_k^{3/4},$$

где i – плотность эмиссионного тока, W_k – кинетическая энергия частиц, вылетающих с поверхности.

Литература

1. Гунько Ю.Ф., Колесникова Э.Н. Структура течения вблизи плоской поверхности в сильно разреженной плазме // Модели неоднородных сред. Физическая механика. 2004. Вып. 8. С. 63-95.

О ЗАДАЧАХ ГИЛЬБЕРТА – ПРИВАЛОВА В ПЛОСКОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Ю.М. Даль

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: ymdahl@yandex.ru

Исследуются задачи Гильберта-Привалова для плоскости с конечной или бесконечной системой прямолинейных разрезов $a_k b_k$ ($k=1, 2, \dots$) коллинеарных оси x . Пусть к одной из кромок некоторого разреза $a_i b_i$ приложена сосредоточенная сила $2R=2P+i2T$ направленная под углом α к оси x . Очевидно, что решение задачи об упругой плоскости с произвольно загруженной совокупностью разрезов будет являться суммой решений четырех задач, схемы которых изображены на рис. 1.

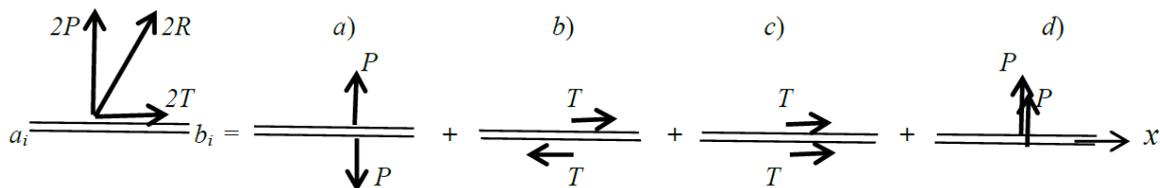


Рис. 1. Исходная задача и основные частные задачи.

Согласно [1], напряжения $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ в плоскости с разрезами определяются зависимостями

$$\sigma_{xx} + \sigma_{yy} = 2[\Phi(z) + \overline{\Phi(z)}], \quad \sigma_{yy} - \sigma_{xx} + 2i\sigma_{xy} = 2[-2iy\Phi'(z) + \Psi_2(z)], \quad (1)$$

где $\Phi(z)$ и $\Psi_2(z)$ – регулярные функции, причем симметрия внешних нагрузок относительно оси x (задачи a и c) налагает на эти функции следующие условия:

$$\overline{\Phi(z)} = \Phi(\bar{z}), \quad \overline{\Psi_2(z)} = \Psi_2(\bar{z}). \quad (2)$$

При асимметрии внешних усилий (задачи b и d) имеем

$$\overline{\Phi(z)} = -\Phi(\bar{z}), \quad \overline{\Psi_2(z)} = -\Psi_2(\bar{z}). \quad (3)$$

Из соотношений (1), (2), (3) получаем

$$\sigma_{yy} + i\sigma_{xy} = \Phi(z) \pm \Phi(\bar{z}) - 2iy\Phi'(z) \pm \Psi_2(z). \quad (4)$$

Краевые условия на разрезах $a_k b_k$ ($k = 1, 2, \dots, N$) будут:

$$\sigma_{yy}^\pm + i\sigma_{xy}^\pm = \sum_{k=1}^N F_k^\pm \delta(x - \lambda_k), \quad (5)$$

где F_k^\pm – сила, приложенная в точке λ_k на разрезе $a_k b_k$; индексами «плюс» и «минус» обозначены соответственно верхние и нижние берега разрезов; $\delta(x - \lambda_k)$ – дельта функция Дирака. В задаче a) функция $F_k^\pm = -P_k$; в задаче b) функция $F_k^\pm = iT_k$; в задаче c) $F_k^+ = +iT_k$, $F_k^- = -iT_k$; в задаче d) $F_k^+ = -P_k$, $F_k^- = +P_k$. Учитывая равенства (4), запишем уравнение (5) в виде краевого условия для двух регулярных функций $\Phi(z)$ и $\Psi_2(z)$, связанных между собой зависимостью (4)

$$\Phi^\pm(x) \pm \Phi^\mp(x) \pm \Psi_2^\pm(x) = \sum_{k=1}^N F_k^\pm \delta(x - \lambda_k) \quad (6)$$

Проблему нахождения функции $\Phi(z)$ по условию (6), где отсутствует слагаемое $\Psi_2^\pm(x)$, обычно называют задачей Гильберта–Привалова [2]. Функции $\Phi(z)$ и $\Psi_2(z)$, удовлетворяющие приведенному выше равенству (6), установлены в работах [3, 4] для различных задач плоской теории упругости.

Литература

1. Колосов Г.В. Применение комплексной переменной к теории упругости. М.: ОНТИ, 1935. 215 с.
2. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. 4-е изд. М.: Наука, 1966. 707 с.
3. Даль Ю.М. Некоторые основные задачи теории упругости о плоскости с прямолинейными разрезами // Вестник С.-Петербур. ун-та. Сер.1. 2016. Т. 3(61). Вып. 1. С. 120-133.
4. Даль Ю.М. Растяжение упругой плоскости с решеткой прямолинейных разрезов // Вестник С.-Петербур. ун-та. Сер. 1. 2016. Т. 3(61). Вып. 2. С. 274-283.

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ В СОПЛЕ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

В.Н. Емельянов, М.С. Яковчук, Н.А. Брыков

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,

Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-я Красноармейская, 1

E-mail: vlademelyanov@gmail.com, mihailyakovchuk@gmail.com, brykovna@yandex.ru

Нестационарные течения в соплах с изменяемой геометрией характерны для многих задач АРКТ. В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с численным моделированием течения продуктов сгорания в сопле при перемещении его раздвижной части из исходного положения в рабочее, и сопловых течений при движении тела в области критического сечения.

Применение раздвижных сопел в двигательных установках является одним из способов увеличения геометрической степени расширения сопла и удельного импульса тяги. Для численных расчетов используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса, замкнутые при помощи уравнений SST-модели турбулентности, и подвижные сеточные структуры (рис. 1).

Изучается нестационарная структура потока, формирующегося при приведении сопла в рабочее положение и пространственно-временные взаимосвязи между параметрами течения. Рассчитывается изменение осевой силы во времени, приложенной к внутренним стенкам сопла, при истечении реактивной струи из сопла в условиях перемещения его выдвинутой секции. Изменение силового усилия носит немотонный характер (рис. 2), достигая в некоторый момент времени минимального значения, а в конце расчета, когда сопло приводится в рабочее положение, выходит на постоянный уровень.

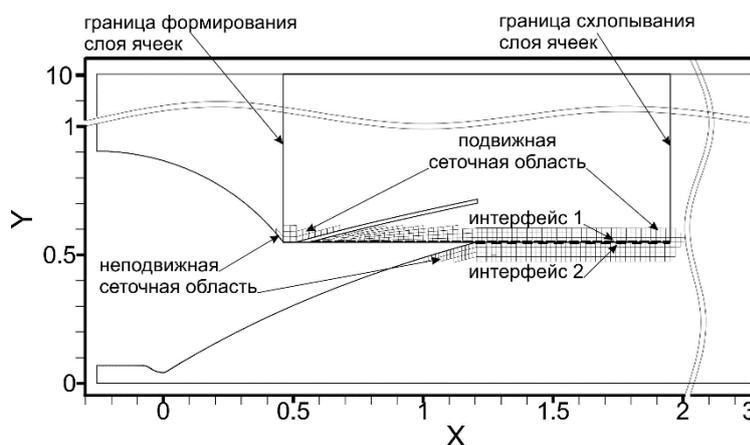


Рис. 1. Схема конфигурации расчетной области.

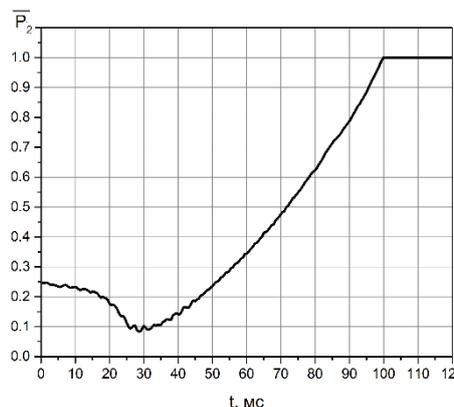


Рис. 2. Изменение во времени осевой силы, приложенной к внутренним стенкам выдвинутой секции сопла.

Задача частичного перекрытия сопла телом может быть интересна в ракурсе различных вопросов: управление горением в ракетных двигателях, управление величиной тяги, влияние перекрытия сопла крупногабаритными фракциями топлива, при утилизации ракетных двигателей. Перекрытие критического сопла инициирует волновой процесс, распространяющийся как по потоку, так и в камеру сгорания.

В работе рассчитывается нестационарное течение газа в проточной части сопла при прохождении осесимметричного тела через критическое сечение сопла. Рассматривается возвратно-поступательное движение тела по заданному закону, а также движение под действием приложенных газодинамических сил. Решение задачи проводилось в невязкой постановке в среде ANSYS Fluent с использованием шестиступенчатого решателя. Аналогичная задача решена с помощью пользовательского программирования в среде Matlab. Проведено сравнение полученных результатов.

Литература

1. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / Под ред. А.С. Коротева. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.
2. Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе / Под ред. Л.Н. Лаврова. М.: Машиностроение, 1993. 215 с.

О РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ТУРБУЛЕНТНОГО НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ТРУБАХ

Н.Н. Ермолаева, Г.И. Курбатова

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: n.ermolaeva@spbu.ru, g.kurbatova@spbu.ru*

В модель неустановившегося турбулентного неизотермического течения газа в трубах входят коэффициент гидравлического сопротивления и суммарный коэффициент теплообмена газа с окружающей средой. Трудности расчета этих параметров хорошо известны [1]. При моделировании неустановившихся режимов течения встает вопрос о допустимости пренебрежения зависимостью этих величин от времени.

В работе исследованы вопросы определения этих параметров и найдены необходимые оценки на основе численных расчетов различных вариантов неустановившихся турбулентных течений газов в трубах при сверхвысоких давлениях в северных морях.

Приведено решение задачи идентификации по известным экспериментальным данным коэффициента гидравлического сопротивления и суммарного коэффициента теплообмена газа с окружающей средой для модели установившегося неизотермического течения газа по морским газопроводам, основанное на идеях работы [2].

Частично проведенные исследования опубликованы в работах [3], [4].

Литература

1. Казак К.А., Чионов А.М., Кориунов С.А., Кулик В.С. Идентификация неизмеряемых параметров газопровода для моделирования параметров потока газа // Трубопроводный транспорт [теория и практика]. 2012. № 2. С. 36-41.
2. Васильев О.Ф., Бондарев Э.А., Воеводин А.Ф., Каниболотский М.А. Новосибирск С.О.: Наука, 1978. 128 с.
3. Ермолаева, Н.Н., Курбатова Г.И. Параметрическая идентификация модели установившегося неизотермического течения газа по морскому газопроводу // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т. 1. № 1 (35) С. 8-14.
4. Ермолаева, Н.Н., Курбатова Г.И. Квазиодномерная нестационарная модель процессов в морских газопроводах // Вестник Санкт-Петербургского Университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2015. Вып. 3. С. 55-66.

ПРОЦЕССЫ РЕЛАКСАЦИИ И ПЕРЕНОСА ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ В ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ПЛАЗМЕ

В.М. Жданов, А.А. Степаненко

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Россия, Москва, 115409, Каширское шоссе, 31
E-mail: zhdanov@plasma.mephi.ru, aastepanenko@mephi.ru

Исследования процессов релаксации и переноса в частично ионизованных плазменных средах с учетом их приложения к задаче входа космических аппаратов в атмосферы планет, а также использования в ряде технических приложений, остаются чрезвычайно актуальными в настоящее время. Применяемая при этом плазма является, как правило, частично ионизованной, содержащей значительное количество как одноатомных, так и многоатомных компонентов, представленных молекулами и молекулярными ионами. Наличие частиц, обладающих внутренними степенями свободы, существенно расширяет число каналов взаимодействия частиц плазмы, усложняя анализ процессов переноса в подобных средах. В связи с этим актуальна задача получения общих соотношений переноса для частично ионизованной молекулярной плазмы, которые можно использовать для замыкания уравнений магнитной гидродинамики.

В настоящей работе на основе уравнений переноса [1], получаемых с использованием линеаризованных уравнений моментов обобщенного метода Грэда [2], рассмотрены процессы переноса и релаксации для тяжелых частиц (молекул, атомов, а также атомарных и молекулярных ионов) плазмы, находящейся в магнитном поле. При этом процессы переноса электронов отдельно не рассматриваются - их детальный анализ может быть найден в [3].

Как и в работе [1], принимается выполненной следующая иерархия чисел Кнудсена:

$$Kn \sim Kn_{rot} < Kn_{vib} < Kn_{el} \ll Kn_r, \quad (1)$$

где Kn , Kn_{rot} , Kn_{vib} , Kn_{el} – соответственно числа Кнудсена для упругих столкновений, а также столкновений, сопровождающихся обменом квантами вращательной, колебательной энергии либо квантами электронного возбуждения частиц. При этом Kn_r – число Кнудсена для реактивных столкновений, удовлетворяющее двум различным случаям

$$a) Kn_r \ll 1, \quad b) Kn_r \sim 1, \quad (2)$$

соответствующим слабому (а) и сильному (б) отклонению плазмы от химического равновесия.

В результате анализа процессов релаксации в плазме в работе найдены выражения для коэффициента объемной вязкости ζ_h , тяжелых компонентов плазмы, а также для релаксационного давления, p^{rel} . Основным отличием представленных выражений от хорошо известных соотношений, полученных ранее для смеси нейтральных многоатомных газов [2], является наличие поправок, определяемых обменом энергией между электронами и внутренними степенями свободы тяжелых частиц, а также протеканием в плазме электрического тока. В случае векторных процессов переноса представлены выражения для диффузионных потоков и коэффициентов диффузии тяжелых частиц в плазме при наличии магнитного поля, а также тепловых потоков и коэффициентов теплопроводности, связанных с переносом поступательной, внутренней и химической энергии. Получены соотношения Стефана-Максвелла, учитывающие влияние электронов на диффузию тяжелых компонентов плазмы за счет формирования амбиполярного электрического поля. В случае тензорных процессов переноса представлены выражения для компонентов парциальных тензоров вязких напряжений и соответствующих им парциальных коэффициентов вязкости тяжелых частиц плазмы.

Литература

1. Zhdanov V.M., Stepanenko A.A. Kinetic theory of transport processes in partially ionized reactive plasma, I: General transport equations // Physica A. 2016. Vol. 446. P. 35-53.
2. Zhdanov V.M. Transport Processes in Multicomponent Plasma. London: Taylor&Francis, 2002. 277 p.
3. Zhdanov V.M., Stepanenko A.A. Kinetic theory of transport processes in partially ionized reactive plasma, II: Electron transport properties // Physica A. 2016. Vol. 461. P. 310-324.

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СВЕРХЗВУКОВОГО ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЯ ЗАВИХРЕННОСТИ

В.И. Запрыгаев, И.Н. Кавун

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Россия, Новосибирск, 630090, ул. Институтская, 4/1
E-mail: zapr@itam.nsc.ru*

Приведены результаты [1-3] расчётно-экспериментального исследования трёхмерного ламинарного отрывного течения в угле сжатия при числе Маха набегающего потока $M_\infty = 6$. Описывается новый структурный элемент сверхзвукового отрывного течения в угле сжатия – высоконапорный слой, формирующийся вниз по потоку от линии присоединения и расположенный вблизи стенки наклонного уступа над пограничным слоем. Этот слой характеризуется высоким уровнем полного и значительным поперечным градиентом газодинамических параметров потока. Показано, что вблизи линии присоединения существуют два типа продольных пристенных вихрей. Такая вихревая структура характерна для многих случаев сверхзвуковых отрывных течений и носит название вихрей Жину [4].

Достоверность данных численного расчёта проверялась результатами эксперимента.

Полученные в численном расчёте поля газодинамических параметров потока использованы для анализа вихревого течения в области присоединения. Уравнение переноса завихренности имеет вид

$$\frac{D\vec{\omega}}{Dt} = -\vec{\omega}(\nabla \cdot \vec{u}) + (\vec{\omega} \cdot \nabla)\vec{u} + \frac{1}{\rho^2} \nabla \rho \times \nabla p - \frac{1}{\rho^2} \nabla \rho \times (\nabla \cdot \vec{\tau}) + \frac{1}{\rho} \nabla \times (\nabla \cdot \vec{\tau}),$$

где $\vec{\omega}$ – вектор завихренности, \vec{u} – вектор скорости газового потока, p – давление, ρ – плотность, $\vec{\tau}$ – тензор вязких напряжений. Первый и второй члены в правой части уравнения описывают обмен между компонентами вектора завихренности вследствие поворота и растяжения линий тока из-за существования неоднородности поля векторов скорости [5]. Третье слагаемое в правой части – бароклинный эффект, связанный с порождением завихренности из-за неколлинеарности векторов-градиентов плотности и давления. Четвёртое и пятое слагаемые связаны со скоростью изменения завихренности вследствие молекулярной диффузии.

По результатам проведённого численного расчёта был вычислен удельный вес членов, входящих в правую часть уравнения, что позволило выяснить их вклад в порождение и трансформацию продольных пристенных вихрей. Для контроля правильности вычисления был выполнен расчёт баланса левой и правой частей уравнения. Установлено, что за исключением тонкой пристенной области левая и правая части уравнения удовлетворительно согласуются.

Отмечено, что вниз по потоку от линии присоединения абсолютное значение этих слагаемых быстро уменьшается. Это указывает на то, что пристенные вихри формируются непосредственно в области присоединения, а далее порождающие их причины исчезают.

Показано, что область интенсивного вихреобразования занимает примерно 20% от присоединившегося к стенке сдвигового течения. Максимальное абсолютное значение имеет вязкий член, следующий за ним – кинематический, последний – бароклинный. Из сравнения величин слагаемых можно заключить, что наибольший вклад в образование пристенного вихревого течения вносят вязкий и кинематический эффекты (неустойчивость гёртлеровского типа).

Работа поддержана грантами РФФИ №13-01-00351а и №16-01-00314а.

Литература

1. *Zaprygaev V.I., Kavun I.N., Lipatov I.I.* Supersonic laminar separated flow structure at ramp for free-stream Mach number 6 // Progress in Flight Physics. EDP Sciences, 2013. Vol. 5. P. 349-362.
2. *Запрыгаев В.И., Кавун И.Н., Липатов И.И.* Возникновение высоконапорного слоя в угле сжатия при сверхзвуковой скорости потока // МЖГ. 2014. № 6. С. 135-144.
3. *Запрыгаев В.И., Кавун И.Н.* Механизм формирования продольных вихрей за линией присоединения сверхзвукового отрывного течения в угле сжатия // Учёные записки ЦАГИ. 2016. Т. 47. № 3. С. 27-37.
4. *Ginoux J.J.* Streamwise vortices in reattaching high-speed flows: A suggested approach // AIAA Journal. 1971. N 4. P. 759-760.
5. *Smits A.J., Dussauge J-P.* Turbulent Shear Layers in Supersonic Flow. Springer Science+Business Media, Inc. 2006. 410 p.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЯЦИИ ЗАМКНУТОГО ПОМЕЩЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕСТОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

М.А. Засимова, Н.Г. Иванов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, 29
E-mail: zasimova_ma@mail.ru, ivanov_ng@spbstu.ru

При решении задач, связанных с кондиционированием в жилых и производственных помещениях, активно используются инженерные методики расчета воздухообмена, которые позволяют получить лишь приближительную, не всегда достоверную информацию об интегральных параметрах течения. Для оценки применимости таких методов, а также для получения более полной картины течения необходимо привлечение более точных подходов к моделированию турбулентного движения.

В докладе представляются результаты численного моделирования вентиляционного течения в замкнутом помещении для условий, приближенных к эксперименту [1, 2]. Геометрия расчетной области, включающая прямоугольную комнату и выходной канал, представлена на рис. 1. На вход подается рассматриваемый как несжимаемая среда воздух со средней скоростью $V_{in} = 0.455$ м/с, что соответствует числу Рейнольдса, равному $Re = h_{in} V_{in} / \nu = 5233$. Расчеты выполнены с использованием неструктурированных сеток размерностью от 8 до 58 млн ячеек. Численное моделирование проведено при помощи двух CFD-кодов: ANSYS Fluent и SINF (последний разрабатывается на кафедре гидроаэродинамики, горения и теплообмена СПбПУ). Моделирование турбулентного течения воздуха осуществлялось на основе двух подходов: решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) с использованием полуэмпирических моделей турбулентности и с помощью вихререзающего подхода – метода моделирования крупных вихрей (LES). Расчеты проводились с привлечением ресурсов суперкомпьютерного центра «Политехнический», максимальное число ядер, использовавшихся при распараллеливании, составило 512.

Несмотря на геометрическую простоту, рассматриваемая модельная задача сочетает ряд осложняющих факторов, характерных для вентиляционных течений, формирующихся в реальных условиях (рис. 1): под потолком помещения развивается плоская пристенная струя, после разворота нисходящая струя натекает на нижнюю стенку, боковые стенки формируют трехмерную структуру осредненного течения. В докладе подробно обсуждаются методические вопросы применения вихререзающих подходов к моделированию таких течений: выбор характеристик расчетной сетки, влияние схемы аппроксимации, подсеточной модели и входных граничных условий. На основе сопоставления с экспериментальными данными и данными LES-расчетов дается оценка точности результатов, получаемых при применении RANS-метода.

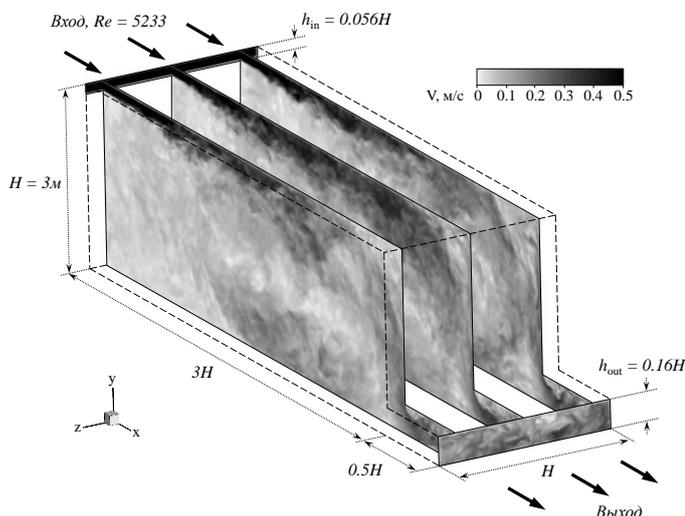


Рис. 1. Геометрия расчетной области: стенки показаны пунктирными линиями; на схеме изображены мгновенные поля модуля скорости в продольных сечениях комнаты ($z = 0.3$ м, 1.5 м, 2.7 м).

Литература

1. Nielsen P.V., Restivo A., Whitelaw J.H. The velocity characteristics of ventilated room // ASME J. Fluids Engineering. 1978. Vol. 100. P. 291-298.
2. Nielsen P.V. Specification of a two-dimensional test case. Aalborg: Institutet for Bygningsteknik, Aalborg Universitet, Gul serie, 1990. 15 p.

СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНОЙ МНОГОПЛАНОВОЙ ЗАЩИТЫ

В.Д. Захматов, М.В. Чернышов, Н.В. Щербак, И.А. Попок

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, 29
E-mail: zet.pulse@gmail.com*

До настоящего времени не создано расчетных методов и математических моделей, критически корректно отражающих сложнейший, многофазный процесс образования и распространения импульсного, газодисперсного вихря. Недостаточна степень экспериментального исследования нестационарного сложного процесса межфазного взаимодействия, нет коэффициентов теплообмена, массообмена, ускорения. Поэтому трудны корректные модели и расчёты дальности распространения вихря и текущих параметров его фронта: скорости, плотности, площади, глубины, для оценки динамического воздействия потока на человека. Остается научно корректным только экспериментальный путь.



С целью воздействия мощного, импульсного, газодисперсного потока на людей проводились следующие эксперименты. Испытывалась импульсная установка типа «Импульс-3», представляющая из себя шасси танка Т-62 с башенной 50-ствольной импульсно-распылительной установкой. Она состоит из стволов калибра 200 мм, длиной 1200 мм (6 калибров). В каждый ствол заряжается до 25 кг метаемого материала. Установка является универсальной и пригодна для эффективного распыления широкого диапазона метаемых материалов – порошковых,

жидких или водяных огнетушащих составов, причем при импульсной подаче достигается высокая эффективность использования дешевых, недефицитных составов, а также некондиционных составов, например, слежавшихся порошков или с просроченным сроком хранения.

Масштаб воздействия, дающий возможность за минимальное время сбить пламя над всей горячей поверхностью, качественно изменяет характер тушения, сразу превращая сплошную горящую поверхность в отдельные локальные очаги, которые затем возможно быстро потушить с помощью традиционной струйной гидравлической или пневматической техники. Залпы, создающие мощные газодисперсные вихри, впервые гарантируют сбивание пламени на больших площадях за минимальный временной интервал, включающий также время подготовки залпа не превышает одной минуты, так как импульсные установки практически безинерционны и характеризуются максимальной степенью готовности к воздействию. Это весьма важное обстоятельство для обеспечения безопасности второй стадии операции по спасению и эвакуации из горящих зданий, самолета, вагона, автобуса. Импульсный газодисперсный поток с распыленным пенообразователем может обеспечить покрытие равномерным, тонким изолирующим слоем поверхности зеркала авиационного топлива, разлитого под самолетом, тушения в цехах, тоннелях, на объектах нефтегазового комплекса.

Импульсный вихрь имеет вихревую структуру и высокую кинетическую энергию, которые обеспечивают плоский фронт волны по прямой траектории. Эта волна проникает в массу огнетушащего состава, увеличивая его объем, площадь поверхности и радиус распыления, создавая направленные потоки, входящие в зону огня и повышающие огнетушащие возможности. Направленный газодисперсный поток создает высокую концентрацию тонкодисперсного огнетушащего состава – воды (микрокапель) или тумана, порошкового аэрозоля или других распыляемых огнетушащих составов или инертных материалов. Эти тонкораспыленные составы, несомые огнетушащими струями и одновременно распространяющиеся по зоне горения материала, практически сбивают пламя над горячей поверхностью, что уничтожает одну зону пирамиды (механизма) пожара - горючее, тепло, кислород, химическая цепь реакции. Другие механические и физические механизмы включают: большую теплопоглощающую и теплорассеивающую поверхность, разрушение фронта пламени, возмущение поверхности жидкого горючего материала, усиленное перемешивание огнетушащих частичек/капель с горючими парами, изоляцию поверхности и паров горючего от кислорода.

Импульсный огнетушащий модуль (несколько устройств или установка) могут содержать традиционные огнетушащие составы (вода, пена, порошки), передовые новые заменители хладона (FM-200, FE-36 и др.) или альтернативу хладона – порошковый аэрозоль. Не представляет трудности комбинированная подача различных огнетушащих составов, например, заранее приготовленная смесь гранулированного SFE (Spectrex Fire Extinguishing) состава с огнетушащим порошком в зону огня. Гранулированный состав SFE активируется потоком тепла из пламени, интенсивно разлагается и образует тонкодисперсный аэрозоль, равномерно смешивающийся с более крупными частицами огнетушащего порошка. Таким образом, наиболее эффективное огнетушащее облако создается в зоне пожара и обеспечивает комбинированное физическое и химическое комплексное огнетушащее воздействие и предотвращение повторного воспламенения.

КАРРА – ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИЛЬНОНЕРАВНОВЕСНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗОВ

**В.А. Истомин, А.Г. Карпенко, О.В. Корниенко, А.А. Косарева, О.В. Кунова,
Е.В. Кустова, М.А. Мехоношина, М.Н. Набокова, Г.П. Облапенко,
К.В. Папина, Л.А. Пузырева, А.С. Савельев**

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: kunstmord@kunstmord.com*

В связи с развитием вычислительной техники в настоящее время представляется возможным применение строгих методов и алгоритмов кинетической теории в прикладных вычислениях. Однако на данный момент фактически отсутствуют программные комплексы, позволяющие рассматривать произвольные газовые смеси в состоянии сильной термо-химической неравновесности.

Программный комплекс КАРРА позволяет рассчитывать теплоемкости, скорости физико-химической релаксации и коэффициенты переноса в произвольных газовых смесях в поуровневом, многотемпературном и одготемпературном приближениях кинетической теории, при этом его структура позволяет легко использовать расчетные функции модуля в существующих программных продуктах для численного расчета течений.

В работе описаны возможности программного комплекса и реализованных в нем моделей скорости физико-химической релаксации, потенциалов взаимодействия, алгоритмов расчета коэффициентов переноса. Приведены примеры расчета коэффициентов переноса в поуровневом приближении в течениях воздуха за сильными ударными волнами, изучено влияние выбора моделей взаимодействия на результаты расчетов.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, тема НИР 6.37.206.2016.

Литература

1. *Нагнибеда Е.А., Кустова Е.В.* Кинетическая теория процессов переноса и релаксации в потоках неравновесных реагирующих газов. СПб.: Изд-во С.-Петерб. Ун-та, 2003. 274 с.

ПОУРОВНЕВАЯ КИНЕТИКА И ПЕРЕНОС В ИОНИЗОВАННЫХ АТОМАРНЫХ ГАЗАХ С ЭЛЕКТРОННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

В.А. Истомин, Е.В. Кустова

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: vladimir_istomin@ifea.spbu.ru, e.kustova@spbu.ru*

В течение длительного времени из-за больших вычислительных сложностей при расчетах тепловых потоков за гиперзвуковыми ударными волнами влияние электронного возбуждения не учитывалось, а при расчете коэффициентов переноса атомы обычно рассматривались как бесструктурные частицы. Данное предположение приводило к тому, что в выражениях для теплового потока и тензора напряжений не появлялись члены, связанные с внутренними степенями свободы, что могло приводить к значительным вычислительным погрешностям при расчете потоковых членов [1-7].

Цель настоящей работы заключается в построении поуровневой модели кинетической теории процессов переноса и релаксации [8] для ионизованных атомарных газов с учетом электронных степеней свободы нейтральных и ионизованных атомов. В рамках расчета коэффициентов переноса (теплопроводность, сдвиговая вязкость, диффузия и термодиффузия) учитывается зависимость атомарного радиуса электронно-возбужденной частицы от занимаемого электронного уровня. Показано, что при расчете коэффициентов переноса возможно использование модели Слейтера для расчета атомарного радиуса. На основе разработанной модели коэффициенты переноса рассчитываются для различных распределений атомов по уровням электронной энергии. Показано, что для случая эксперимента с летательным аппаратом Fire II [9] учетом эффекта возрастания атомарного радиуса можно пренебречь, в то время как данный эффект значительно влияет на перенос, если распределение атомов по уровням электронной энергии представляется из себя Больцмановское распределение, а также при температурах выше 14000 К.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-38-60009) и Санкт-Петербургского государственного университета (грант 6.37.206.2016).

Литература

1. Bruno D., Laricchiuta A., Capitelli M., Catalfamo C. Transport of internal electronic energy in atomic hydrogen thermal plasmas // *Phys. Plasmas*. 2007. Vol. 14. P. 022303.
2. Kustova E.V., Puzyreva L.A. Transport coefficients in nonequilibrium gas-mixture flows with electronic excitation // *Physical Review E*. 2009. Vol. 80. N 4. P. 046407.
3. Istomin V.A., Kustova E.V. Transport properties of five-component nitrogen and oxygen ionized mixtures with electronic excitation // *AIP Conference Proceedings*. 2012. Vol. 1501. N 1. P. 168-174.
4. Istomin V.A., Kustova E.V., Mekhonoshina M.A. Eucken correction in high-temperature gases with electronic excitation // *The Journal of chemical physics*. 2014. Vol. 140. N 18. P. 184311.
5. Istomin V.A., Kustova E.V. Effect of electronic excitation on high-temperature flows behind strong shock waves // *AIP Conference Proceedings*. 2014. Vol. 1628. N 1. P. 1221-1228.
6. Istomin V.A., Kustova E.V. State-to-state kinetics and transport properties of electronically excited N and O atoms // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1786. P. 150002.
7. Istomin V.A., Kustova E.V. Transport coefficients and heat fluxes in non-equilibrium high-temperature flows with electronic excitation // *Physics of Plasmas*. 2017. Vol. 24. N 2. P. 022109.
8. Nagnibeda E.A., Kustova E.V. // *Non-equilibrium reacting gas flows - Kinetic theory of transport and relaxation processes*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2009.
9. Cauchon D.L. // *NASA Technical Memorandum X-1402*, 1967.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИКИ ТЕЛА В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОГО ЭНЕРГОПОДВОДА В СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОТОК

А.Г. Карпенко, В.А. Лашков, И.Ч. Машек, Р.С. Хоронжук

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9*
E-mail: aspera.2003.ru@mail.ru, valerial180150@gmail.com, igor.mashek@gmail.com,
khoronzhuk@gmail.com

Анализ экспериментальных данных и теоретические исследования показывает, что аэродинамическое сопротивление летательного аппарата увеличивается примерно $\sim \rho M^2$, а тепловые нагрузки $\sim \rho M^3$, где ρ - плотность среды, M – число Маха полета. Поэтому с увеличением скорости полета летательного аппарата становится особенно актуальным поиск путей уменьшения силовых и тепловых нагрузок на теле.

В последнее время значительный интерес представляют способы управления аэродинамическими характеристиками летательного аппарата с помощью использования различных видов разрядов (лазерный, микроволновый, тлеющий). Локальный нагрев газа во многих случаях является главным фактором, влияющим на перестройку течения газа около тела. Сфокусированная микроволновая плазма и лазерный разряд способны производить локализованный нагрев, поэтому эти средства рассматриваются как наиболее привлекательные с точки зрения энергетической эффективности для управления потоком. Применение этих методов особенно привлекательно в высокоскоростной аэродинамике. Преимущество методов связано с тем, что они позволяют осуществлять дистанционную и практически мгновенную доставку энергии в определенное место, применять электронное управление при высокой эффективности генерации.

Было показано экспериментально [1, 2, 3] и теоретически [4], что основным фактором, приводящим к изменению аэродинамического сопротивления тела, является вихревое движение газа, которое возникает при взаимодействии плазмоида от микроволнового разряда с ударным слоем на теле. Образование вихря в процессе взаимодействия нагретого слоя с ударной волной на теле связано с неустойчивостью течения газа типа Рихтмайера - Мешкова и Кельвина - Гельмгольца.

Исследования проводились на сверхзвуковой аэродинамической трубе, на которой создавались рабочие потоки с числом Маха 1,3 – 3 при давлении от 10 Торр и выше и температуре торможения до 600К. Труба оснащена импульсным СВЧ генератором и лазером, с помощью которых создаются плазмоиды в сверхзвуковом потоке. Установка обеспечена диагностическим оборудованием с высоким пространственно-временным разрешением, позволяющим проводить исследования давления и теплового потока на поверхности модели аэродинамического тела.

На аэродинамической трубе проводились исследования:

- силовых нагрузок и тепловых потоков на аэродинамическом теле;
- лазерного, микроволнового, а также их комбинации, разрядов в сверхзвуковом потоке.

Исследования показали, что взаимодействие разряда с ударным слоем приводит к кардинальной перестройке течения газа около затупленного тела. Это в свою очередь меняет распределение давления и тепловых потоков на поверхности тела. Было установлено, что с увеличением числа Маха потока эффективность воздействия энергосложения на изменение давления в критической точке на поверхности тела растет [5]. Существенно изменяется тепловой поток на поверхности экспериментальной модели. Наблюдалось изменение направления теплового потока в критической точке на затупленном цилиндре.

Литература

1. *Kolesnichenko Yu., Brovkin V., Azarova O., Grudnitsky V., Lashkov V., Mashek I.* Microwave Energy Release Regimes for Drag Reduction in Supersonic Flows // AIAA 2002-0353. 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting&Exhibit. Reno, NV, USA. 2002.
2. *Lashkov V.A., Mashek I.Ch., Anisimov Yu.I., Ivanov V.I., Kolesnichenko Yu.F., Ryvkin M.I., Gorynya A.A.* Gas dynamic effect of microwave discharge on supersonic cone-shaped bodies // AIAA 2004-0671. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, NV, USA. 2004.
3. *Kolesnichenko Yu.F., Brovkin V.G., Afanas'ev S.A., Khmara D.V., Lashkov V.A., Mashek I.Ch.* Interaction of high-power MW with DC, RF, SHF and laser created plasmas // AIAA 2005-0405. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, NV, USA. 2005.
4. *Azarova O.A., Kolesnichenko Y.F.* On details of flow structure during the interaction of an infinite rarefied channel with a cylinder shock layer // Proc. 7th Int. Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics. Joined Institute of High Temperatures RAS, Moscow. 2007. P.101-113.
5. *Karpenko A.G., Khoronzhuk R.S., Lashkov V.A., Mashek I.C.* Effect of Mach number on the efficiency of microwave energy deposition in supersonic flow // Physics of Plasmas. 2016. Vol. 23. N 5. P. 052305.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ НА ЕГО ВРАЩАТЕЛЬНЫЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОИЗВОДНЫЕ

Д.В. Кауфман, А.Н. Рябинин

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: kifadan@mail.ru, a.ryabinin@spbu.ru

Летящее тело подвергается воздействию возмущающих аэродинамических сил, которые формируют колебательное движение относительно центра масс. Характер колебаний зависит от динамической устойчивости и влияет на траекторию движения. Для прогнозирования движения необходимо знание вращательных производных. Признанным средством определения вращательных производных является эксперимент в аэродинамической трубе [1].

Цилиндр диаметром 0,1 м и длиной 0,31 м закреплялся в рабочей части дозвуковой аэродинамической трубы АТ-12 на проволочной подвеске таким образом, чтобы он мог свободно вращаться вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной вектору скорости набегающего потока и оси цилиндра. К переднему торцу цилиндра по очереди крепились четыре сменные головные части с плавными обводами, имеющими длину от 0,015 до 0,145 м. Испытания проводились также с цилиндром без головной части. Вместо головной части в части опытов использовалась круглая пластина, закрепленная соосно перед цилиндром на некотором расстоянии от торца.

К заднему торцу цилиндра была присоединена хвостовая державка, соединенная проволочными тягами с двумя пружинами. Пружины располагались выше и ниже ядра потока в рабочей части аэродинамической трубы (рис. 1). Натяжение нижней пружины измерялось полупроводниковым тензопреобразователем, сигнал с которого подавался на осциллограф, работающий в режиме самописца, и далее в компьютер.

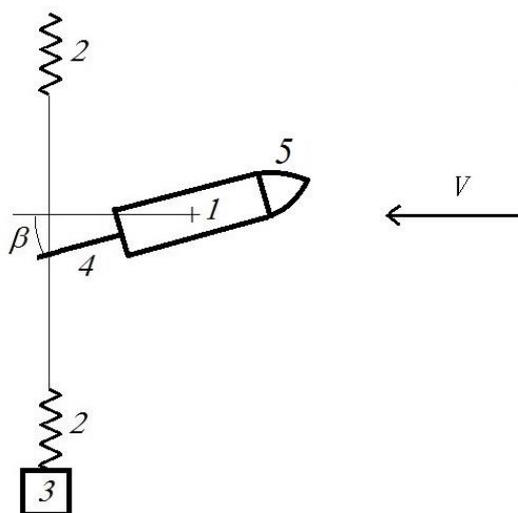


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 – осесимметричное тело, 2 – пружины, 3 – полупроводниковый тензопреобразователь, 4 – хвостовая державка, 5 – сменная головная часть.

Во всех случаях модель, выведенная из состояния равновесия, совершала затухающие колебания. Определены логарифмические декременты затухания колебаний тела в потоке и вычислены коэффициенты вращательных аэродинамических производных.

Литература

1. Белоцерковский С.М., Скрипач Б.К., Табачников В.Г. Крыло в нестационарном потоке газа. М.: Наука, 1971. 768 с.

СРАВНЕНИЕ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ НА ПРЕГРАДЫ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Ю.В. Каун, М.С. Яковчук

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова,
Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-я Красноармейская, 1
E-mail: y.kaun13@mail.ru

В настоящей работе исследуется задача силового воздействия сверхзвуковой струи на преграду конечных размеров в пакете ANSYS Fluent и сравниваются полученные результаты с данными лабораторной работы по курсу Аэродинамики, цель которой была определить распределение давления по поверхности преграды, найти суммарную силу воздействия потока на преграду.

При вычислительном моделировании рассматривается задача истечения сверхзвуковой струи из сопла и взаимодействие ее с преградой конечных размеров. Используются два вида преграды: плоская и сферическая, полученные результаты сравниваются.

Вычислительный эксперимент проводился в осесимметричной постановке. Граничные условия численного эксперимента воспроизводят условия физического эксперимента: избыточное давление в ресивере 6 атм, температура 300 К. Расчетная сетка состоит из 13–14 тыс. ячеек.

При натекании сверхзвуковой струи перед преградой образуется ударная волна. В этом случае ударная волна отойдет от тела и произойдет изменение газодинамических параметров: скорость и число Маха потока уменьшаются, а давление, плотность и температура газа увеличиваются, что показано на теневой фотографии, на основе распределения градиента плотности (рис. 1).

Сравнение данных о распределении давления по поверхности преграды, полученных в численном и физическом эксперименте, приведены на графике (рис. 2).

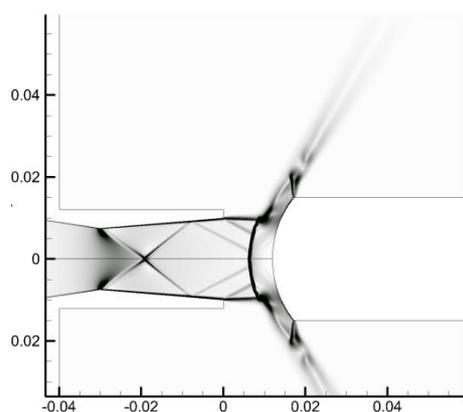


Рис. 3. Численная теневая фотография.

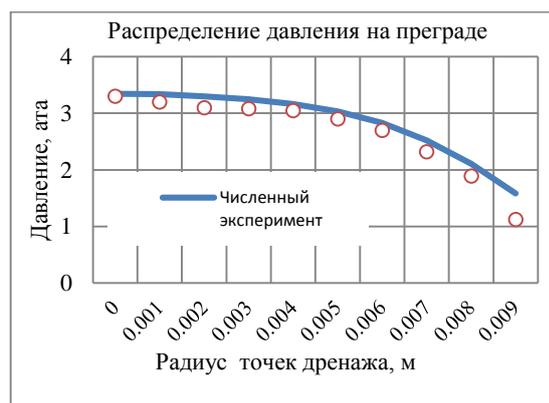


Рис. 4. Распределение давления на преграде.

В результате интегрирования давления по поверхности была получена действующая на преграду суммарная сила 75,77 Н. Суммарная сила, полученная на основе физического эксперимента, найденная по приближенной теоретической формуле $N = P - Qv_c \cos \theta$, равна 73,06 Н. Погрешность вычислений составила 3,5%. Также была определена сила тяги сопла, в численном эксперименте 124 Н, в физическом 123,6 Н, где погрешность составила меньше 0,3%.

На основе опыта решенной задачи планируется решение задачи о совместном силовом и тепловом взаимодействии струи с преградой на основе нестационарного вычислительного моделирования в трехмерной постановке.

ЭВРИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТЕЛА В ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ

А.В. Кашеваров¹, Г.В. Моллесон¹, А.Л. Стасенко^{1,2}

¹Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского,
Россия, Жуковский, 140180, ул. Жуковского, 1

²Московский физико-технический институт (гос. университет),
Россия, Жуковский, 140180, ул. Гагарина, 16

E-mail: a.v.kash@yandex.ru, molleson@yandexl.ru, stasenko@serpantin.ru

Взаимодействие частиц высокоскоростного потока с твердым телом представляет интерес для многих отраслей человеческой практики. В случае чисто газового потока в [1] введена концепция «ударной трансформанты», описывающая кинематику молекулы до и после столкновения. В случае газодисперсного потока в [2–4] теоретически и экспериментально исследовано взаимодействие микрочастиц с поверхностью твердого тела. В [5] предложены выражения для коэффициентов восстановления компонент скорости частицы, учитывающие физико-механические свойства обоих участников столкновения (плотности, модули Юнга и Пуассона, пределы текучести). Эти выражения, верифицированные сравнением с многочисленными экспериментальными данными, в частности, [4], были использованы при описании воздействия сверхзвуковой газодисперсной струи на преграды различной геометрии, например, [6].

Численные исследования, проведенные в широкой области значений управляющих параметров (числа Маха на срезе сопла, температуры и давления торможения, размеров и массовой доли диспергированных частиц различных материалов), позволили определить плотность потока энергии на обтекаемом теле, характеристики «хаоса», порожденного отразившимися частицами и создающими экранный эффект.

Начат цикл работ, связанный с предсказанием воздействия кристаллов льда, содержащихся в верхних слоях атмосферы, с элементами конструкции летательного аппарата.

При описании жидкой пленки, текущей по поверхности тела под действием потока воздуха, учтено, что внедряющиеся в нее кристаллы тают не мгновенно. Это потребовало создания нелокальной модели «шуги» с вязкостью, зависящей от массовой доли кристаллов. Создана и численно реализована [7] соответствующая физико-математическая модель образования барьерного льда на поверхности тела – самого коварного вида обледенения.

Предложена новая физическая модель аккреции вещества на сухой поверхности обтекаемого тела, учитывающая частичное разрушение кристалла при столкновении с поверхностью как за счет нормальных, так и тангенциальных напряжений в нем, дающая оценку сверху для скорости роста наледи. При описании динамики кристалла, приближающегося к обтекаемой поверхности, учтено влияние его несферичности и ориентации на границу и размеры орошаемого участка. Численные исследования показали, что использование этой модели предсказывает появление «двурогого» слоя льда, типичного для переохлажденных облачных капель.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10472).

Литература

1. Валандер С.В. Уравнения и постановка задач в аэродинамике разреженных газов // Аэродинамика разреженных газов. Вып. 1. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1963. С. 7-37.
2. Матвеев С.К., Сеюкова Л.П. Обтекание сферы потоком газозвеси // Динамика однородных и неоднородных сред. Вып. 9. Газодинамика и теплообмен. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1987. С. 16-23.
3. Циркунов Ю.М., Панфилов С.В., Клычников М.Б. Полуэмпирическая модель ударного взаимодействия дисперсной частицы примеси с поверхностью, обтекаемой потоком газозвеси // ИФЖ. 2007. Т. 80. № 5-6. С. 379-386.
4. Лаишков В.А. Об экспериментальном определении коэффициентов восстановления скорости частиц потоком газозвеси при ударе о поверхность // ИФЖ. 1991. Т. 60. № 2. С. 197-203.
5. Стасенко А.Л. Коэффициенты восстановления скорости частиц при отражении от поверхности твердого тела // ИФЖ. 2007. Т. 80. № 5. С. 38-44.
6. Моллесон Г.В., Стасенко А.Л. Особенности обтекания затупленного тела сверхзвуковой полидисперсной струей с закруткой отраженных частиц // ТВТ. 2011. Т. 49. № 1. С. 73-80.
7. Кашеваров А.В., Стасенко А.Л. Гидротермодинамика жидкой пленки с кристаллами на теле в воздушно-кристаллическом потоке // ПМТФ. 2017. Т. 58. № 2.

УПРАВЛЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯМИ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛНИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

С.В. Кириловский, Т.В. Поплавская

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Россия, Новосибирск, 630090, ул. Институтская, 4/1

Новосибирский государственный университет,

Россия, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2

E-mail: popla@itam.nsc.ru, kirilov@itam.nsc.ru, mironov@itam.nsc.ru, tsyvan@itam.nsc.ru

Ламинарно-турбулентный переход (ЛТП) приводит к существенному увеличению аэродинамического сопротивления и нагреву поверхности, а также снижает эффективность силовых установок гиперзвуковых транспортных средств. В настоящее время разработан ряд активных (вдув/отсос, локальное охлаждение/нагрев и др.) и пассивных (звукопоглощающие покрытия и др.) методов управления ЛТП.

Из-за суровых внешних условий гиперзвукового полета, связанных с большими тепловыми потоками и высокими температурами течения в пограничном слое, трудно использовать активные методы управления, поэтому пассивные методы представляют основной интерес для гиперзвуковых исследований ЛТП. Одним из таких пассивных методов является локальное формирование поверхности тела, например, с помощью неглубокой, рифленой, волнистой поверхности, которая создает относительно устойчивый свободный сдвиговый слой [1]. Главная цель этой работы - проверить концепцию стабилизации пограничного слоя с помощью волнистых поверхностей разного типа (рис.1).

Численное моделирование сверхзвукового обтекания сплошной пластины и пластины с волнистостью проведено на базе решения двумерных уравнений Навье–Стокса с помощью пакета ANSYS Fluent, созданы встраиваемые в пакет модули для введения в пограничный слой возмущений типа вдув-отсос с амплитудой A и частотой f . Выполнена верификация программы расчета сравнением с имеющимися в литературе данными по пульсациям давления на поверхностях моделей. Показано, что волнистость поверхности существенно снижает пульсации давления на поверхности пластины и не увеличивает значения средних тепловых потоков (рис.2). Снижение уровня пульсаций на волнистой поверхности не мгновенно, поскольку сохраняется со временем.

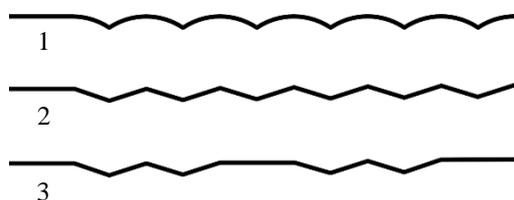


Рис. 1. Пластины с волнистой поверхностью разных видов

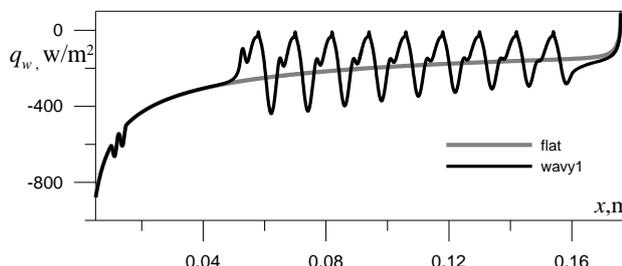


Рис. 2. Распределения тепловых потоков на поверхности пластин. $M_\infty=6.0$, $Re_1=10.5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, $P_\infty=445 \text{ Па}$, $T_0=354,06\text{К}$, $T_\infty=43,08 \text{ К}$, $T_w=293\text{К}$, $A=8.76$, $f=138.74\text{кГц}$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 016-08-00782).

Литература

1. Bountin D., Chimitov T., Maslov A., Novikov A., Egorov I., Fedorov A., Utyuzhnikov S. Stabilization of a Hypersonic Boundary Layer Using a Wavy Surface // AIAA J. 2013. Vol. 51. N 5. P. 1203-1210.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЦИЛИНДРА С СООСНЫМ ДИСКОМ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Н.А. Киселев

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: kislkn@mail.ru*

При перемещении в воздушном потоке грузов, подвешенных под летательным аппаратом, наиболее часто встречаются вращательные колебания относительно вертикальной оси [1]. В данной работе проводилось исследование влияния дисков разного диаметра D , установленных перед цилиндром удлинения 2, $D=0,14$ м, на возникновение вращательных колебаний цилиндра.

В экспериментах в аэродинамической трубе на постоянном расстоянии перед цилиндром устанавливались диски разного диаметра. Ось вращения горизонтально проходила через центр масс цилиндра и перпендикулярно набегающему потоку. Цилиндр был закреплен в рабочей части аэродинамической трубы с помощью пружинной подвески и мог совершать вращательные колебания с частотой, близкой к собственной частоте пружинной подвески. Одна из пружин подсоединялась к тензопреобразователю, сигнал с которого через осциллограф Velleman PCS500A шел на персональный компьютер. Подробное описание аналогичных экспериментов без установленных перед цилиндром дисков приведено в [2].

Вычислены амплитуды A колебаний цилиндра при различных скоростях набегающего потока и дисках различного диаметра, установленных перед цилиндром. Найдены параметры математической модели, предсказывающей линейную зависимость $A^2/4+\beta^2$ от $1/v$, где β – равновесный угол наклона цилиндра, v – скорость набегающего потока [3]. Исследования показали, что наличие диска, установленного перед цилиндром, уменьшает амплитуды колебаний или полностью их гасит.

Литература

1. *Рябинин А.Н., Тюрин Б.Ф.* Поведение груза, подвешенного под вертолетом // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 1. 1993. Вып. 1. С. 87-91.
2. *Киселев Н.А., Рябинин А.Н.* Исследование вращательных колебаний цилиндров в воздушном потоке // Естественные и математические науки в современном мире. 2014. № 2 (15). С. 83-87.
3. *Луценко И.В., Рябинин А.Н.* Экспериментальные исследования колебаний цилиндра в воздушном потоке // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 1. 2007. Вып. 2. С. 120-123.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СКАЛЯРНЫХ И КВАЗИОДНОМЕРНЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ

Е.В. Колесник

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, 29
E-mail: kolesnik_ev@mail.ru*

При численном моделировании транс- и сверхзвуковых течений схема аппроксимации конвективных потоков должна обеспечивать возможность достаточно точного разрешения газодинамических разрывов при отсутствии осцилляций. Указанными свойствами обладают схемы, основанные на задаче Римана о распаде разрыва, например, схема Roe [1], но в случае схем первого порядка они могут сильно размывать разрывы. Повышение порядка можно обеспечить с помощью MUSCL подхода [2], переходя к кусочно-полиномиальному распределению переменных в ячейке и используя реконструированные значения переменных на грани при решении задачи Римана. При этом для подавления осцилляций вводятся специальные ограничители, которые модифицируют наклоны распределений переменных в ячейках.

В случае структурированных сеток при решении многомерных задач успешно применяется квазиодномерный подход вдоль каждого координатного направления с применением неосциллирующих одномерных схем, для которых разработана надежная теория [3,4]. Для расчетов на неструктурированных сетках в литературе предлагаются разные подходы, которые можно разделить на два основных класса: квазиодномерные и «скалярные». При квазиодномерном подходе восстанавливаются значения переменных вдоль направления, пересекающего грань контрольного объема [5,6], и далее используются известные схемы [3,4]. Второй подход, скалярный, исходно разработан для неструктурированных сеток, значения переменных на грани реконструируются с использованием градиента в центре контрольного объема, а величина градиента модифицируется (ограничивается) с помощью тех или иных ограничителей [7-10], вычисляемых с использованием информации в соседних контрольных объемах.

Для проведения расчетов код SINP [11], разработанный на кафедре «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» СПбПУ, был дополнен возможностью расчета конвективных потоков по схеме Roe с повышением порядка точности и с применением различных ограничителей, предложенных в [5-10]. Сопоставительный анализ работоспособности скалярных и квазиодномерных ограничителей проведен на двух тестовых задачах о течении невязкого газа, а именно: трансзвукового обтекания крылового профиля НАСА-0012 и сверхзвукового течения в канале с центральным клином с входным числом Маха равным 3. Оценивались гладкость решения, диссипативность схемы, устойчивость и сходимость к стационарному решению.

В целом установлено, что на рассмотренных тестовых примерах скалярные ограничители [8,9], не смотря на некоторую «эвристичность» при их формулировке, показывают результаты по крайней мере не худшие, чем лучшие из известных квазиодномерных ограничителей.

Литература

1. Roe P.L. Approximate Riemann Solvers, parameter vectors, and difference schemes // J. Comput. Phys. 1981. Vol. 43. N 2. P. 357-372.
2. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second order sequel to Godunov's method // J. Comput. Phys. 1979. Vol. 32. N 1. P. 101-136.
3. Harten A. High resolution schemes for hyperbolic conservation laws // J. Comput. Phys. 1983. Vol. 49. N 3. P. 357-393.
4. Jameson A. Artificial diffusion, upwind biasing, limiters and their effect on accuracy and multigrid convergence in transonic and hypersonic flow // AIAA Paper No. 93-3359. 1993.
5. Bruner C., Walters R. Parallelization of the Euler equations on unstructured grids. Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
6. Darwish M., Moukalled F. TVD schemes for unstructured grids // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46. P. 599-611
7. Barth T.J., Jespersen D.C. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes // AIAA Paper No. 89-0366. 1989.
8. Venkatakrishnan V. Convergence to steady state solutions of the Euler equations on unstructured grids with limiters // J. Comput. Phys. 1995. Vol. 118. P. 120-130.
9. Michalak K., Ollivier-Gooch C. Accuracy preserving limiter for the high-order accurate solution of the Euler equations // J. Comput. Phys. 2009. Vol. 228. P. 8693-8711.
10. Park J.S., Yoon S.H., Kim C. Multi-dimensional limiting process for hyperbolic conservation laws on unstructured grids // J. Comput. Phys. 2010. Vol. 229. P. 788-812.
11. Смирнов Е.М., Зайцев Д.К. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно-технические ведомости. СПб.: Издательство Политехнического университета. 2004. № 2 (36). С. 22.

ЭФФЕКТИВНЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА И МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ В ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННЫХ СМЕСЯХ ГАЗОВ ПРИ НАЛИЧИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

А.Ф. Колесников

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского, 101, к. 1
E-mail: koles@ipmnet.ru*

Для описания многокомпонентной диффузии и переноса тепла в двух-температурной плазме при наличии электромагнитного поля выбраны соотношения между «силами» и «потоками» с учетом высших приближений метода Чепмена-Энскога по полиномам Сонина [1]. В таком представлении диффузионные движущие силы и градиенты поступательной и электронной температур выражены через диффузионные потоки, парциальные тепловые потоки и высшие моменты функций распределения компонентов. Из этих уравнений выведены формулы для тепловых потоков, коэффициентов теплопроводности, электропроводности и термодиффузионных отношений для тяжелых частиц и электронов. Также получены соотношения Стефана-Максвелла для диффузионных потоков тяжелых компонентов и электронов при наличии электромагнитного поля. В эти соотношения входят поправки к бинарным коэффициентам диффузии, вычисление которых существенно проще расчетов многокомпонентных коэффициентов диффузии.

В целом, при новом подходе коэффициенты переноса выражаются через определители существенно меньшего порядка, чем в традиционной формулировке. Итоговая форма уравнений переноса является наиболее экономичной и удобной с точки зрения использования в компьютерных кодах, предназначенных для численного моделирования течений многокомпонентных частично ионизованных смесей газов.

Литература

1. *Kolesnikov A.F.* General Formulation of Multicomponent Plasmas Equations with Ambipolar Approach for Weakly Ionized Gases. AIAA Paper No. 2003-1055. 2003.

НЕРАВНОВЕСНАЯ ДИССОЦИАЦИЯ И КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ КИНЕТИКА В УДАРНО НАГРЕТОЙ СМЕСИ CO₂/CO/O

А.А. Косарева, Е.А. Нагнибеда

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: kos-hellen@yandex.ru, e_nagnibeda@mail.ru

В работе численно исследовано течение смеси CO₂/CO/O в релаксационной зоне за фронтом ударной волны (УВ) в рамках трехтемпературного, двухтемпературного и однетемпературного описания. Учитываются переходы колебательной энергии, диссоциация молекул углекислого газа и рекомбинация. Исследуется влияние неравновесной кинетики на параметры течения за ударными волнами, возникающими у поверхностей тел, движущихся с гиперзвуковыми скоростями.

Выбор кинетической модели основан на разбиении неравновесных процессов на быстрые и медленные и на соотношениях между характерными временами релаксации. Из экспериментов известно, что в рассматриваемых условиях к быстрым процессам относится поступательно-вращательная релаксация, обмены колебательными энергиями внутри трех типов колебаний молекул углекислого газа, а также энергообмен между симметричной и деформационной модами. В результате быстрых процессов устанавливаются двухтемпературные распределения молекул углекислого газа, зависящие от колебательных температур T_{12} , T_3 объединенной симметрично-деформационной и антисимметричной мод. В рамках трехтемпературной модели [1] набор макропараметров, описывающих квазиодномерное течение смеси за фронтом УВ, содержит числовые плотности компонентов $n_{CO_2}(x)$, $n_{CO}(x)$, $n_O(x)$, температуру газа $T(x)$, колебательные температуры $T_{12}(x)$, $T_3(x)$ и макроскопическую скорость потока $v(x)$. В упрощенном двухтемпературном приближении вводится общая колебательная температура $T_{12}(x) = T_3(x)$, при однетемпературном описании макропараметрами являются функции $n_{CO_2}(x)$, $n_{CO}(x)$, $n_O(x)$, $T(x)$, $v(x)$, (x – расстояние от фронта УВ).

Релаксация смеси за ударным фронтом изучена в трех приближениях на основе численного интегрирования уравнений химической и колебательной кинетики совместно с уравнениями сохранения импульса и полной энергии в вязком нетеплопроводном газе. Условия, связывающие параметры в набегающем потоке и сразу за фронтом УВ, записаны в каждом приближении с учетом колебательных распределений, устанавливающихся внутри фронта за счет быстрых энергообменов при замороженных медленных процессах.

В расчетах использованы экспериментальные данные о скоростях переходов колебательной энергии молекул углекислого газа [2] и обобщенная модель диссоциации Тринора-Маррона [1]. Результаты получены при условиях в набегающем потоке, соответствующих обтеканию космического аппарата MSRO [3] при его входе в атмосферу Марса: $\rho = 2.93 \cdot 10^{-4}$ кг/м³, $T = 140$ К; $v_1 = 5223$ м/с, $v_2 = 4693$ м/с. Исследована структура релаксационной зоны за УВ в трех приближениях. Сравнение полученных результатов показало влияние колебательной неравновесности и выбора кинетической модели на изменение параметров течения за ударным фронтом и на длину зоны релаксации. Также показано влияние колебательных распределений на коэффициенты скорости диссоциации молекул углекислого газа за фронтом УВ.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ (проект № 6.37.206.2016) и РФФИ (проект № 15-01-02373).

Литература

1. E.V. Kustova, E.A. Nagnibeda. On a correct description of a multi-temperature dissociating CO₂ flow. Chem. Phys. 2006. Vol. 321. P. 293-310.
2. Losev S.A. et al. Radiation of CO₂/N₂/Ar mixture in a shock wave: experiment and modeling // Proceeding of the Third European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles. ESTEC, Noordwijk. ESA SP-426.1998. P. 437-444.
3. Шевелев Ю.Д., Сызранова Н.Г. Влияние различных моделей химической кинетики на сверх-звуковое обтекание затупленных тел потоком углекислого газа // Физикохимическая кинетика в газовой динамике. 2007. Т. 5. www.chemphys.edu.ru/pdf/2007-12-17-001.pdf.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ДИНАМИКЕ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА В ЛАБОРАТОРИИ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ СПБГУ

А.А. Крылов

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: andrey.krylov.spbgu@gmail.com*

Настоящее сообщение посвящено характеристике основных направлений экспериментальных исследований в потоках разреженного газа в университете. В сообщении приводится краткая характеристика экспериментального оборудования (установка ВУ-1) и методов диагностики. Основные направления исследований на ВУ-1 – аэродинамика и теплообмен тел различной формы в потоках разреженного газа. Для тел сложной формы проведены систематические исследования аэродинамической интерференции отсеков космических кораблей в условиях расстыковки. Дается характеристика нового газоструйного метода уменьшения аэродинамического сопротивления тел, который позволяет практически на порядок снизить аэродинамическое сопротивление. Разработан плазменный метод организации рабочего потока, который формируется за счет ускорения плазмы газового разряда в электрическом поле с последующей перезарядкой. Метод позволяет создавать гиперзвуковые потоки газа свободные от релаксационных эффектов.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ В УДАРНОЙ ТРУБЕ

А.Н. Кудрявцев, Д.В. Хотяновский

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Россия, Новосибирск, 630090, ул. Институтская, 4/1
E-mail: alex@itam.nsc.ru, khotyanovsky@itam.nsc.ru

В докладе представлены результаты численного моделирования распространения ударной волны в цилиндрической ударной трубе большой длины. Расчеты проведены на основе модели Навье–Стокса в осесимметричной постановке. Параметры течения соответствуют условиям эксперимента [1]: внутренний диаметр трубы равняется 28,575 мм, длина трубы от диафрагмы до правой границы расчетной области равна 7,5 м. Температура стенки трубы считалась постоянной и равной начальной температуре газа 300 К. В качестве рабочего и толкающего газа использовался аргон. Расчеты проводились с использованием граничных условий скольжения и скачка температуры в формулировке М.Н. Когана [2]. Давление справа от диафрагмы было фиксировано и равнялось $p_0 = 66.66$ Па, начальное отношение давлений варьировалось. При рассматриваемых параметрах потока (небольшое отношение диаметра трубы к длине, малое начальное давление) газодинамические характеристики течения в значительной степени определяются вязкими эффектами: число Рейнольдса по диаметру трубы и начальным значениям скорости звука и вязкости равняется в данном случае $Re_0 = 431$.

Результаты численных расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными [1]. Влияние вязкого трения и теплопроводности приводит к значительным отличиям скорости распространения ударной волны от ее значения по невязкой теории. Расчеты показывают, что при рассмотренных условиях, ударная волна и контактный разрыв, начиная с некоторого момента времени, распространяются с одинаковой скоростью. На достаточно больших расстояниях вдоль трубы ударная волна вырождается в слабое возмущение давления, подталкиваемое сзади контактным разрывом и распространяющееся с дозвуковой скоростью.

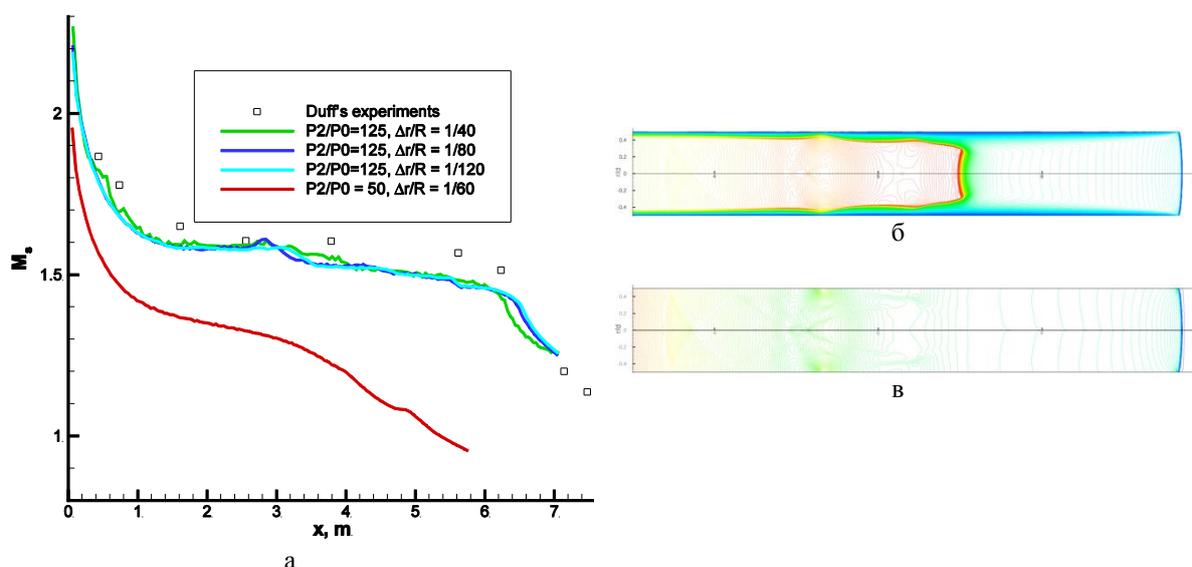


Рис. 1. Число Маха ударной волны в различных положениях вдоль при различных начальных отношениях давлений и сравнение с экспериментальными данными [1] при $p_2/p_0=125$ (а); мгновенное поле течения: изолинии числа Маха (б) и давления (в).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-57-48007). Расчеты проводились на вычислительных кластерах Новосибирского государственного университета и Межведомственного суперкомпьютерного центра.

Литература

1. Duff R.E. Shock-Tube Performance at Low Initial Pressure // Physics of Fluids. 1959. Vol. 2. N 2. P. 207-216.
2. Коган М.Н. Динамика разреженного газа. М.: Наука, 1967. 440 с.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

А.Н. Кудрявцев, Д.В. Хотяновский

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Россия, Новосибирск, 630090, ул. Институтская, 4/1
E-mail: alex@itam.nsc.ru, khotyanovsky@itam.nsc.ru*

В соответствии с линейной теорией устойчивости и имеющимися экспериментальными данными, при больших числах Маха в пограничном слое доминирует неустойчивость второй моды, т.е. моды Маха [1]. Наклонные волны возмущений первой моды также неустойчивы, но имеют значительно меньшие инкременты нарастания. Линейная и нелинейная динамика возмущенного пограничного слоя включает, таким образом, сложное взаимодействие целого спектра волн неустойчивости, конкуренцию мод, и может приводить к совершенно различным сценариям перехода в зависимости от условий выше по потоку.

В настоящем докладе приведены результаты прямого численного моделирования развития возмущений и перехода к турбулентности в сверхзвуковом пограничном слое на плоской пластине. Расчеты проведены при числах Маха набегающего потока $M = 2$ и 6 . Использованный при проведении расчетов код основан на применении схем сквозного счета высокого порядка точности. Стационарное основное течение возбуждалось путем введения на входной границе возмущения, имеющего вид суперпозиции собственных функций линейной задачи устойчивости. При числе Маха $M = 2$ моделировался сценарий перехода, связанный с ростом и нелинейным взаимодействием двух наклонных волн Толлмина–Шлихтинга. При числе Маха $M = 6$ рассматривалось развитие суперпозиции двумерных возмущений второй моды и трехмерных возмущений первой моды. В обоих случаях рост трехмерных возмущений привел к появлению мелко-масштабных пульсаций, стохастизации течения и переходу к турбулентности.

Расчеты проводились на вычислительных кластерах Новосибирского государственного университета и Межведомственного суперкомпьютерного центра.

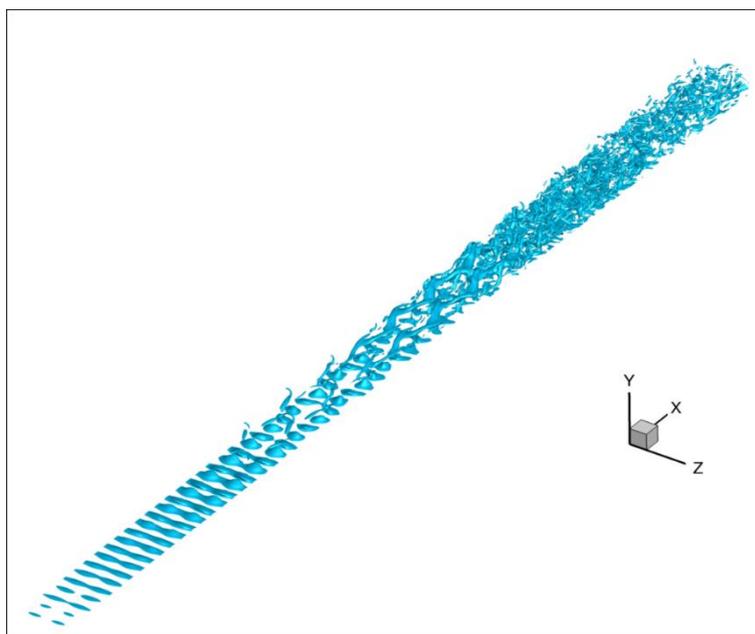


Рис. 1. Переход к турбулентности в пограничном слое при числе Маха 6.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-11-00490).

Литература

1. Mack L.M. Boundary layer stability theory. Document 900-277, Rev. A. Pasadena, California, Jet Propulsion Laboratory, 1969. 388 p.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ И РЕЛАКСАЦИИ В УДАРНО-СЖАТЫХ ГАЗАХ

М.М. Кузнецов, Ю.Д. Кулешова, С.В. Матвеев, В.Е. Молостин

*Московский государственный областной университет,
Россия, Москва, 105005, ул. Радио, 10А
E-mail: kuznets-omn@yandex.ru*

В настоящее время возможность описания движения разреженных газов в широком диапазоне чисел Кнудсена в виде движения континуумов с нелинейными законами трения и теплопередачи обоснована успешным решением ряда граничных задач кинетической теории газов. Перечислим наиболее заметные, по нашему мнению, достижения в этой области: точное аналитическое решение бесконечной системы моментов в задаче Куэтта [1,2], асимптотическое решение задачи Куэтта в виде разложения Гильберта, просуммированного по всем приближениям по числу Кнудсена порядка единицы [3], статистическое моделирование структуры ударной волны методом Монте-Карло и аналитическое представление его результатов в виде универсальных нелинейных зависимостей от градиентов скорости и температуры [4]. В настоящей работе проблемы нелинейного переноса и релаксации рассмотрены на основе бимодального и эллипсоидального распределения по скоростям молекул газа. Релаксация поступательных степеней свободы молекул газа внутри фронта ударной волны рассмотрена с учетом анизотропии поля кинетических температур [5].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 17-07-00-945А.

Литература

1. *Галкин В.С.* Об одном решении кинетического уравнения Больцмана // ПММ. 1956. Т. XX. Вып. 3. С. 445-446.
2. *Хонькин А.Д.* О нелинейных коэффициентах переноса // ЧММСС. 1982. Т. 3. № 6. С. 130-136.
3. *Макашев Н.К., Носик В.И.* Стационарное течение Куэтта (с теплопередачей) газа максвелловских молекул // Докл. АН СССР. 1980. Т. 253. № 5. С. 1077-1081.
4. *Ерофеев А.И., Фридендер О.Г.* Перенос импульса и энергии в ударной волне // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2002. № 4. С. 120-130.
5. *Кузнецов М.М., Кулешова Ю.Д., Смотрова Л.В.* Эффект высокоскоростной поступательной неравновесности в бимодальной ударной волне // Вестник МГОУ. Сер. «Физика-математика». 2012. № 2. С. 108-115.

АНАЛИЗ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПОСТУПАТЕЛЬНОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ НА ОСНОВЕ БИМОДАЛЬНОГО И ЭЛЛИПСОИДАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАР МОЛЕКУЛ В УДАРНОЙ ВОЛНЕ

М.М. Кузнецов, Ю.Д. Кулешова, Ю.Г. Решетникова, Л.В. Смотрова

*Московский государственный областной университет,
Россия, Москва, 105005, ул. Радио, 10А
E-mail: kuznets-omn@yandex.ru*

Численные и аналитические исследования эффектов высокоскоростной поступательной неравновесности в ударной волне (см., например, [1,2]) сохраняют свою актуальность и в настоящее время. Перманентный интерес к этой проблеме обусловлен сохраняющейся потребностью получения надежных данных о кинетике элементарных процессов в ударных волнах, необходимых во многих практических приложениях. В данной работе аналитически сформулированы необходимые и достаточные условия наличия максимумов относительных величин высокоскоростного перехлеста значений функции распределения пар молекул во фронте ударной волны в однокомпонентном и двухкомпонентном газе. Получены аналитические выражения для этих максимумов, зависящие от значений характерных макропараметров: степени сжатия в ударной волне, отношения молекулярных масс компонентов и т.д. В отличие от известных численных расчетов, зависящих от их точности, данные результаты носят окончательный характер. Используемое в работе, найденное ранее авторами, эллипсоидальное распределение пар молекул [2] позволяет аналитически учесть эффект высокоскоростной поступательной неравновесности универсальной формулой, включающей все основные физические факторы, впервые численно выявленные в работе [1].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 17-07-00-945А.

Литература

1. *Генич А.П., Куликов С.В., Манелис Г.Б., Черешнев С.Л.* Распределение молекулярных скоростей во фронте ударной волны в газовых смесях // Известия Академии Наук СССР. Механика жидкости и газа. 1990. № 2. С. 144-150.
2. *Кузнецов М.М., Кулешова Ю.Д., Смотрова Л.В.* Эффект высокоскоростной поступательной неравновесности в бимодальной ударной волне // Вестник МГОУ. Сер. «Физика-математика». 2012. № 2. С. 108-115.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ

Л.С. Лаврищева, В.Н. Новосёлов

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Россия, Санкт-Петербург, 196158, Московское шоссе, 44
E-mail: liubovlavrishcheva@gmail.com, L_Lavrisheva@ksrc.ru, catran@bk.ru

Оптимизацию можно считать вершиной инженерных компьютерных технологий. В этой задаче в максимальной степени задействован математический аппарат, который относится к разным прикладным областям. Кроме этого, для построения всей технологической цепочки привлечены эффективные серверные платформы и последние достижения в области разработки программного обеспечения.

В последний год, в Крыловском научном центре разработана и запущена технология оптимизации гребных винтов. В качестве объекта исследования рассматривается параметрическая модель гребного винта регулируемого шага, включая параметризованный вал и обтекатель для возможности оптимизации их формы.

Процесс оптимизации предполагает непрерывное взаимодействие нескольких программных продуктов. На первом этапе запускался Vintgen версии 1.06, который является самостоятельной программой построения геометрии модели винта, разработанной в Суперкомпьютерном центре математического моделирования Крыловского государственного научного центра. Эта программа не только является аналогом современных пакетов твердотельного моделирования, но и превосходит их по быстродействию и дает возможность параметризации модели в текстовом файле XML, что позволяет одновременно сократить время расчетов и обеспечить максимальную свободу для пользователя в выборе параметров оптимизации.

Для численного моделирования обтекания модели гребного винта использовался коммерческий продукт вычислительной гидродинамики STAR-CCM+ версии 11.06.010. Для этого пакета с целью автоматизации процесса оптимизации была написана специальная программа на языке Java, в которой запускался процесс построения расчетной сетки, расчет обтекания и вывод значения целевой функции.

В качестве оптимизатора задействован программный комплекс pSeven версии 6.10. Были выделены управляемые параметры, в том числе отвечающие за длину и диаметр вала и обтекателя. Цель оптимизации – повышение коэффициента полезного действия (КПД).

Задача решена в стационарной постановке. В качестве модели турбулентности использована $k-\omega$ SST модель Ментера. В расчетах принята плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $\mu = 1.141 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. На входной границе расчетной области задавалась скорость потока, на выходной границе ставилось условие свободного вытекания, на остальных внешних границах – условие проскальзывания.

Получены результаты расчетов до и после оптимизации для коэффициента упора K_T , коэффициента момента K_Q и КПД η_0 на поступи винта $J = V/(nD)$, где V – скорость судна (м/с), n – частота вращения винта (об/сек), D – диаметр винта (м). Коэффициенты упора, момента и КПД определялись по следующим формулам:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \quad \eta_0 = \frac{J K_T}{2\pi K_Q},$$

где T – упор гребного винта, Q – момент гребного винта.

Литература

1. Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А. Судовые движители. Ленинград «Судостроение», 1988. С. 18-38.
2. Foeth E.-J. Propeller optimization using an unsteady boundary-element method // Proceedings of the fourth international symposium on marine propulsors. 2015. P. 27-32.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ИОНИЗОВАННОЙ СРЕДОЙ

Т.А. Лапушкина, А.В. Ерофеев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
Россия, Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, 26
E-mail: tanyusha@mail.ioffe.ru, alex.erofeev@mail.ioffe.ru

Проблема изучения воздействия на сильные газодинамические разрывы, включая ударные волны различной природы, с целью их значительного ослабления вплоть до полного разрушения, важно, как с прикладной точки зрения, так и вызывает большой интерес для фундаментальных исследований. Работа является продолжением цикла работ по исследованию взаимодействия сильной ударной волны с ионизованной плазменной средой [1-3] с целью изучения возможности изменения ее основных характеристик, а именно интенсивности, скорости распространения, возможности управления ее положением. Задача плазменного воздействия на сверхзвуковые течения и газодинамические разрывы решается в несколько этапов. В предыдущих работах было исследовано воздействие газового разряда, сформированного в сверхзвуковом потоке перед присоединенной волной обтекаемого тела [1] или у поверхности тела в области между ударной волной и телом [2], а также процесс замыкания газового разряда при прохождении ударной волны через область приложения электрического поля [3].

Основная цель работы на данном этапе изучить процесс прохождения сильной ударной волны (число Маха 6.8) через область заранее сформированного слаботоочного газового разряда при варьировании величины газоразрядного тока и степени ионизации. Использование слаботоочного газового разряда позволяет исследовать степень воздействия слабоионизованной неравновесной плазменной среды на структуру и скорость распространения ударной волны.

Исследования проводятся в прямом канале квадратного сечения, сопряженном с ударной трубой, в которой происходит формирование ударных волн различной интенсивности. Зона воздействия представляет собой область приложения напряжения к специальным штыревым электродам, расположенным на верхней и нижней стенках канала. Рабочими средами распространения ударной волны являются ксенон или воздух. Газовый разряд формируется в рабочей зоне перед приходом ударной волны. Используется газовый разряд двух видов: слаботоочный однородный разряд и разряд в виде сферических страт разной конфигурации, представляющих собой ионизационные волны, которые возникают при токе 200-300 мА вследствие развития ионизационной неустойчивости [4].

В работе исследуется воздействие однородной и стратифицированной ионизованной среды на форму и скорость распространения ударной волны. Для этого снимаются вольтамперные характеристики разряда, измеряется скорость распространения ударной волны до области разряда и после прохождения зоны взаимодействия, а также исследуется процесс распространения ударной волны через область разряда путем визуализации картины течения в этой области шлирен методом с много кадровой скоростной съемкой. На рис. 1 представлены шлирен картины изменения формы ударной волны при прохождении через однородный газовый разряд различной интенсивности, где видно значительное уширение волны.

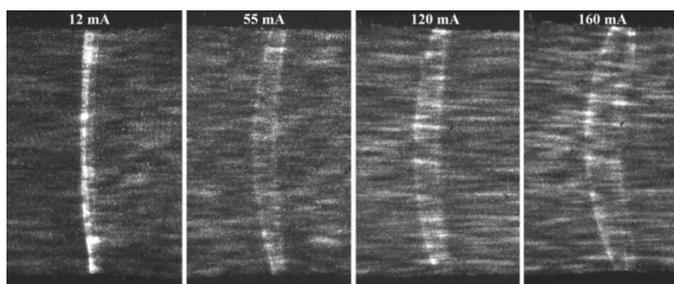


Рис. 1. Уширение ударной волны при прохождении через ионизованную среду.

Работа поддержана Грантом РФФИ № 15-01-04635а.

Литература

1. Лапушкина Т.А., Ерофеев А.В., Поняев С.А., Бобаев С.В. Сверхзвуковое обтекание тела неравновесной газоразрядной плазмой // Журнал Технической Физики. 2009. Т. 79. № 6. С. 78-86.
2. Лапушкина Т.А., Ерофеев А.В., Поняев С.А. Сверхзвуковое обтекание тела при воздействии электрического и магнитного полей // Журнал Технической Физики. 2011. Т. 81. № 5. С. 28-34.
3. Лапушкина Т.А., Ерофеев А.В. Особенности замыкания газового разряда при прохождении ударной волны через область приложения электрического поля // Письма в Журнал Технической Физики. 2015. Т. 41. № 5. С. 35-41.
4. Нерушев О.А., Новопашин С.А., Радченко В.В., Сухинин Г.И. Сферические страты в тлеющем разряде // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 1997. Т. 66. № 11. С. 679-682.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

Г.Е. Левченко^{1,2}, А.П. Маштаков^{1,2}, В.Л. Бакулев²

¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-я Красноармейская, 1

²АО НПП «Радар ММС», Россия, Санкт-Петербург, 197375, ул. Новосельковская, 37А

E-mail: levgleb@yandex.ru, mashtakovap@gmail.com, vlbakulev@gmail.com

Расчет параметров динамики морских сооружений на свободной морской поверхности является неотъемлемой частью проектирования объектов морского базирования. Возмущения «большой» воды негативно сказываются на условиях работы и состоянии персонала и оборудования. Для учета и расчета движения конструкций необходимо составить модель для исследования, которая должна включать геометрию расчетной модели, условия работы, способ и вид задания возмущения морской поверхности, метод расчета и описания перемещения объекта, описание расчетной методики, её физическое и математическое обоснование.

Морской транспорт является важной частью человеческого существования на протяжении не одного десятка веков, в силу этого накоплен большой математический и экспериментальный багаж знаний. Большая часть этих знаний пригодна для расчета моделей типичной геометрической формы с использованием большого количества допущений. Часть этих методов является полностью эмпирическими или требует проведения полноразмерных испытаний. Классические математические методы имеют сложный аппарат и зачастую требуют длительную подготовку и расчет. В настоящий момент наиболее распространенными методами расчета являются численные методы или опытовые бассейны. Опытные бассейны доступны лишь небольшому количеству организаций, требуют опыта работы и грамотной интерпретации полученных данных. Численные методы же получили огромное развитие и распространение в связи с ростом производительности персональных компьютеров. Любой желающий, обладающий некоторой квалификацией, может воспользоваться пакетами прикладных программ для расчета.

В настоящее время получили широкое распространение следующие численные методы: CFD (computational fluid dynamics, вычислительная гидродинамика), реализующий общие модели динамики текучих сред, и NWT (Numerical wave tank, численный волновой бассейн), реализующие модель потенциальных течений жидкости со свободной поверхностью. NWT проще и доступнее других методов расчета, менее требовательна к компьютерным ресурсам и позволяет эффективно моделировать процессы динамики сооружений. Для наиболее корректного задания возмущения морской поверхности используются морские спектры, так же NWT позволяют учесть действие ветра на возвышающиеся конструкции.

Данная работа посвящена расчету качки плавучих сооружений на нерегулярном волнении, а также описанию проблем использования метода NWT для расчета сложных конструкций. Для работы требуется понимание расчетного аппарата, знание особой терминологии и интерпретация результатов. Как результат расчета обычно представляются параметры качки (амплитуда и период), перемещения и динамическое воздействие на конструкции и оборудование.

Литература

1. Чижумо С.Д. Основы динамики судов на волнении: учеб. пособие Комсомольск-на-Амуре. ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. 110 с.
2. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Качка судов на морском волнении. Л.: «Судостроение», 1969. 432 с.
3. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. Л.: «Судостроение», 1982. 286 с.
4. Gourlay T., A.von Graefe., Shigunov V., Lataire E. Comparison of AQWA, G1 Rankine, Moses, Octopus, Pdstrip and Wamit with model test results for cargo ship wave-induced motions in shallow wate // OMAE 2015. St.John's. 2015. P. 11.
5. Xu J.H., Liu Y.Q., Chen C.H. Dynamic response analysis of small oil tanker based on AQWA // Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2013. Vol. 779. P. 757-762.
6. Pesman E., Kolukisa D.C., Taylan M. Numerical and analytical approaches for roll motion analysis in regular longitudinal waves // Polish Maritime Research. Trabzon, 2015. P. 8.
7. Waals O., Wilde J. Time domain sinulations of side-by-side moored vessels lessons learnt from benchmark test // OMAE 2007. San Diego. 2007. P. 11.

НЕКОТОРЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ВЯЗКОГО ГАЗА

И.И. Липатов

*Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского,
Россия, Жуковский, 140180, ул. Жуковского, 1
E-mail: igor_lipatov@mail.ru*

Представлены результаты исследования течений, в которых существенную роль играют процессы взаимодействия вязких и невязких течений. Эти процессы проявляются в течениях, содержащих отрыв и присоединение пограничных слоев, распространение возмущений, течения при наличии разрывных граничных условий и др.

Две работы сыграли ключевую роль в развитии гидродинамики. Первая принадлежит Людвигу Прандтлю [1], она была представлена на математическом конгрессе в Гейдельберге. В этой работе была сформулирована теория пограничного слоя. Теория была основана на экспериментальных данных и предположении о малом влиянии вязкости при больших числах Рейнольдса.

Вторая работа принадлежит Вернеру Гейзенбергу [2] и была посвящена анализу процессов гидродинамической устойчивости при больших числах Рейнольдса.

В докладе представлены результаты некоторых последующих исследований, основанных на применении асимптотических методов для построения математических моделей динамики вязкого газа, описывающих разнообразные гидродинамические эффекты в дозвуковых, сверхзвуковых и гиперзвуковых течениях. Эти результаты частично описаны в монографии [3] и в статьях последнего времени.

Литература

1. *Prandtl L. Uber Flussigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung // Verhandlg. III. Intern. Kongr. Heidelberg. 1904. P. 484-491.*
2. *Heisenberg W. Uber Stabilitat und Turbulenz von Flussigkeitsstromen // Ann. Phys. 1926. Vol. 74. P. 577-627.*
3. *Нейланд В.Я., Боголепов В.В., Дудин Г.Н., Липатов И.И. Асимптотическая теория сверхзвуковых течений вязкого газа. М.: Физматлит, 2004. 455 с.*

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ АКТИВНОГО ДИФFUЗОРА ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ХИМИЧЕСКОГО КИСЛОРОД-ЙОДНОГО ЛАЗЕРА

В.М. Мальков, А.А. Дук, А.В. Емельянова

¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-я Красноармейская, 1
E-mail: trupeloo@gmail.com

Сверхзвуковые химические кислород-йодные лазеры (ХКЙЛ) остаются одними из самых перспективных лазеров для реализации мобильных лазерных комплексов (МЛК) мегаваттного класса мощности. В ХКЙЛ полное давление потока отработавшей активной среды составляет ≈ 20 мм рт. ст. Для реализации непрерывного режима работы необходима система восстановления давления (СВД), обеспечивающая выхлоп в атмосферу. Обычная СВД состоит из диффузора, теплообменника и нескольких ступеней эжекторов (ЭЖ), запитываемых от газогенераторов [1]. В [2] на основе ХКЙЛ был реализован МЛК воздушного базирования на самолете Boeing-747. Наличие горячих ЭЖ и больших габаритов комплекса привело к приостановке дальнейших работ. Сегодня разработана и испытана СВД на основе Активного Диффузора (АД), которая не использует горячих ЭЖ и позволяет сократить габариты СВД [3]. На практике массогабаритные характеристики СВД могут составлять большую часть массы всего МЛК, поэтому оптимизация геометрии и повышение эффективности работы АД остается актуальной задачей. Канал АД отличается от выхлопных каналов аэродинамических труб: поперечное сечение представляет собой прямоугольник с отношением сторон $b/h \gg 1$, сам канал является сложным – с уступами, кавернами и разделительными пилонами. Сверхзвуковой лазерный поток характеризуется малыми числами $Re \approx 10^3$ с наличием тепловыделения. Процесс торможения потока в диффузоре имеет трехмерный характер и для оценки рабочих характеристик АД традиционные интегральные методики не могут быть использованы.

Задача по оптимизации геометрии АД обладает большим числом параметров, и ее решение эмпирическим путем вряд ли возможно. Канал АД состоит из сверхкороткой пассивной диффузорной части (ПЧ), разделенный, как обычно, вертикальными пилонами, и активной части (АЧ). АЧ представляет собой специальный многосопловой блок с расположенными по периферии канала соплами и камеру смещения, разделенную пилонами (что сокращает ее длину, необходимую для смещения эжектирующего и откачиваемого лазерного газа). Вертикальные пилоны ПЧ заканчиваются в одной плоскости с сопловым блоком АЧ и имеют на срезе такие же сопла. Таким образом, АЧ – это многосопловой ЭЖ с распределенной по сечению подачей эжектирующего газа, а АД – это выхлопной диффузор и ЭЖ, соединенные в одно устройство.

В работе представлены результаты оптимизации геометрии ПЧ. Необходимо было организовать торможение потока на очень короткой длине, чтобы АД, как ЭЖ, работал по схеме «дозвук-сверхзвук». Первые варианты АД [1] работали по схеме «сверхзвук-сверхзвук», что с точки зрения коэффициента эжекции системы менее выгодно. Для сокращения зоны торможения потока канал ПЧ был разделен дополнительно горизонтальным пилоном, т.е. была реализована двухэтажная конструкция. При этом важно было избежать увеличения давления запуска диффузора. Проведено было параметрическое исследование влияния всех параметров на длину зоны торможения и давление запуска пассивного диффузора. В расчетах варьировались: начальные углы пилонов, местоположение горизонтального пилон и его толщина, общая степень поджатия канала ПЧ. Удалось добиться торможения потока на расстоянии в 1 калибр (по высоте канала). Эксперименты [1] показали, что короткая ПЧ позволяет организовать отсос пограничного слоя со стенок лазерной камеры и предотвратить его отрывы, приводящие к образованию ударных волн. Тем самым удалось добиться улучшения оптического качества потока в резонаторе. Отмечено, что выхлоп для МЛК воздушного базирования может быть реализован на базе только одного АД, что означает сокращение длины лазерного модуля - по сравнению с традиционным решением для СВД – более чем в 2,5 раза.

Расчеты выполнялись в программном пакете конечно-элементного анализа Ansys CFX в нестационарной постановке с использованием модели турбулентности SST. Методика численного эксперимента была верифицирована в [1].

Литература

1. Мальков В.М., Киселев И.А. и др. Система восстановления давления химического кислородно-йодного лазера на базе активного диффузора // Теплофизика и Аэромеханика. 2011. Т. 18. № 3. С. 381-395.
2. Koop G., Hartlov J., et. all. Airborne laser flight-weighted laser module (FLM) and COIL modeling support // AIAA Paper No. 2000-2421. 2000.
3. Патент № 2609186 от 30.01.2017 «Газодинамический тракт сверхзвукового химического лазера с активным диффузором».

МНОГОСОПЛОВОЙ ЭЖЕКТОР (М-ЭЖ): ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ

В.М. Мальков, А.В. Емельянова, А.А. Дук

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.М. Устинова,
Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-ая Красноармейская, 1
E-mail: nastyajane@yandex.ru

Эжектор (ЭЖ), как струйный насос для откачки газов, находит себе применение в различных областях техники. На сегодня одна из актуальных задач: применение ЭЖ в составе системы восстановления давления (СВД) для сверхзвуковых химических лазеров, так как они наиболее вероятные кандидаты для создания мобильных лазерных комплексов (МЛК) мегаваттного уровня мощности. Основное требование к СВД - это уменьшение массогабаритных характеристик, что критически важно для мобильных систем. Разработка эффективного ЭЖ, работающего с меньшим расходом газа, позволяет заметно сократить габариты лазерного модуля, так как ЭЖ с системой хранения и подачи компонентов для газогенератора, питающего ЭЖ, определяет во многом массогабариты МЛК [1, 2].

Работа ЭЖ основана на процессе смешения высоконапорного эжектирующего газа с эжектируемым. В [3] для улучшения смешения использовалась подача эжектирующего газа со стенок камеры смешения через большое число малоразмерных сопел. Такая схема ЭЖ позволяет увеличить поверхность смешения потоков, но из-за большого количества малых сопел схема фактически становится классической периферийной, а кроме того струи были направлены под углом к центральной оси ЭЖ, что приводило к потере импульса вдуваемого газа. В ЭЖ такого типа значение $n \cdot \epsilon$ получилось низким ≈ 0.5 (n - коэффициент эжекции, ϵ - степень сжатия). В [4] интенсификация смешения осуществлялась за счет использования вихреобразующих элементов на конце центрального сопла. В этом случае получено $n \cdot \epsilon$ гораздо выше ≈ 2 , но часть импульса эжектирующего потока все-таки теряется на завихрителях.

В М-ЭЖ, предложенном в [5], где вместо одного центрального большого сопла используется несколько сопел (с тем же общим расходом), расположенных по обечайке камеры смешения, смешение потоков газов интенсифицируется за счет увеличения самой поверхности смешения. При этом нет потери импульса эжектирующего газа, т.к. сопла расположены спутно с потоком эжектируемого газа. М-ЭЖ – многопараметрическое устройство, выбор схемы смешения и нахождение оптимальных характеристик ЭЖ экспериментальным путем слишком трудоемко. В работе на основе 3-D расчетов вязких течений проведено параметрическое исследование влияние геометрии канала М-ЭЖ на его эффективность. Варьировались такие параметры как: длина камеры смешения, длина горла, диаметр горла, углы наклона сопел, количество сопел, расположение сопел и различные сочетания параметров геометрии канала.

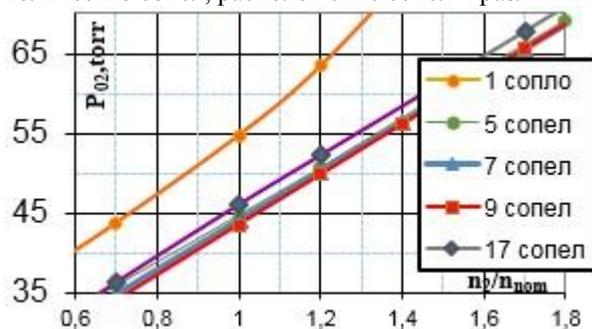


Рис. 1. Зависимость P_{02} от величины нагрузки для М-ЭЖ с разным количеством сопел.

Некоторые результаты: в М-ЭЖ оптимальным количеством сопел является 7 сопел (на рис. 1 P_{02} – давление перед ЭЖ), длины камеры смешения и горла ЭЖ могут быть сокращены до 5 и 4 калибров, соответственно, вместо обычно рекомендуемых 10-12 калибров.

Исследования проводились с помощью программного пакета ANSYS (модель турбулентности - SST модель). Численная методика верифицировалась по результатам испытаний ЭЖ центральной схемы на лабораторном эжекторном стенде, описанном в [1], и по результатам испытаний, ранее разработанных СВД [1, 2].

Литература

1. Мальков В.М., Киселев И.А., Шаталов И.В. и др. Система восстановления давления HF/DF лазера большой мощности: опыт реализации // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14. № 4. С. 591-607.
2. Мальков В.М., Киселев И.А., Шаталов И.В. и др. Система восстановления давления химического кислород-йодного лазера на базе активного диффузора // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. № 3. С. 397-411.
3. Аркадов Ю. К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. М.: Издательство Физ.-мат. Литературы, 2001.
4. Соболев А.В., Запругаев В.И., Мальков В.М. Применение насадок, шевронов и табов для улучшения расходных характеристик газовых эжекторов // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14. № 2.
5. Мальков В.М., Шаталов И.В., Дук А.А., Анисимова (Емельянова) А.В. Эффективные эжекторы для системы восстановления давления сверхзвуковых химических лазеров // Струйные, отрывные и нестационарные течения: тезисы докладов 24-го Всероссийского семинара с международным участием. Новосибирск: Параллель, 2015. С. 108-110.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВО ВХОДНЫХ СТУПЕНЯХ КОМПРЕССОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ АВИАДВИГАТЕЛЯ

О.В. Маракуева, Ю.М. Циркунов

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.М. Устинова,
Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-ая Красноармейская, 1
E-mail: olga_marakueva@mail.ru, tsrknv@bstu.spb.su*

Одной из наиболее сложных задач в проектировании авиационного двигателя является исследование динамического поведения лопаток компрессора в условиях обтекания нестационарным потоком воздуха [1]. Явление флаттера, которое может возникать практически на любом режиме работы авиационного двигателя, является крайне нежелательным и требует особого внимания при проектировании. Основным методом исследования данного явления в настоящее время служит эксперимент, но из-за его трудоемкости и зачастую невозможности получения необходимой информации наиболее перспективным становится численное моделирование аэроупругого взаимодействия лопаток с потоком воздуха в трехмерной постановке [2].

В процессе проведения эксперимента при некоторых условиях флаттер диагностировался в первом рабочем колесе компрессора высокого давления авиационного двигателя.

В данной работе в качестве первого шага решения сопряженной задачи моделирования и анализа флаттера проводится численное исследование пространственного нестационарного течения в проточной части регулируемого входного направляющего аппарата и в двух ступенях компрессора высокого давления с целью выбора адекватной математической модели.

В процессе изучения течения методами вычислительной газодинамики рассматриваются различные модели турбулентности, исследуется сеточная сходимость и нестационарные эффекты течения в компрессоре на одном режиме его работы. Все расчеты проводятся с использованием программного обеспечения Fine/Turbo.

Данное исследование выполнено при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-07965).

Литература

1. *Самойлович Г.С.* Нестационарное обтекание и аэроупругие колебания решеток турбомашин. М.: Наука, 1969.
2. *Писаренко Г.С., Ольштейн Л.Е.* Проблемы аэроупругости лопаток турбомашин // Проблемы прочности. 1974. № 8. С. 3-8.

О МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ВЯЗКОСТИ

С.К. Матвеев

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: smat@rambler.ru

Предлагается модификация модели Спаларта-Алмареса [1], отличающаяся более рациональным выбором входящих в уравнение величин и меньшим количеством эмпирических констант.

Уравнение для турбулентной вязкости ν_t принимается в виде

$$\frac{d\nu}{dt} = f_b S \nu_t + \nabla \left(\frac{\nu_t}{\sigma} \nabla \nu_t \right) - C_d (\nabla \nu_t)^2 - C_w \left(\frac{\nu_t}{d} \right)^2, \text{ где } f_b(\nu_t) = \frac{\kappa^2 \nu_t}{\sigma \sqrt{\nu_t^2 + c_1 \nu^2}} \left(1 - c_2 \frac{\nu_t}{\nu_m} \right),$$

ν – молекулярная вязкость, ν_m – максимальное значение турбулентной вязкости в рассматриваемой области, $\kappa = 0.41$ – постоянная Прандтля-Кармана. Значения констант $C_1 = 6.5$, $C_2 = 0.8$, $\sigma = 0.5$, $C_d = 3.467$, $C_w = 0.533$ находятся по известным экспериментальным данным о течениях несжимаемой жидкости в трубах и в основном участке затопленной струи. На рис. 1 показаны результаты расчетов течения в трубе для различных значений напора. Интересно, что переход от ламинарного течения к турбулентному (и обратно) происходит автоматически без изменения уравнений и без каких-либо переключателей в алгоритме расчета.

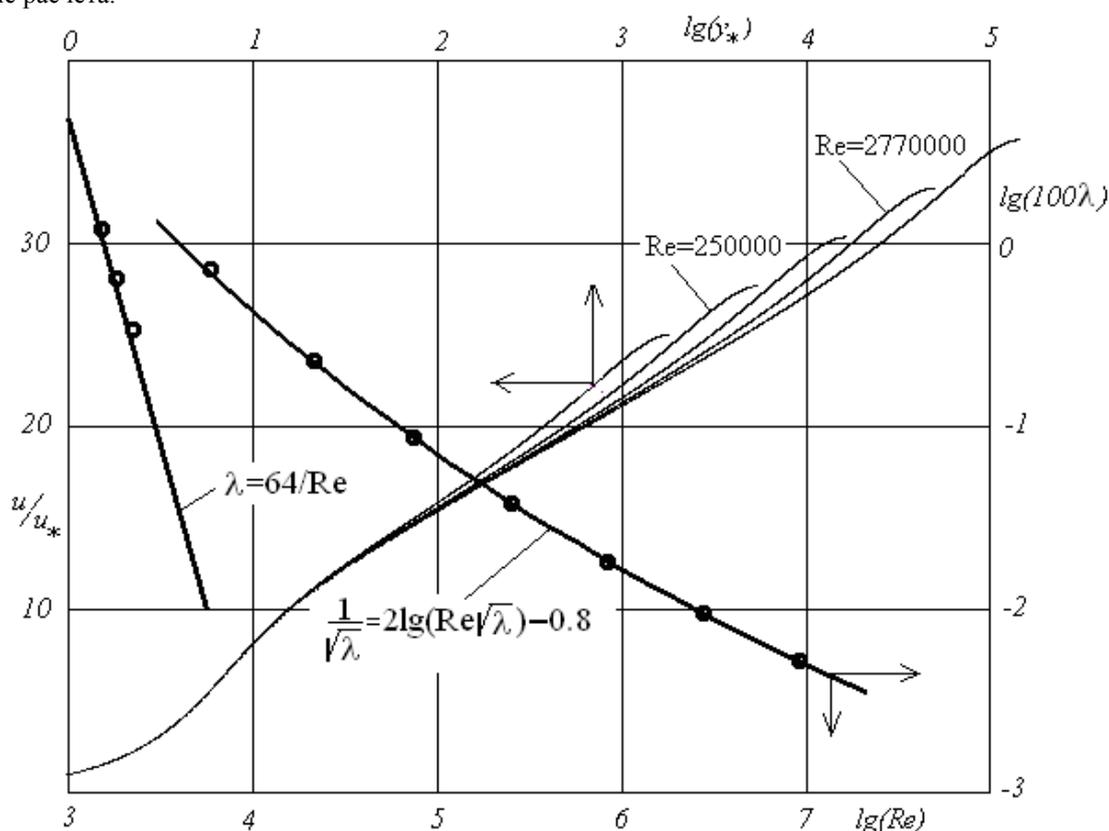


Рис.1. Результаты расчета коэффициента сопротивления (кружки) и профилей скорости.

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства образования и науки республики Казахстан, грант 5318/ГФ4.

Литература

1. Spalart P.R., Allmaras S.R. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows // AIAA Paper №92-0439. 1992

ТУРБУЛЕНТНОЕ ДВУХСЛОЙНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ТРУБЕ

С.К. Матвеев¹, Н.Ж. Джайчибеков², Б.С. Шалабаева²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9

² Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
Казахстан, Астана, 010000, ул. К. Мунайтыпасова, 5

E-mail: smat@rambler.ru, jaich@mail.ru

Решается задача о стационарном турбулентном течении в наклонной трубе двух несмешивающихся жидкостей (в качестве одной из жидкостей может быть газ, сжимаемостью которого пренебрегается). Постановка и метод решения задачи близки к [1], но течение турбулентное, модель турбулентности принята как в [2]. На поверхности раздела ($y=h$, h – глубина нижнего слоя жидкости) считаются непрерывными осевая скорость w , напряжение трения и турбулентная вязкость V_t , а плотности ρ_i и молекулярные вязкости V_i различны при $i=1$ ($y \leq h$) и при $i=2$ ($y \geq h$). Численно решаются уравнения количества движения в каждом

$$\text{слое: } \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial p}{\partial z} - g \sin \alpha = \frac{\partial}{\partial x} \left[(v_t + v_i) \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(v_t + v_i) \frac{\partial w}{\partial y} \right], \quad (i=1, 2)$$

и единое уравнение для турбулентной вязкости:

$$f_b v_t \sqrt{\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_t}{\sigma} \frac{\partial v_t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_t}{\sigma} \frac{\partial v_t}{\partial x} \right) = C_d \left[\left(\frac{\partial v_t}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_t}{\partial y} \right)^2 \right] + C_w \left(\frac{v_t}{d} \right)^2.$$

Здесь d – кратчайшее расстояние до стенки трубы, $f_b(v_t) = \frac{\kappa^2 v_t}{\sigma \sqrt{v_t^2 + c_1 v^2}} \left(1 - c_2 \frac{v_t}{v_m} \right)$, $\kappa = 0.41$,

$C_1 = 6.5, C_2 = 0.8, \sigma = 0.5, C_d = 3.467, C_w = 0.533$. Функция f_b и значения констант выбирались из условия наилучшей аппроксимации экспериментальных данных по стационарному течению несжимаемой жидкости в трубе и течению в основном участке затопленной струи.

Расчеты проводились на сетке, имевшей 100 ячеек на диаметр. В ближайших к стенкам трубы узлах сетки граничные условия записывались с использованием пристеночных аппроксимаций вида $\frac{w}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln(y_*) + B - \frac{C_3}{y_*} + \frac{C_4}{y_*^2}$, что позволило получить достаточную точность, не измельчая сетку.

При умеренных числах Рейнольдса в расчетах наблюдались режимы, когда в слое с малой объемной долей течение становилось ламинарным при турбулентном течении во втором слое. Критерии ламинарно-турбулентного перехода не установлены, поскольку это требует специального исследования с экспериментальным подтверждением. К сожалению, таких экспериментальных данных авторы в литературе не нашли.

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства образования и науки республики Казахстан, грант 5318/ГФ4.

Литература

1. Джайчибеков Н.Ж., Матвеев С.К., Сидоров Д.Г. Расчет двухфазного стратифицированного течения в трубе // Вестник С.-Петерб. ун-та. 2017. Сер. 1. №1. С. 30-34.
2. Матвеев С.К. О модели турбулентности на основе уравнения для вязкости // Настоящий сборник. Санкт-Петербург: Издательство, 2017. С. 1.

ОБТЕКАНИЕ ЧАСТИЦ НЕСФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРИ УМЕРЕННЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Л.Н. Микаилова¹, Ю.М. Циркунов²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург 195251, ул. Политехническая, 29

²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-ая Красноармейская, 1
E-Mail: dwema@mail.ru , yury-tsirkunov@rambler.ru

Аналізу взаємодії дисперсних частиць несферическої форми в двухфазних потоках присвячено доволно багато публікацій (см. огляд [1]). Однак існують лише єдиничні роботи, в яких обтекання частиць, в тому числі несферическої форми і вращаючихся, досліджується шляхом прямого чисельного моделювання (см., наприклад, [2]). Питання про особливості обтекання і аеродинамічних характеристик частиць різної, наприклад, кубіческої форми або в вигляді призм з срезаними вершинами достатньо актуальні. Значительний інтерес представляє обтекання вращаючихся частиць.

В даній роботі на основі рівнянь Нав'є–Стокса виконані систематичні розрахунки обтекання частиць несферическої форми, в тому числі з урахуванням їх вращення, з метою вивчення картини течії і вихревої структури сліду, а також визначення сили опору і поперечної сили. Розглянуто обтекання кубика, кубика з срезаними вершинами, а також еліпсоїда вращення несжимаемым газом при умерених числах Рейнольдса. Результати порівнювалися з випадком обтекання сфери. В розрахунках число Рейнольдса змінювалося в діапазоні $Re=1...400$. Досліджено вплив форми і вращення частиць на картину течії і аеродинамічні характеристики.

Розрахунки були виконані в програмному пакеті ANSYS Fluent. Неструктурована сітка в розрахунковій області була побудована в ANSYS ICEM CFD і ANSYS MESHING.

Отримані результати суттєво уточнили уявлення про картину обтекання частиць, в частині, про розвиток вихревих слідів, а також про їх аеродинамічні характеристики, що важливо для підвищення адекватності моделей міжфазного взаємодії в двухфазних течіях. Приклад картини течії навколо кубика наведено на рис. 1.

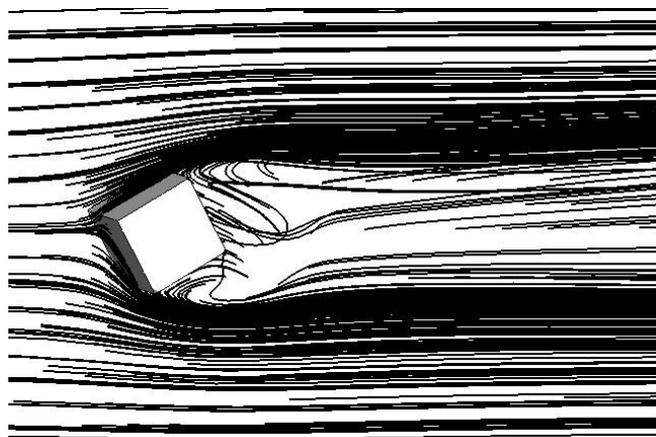


Рис.1. Картина линий тока при обтекании кубической частицы под углом атаки 30° , $Re=200$.

Данное исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-07965).

Литература

1. Каишеваров А.В., Стасенко А.Л. Взаимодействие частиц различной формы с несущим континуальным потоком (обзор) // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. XLV. № 5. С. 3-17.
2. Richter A., Nikrityuk P.A. Drag forces and heat transfer coefficients for spherical, cuboidal and ellipsoidal particles in cross flow at sub-critical Reynolds numbers // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. Vol. 55. P. 1343-1354.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ С НАГРЕВАЕМЫМИ ПОРИСТЫМИ ВСТАВКАМИ

С.Г. Миронов

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Россия, Новосибирск, 630090, ул. Институтская, 4
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Россия, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2
E-mail: mironov@itam.nsc.ru

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований обтекания сверхзвуковым потоком ($M_\infty = 4,85$ и 7) моделей, включающих вставки из высокопористых (95 %) газопроницаемых ячеисто-пористых материалов, выполненных в ИТПМ СО РАН в последние 5 лет. Целью исследований являлась разработка новых методов управления аэродинамическими силами тел в сверхзвуковом потоке.

Экспериментальные исследования включали измерения гидродинамических характеристик пористых материалов на фильтрационном стенде при одномерном течении воздуха в круглом канале с не нагреваемыми [1] и нагреваемыми пористыми вставками, а также эксперименты в сверхзвуковой аэродинамической трубе ИТПМ СО РАН Т-327Б на осесимметричных моделях с пористыми вставками без [2] - и при наличии нагрева [3] пористого материала. В экспериментах на фильтрационном стенде была измерена величина гидравлического сопротивления пористых образцов в зависимости от температуры воздуха прошедшего через нагретый пористый образец. В трубных экспериментах, в основном, определялась зависимость величины аэродинамического сопротивления модели от температуры пористой вставки или прошедшего через нее воздуха. В одном из вариантов нагревание пористой вставки в трубных экспериментах осуществлялось термическим лучистым нагревом перед пуском аэродинамической трубы, с последующим охлаждением вставки набегающим потоком. В другом варианте пористая вставка постоянно нагревалась электрическим тлеющим разрядом, где катодом служила передняя пористая вставка (см. [3]). Экспериментальные исследования были дополнены численным моделированием в рамках дискретной (скелетной) модели ячеисто-пористых материалов [4], специально разработанной для задач сверхзвукового обтекания высокопористых материалов.

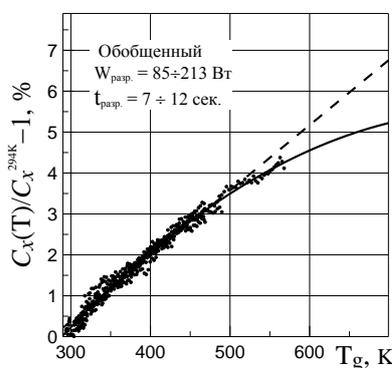


Рис. 1. Обобщенная зависимость относительного роста аэродинамического сопротивления цилиндра с пористой вставкой от температуры воздуха, прошедшего через пористый материал. Нагрев тлеющим электрическим разрядом.

Точки – эксперимент ($M_\infty = 7$), кривые – линейная и квадратичная аппроксимации экспериментальных данных.

Было показано, что нагревание пористой вставки в цилиндр, продольного сверхзвуковому потоку, можно на $\cong 5 - 7$ % увеличить аэродинамическое сопротивление модели за счет роста гидравлического сопротивления течения воздуха в порах материала (рис. 1). Было обнаружено, что в исследованном диапазоне параметров потока эффект теплового управления слабо зависит от числа Маха и Рейнольдса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-03867).

Литература

1. Миронов С.Г., Колотилов В.А., Маслов А.А. Экспериментальное исследование фильтрационных характеристик высокопористых материалов // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 5. С. 599-607.
2. Фомин В.М., Миронов С.Г., Сердюк К.М. Снижение волнового сопротивления тел в сверхзвуковом потоке пористыми материалами // Письма в Журнал Технической Физики. 2009. Т. 35 Вып. 3. С. 39-45.
3. Миронов С.Г., Маслов А.А., Цырюльников И.С. Управление аэродинамическими силами с помощью газопроницаемых пористых материалов // Письма в Журнал Технической Физики. 2014. Т. 40. Вып. 19. С. 83-88.
4. Poplavskaya T.V., Kirilovskiy S.V., Mironov S.G. Supersonic flow around a cylinder with front gas-permeable insert which modelled by skeleton of porous material // AIP Conf. Proc. 2016. Vol. 1770. P. 030067.

МОДИФИКАЦИЯ k - ω -SST МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ И ГОРЕНИЯ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

А.А. Моисеев¹, А.В. Савин²

¹АО «Концерн «Струйные технологии», Россия, Санкт-Петербург, 198097, пр. Стачек, 47, литер БД

²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,

Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-ая Красноармейская, 1

E-mail: terminalmashine@gmail.com

При моделировании турбулентных фильтрационных течений и турбулентного газозного горения в пористых средах в рамках подхода взаимопроникающих континуумов необходимо корректно описать диффузию в газовой фазе. При прямом применении известных моделей турбулентности в уравнениях для газовой фазы [1] не учитывается дисперсионное перемешивание [2], обусловленное случайно-неоднородной стационарной структурой пористого тела. В этих условиях, даже при ламинарном течении в порах, при описании газового потока на уровне континуума возникает дисперсионное перемешивание, подобное турбулентному. Пространственный масштаб такой псевдо-турбулентности имеет порядок масштаба пористой структуры, а масштаб «пульсаций» скорости – порядок самой фильтрационной скорости.

Для моделирования такой псевдо-турбулентности в принципе подходит любая известная модель, при условии правильного описания масштабов. В данной работе представлена модификация k - ω -SST модели Ментера [3] за счет введения источниковых членов S_k и S_ω в транспортные уравнения для k и ω :

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x_i} \cdot (\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot (\rho \omega u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \\ S_k &= -\frac{\rho u (k - k_\infty)}{D_0}; \quad k_\infty = K_u u^2 \\ S_\omega &= -\frac{\rho u (\omega - \omega_\infty)}{D_0}; \quad \omega_\infty = K_\omega \frac{u}{0.1 D_0}\end{aligned}$$

где u – фильтрационная скорость, D_0 – масштаб пористой структуры. Новые «дисперсионные» источникивые члены значительно больше, чем члены генерации и диссипации, поэтому именно они управляют масштабами. Такая модифицированная модель качественно верно описывает дисперсионную диффузию в фильтрационном течении, но для количественного совпадения необходима калибровка коэффициентов K_u и K_ω .

Для описания турбулентного горения в пористой среде используется модель распада вихря [4], в которой турбулентный коэффициент диффузии определяется через турбулентное число Шмидта (обычно считается, что $Sm_t = 1$) и турбулентную вязкость, пропорциональную k/ω , а скорость реакции пропорциональна скорости диссипации $1/\omega$. Тогда, при условии правильного определения k и ω , в рамках модели распада вихря обеспечивается корректное моделирование диффузионного горения в пористой среде.

Для калибровки использовалось численное решение для фильтрационного течения в пористой среде с детальным геометрическим описанием формы поровых каналов и со стандартной k - ω -SST моделью в искусственно сгенерированной методом [5] случайной засыпке из 1800 сфер диаметром 60 мкм в канале диаметром 0.6 м. Расчет проведен на сетке, содержащей 36,7 млн. ячеек при числе Рейнольдса ~6000. Калибровка проведена путем сравнения с результатами такого детального моделирования формы автоматического диффузионного факела, полученной методом взаимопроникающих континуумов с использованием предлагаемой модифицированной k - ω -SST модели.

Литература

1. Федоров С.С. и др. Исследование процессов смесеобразования в шахтных известково-обжиговых печах // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. 2010. Випуск 2. С. 184-197.
2. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. М.: Химия, 1982. 320 с.
3. Menter, F. R. // AIAA Journal. 1994. Vol. 32. N 8. P. 1598-1605.
4. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // Symposium (International) on Combustion. 1977. Vol. 16. Issue 1. P. 719-729.
5. Савин А.В., Моисеев А.А., Яценко А.А. // Математическое моделирование. 2016. Т. 28. № 10. С. 87-96.

ПОУРОВНЕВОЕ ОПИСАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ВОЗДУХА В СОПЛАХ

Е.А. Нагнибеда, К.В. Папина

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: e_nagnibeda@mail.ru, papakurt@mail.ru

Исследование расширяющихся сверхзвуковых неравновесных течений реагирующих газовых смесей представляет значительный интерес во многих практических приложениях, связанных с разработкой реактивных двигателей и моделированием условий в высокоэнтальпийных установках. В большинстве работ (см., например, [1], [2]), посвященных детальному поуровневому описанию течений в соплах, рассматриваются бинарные смеси $N_2(i)/N$ и $O_2(i)/O$, так как детальное описание потоков многокомпонентных смесей требует решения большого числа уравнений и приводит к увеличению вычислительных ресурсов [3,4]. Другой проблемой является недостаток данных о зависящих от номеров уровней коэффициентах скорости химических реакций.

В настоящей работе рассматриваются квазиодномерные стационарные течения пятикомпонентного воздуха $N_2(i)/O_2(i)/NO(i)/N/O$ в соплах на основе поуровневого описания. В рамках данной кинетической модели времена колебательной релаксации и химических реакций считаются сравнимыми со средним временем изменения газодинамических параметров и уравнения колебательной и химической кинетики решаются совместно с уравнениями сохранения импульса и энергии. Принимаются во внимание реакции обмена атомами $N_2(i) + O \leftrightarrow NO(i) + N$ и $O_2(i) + N \leftrightarrow NO(i) + O$, диссоциация, рекомбинация, переходы поступательной энергии в колебательную и обмены колебательными энергиями молекул одного и того же сорта и разных сортов. Макропараметрами течения являются заселенности колебательных уровней молекул n_{N_2i} , n_{O_2i} , n_{NOi} , числовые плотности атомов n_N , n_O , температура газа T и макроскопическая скорость v . При численном интегрировании системы уравнений для макропараметров коэффициенты скорости колебательных переходов вычислялись на основе модели Шварца, Славского и Герцфельда [5], для коэффициентов скорости диссоциации использовалась поуровневая модель Тринора-Маррона [2]. Основное внимание уделялось выбору модели коэффициентов скорости обменных реакций: рассмотрены модели с учетом и без учета колебательного возбуждения молекул NO . Исследована зависимость параметров течения от заданных условий в форкамере. Помимо полной системы реакций рассмотрены две упрощенные схемы: 1) без учета обменных реакций; 2) без учета рекомбинации. Результаты показали возрастающую с уменьшением температуры роль рекомбинации в сопле и влияние обменных реакций на состав смеси.

Расчеты течений воздуха в соплах трех видов показали сильное влияние формы сопла на характер химических реакций и изменение температуры и скорости газа. Наиболее резкое убывание температуры получено в случае конического сопла, в котором наблюдается наибольшее расширение потока по сравнению с гиперболическим соплом и соплом F4.

Проведено сравнение результатов, полученных в поуровневом и в однотемпературном приближениях, а также при рассмотрении течений пятикомпонентного воздуха и бинарных смесей $N_2(i)/N$ и $O_2(i)/O$.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ (проект № 6.37.163.2014) и РФФИ (грант № 15-01-02373).

Литература

1. *Shizgal, B. D., Lordet, F.* Vibrational nonequilibrium in a supersonic expansion with reaction: Application to O_2-O // The Journal of Chemical Physics. 1996. Vol. 104. N 10. P. 3579-3597.
2. *Kustova E.V., Nagnibeda E.A., Alexandrova T. Yu. et al.* On the nonequilibrium kinetics and heat transfer in nozzle flows // Chem. Phys. 2002. Vol. 276. N 2. P. 139-154.
3. *Colonna G., Pietanza L. D., Capitelli M.* Macroscopic kinetic model for air in nozzle flow // AIP Conference Proceedings. 2012. Vol. 1501. N 1. P. 1071-1077.
4. *Bazilevich S.S., Simitsyn K.A., Nagnibeda E.A.* Non-equilibrium Flows of Reacting Air Components in Nozzles // AIP Conference Proceedings. 2009. Vol. 1084. N 1. P. 843-848.
5. Физико-химические процессы в газовой динамике / Под ред. Г.Г. Черного, С.А. Лосева. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1995. 350 с.

МНОГОТЕМПЕРАТУРНАЯ ХИМИЧЕСКАЯ И КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ КИНЕТИКА В ПОТОКАХ ВОЗДУХА ЗА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Е.А. Нагнибеда¹, И.З. Шарафутдинов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
²Информационно-технологическая сервисная компания (ИТСК),
Россия, Санкт-Петербург, 196084, ул. Киевская, 5ЧА
E-mail: e_nagnibeda@mail.ru, shiaz@yandex.ru

В работе исследованы неравновесные течения воздуха $N_2/O_2/NO/N/O$ за ударными волнами на основе многотемпературного подхода, позволяющего перейти от детального поуровневого описания к уравнениям для макропараметров. Учитывается неравновесное возбуждение колебательных степеней свободы молекул, диссоциация, рекомбинация и обменные реакции Зельдовича. Особенностью предложенного подхода, является сочетание упрощений многотемпературного подхода и строгости поуровневого описания при вычислении осредненных коэффициентов скорости реакций.

Распределения молекул по колебательным энергиям моделируются обобщенными распределениями Тринора [1] в случае умеренного колебательного возбуждения и составными распределениями Гордиеца [2] в сильно возбужденном газе. Исследованы осредненные по неравновесным колебательным распределениям коэффициенты скорости диссоциации и обменных реакций и факторы неравновесности в разных температурных условиях. Расчеты параметров течения проведены при числах Маха в набегающем потоке $M=10,13,16$. Рассмотрены как традиционные условия невозмущенного набегающего потока, так и случай колебательно-возбужденных молекул перед ударным фронтом. Использование распределения Тринора при моделировании неравновесных процессов за ударными волнами, возникающими в равновесном набегающем потоке, приводит к удовлетворительной строгости определения скорости реакций и макропараметров потока, а при изучении релаксационной зоны за ударными волнами, возникающими в возбужденном газе, более обоснованы составные распределения Гордиеца.

На рис. 1 показано изменение температуры за ударной волной при учете распределений Тринора и однотемпературных распределений Больцмана.

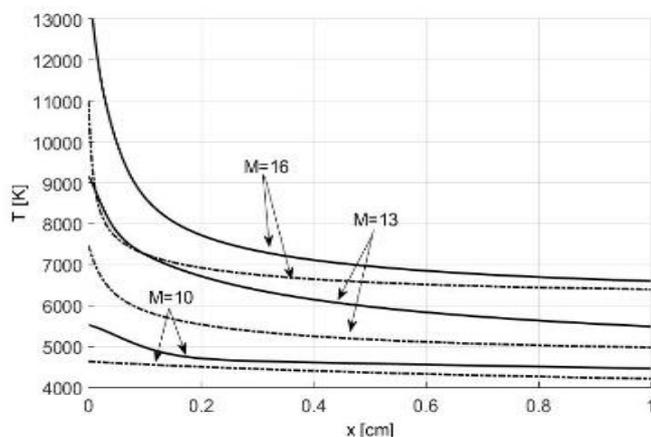


Рис. 1. Температуры T в зависимости от расстояния за фронтом волны x при распределениях Тринора (—) и Больцмана (---).

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 15-01-02373.

Литература

1. Treanor C.E., Rich J.W., Rehm R.G. Vibrational relaxation of anharmonic oscillators with exchange dominated collisions // J. Chem. Phys. 1968. Vol. 48. P. 1798-1807.
2. Гордиец Б.Ф., Осипов А.И., Шелепин Л.А. Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры. М.: Наука, 1980. 512 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

М.С. Нурмухамбетов, Ю.М. Циркунов

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-я Красноармейская, 1
E-mail: nurmuhambetov_ma@mail.ru , tsrknv@bstu.spb.su

В работе приводятся результаты численного моделирования обтекания высокоскоростным потоком воды в режиме суперкавитации удлиненных осесимметричных тел. Режим суперкавитации появляется при скоростях течения выше 100 м/с и характеризуется образованием около тела сплошной каверны паров воды. С практической точки зрения режим суперкавитации является наиболее эффективным для движения, так как сила сопротивления действует только на носовую часть тела – кавитатор. Остальная часть тела обтекается водяным паром при давлении испарения (всего 2600Па) и почти не вносит вклада в общую силу сопротивления.

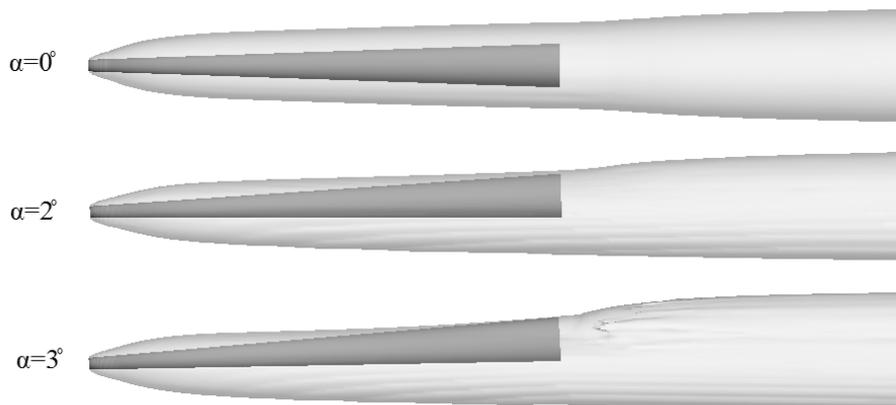


Рис.1. Конфигурация каверны около тела при суперкавитации; α – угол атаки, скорость набегающего потока 480 м/с.

Высокоскоростная стадия проникания тела в воду рассчитывается на основе уравнений Эйлера методом конечного объема в пакете ANSYS Autodyn. Для воды используется уравнение состояния, в котором учитывается сжимаемость. Гидродинамическая задача на этой стадии и динамическая задача деформации кавитатора рассматриваются в сопряженной постановке.

В дальнейшем гидродинамическая задача решается с использованием ANSYS CFX на основе уравнений Рейнольдса (RANS-подход) с SST моделью турбулентности Ментера. Поведение поверхности раздела сред описывается моделью VOF. Расчет в данной постановке позволяет получить более полную картину течения, предсказать появление циркуляционных зон, учесть взаимодействие корпуса тела с парами воды. Расчет проведен с использованием несжимаемого уравнения состояния (увеличение плотности воды на 5% достигается при скорости набегающего потока 540 м/с, что ограничивает применимость этой постановки). Вид каверны около тела при различных углах атаки показан на рис. 1.

В процессе движения тел в водной среде в режиме суперкавитации со временем развиваются колебательные движения, образующиеся при взаимодействии «корпуса» тела с каверной при ненулевом угле атаки [1]. В данной работе произведена оценка устойчивости движения тел различного относительного удлинения. Силы и моменты, действующие на тело, определены в диапазоне скорости 100–1100 м/с. Рассчитывались двумерные уравнения динамики движения при разных начальных углах атаки. Показано, что увеличение относительного удлинения ведёт к увеличению устойчивости движения. Определены характерные амплитуды колебательных движений тела.

Литература

1. Савченко Ю.Н., Семенов В.Н., Путилин С.Н. Нестационарные процессы при суперкавитационном движении тел // Прикладная гидромеханика. 1999. № 1. С. 79-97.

ТЕЧЕНИЕ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ СО СТЕНКАМИ РАЗНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ

В.А. Павловский¹, А.Л. Чистов¹, К.В. Шестов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9

²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Россия, Санкт-Петербург, 190008, ул. Лоцманская, 3
E-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com, a.chistov@spbu.ru, pulick76@yandex.ru

Турбулентные течения в плоских каналах с различной шероховатостью встречаются во многих технических приложениях, начиная от пластинчатых теплообменных аппаратов и заканчивая гидравлическими трактами различных энергетических установок, в том числе и атомных. Однако в современной научной и технической литературе расчеты такого рода течений практически отсутствуют [1, 2].

Для описания установившихся течений несжимаемой вязкой жидкости в плоском канале с различной шероховатостью противоположных стенок в работе использована f - модель турбулентности [3], позволяющая эффективно рассчитывать внутренние течения в каналах и трубах, в том числе и шероховатых [4].

На основе результатов опытов Никурадзе, для задач о течениях в каналах с шероховатыми поверхностями в рамках f - модели сформулированы соответствующие граничные условия, которые в дальнейшем использованы при выполнении расчета установившегося течения вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале со стенками с разной шероховатостью. Приведены результаты расчетов профилей скорости и коэффициентов сопротивления для разных значений чисел Рейнольдса и величин бугорков шероховатости. В поперечном сечении канала поток жидкости разбивается на два слоя различной толщины, омывающих стенки с разной шероховатостью. Точка сшивания решений определяется из условия непрерывности профиля скоростей.

Полученное решение позволяет рассчитывать профили скоростей и гидравлические сопротивления при заданной шероховатости противоположных стенок. Проведено сравнение с результатами расчетов и опытов для течения в плоских каналах с одинаковой шероховатостью стенок [4]. Выполнено сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными для течений в плоских каналах и кольцевых малой кривизны, через которые прокачивается жидкость [5]. Сравнение результатов расчета и эксперимента подтверждает справедливость полученных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-08-00890).

Литература

1. Эртель Г. мл. (ред.) Путеводитель Прандтля по гидроаэродинамике. Москва-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика: Институт компьютерных исследований, 2007. 776 с.
2. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: ХИ, 1961. 831 с.
3. Павловский В. А. Об одной феноменологической альтернативе гипотезе длины пути перемешивания // Модели механики сплошной среды. Сб. Физическая механика. Вып. 7 / Под ред. Б. В. Филиппова. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1998. С. 21-35.
4. Павловский В.А., Чистов А.Л., Шестов К.В. Моделирование течений в трубах с шероховатыми стенками // Морские интеллектуальные технологии // 2016. № 4. С. 109-113
5. Корсун А.С., Куценко А.В., Писаревский М.И., Федосеев В.Н., Балберкина Ю.Н. Гидравлическое сопротивление плоских и кольцевых каналов с различной шероховатостью противоположных стенок // Теплоэнергетика. 2017. № 3. С. 88-91.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ ЛЬДА НА ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ОПОРЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ИЗ ПЛАСТИЧЕСКИ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Г.В. Павилайнен, Д.В. Лачугин

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: G_V_Pavilaynen@mail.ru, daniillachugin@gmail.com*

Результаты исследований прочности стержневых и балочных конструкций из особых конструкционных материалов открывают новые возможности для проектирования и возведения нефтяных буровых платформ на шельфе Охотского моря, других крупных сооружений при обеспечении их высокой надежности в условиях экстремальной эксплуатации. Оптимальные конструктивные решения, увеличение мощности и размеров сооружений, повышение параметров рабочих давлений и внешних воздействий, в том числе и ледовой нагрузки, существенно сказывается на стоимости таких конструкций и их эффективности при использовании в неблагоприятных климатических условиях. Особо остро ставится вопрос о критериях длительной механической работоспособности, прочности и надежности при работе в упруго-пластической стадии нагружения.

Построение предполагаемой математической модели изгиба балок заключается в принятии ряда положений, в том числе гипотезы плоских сечений, одноосности нагружения, схемы идеальной пластичности А.А. Ильюшина. Для задач пластически изотропных вертикальных балок при упруго-пластическом изгибе эти допущения позволяют построить точные решения, удовлетворяющие уравнениям равновесия и совместности деформаций [1]. Некоторые результаты для вертикальных балок получены в [2 - 4]. В случае, когда точных решений построить не удастся, математические задачи теории пластичности и нелинейной упругости можно рассматривать численно с помощью пакета ASNSYS [5].

В предлагаемой работе предложено полное решение задачи упруго-пластического изгиба вертикальной консоли из пластически анизотропного материала и выявлено влияние собственного веса и гидростатического давления на прогиб свободного конца консоли. Рассматривается упруго-пластический изгиб вертикальной балки, защемленной на нижнем конце. На верхнем конце действует постоянная сосредоточенная горизонтальная нагрузка P . Материал консоли обладает различными свойствами при растяжении и сжатии. Расчет проводится до момента образования в консоли пластического шарнира в месте жесткой заделки. Задача может быть рассмотрена и при учете придонного или поверхностного течения.

Результаты расчетов выявляют существенное влияние пластической анизотропии на значение изгибающей нагрузки, при котором происходит появление пластичности, а также существенную асимметрию развития пластических областей. Влияние веса и гидростатического давления незначительно.

Литература

1. *Pavilaynen G.V.* Elasto-Plastic Deformations of Ribbed Plates // CRM Proceedings and Lecture Notes. Providence, R.I.: Amer. Math. Soc., 1993. P. 227-233.
2. *Павилайнен Г.В.* К вопросу упруго-пластического деформирования конструкций // Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. 1. 1992. Вып. 1. С. 70-75.
3. *Лачугин Д.В.* Упруго-пластический изгиб разнопрочной вертикальной консоли под действием сосредоточенной нагрузки на свободном конце // Российско-китайский научный журнал «Содружество» раздел Физико-математические науки. 2016. № 2(2). С. 32-35.
4. *Павилайнен Г.В., Бембеева А.И., Канин М.С.* Упруго-пластический изгиб разнопрочных балок // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1. 2014. Т. 1. № 2. С. 284-291.
5. *Pavilaynen G.V., Naumova N.V.* Elastic-plastic deformations of SD-beams // In Proceedings of VII Polyachov's Reading, Book of Abstracts I, Saint-Petersburg. 2015. P. 239.

О СВЯЗИ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТЕЙ В УНИВЕРСАЛЬНЫХ КООРДИНАТАХ С КРИВЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ПРОЯВЛЕНИИ ЭФФЕКТА ТОМСА

В.А. Павловский

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com*

Для турбулентного течения несжимаемой жидкости в трубе профиль скоростей в универсальных координатах имеет четыре четко выраженных области течения – зону вязкого подслоя, буферную зону, логарифмический участок и область внешнего течения. По данному профилю можно построить кривую течения в логарифмических координатах «число Рейнольдса – коэффициент сопротивления», что и было выполнено Л. Прандтлем, получившим логарифмический закон сопротивления [1], решающее влияние на который оказывает логарифмический участок профиля скоростей.

При течении слабоконцентрированных водных растворов полимеров, проявляющих в турбулентном режиме эффект снижения сопротивления – эффект Томса – имеются экспериментальные данные как в части профилей скоростей, так и в части кривых сопротивления [2, 3]. Однако вопрос о связи между ними в современной литературе практически не обсуждается, как следствие, нет работ по построению кривых сопротивления по измеренному профилю скоростей и их сопоставлению с экспериментальными данными. Снижение сопротивления обычно объясняется расширением буферной зоны профиля скоростей и увеличением значения константы в логарифмическом законе сопротивления. Построение же такого профиля не позволяет добиться согласования расчетных и экспериментально наблюдаемых кривых сопротивления.

В работе рассматривается обратная задача – восстановление профиля скоростей по кривым сопротивления. Оказывается, что значительную роль в эффекте Томса играет зона внешнего течения, которая, по сравнению с течением обычной ньютоновской жидкостью, увеличивается. Именно она дает подобие кривых сопротивления при больших турбулентных числах Рейнольдса и при ламинарном режиме течения.

Литература

1. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
2. *Иванюта Ю.Ф., Чекалова Л.А.* Исследование профиля скоростей турбулентных течений слабых водных растворов полимеров в трубе // Инженерно-физический журнал. 1974. Т. 26. № 5. С. 799-806.
3. *Орлов О.П.* Физическая природа явления уменьшения сопротивления трения в слабых водных растворах полимеров // Труды Крыловского государственного науч. центра. Выпуск 92. 2016. С. 59-91.

URANS И LES РАСЧЕТЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ И ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ В КАНАЛЕ С РЕЗКИМ ПОВОРОТОМ НА 180°

Д.О. Панов, В.В. Рис, Е.М. Смирнов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, 29
E-mail: smirnov_em@spbstu.ru

Канал прямоугольного сечения с резким поворотом на 180° (U-образный канал) - это одна из геометрических форм, типичных для проточных частей внутренних систем конвективного охлаждения лопаток газовых турбин и аналогичных устройств. В экспериментальной работе [1] методом лазерной анемометрии детально изучалась структура турбулентного течения, развивающегося при $Re = 10^5$ в U-образном канале квадратного сечения (отношение среднего радиуса поворота к стороне сечения составляло 0,65). Данное течение характеризуется наличием интенсивных вторичных (поперечных) течений и развитой зоной отрыва в области за поворотом. Попытки воспроизвести картину течения посредством численного решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), как правило, оказывались несостоятельными. Успешные единичные расчеты связаны с использованием замыкающих RANS-моделей турбулентности повышенной степени сложности (см., например, работы [2, 3]). В связи с этим представляется важным накопление опыта в получении решений по методу моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES). В [4] представлены результаты LES-расчетов, проведенных для условий экспериментов [1]; по причине весьма высокого значения числа Рейнольдса метод LES применялся в сочетании с методом пристенных функций. Авторам [4] удалось получить расчетные поля средней скорости и напряжений Рейнольдса, находящиеся в хорошем согласии с опытными данными, однако вопрос о сеточной чувствительности решения оставался открытым.

В докладе представляются результаты численного моделирования течения в U-образном канале той же геометрии, что и в работах [1-4], но при уменьшенных значениях числа Рейнольдса: $Re = 2 \cdot 10^4$, $4 \cdot 10^4$ и $6 \cdot 10^4$. Расчеты выполнены на основе двух подходов к моделированию турбулентных течений: в первом случае решались нестационарные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (URANS-подход) при их замыкании по SST модели турбулентности Ментера с введенной поправкой на кривизну линий тока. Во втором случае использовался LES-подход с подсеточной моделью турбулентности, известной как WALE (Wall-Adapting Local Eddy-viscosity) [5] и не предполагающей использования пристенных функций. Расчеты при $Re = 2,1 \cdot 10^4$ были выполнены на трех последовательно измельчаемых сетках, включающих 4,4; 9,4 и 19 миллионов, соответственно. Показана близость решений на второй и третьей сетках. Для расчетов при $Re = 4 \cdot 10^4$ и $6 \cdot 10^4$ использовались, соответственно, сетки с 27-ю и 48-ю миллионами ячеек, удовлетворяющие известным требованиям к размерам сеточных элементов для разрешения вихрей в пристенном слое.

Проведен сопоставительный анализ осредненных картин течения и потерь давления в канале, предсказываемых по двум расчетным подходам. Установлено, в частности, что URANS-распределение скорости более неоднородно на выходе из поворота, чем в LES-решении, но при этом быстрее выравнивается вниз по потоку. Изменения формы отрывной зоны вниз по потоку также различны в решениях по двум подходам: согласно URANS-решению, сразу за поворотом поперечное течение имеет сильно выраженную четырехвихревую структуру, которая сохраняется на несколько калибров вниз по потоку. В осредненном LES-решении трехмерная картина течения проще: четырехвихревая структура наблюдается только в небольшой области за поворотом. Поле осредненной продольной компоненты скорости, рассчитанное по методу LES при $Re = 6 \cdot 10^4$, хорошо согласуется с данными измерений [1]. Установлено также, что URANS/SST-расчеты дают на 20% меньшие потери давления в рассматриваемом канале, чем LES/WALE-расчеты, в то время как последние приводят к результатам, практически совпадающим с имеющимися данными измерений.

Литература

1. Cheah S.C., Iacovides H., Jackson D.C., Ji H., Launder B.E. LDA investigation of the flow development through rotating U-ducts // Journal of Turbomachinery. 1996. Vol. 118. N 3. P. 590-596.
2. Nikas K.-S. P., Iacovides H. The computation of flow and heat transfer through square-ended U-bends, using low-Reynolds-number models // Int. J. Num. Methods for Heat and Fluid Flow. 2004. Vol. 14. N 3. P. 305-324.
3. Suga, K. Predicting turbulence and heat transfer in 3-D curved ducts by near-wall second moment closures // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46. P. 161-1736.
4. Guleren K.M., Turan A. Validation of large-eddy simulation of strongly curved stationary and rotating U-duct flows // Int. J. Heat and Fluid Flow. 2007. Vol. 28. P. 909-921.
5. Nicoud, F. and F. Ducros (1999). Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor // Flow, Turbul. Combust. 1992. Vol. 62. N 3. P. 183-200.

ТРАЕКТОРНЫЕ РАСЧЕТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ ВЫБОРЕ МОДЕЛЕЙ ДИССОЦИИИ В УСЛОВИЯХ ТЕРМИЧЕСКОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ

М.Ю. Погосбекян, А.Л. Сергиевская

Институт механики МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, Москва, 119192, Мичуринский пр., 1
E-mail: pogosbekian@imec.msu.ru, sergievska@imec.msu.ru

Для корректного описания физико-химических процессов в условиях термической неравновесности используются различные теоретические модели (модель Мерроуна-Тринора, Кузнецова, Мачерета-Фридмана, Парка и т.д.), которые учитывают зависимость константы скорости химической реакции как от поступательной, так и от колебательной температур. Однако, многие модели используют эмпирические параметры, при этом авторские рекомендации по их выбору часто имеют ограниченный характер, связанный с конкретной авторской задачей как по моделируемым процессам, так и по характеристикам среды, в которой происходят исследуемые процессы.

В течении последних лет была разработана методика сравнительного исследования моделей физико-химических процессов, позволяющая верифицировать эти модели и определять рекомендуемые параметры, используемые в них. Методика основана не только на всестороннем анализе авторских моделей и перекрестном сравнении моделей, но, что крайне важно, сравнении моделей с результатами траекторных расчётов и имеющимися современными экспериментальными данными.

Моделирование динамики молекулярных реакций проводилось с помощью вычислительного комплекса "MD Trajectory" [1]. В расчетах использовались поверхности потенциальной энергии, полученные методами квантовой механики. Вычислительные эксперименты по сравнительному моделированию и верификации проводились в среде Интернет-Каталога моделей физико-химических процессов [2]. Каталог - коллекция описаний моделей процессов на разных уровнях приближения, содержащая и базу соответствующих вычислительных модулей, и базу данных, включающую все необходимые данные по молекулам, участвующим в процессах, парам молекул и равновесным характеристикам самих процессов.

В докладе будут представлены результаты сравнительного анализа моделей, траекторных расчетов и экспериментальных данных для процессов диссоциации молекул O_2 и N_2 в условиях сильной неравновесности.

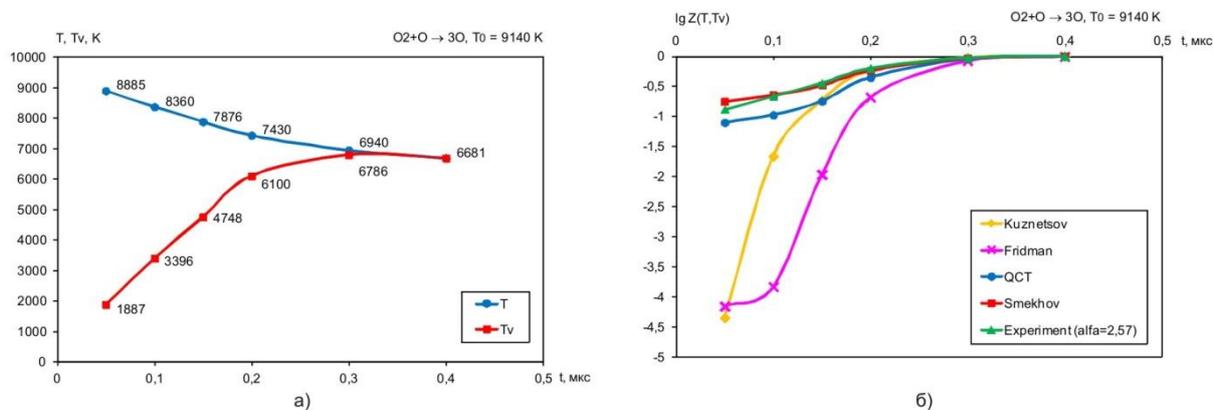


Рис. 1. а) Профиль поступательной T и колебательной Tv температур, измеренных в эксперименте для начальных условий за фронтом ударной волны $P_1=1$ Тор, $V=4.13$ км/с, $T_0=9140$ К; б) Фактор неравновесности для процесса диссоциации $O_2 + O \rightarrow 3O$ для температур T и Tv реализуемых в эксперименте.

Работа выполнена с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова [3].

Литература

1. Погосбекян М. Ю., Лосев С. А. Исследование реакции $CO+N \rightarrow CN+O$ методом квазиклассических траекторий с использованием вычислительного комплекса "MD TRAJECTORY" // Химическая физика. 2003. Т. 22. № 6. С. 38-46.
2. Ковач Э. А., Лосев С. А., Сергиевская А. Л., Храпак Н.А. Каталог моделей физико-химических процессов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 10.
3. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин В.В. Практика суперкомпьютера "Ломоносов" // Открытые системы. М.: Издательский дом "Открытые системы", 2012.

ВЫСОКОПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СВЕРХЗВУКОВОЙ АЭРОДИНАМИКЕ

Т.В. Поплавская, С.В. Кириловский, С.Г. Миронов, И.С. Цырюльников

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Россия, Новосибирск, 630090, ул. Институтская, 4/1,
Новосибирский государственный университет, Россия, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2
E-mail: popla@itam.nsc.ru, kirilov@itam.nsc.ru, mironov@itam.nsc.ru, tsyvan@itam.nsc.ru

В последнее время газопроницаемые пористые материалы нашли применение для управления аэродинамикой летательных аппаратов. Работы в этой области ведутся в двух основных направлениях:

– использование пористых материалов для подавления возмущений среднего течения, а именно акустических возмущений, в гиперзвуковом пограничном слое для продления ламинарного режима течения;
– управление характеристиками среднего течения при обтекании тел с газопроницаемыми пористыми вставками с целью снижения волнового сопротивления или создания боковых сил для маневрирования летательных аппаратов.

В рамках первого направления в работе представлено моделирование поглощения акустических возмущений при гиперзвуковом обтекании пластины с пористой вставкой с учетом реальных свойств газа. Численное моделирование сверхзвукового обтекания пластины колебательно-возбужденной смесью газов ориентировалось на экспериментальные исследования по измерению характеристик среднего течения и пульсаций давления на поверхности пластины в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН [1]. Экспериментальные измерения пульсаций давления проведены для пластины с пористой вставкой из высокопористого ячеистого материала (ВПЯМ) - вспененного никеля - с коэффициентом пористости 95%. В численном моделировании геометрия звукопоглощающего покрытия включается в расчетную область (Рис.1) в виде набора двумерных элементов квадратного сечения, расположенных в шахматном порядке (дискретная модель, базирующаяся на реальном скелете ВПЯМ). Численное моделирование проводилось с помощью пакета ANSYS Fluent на базе решения двумерных нестационарных уравнений Навье-Стокса, дополненных уравнениями сохранения колебательной энергии каждой колебательной степени свободы молекул углекислого газа и встраиваемыми в пакет модулями для реализации двухтемпературной модели колебательной релаксации углекислого газа. Показано, что покрытия из ВПЯМ эффективно работают для подавления пульсаций давления при обтекании тел колебательно возбужденными газами.

В рамках второго направления выполнено моделирование сверхзвукового осесимметричного обтекания продольного потока цилиндра с передней вставкой из ВПЯМ. Сила сопротивления модели потоку измерялась трехкомпонентными тензовесами в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-327В ИТПМ СО РАН при числе Маха $M_\infty = 4.85$ [2]. В численном моделировании также использовалась предложенная выше дискретная модель пористой среды в виде квадратных элементов, расположенных в шахматном порядке друг за другом, но уже закрученных вокруг продольной оси модели (Рис. 2). Получено существенное (до 40%) снижение аэродинамического сопротивления цилиндра.

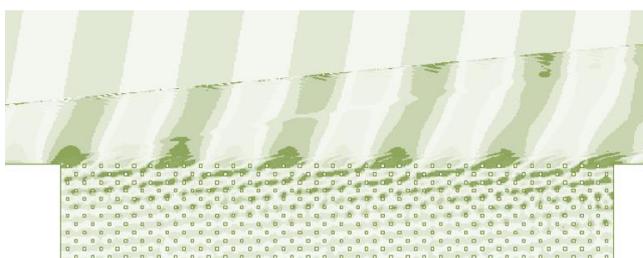


Рис. 1. Поле мгновенных пульсаций давления $f=160\text{кГц}$ (фрагмент вблизи звукопоглощающей пористой вставки) на пластине, обтекаемой колебательно-возбужденной смесью газов CO_2 и воздуха.

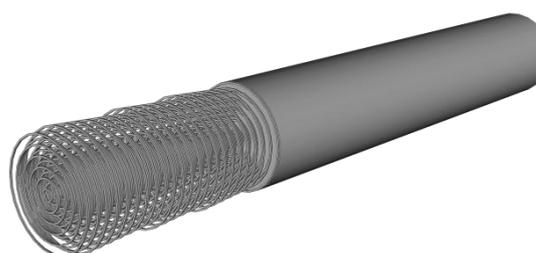


Рис. 2. 3D-изображение расчетной модели цилиндра с передней пористой вставкой, обтекаемой сверхзвуковым потоком воздуха.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 015-08-03867).

Литература

1. Tsyryulnikov I.S., Maslov A.A., Mironov S.G. et al. The efficiency of the method of sound-absorbing coatings in vibrationally excited hypersonic flow // Tech. Phys. Lett. 2015. Vol. 41. Issue 2. P. 184-186.
2. Fomin V.M., Mironov S.G., Serdyuk K.M. Reducing the wave drag of bodies in supersonic flows using porous materials // Tech. Phys. Lett. 2009. Vol. 3. Issue 3. P. 117-119.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ДАТЧИКАМИ НА АНИЗОТРОПНЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТАХ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

П.А. Попов, Б.И. Резников, В.А. Сахаров

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Россия, Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, 26
E-mail: pavel.popov@yahoo.com

В экспериментальной газовой динамике основными инструментами измерения тепловых потоков к поверхности исследуемого тела, являются коаксиальные термопары и тонкопленочные датчики сопротивления [1]. В последнее время, в теплофизическом эксперименте стал применяться новый тип тепловых датчиков с чувствительным элементом на основе анизотропных термоэлементов [2]. Они обладают высокой механической прочностью, что позволяет проводить исследования теплообмена при обтекании тела высокосубзвуковым потоком. Высокая чувствительность и быстродействие позволяет исследовать быстропротекающие процессы, такие как взаимодействие ударных волн с твердыми стенками, устойчивость пристеночных сверхзвуковых течений и т.д. Накопленный авторами опыт показал применимость датчиков данного типа для исследования различных процессов в экспериментах на ударных трубах, в том числе, в присутствии сильных магнитных полей [3, 4].

Применение датчиков данного типа при исследовании быстропротекающих процессов обладает рядом особенностей. В данном случае, невозможно применять метод стационарной калибровки для обработки сигнала датчика, т.к. он приводит к качественно неверным результатам. Авторами предложена методика обработки результатов измерений, позволяющая определить величину нестационарного теплового потока по электрическому сигналу датчика. Также, реализована численная модель датчика, учитывающая анизотропию всех кинетических коэффициентов, а также основных термоэлектрических процессов, протекающих в чувствительном элементе. Проведено исследование влияния геометрических размеров термоэлементов и подложки на применимость методики и точность определения теплового потока. Сформулированы рекомендации по применению датчиков на основе анизотропных термоэлементов в практике газодинамического эксперимента.

Литература

1. Hollis, Brian R., Dinesh K. Prabhu, and Matthew G. MacLean. Blunt-Body Heating and Pressure Database from High-Enthalpy, CO₂ Testing in an Expansion Tunnel // AIAA Paper No. 2016-4141. 2016.
2. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Градиентные датчики на основе висмута в теплофизическом эксперименте // Теплофизика высоких температур. 2004. Т. 42. № 4. С. 626-634.
3. Бобашев С.В., Менде Н.П., Попов П.А., Сахаров В.А. Экспериментальное исследование магнитогидродинамического воздействия на тепловой поток к поверхности модели // Журнал Технической Физики. 2010. Т. 80. № 12. С. 51-56.
4. Bobashev S.V. et al. Supersonic Flow about Wedge: MHD Impact on Flow Structure and Heat Flux // AIAA Paper No. 2008-1094. 2008.

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТОВ САМОДИФФУЗИИ И ТЕРМОДИФФУЗИИ НА ФРОНТ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Э.В. Прозорова

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: e.prozorova@spbu.ru*

Целью предлагаемой работы является уточнение математической модели описания механики сплошной среды и ее практическое применение на примере влияния самодиффузии для фронта ударной волны при числе Маха равном единице. Уточняются определения температуры, энергии, давления и их влияние на измерения в экспериментах для смеси газов. Работа, связанная с формулировкой законов сохранения как условий равновесия моментов сил, а также действием дополнительных потоков на сторонах элементарного объема, была выполнена ранее. После уточнения был получен несимметричный тензор напряжений. Предлагался метод расчета этого тензора. Уравнения для газа были найдены из модифицированного уравнения Больцмана и из феноменологической теории. Для твердого тела использовались уравнения феноменологической теории, но изменялась их трактовка. На наш взгляд неточность, приводящая к симметрии тензора напряжений, возникает при расчете функции Лагранжа частиц как суммы попарно взаимодействующих частиц и неизменности положения центра инерции системы. Положение оси инерции при равновесных условиях и при неравновесных условиях различно, что и обуславливает наличие коллективных эффектов.

В результате в систему уравнений сплошной среды добавлялись слагаемые с третьей производной в уравнении движения и второй производной в уравнении неразрывности. Повышение порядка уравнений потребовало введения дополнительных граничных условий. Были рассмотрены простейшие примеры, иллюстрирующие вклад новых слагаемых в задачах пограничного слоя, кинетической теории и теории упругости.

Был разрешен парадокс Д. Гильберта при решении уравнения Больцмана методом Чепмена-Энскога. Здесь выясняется вклад перекрестных эффектов в законы сохранения механики сплошной среды, в том числе самодиффузии, термодиффузии и др., наблюдаемые в экспериментах. На их существование из феноменологических соображений указывал С.В. Валландер. Предлагается вывод этих законов из кинетической теории и обсуждается роль процессов самодиффузии и термодиффузии на структуру ударной волны при числе Маха равном единице.

ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЕ НЕНЬЮТОНОВСКОЕ ТЕЧЕНИЕ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

Ст. Радев¹, С. Табакова^{1,2}, Н. Кутев³

¹Институт механики Болгарской академии наук (БАН), Болгария, София, 1113, акад. Г. Бончев, 4

²Пловдивский филиал Технического университета Софии

³Институт математики и информатики БАН, София 1113, акад. Г. Бончев, 8

E-mail: stradev@imbm.bas.bg; stabakova@gmail.com; kutev@math.bas.bg

В настоящем докладе получено полное численное и приближенное аналитическое решение для осциллирующего течения неньютоновской жидкости в плоском канале. Применяется вязкая модель Каро (Carreau) [1], которая часто используется для описания течения крови.

Численное решение получено при помощи классической конечно-разностной схемы Кранка-Никольсона. Для сравнения по методу малого параметра получено приближенное решение как возмущение известного аналитического решения Womersley [2] в случае ньютоновской жидкости. Первое приближение содержит фундаментальную и третью гармонику.

Приведены строгие оценки невязки приближенного решения [3].

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность Национальному научному фонду Министерства образования и науки Болгарии за финансовую помощь в рамках следующих грантов: DFNI-I02/9 и DFNI-I02/3.

Литература

1. *Boyd J., Buick J. M. and Green S.* Analysis of the Casson and Carreau-Yasuda non-Newtonian blood models in steady and oscillatory flows using the lattice Boltzmann method // *Physics of Fluids*. 2007. Vol. 19. P. 093103.
2. *Womersley J. R.*, Method for the calculation of velocity, rate of flow and viscosity drag in arteries when the pressure gradient is known // *The Journal of Physiology*. 1955. Vol. 127. P. 553-563.
3. *Kutev N., Tabakova S., and Radev St.* Velocity and shear rate estimates of some non-Newtonian oscillatory flows in tubes // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1773. P. 080002.

ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ ПРИ ГАЗОФАЗНОМ ОСАЖДЕНИИ УГЛЕРОДНЫХ СТРУКТУР

А.К. Ребров

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Россия, Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 1
Email: rebrov@itp.nsc.ru*

В Институте теплофизики им. С.С.Кутателадзе в течение нескольких лет развивается новый метод газофазного осаждения алмазных структур, основанный на активации газовых смесей на протяженных поверхностях. Метод изначально родился, благодаря исследованиям осаждения полимерных плёнок [1]. Его отличительной чертой, определяющей основные преимущества, является широкий диапазон режимов по удельным потокам газов, диапазону давлений и температур. К настоящему времени получены результаты осаждения поликристаллических плёнок алмаза из потока активированной смеси водорода с метаном при скорости осаждения до 20мк/час [2].

При всех успехах газофазного синтеза алмаза (chemical vapor deposition) в мировой литературе нет устоявшихся представлений о каналах формирования алмазных структур из газовой фазы. Набор фрагментов, определяющих этот процесс, отличается для разных методов активации. Сведения об элементарных процессах взаимодействия молекул водорода, углеводородов и их фрагментов с поверхностями активации и поверхностями синтеза в литературе имеются, но весьма ограничены.

Новые задачи исследований относятся не только к проблеме синтеза углеродных структур; важным является решение проблемы описания неравновесных процессов при течении газов в каналах с гетерогенными химическими реакциями. Это определило постановку данной работы. Данные об элементарных процессах взаимодействия атомов и молекул с поверхностями взяты из литературы [3]. Теоретические исследования проводились по пути создания методов расчета течений в цилиндрических каналах в диапазоне течений от свободно - молекулярного до сплошного, а также в пространстве между источником активированного газа и поверхностью осаждения. Прямое статистическое моделирование [4] позволило изучить неравновесные процессы энергообмена в цилиндрическом канале и области между источником и поверхностью осаждения. Важным следствием явились новые данные о гетерогенных процессах в канале при низком давлении и роли физико-химических реакций во всей проточной части.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-19-00061.

Литература

1. *Rebrov A.K., Shishkin A.V., Timoshenko N.I.* Free C₂F₄ Jet Deposition of Thin PTFE-like Films // Plasma Process. Polym. 2005. Vol. 2. N 6. P. 464.
2. *Емельянов А.А., Ребров А.К., Юдин И.Б.* Осаждение алмазных структур из взаимодействующих газовых струй // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 12. С. 56.
3. *Ребров А.К.* Возможности газофазного синтеза алмазных структур из смесей водорода и углеводородов // Успехи физических наук. 2017. Т. 60. № 2.
4. *Ребров А.К., Юдин И.Б.* // Доклады Академии Наук, Механика. 2016. Т. 468. № 1. С. 33.

ЛАЗЕРНАЯ ТЯГА ДЛЯ ПОЛЕТОВ В АТМОСФЕРЕ

Ю.А. Резунков¹, А.А. Шмидт²

¹ОАО «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения»,
Россия, Сосновый Бор, 188540, ул. Ленинградская, 29, литер Т

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Россия, Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, 26

E-mail: alexander.schmidt@mail.ioffe.ru

В работе обсуждается возможность использования мощных лазеров наземного, воздушного и космического базирования для создания тяги при сверхзвуковых полетах в атмосфере. Для анализа выполнимости полетов атмосферных лазерных двигателей было проведено численное моделирование течения, создаваемого взаимодействием лазерного луча и / или абляционной струи с набегающим сверхзвуковым потоком, поступающим в лазерный двигатель.

Численное моделирование работы одной из возможных схем лазерного реактивного двигателя основано на простых моделях рабочих сред (набегающего потока и абляционной струи). При этом основное внимание уделено формированию ударно-волновой структуры течения в лазерном реактивном двигателе и влиянию на эту структуру параметров набегающего потока и абляционной струи (мощности лазерного излучения).

При проведении расчетов использована открытая вычислительная среда OpenFOAM, что обеспечивает эффективный и гибкий инструмент исследований. Получена информация о структуре потока в лазерном реактивном двигателе. Показано, что на формирование тяги влияет не только выделяемая в потоке энергия излучения, но и изменение структуры потока в результате энерговыделения. Продемонстрирована немонотонная зависимость тяги от мощности излучения.

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОРИСТЫМ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ МОДЕЛИ В ПОТОКЕ СМЕСИ КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВОЗБУЖДЕННЫХ ГАЗОВ

А.И. Решетова, Т.В. Поплавская, С.В. Кириловский, И.С. Цырюльников

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Россия, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Россия, Новосибирск, 630090, ул. Институтская, 4/1
E-mail: annareshetova29@gmail.com, popla@itam.nsc.ru, kirilov@itam.nsc.ru

Возможность управления переходом к турбулентности является одним из самых важных условий разработки перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов. Метод звукопоглощающих покрытий поверхности, основанный на поглощении акустических возмущений, показал свою эффективность для низкотемпературных гиперзвуковых потоков. В условиях реального полета, где наблюдаются большие скорости и температуры, эффекты реального газа, связанные с возбуждением колебательных степеней свободы молекул и неравновесностью течения, могут существенно повлиять на генерацию и развитие возмущений в пограничном слое, и как следствие на переход к турбулентности. Цель данной работы – исследовать эффективность метода звукопоглощающих покрытий в колебательно возбужденных гиперзвуковых потоках смесей газов. В работе проведено численное исследование влияния звукопоглощающих покрытий на интенсивность пульсаций давления на поверхности пластины ($L = 0,4\text{ м}$), обтекаемой гиперзвуковым колебательно-возбужденным потоком ($M_\infty=8,44$, $Re_l=1,36 \times 10^6$, $P_\infty=374,5\text{ Па}$, $T_0=2430\text{ К}$, $T_\infty=215\text{ К}$) смеси углекислого газа и азота при условиях экспериментов, проводимых в импульсной аэродинамической трубе ИТ 302М ИТПМ СОРАН.

Численное моделирование выполнено на базе решения двумерных нестационарных уравнений Навье–Стокса в рамках модели термически совершенного газа. Для учета влияния колебательной релаксации молекул CO_2 к уравнениям Навье–Стокса добавлены уравнения сохранения колебательной энергии для каждой колебательной степени свободы молекул. Учёт энергообмена между колебательными и поступательно-вращательными степенями свободы молекул CO_2 с конечным временем релаксации производился добавлением в уравнения сохранения колебательной энергии источниковых членов, рассчитываемых по уравнению Ландау–Теллера. Акустические возмущения моделировались заданием суперпозиции стационарного течения и плоских монохроматических акустических волн. В экспериментах использовалась модель пластины с пористой звукопоглощающей вставкой из вспененного никеля с коэффициентом пористости 0,95. В настоящей работе звукопоглощающий участок поверхности описывается в рамках дискретной модели пористой среды, моделирующей реальный скелет вспененного никеля. Геометрия звукопоглощающего покрытия включается в расчетную область в виде квадратных элементов, расположенных в шахматном порядке.

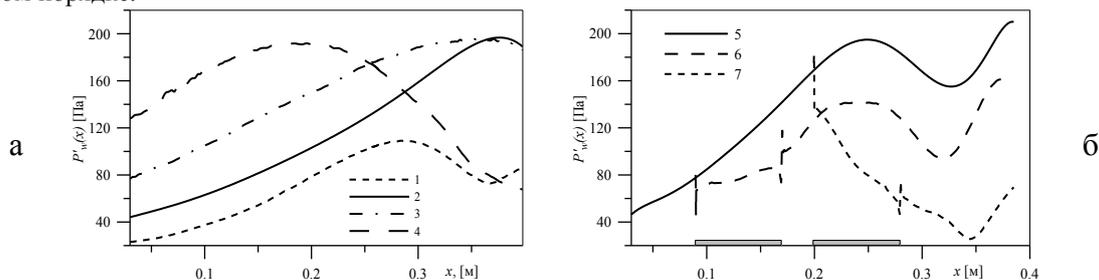


Рис. 1. Среднеквадратичные пульсации давления на поверхности пластины: (а) – $\alpha=5, 10, 15, 20^\circ$ (1-4), сплошная пластина, $f = 120$ кГц; (б) – $\alpha=10, 2^\circ$, сплошная пластина (5), пластина со звукопоглощающим покрытием на расстоянии 90мм (6) и 200мм (7) от носика пластины, $f = 160$ кГц

Получены расчетные данные по динамике развития возмущений на пластине, обтекаемой гиперзвуковым потоком колебательно возбужденной смеси CO_2 и N_2 при разных углах атаки $\alpha = 5 \div 20^\circ$ (рис. 1а) и разных местоположениях пористого покрытия. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными по интенсивности пульсаций давления на поверхности пластины. Показано (рис. 1б), что звукопоглощающие пористые покрытия, независимо от их местоположения на поверхности, подавляют пульсации давления при обтекании тел колебательно-возбужденными газами (уменьшают амплитуду пульсаций давления как над областью покрытия, так и за ним).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00674.

КОНСЕРВАТИВНЫЙ ПРОЕКЦИОННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА ДЛЯ НЕРАВНОМЕРНЫХ СЕТОК

О.А. Рогозин

Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН,
Россия, Москва, 119333, ул. Вавилова, 44, к. 2
E-mail: oleg.rogozin@phystech.edu

Решения краевых задач для уравнения Больцмана как правило содержат резкие перепады в пространстве молекулярных скоростей даже в том случае, когда макроскопические величины изменяются достаточно плавно. В частности, граничное условие диффузного отражения подразумевает разрыв функции распределения в касательной плоскости. Поскольку разрывы распространяются вдоль характеристик, при обтекании выпуклых тел они распространяются внутрь области, занимаемой газом. Но и для невыпуклых тел, несмотря на гладкость решения, образованный резкий перепад функции распределения затухает экспоненциально в слое Кнудсена. Его толщина мала только для слаборазреженных течений, т.е. при малых числах Кнудсена. Таким образом, для достижения высокой точности численного анализа значительного круга задач динамики разреженного газа необходимы весьма искусные численные методы.

Широко распространённый метод статистического моделирования (DSMC) обладает высокой универсальностью и во многих приложениях позволяет достичь инженерной точности, однако в некоторых случаях тонкие эффекты остаются за гранью стохастического шума. Кроме того, малые числа Кнудсена, области медленных течений, а также задачи с широким диапазоном плотности представляют известные трудности для метода DSMC.

Метод дискретных скоростей подразумевает фиксированную сетку для всего физического пространства. Использование слишком подробной сетки чревато неоправданно высокими вычислительными затратами, в особенности оперативной памяти. В некоторых случаях удаётся построить неравномерную сетку, хорошо аппроксимирующую значительные перепады функции распределения, тогда высокая точность может быть достигнута недорогой ценой.

В качестве основного численного метода используется проекционно-интерполяционный метод дискретных скоростей, предложенный Ф.Г. Черемисиным [1, 2]. Его отличительные особенности:

- полная консервативность (по массе, импульсу и кинетической энергии),
- точное выполнение H-теоремы Больцмана (интеграл столкновений обнуляется для дискретного максвелловского распределения),
- сохранение положительности решения.

Практика показывает, что численный метод, обладающий всеми этими свойствами, позволяет получить адекватное решение уравнения Больцмана даже на весьма грубых сетках.

Адаптация проекционно-интерполяционного метода для неравномерных сеток требует использования многоточечных шаблонов проецирования [3]. В частности, полная консервативность может быть обеспечена, если шаблон содержит не менее 5 точек, в то время как для равномерной сетки достаточно всего двух. Рассматривается также важный вопрос о достаточном количестве кубатурных точек для вычисления интеграла столкновений.

В качестве численного примера рассматривается течение Куэтта. Полученное численное решение верифицируется как с помощью метода DSMC, так и нелинейного асимптотического решения второго порядка для малых чисел Кнудсена и модели твёрдых сфер [4].

Литература

1. Черемисин Ф.Г. Консервативный метод вычисления интеграла столкновений Больцмана // Доклады РАН. 1997. Т. 357. № 1. С. 1-4.
2. Черемисин Ф.Г. Решение кинетического уравнения Больцмана для высокоскоростных течений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2006. Т. 46. № 2. С. 329-343.
3. Dodulad O.I., Tcheremissine F.G. Multipoint conservative projection method for computing the Boltzmann collision integral for gas mixtures // AIP Conference Proceedings. 2012. Vol. 1501. N 1. P. 302-309.
4. Rogozin O. Numerical analysis of the nonlinear plane Couette-flow problem of a rarefied gas for hard-sphere molecules // European Journal of Mechanics – B/Fluids. 2016. Vol. 60. P. 148-163.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ МЕДЛЕННЫХ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ СЛАБОРАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

О.А. Рогозин

Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН,
Россия, Москва, 119333, ул. Вавилова, 44, к. 2
E-mail: oleg.rogozin@phystech.edu

Рассматриваются медленные (число Рейнольдса порядка единицы) течения слабо Разреженного (малые числа Кнудсена) газа под действием значительных температурных напряжений. Для корректного гидродинамического описания этого класса течений используются уравнения Когана–Галкина–Фридлендера (КГФ) [1], содержащие в уравнении импульса некоторые термострессовые (ненавье–стоксовские) члены. Соответствующие граничные условия определяются с помощью асимптотического анализа кнудсеновского слоя на основе уравнения Больцмана. Изучается вопрос постановки граничных условий вплоть до второго порядка малости по числу Кнудсена. Для численного анализа уравнений КГФ используется solver snitSimpleFoam [2], разработанный в рамках вычислительной платформы OpenFOAM®.

Проведён параметрический анализ некоторых течений: между некоаксиальными цилиндрами и сферами, между эллиптическими цилиндрами. Наряду с возникающим нелинейное термострессовым течением первого порядка по числу Кнудсена, на обтекаемые тела действует сила второго порядка по числу Кнудсена. Рассматривается её зависимость от молекулярного потенциала.

Результаты на основе гидродинамических уравнений КГФ подкрепляются численным решением уравнения Больцмана на основе проекционно-интерполяционного метода дискретных скоростей [3, 4], обобщённого для неравномерных сеток. Показано, что в области, где градиент температуры сравним с обратным числом Кнудсена, асимптотическое решение некорректно описывает поле скоростей, что означает неизбежность кинетического подхода к анализу подобных существенно нелинейных задач. На рис. 1 показано решение уравнения Больцмана для течения между эллиптическими цилиндрами с температурами 1 и 5 (внутренний цилиндр горячий) для модели твёрдых сфер. Область течения с вихрем, направленным по часовой стрелке, не может быть описан с помощью уравнений КГФ.

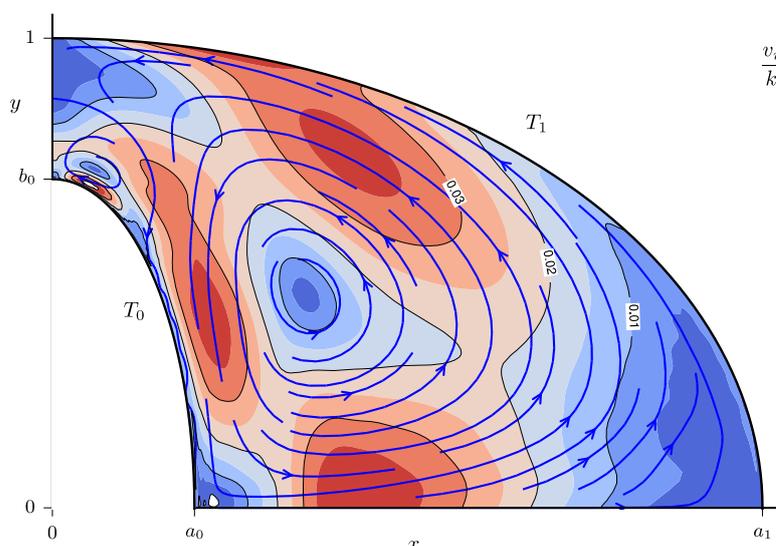


Рис. 1. Поле скоростей при числе Кнудсена 0.02.

Литература

1. Коган, М.Н., Галкин В.С., Фридлендер О.Г. О напряжениях, возникающих в газах вследствие неоднородности температуры и концентраций. Новые типы свободной конвекции // УФН. 1976. Т. 119. № 5. С. 111-125.
2. Rogozin, O.A. Computer simulation of slightly rarefied gas flows driven by significant temperature variations and their continuum limit // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. 2014. Vol. 28. N 6. P. 573-587.
3. Черемисин, Ф.Г. Консервативный метод вычисления интеграла столкновений Больцмана // Доклады РАН. 1997. Т. 357. № 1. С. 1-4.
4. Черемисин Ф.Г. Решение кинетического уравнения Больцмана для высокоскоростных течений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2006. Т. 46. № 2. С. 329-343.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ДОСТИЖЕНИЙ

О.А. Рогозин

Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН,
Россия, Москва, 119333, ул. Вавилова, 44, к. 2
E-mail: oleg.rogozin@phystech.edu

Если связывать дату рождения кинетической теории с фундаментальными трудами Максвелла и Больцмана, то её полувекковая история может служить образцом становления законченного раздела физики. Значительное преобладание численного моделирования над реальным экспериментом служит объективным критерием зрелости физической теории. Нельзя тоже самое сказать про математическую теорию уравнения Больцмана, однако за последние три десятилетия были достигнуты колоссальные успехи. Некоторые из них выходят далеко за грани кинетической теории и отмечены двумя Филдсовскими премиями: П.-Л. Лионс в 1994 г. и С. Виллани в 2010 г. Теория ренормализованных решений ДиПерна–Лионса [1], единственный до сих пор результат существования глобального решения в L^1 , нашла применение для общей нелинейной теории параболических уравнений. Схема доказательства почти экспоненциальной сходимости решения к равновесию [2] применима к широкому классу диссипативно-консервативных уравнений.

Весомый вклад в развитие математической теории внесли советские математики. А.Я. Повзнер существенно развил классические результаты Карлемана для пространственно однородной задачи [3]. С помощью Фурье-преобразования А.В. Бобылев в серии работ заложил основы математической теории для максвелловского газа [4]. Строгие результаты были получены и для сходимости численных методов. В частности, сходимость метода DSMC была строго показана на основе идей А.В. Скорохода [5] и С.Н. Смирнова [6]. Наконец, несколько важных результатов о существовании и единственности решений были получены Н.Б. Масловой [7].

В настоящий обзор включены современные достижения о существовании и единственности решений, сходимости к равновесию, распространению гладкости и моментов функции распределения в зависимости от начальных условий и ядра столкновительного оператора. Затрагивается также многообразие гидродинамических пределов уравнения Больцмана. Обсуждаются преимущественно математические результаты, имеющие выраженный физический смысл или значение.

Литература

1. DiPerna R.J., Lions P.-L. Ordinary differential equations, transport theory and Sobolev spaces // *Inventiones mathematicae*. 1989. Vol. 98. N 3. P. 511-547.
2. Desvillettes L., Villani C. On the trend to global equilibrium for spatially inhomogeneous kinetic systems: the Boltzmann equation // *Inventiones mathematicae*. 2005. Vol. 159. N 2. P. 245-316.
3. Повзнер А.Я. Об уравнении Больцмана кинетической теории газов // Математический сборник. 1962. Т. 58. № 1. С. 65-86.
4. Бобылев А.В. Точные решения нелинейного уравнения Больцмана и теория релаксации максвелловского газа // Теоретическая и математическая физика. 1984. Т. 60. № 2. С. 280-310.
5. Скороход А.В. Стохастические уравнения для сложных систем. М: Наука, 1983. 192 с.
6. Смирнов С.Н. К обоснованию одного стохастического метода решения уравнения Больцмана // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1989. Т. 29. № 2. С. 270-276.
7. Maslova N.B. Nonlinear evolution equations: kinetic approach. Singapore: World Scientific, 1993. 193 p.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОГО ГАЗА С КРУПНОМАСШТАБНОЙ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРОЙ В РЕШЕТКАХ

Д.А. Романюк, Ю.М. Циркунов

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-я Красноармейская, 1
E-mail: romanyuk-da@rambler.ru, tsrknv@bstu.spb.su

При полете самолетов и вертолетов в запыленной атмосфере всегда возникает опасность эрозионного воздействия твердых частиц на элементы двигателя, в частности, на лопасти винта, лопатки входной ступени компрессора, лопатки турбины и т.п., что может привести к повышенному износу двигателя, нарушению режима его работы и аварийной ситуации. Как показали специальные исследования [1], в результате абразивного воздействия частиц ресурс газотурбинного авиадвигателя может уменьшиться в несколько раз. Для оценки рисков выхода авиадвигателя из строя из-за наличия пыли в потоке воздуха необходимо иметь инструмент для моделирования двухфазных течений газа с твердыми частицами в различных элементах тракта двигателя, позволяющий предсказывать поведение примеси и локализацию областей, воздействие на которые высокоскоростного потока частиц особенно велико.

В настоящей работе численно исследуется и анализируется динамическое поведение твердых частиц в системе из двух решеток (ротора и статора), которые в определенном смысле моделируют входную ступень компрессора турбореактивного двигателя.

Нестационарное течение несущего газа моделируется как с учетом воздействия дисперсной примеси, так и без учета. Реализованы три различных подхода, основанные на уравнениях Эйлера, Навье–Стокса и Рейнольдса. Последние замыкались с помощью $k-\omega$ SST модели турбулентности Ментера. Расчетная область состояла из двух блоков – подвижного (около роторной лопатки) и неподвижного (около статорной лопатки). В каждом блоке были построены сетки, согласованные с контурами профилей лопаток. В алгоритме решения исходных уравнений использовались метод конечного объема и схема расщепления по физическим процессам. Для вычисления «вязких» потоков консервативных переменных применялась схема Роу. Использовалась TVD схема второго порядка аппроксимации по пространству. «Вязкие» потоки вычислялись с помощью центрально-разностной схемы. Решения на границе движущегося и неподвижного блоков согласовывались с использованием специально разработанной процедуры. Общее количество ячеек в обоих блоках составляло 250 тысяч. Результаты расчетов показали, что лучше всего крупновихревую структуру нестационарного течения в решетках воспроизводит псевдо-прямое моделирование на основе уравнений Навье–Стокса.

Дисперсная примесь рассматривалась как без учета столкновений между частицами, так и с учетом. В первом случае для описания движения частиц использовался траекторный метод Лагранжа, во втором – метод Монте-Карло, развитый в работе [2]. При моделировании поведения примеси учитывались такие важные эффекты случайной природы, как разброс частиц по размерам в невозмущенном потоке и рассеяние частиц несферической формы при их отскоке от поверхности лопаток. Рассматривались эллипсоиды вращения, прямоугольные призмы и призмы со срезанными вершинами.

Были выполнены систематические расчеты для различных скоростей невозмущенного потока (100 и 200 м/с), размеров частиц (10 ... 40 мкм) и объемных концентраций (10^{-4} ... 10^{-3}). В качестве материала частиц рассматривалась двуокись кремния SiO_2 . Принятые в расчетах исходные данные близки к условиям полета в запыленном воздухе вблизи земной поверхности.

Найдено, что во всех случаях первоначальное пространственно-однородное поле концентрации примеси становится существенно неоднородным при движении частиц через систему решеток. При этом модисперсная примесь образует тонкие слои с очень высокой концентрацией (в несколько раз выше, чем в невозмущенном потоке), которые представляют наиболее серьезную эрозионную опасность для последующих венцов и других элементов тракта турбомшины. Эффекты случайной природы «размазывают» эти слои, уменьшая эрозионную опасность. Сравнительный анализ роли этих эффектов показал доминирующее значение рассеяния частиц из-за несферической формы и полидисперсности примеси. Роль столкновений между частицами оказалась в данном классе течений невелика даже при исходной объемной концентрации примеси $\alpha_\infty=10^{-3}$.

Данное исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-07965).

Литература

1. *Sirs, R.C.* The Operation of Gas Turbine Engines in Hot & Sandy Conditions – Royal Air Force Experiences in the Gulf War // AGARD-CP-558. Paper No. 2. 1994.
2. *Volkov A.N., Tsirkunov Yu.M.* CFD/Monte Carlo simulation of collision-dominated gas-particle flows over bodies // Proc. ASME FEDSM 257(2A). 2002. P. 385-398.

МОЛЕКУЛЯРНОЕ СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

В.Я. Рудяк¹, Е.В. Лежнев^{1,2}

¹*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 630008, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113*

²*Новосибирский технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20
E-mail: valery.rudyak@mail.ru*

Процессы переноса в газах обусловлены сложными процессами передачи по пространству энергии, импульса и массы. Информацию о соответствующих коэффициентах переноса получают главным образом экспериментально, хотя в разреженных газах это удается сделать, используя кинетическую теорию газов. Для плотных газов и жидкостей коэффициенты переноса можно моделировать методом молекулярной динамики. Однако для получения достаточной точности здесь даже в простейших случаях необходимо использовать десятки тысяч частиц молекул, что требует очень большого времени счета. В разреженном газе для моделирования коэффициентов переноса не удается использовать метод молекулярной динамики, а применение кинетической теории также не является тривиальной задачей (требуется реализация достаточно трудоемкой и громоздкой процедуры решения соответствующих интегральных уравнений, вычисление так называемых Ω -интегралы и т.д.).

Процедуру моделирования процессов переноса удалось бы существенно ускорить, если разработать метод, имитирующий динамику молекулярной системы. Тогда, используя достаточно много таких имитированных фазовых траекторий исходной молекулярной системы, можно ожидать получить удовлетворительные данные о средних ее характеристиках, какими и являются коэффициенты переноса. Цель данной работы и состоит в разработке такого имитационного метода, пригодного для моделирования процессов переноса в разреженных и плотных газах.

В основе предлагаемого алгоритма лежит стохастическое моделирование фазовых траекторий рассматриваемых молекулярных систем, моделирующих динамику разреженных или плотных газов. Тестирование алгоритма проводится на примере расчета коэффициентов самодиффузии, вязкости и диффузии благородных газов. В качестве потенциала взаимодействия для разреженных газов использовались потенциалы твердых сфер и Леннард-Джонса, а для плотного газа – потенциал твердых сфер. Показано, что точность 1–2% (именно с такой точностью обычно измеряются коэффициенты переноса) удается достичь, используя порядка трех тысяч молекул, тогда как в методе молекулярной динамики их необходимо, по крайней мере, на порядок больше. В разреженном газе удается в разы снизить число используемых молекул, если исключить так называемые повторные соударения.

Следующим важным фактором, определяющим точность моделирование, является число членов ансамбля, по которому производится усреднение. Это типичный гиббсовский ансамбль, характеризующийся разными начальными фазовыми состояниями молекул при заданных средних значениях макроскопических наблюдаемых. Проведенные тестовые расчеты показали, что точность расчетов, как и следовало ожидать, обратно пропорциональна корню квадратному из числа фазовых траекторий.

При моделировании плотного газа точность существенно зависит от правильного розыгрыша частоты соударений молекул. Использование для этой цели теории Энскога приводит к очень большим ошибкам даже при сравнительно небольших давлениях. С другой стороны, применение феноменологической корреляционной функции Карнахана–Старлинга, делает алгоритм применимым вплоть до давлений около 600 атмосфер.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-00312).

КОНФИГУРАЦИЯ СКАЧКОВ УПЛОТНЕНИЯ В КАНАЛАХ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ

А.Н. Рябинин

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: a.ryabinin@spbu.ru

Недавно было показано, что при изменении числа Маха на входе в канал с центральным телом существуют скачкообразные перестройки скачков уплотнения [1, 2]. Обнаружен гистерезис положения скачков уплотнения по отношению к числу Маха на входе в канал. Внутри диапазона гистерезиса имеется интервал чисел Маха, в котором течение может быть несимметричным. Настоящая работа посвящена численному исследованию конфигурации скачков уплотнения в расширяющемся канале с клинообразным центральным телом.

Стенки канала имеют излом, после которого угол расширения канала возрастает. Выше излома по течению находится затупленный носик клинообразного тела. Между боковыми поверхностями клинообразного тела и стенками канала от носика тела до излома стенок участки канала сужаются.

Расчетные сетки генерировались с помощью программы Gmsh. Сетки насчитывали от 100000 до 150000 элементов. На входе в канал задавалось число Маха, температура газа, давление или число Рейнольдса. Решение уравнений Эйлера проводилось методом конечных объемов с использованием пакетов программ Stanford University Unstructured (SU²) и Ansys CFX. Оба пакета дают близкие результаты. Решение уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS) выполнялось с помощью пакета Ansys CFX. Число Рейнольдса $5,6 \cdot 10^6$. В этом случае сетка была измельчена у стенок, безразмерная толщина первого слоя сетки $y^+ < 1$. Использовалась модель турбулентности k- ω SST. Степень турбулентности набегающего потока 5%.

Качественно конфигурации скачков уплотнения для вязкой и невязкой жидкости совпадают, но диапазон гистерезиса для вязкой жидкости по сравнению с невязкой жидкостью смещен в сторону больших чисел Маха потока на входе в канал.

На рис. 1 показано несколько образцов конфигурации скачков уплотнения.

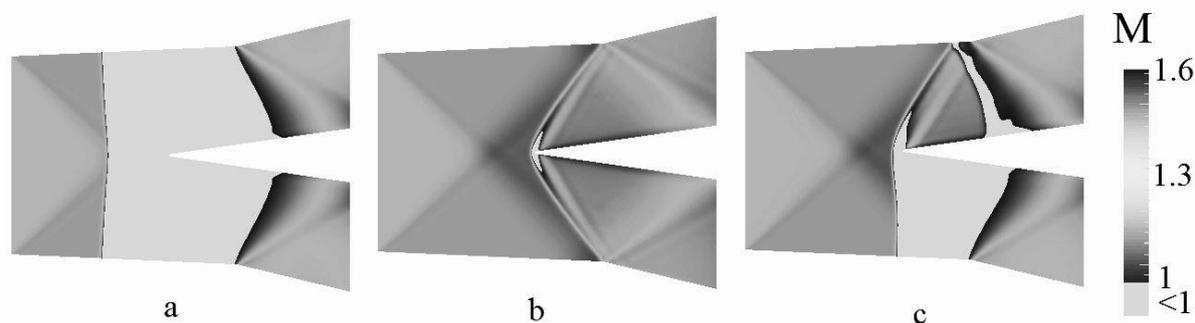


Рис. 1. Образцы «а» и «б» – число Маха $M_{in} = 1.3$, образец «с» - $M_{in} = 1.306$.

На образце «а» за почти прямым скачком уплотнения расположена обширная дозвуковая зона, за ней снова расположена область сверхзвукового течения. Образец «б» демонстрирует только небольшую дозвуковую зону перед носиком затупленного клина. На образце «с» представлено несимметричное течение. Внизу – обширная дозвуковая зона, вверху – узкая дозвуковая зона, расположенная за отраженным от стенки канала скачком уплотнения.

Результаты получены с использованием вычислительных ресурсов ресурсного центра «Вычислительный центр СПбГУ»

Литература

1. Riabinin A., Suleymanov A. Bifurcation of transonic flow in the channel with a central body // Topical Problems of Fluid Mechanics 2016. Conference Proceedings. Prague. 2016. P. 185-190.
2. Ryabinin A.N., Suleymanov A.F. Transonic flow in a channel with a central body // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. N 4. P. 1008-1013.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МГД УПРАВЛЕНИЯ ГИПЕРЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

А.И. Ряховский^{1,2}, В.И. Антонов¹, А.А. Шмидт^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, 29

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Россия, Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, 26
E-mail: alexey.i.ryakhovskiy@mail.ioffe.ru, alexey.i.ryakhovskiy@gmail.com

Методы немеханического управления ударно-волновой конфигурацией обтекания тел в высокоскоростном потоке газа сегодня привлекают широкое внимание исследователей. К возможным применениям подобных технологий относится оптимизация работы прямоточных реактивных двигателей, а также улучшение летных характеристик и снижение тепловых нагрузок возвращаемых летательных аппаратов. Одним из наиболее перспективных подходов к данной проблеме является магнитогазодинамическое (МГД) управление высокоскоростным потоком. Основой данной концепции является взаимодействие набегающего потока ионизированного газа с генерируемым магнитным полем. Это взаимодействие предполагается использовать для управления ударно-волновой конфигурацией.

В виду сложности экспериментальных исследований рассматриваемых режимов полета на первый план в изучении МГД управления высокоскоростным обтеканием выходит математическое моделирование. Нашей задачей является разработка модуля численного моделирования, способного адекватно описать все важные физические аспекты взаимодействия магнитного поля с высокоскоростным потоком газа. Разработка производится на основе открытой интегрируемой платформы численного моделирования OpenFOAM.

Одной из основных характеристик ударных волн в гиперзвуковом потоке является вибрационное возбуждение молекул за её фронтом, приводящее к частичной диссоциации и ионизации. Нами были сравнены одно- и двух-температурное описания данных явлений. В двух-температурная модель предполагается равновесие между трансляционной и ротационной, а также между вибрационной и электронной модами соответственно [1]. Кроме того, учитывается химически неравновесный характер течения. Решаемая система, таким образом, состоит из уравнений неразрывности для каждой из компонент потока, уравнения импульса и уравнений для механической, электронной и полной энергий. Система замыкается моделями диссоциации, ионизации, тепло- и электропроводности. В целях экономии вычислительных ресурсов разработанный алгоритм адаптирует используемую химическую модель в зависимости от локального числа Дамкелера.

Результаты тестирования разработанного солвера сравнивались с данными экспериментов [3, 4]. Было показано, что наличие взаимодействия с магнитным полем вносит дополнительную неоднородность в распределение физических величин между фронтом ударной волны и обтекаемым телом, что при достаточно больших значениях числа Стюарта может повлиять на применимость модели сплошной среды к рассматриваемому потоку.

Полученные результаты демонстрируют потенциал использования МГД управления ударно-волновой конфигурацией. В пакете OpenFOAM помимо основного солвера был создан ряд модулей, реализующих модели различных физических аспектов феномена. Разработанные инструменты численного моделирования могут быть использованы для дальнейшего исследования взаимодействия магнитного поля с гиперзвуковым потоком.

Литература

1. Gnoffo, P. A., Gupta, R. N. Conservation equations and physical models for hypersonic air flows in thermal and chemical nonequilibrium. 1989.
2. Ryakhovskiy A. I., Schmidt A. A. MHD supersonic flow control: OpenFOAM simulation // Труды института системного программирования РАН. 2016. Т. 28. С. 192-206
3. Фомичев В. П., Ядренкин М. А. Экспериментальное исследование методов МГД-управления гиперзвуковым обтеканием тел // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-3.
4. Железнякова А. Л., Суржиков С. Т. Численное моделирование гиперзвукового обтекания модели летательного аппарата Х-43 // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2010. № 1.

ОБОБЩЕННЫЕ УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА–УЛИНГА–УЛЕНБЕКА И ИХ СВОЙСТВА

М.А. Рыдалевская

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: Rydalevska@rambler.ru*

В докладе рассматриваются ситуации, когда в газовых смесях наряду с атомами и молекулами могут присутствовать фермионы (частицы Ферми–Дирака) и бозоны (частицы Бозе–Эйнштейна).

Обычно описание таких систем осуществляется с использованием квантовомеханических матриц плотностей вероятности. Однако, в определенных условиях, можно перейти к приближенному описанию состояния газа на уровне одночастичных функций распределения. Впервые такое описание вырожденного газа, состоящего из частиц Ферми–Дирака, было осуществлено Улингом и Уленбеком в 1932 г. [Phys. Rev., 43, p. 552]. Для газа из частиц Бозе–Эйнштейна такое же описание было применено Улингом в 1934 г. [Phys. Rev., 46, p. 917].

В монографиях [1, 2] для определения явлений переноса в сложных газовых смесях предлагается использовать обобщенные уравнения Улинга–Улинбека. Эти уравнения описывают поведение функций распределения бозонов и фермионов, а также атомов и молекул, которые можно рассматривать как обычные больцмановские частицы.

В настоящем докладе приводится специальная симметричная запись обобщенных уравнений Больцмана–Улинга–Улинбека, которая позволила доказать обобщение H-теоремы Больцмана для пространственно-однородных и неоднородных газовых смесей [3]. Исследуются свойства этих кинетических уравнений. Осуществляется переход к безразмерным переменным и выделяется ведущий интегральный оператор. Предлагается один из вариантов модифицированного метода Чепмена–Энскога (см., например, [4]) для описания явлений переноса в сложных газовых смесях с физико-химическими процессами, когда скорость поглощения и выделения фермионов и бозонов существенно отличается от скоростей физико-химических процессов, связанных со столкновениями обычных больцмановских частиц.

Литература

1. Фаулер Р., Гуггенхейм Э. Статистическая термодинамика. М.: ИИЛ, 1949. 614 с.
2. Гиришельдер Дж., Кертис Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: ИИЛ, 1961. 930 с.
3. Рыдалевская М.А., Цибаров В.А. Обобщение H-теоремы Больцмана для сложных смесей газов // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10. № 2. С. 313-319.
4. Валландер С.В., Нагнибеда Е.А., Рыдалевская М.А. Некоторые вопросы кинетической теории химически реагирующей смеси газов. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1977. 280 с.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ГИПЕРЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ ПОТОКОМ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

В.А. Титарев

*Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН,
Россия, Москва, 119333, ул. Вавилова, 44, к. 2
Московский физико-технический институт,
Россия, Долгопрудный, 141701, Институтский пер., 9
E-mail: titarev@ccas.ru, titarev.va@mipt.ru*

Создание численных методов решения кинетического уравнения Больцмана с точным или модельным интегралом столкновений является актуальной научной задачей. Детерминистическая природа уравнения позволяет создавать эффективные неявные методы высокого порядка аппроксимации по всем переменным, как для стационарных, так и для нестационарных течений. При этом большая размерность уравнения диктует необходимость развития методов решения задач на суперЭВМ.

Автором разрабатываются методы решения трехмерного кинетического уравнения с интегралом столкновений Шахова [1] (S-модели) для решения пространственных задач [2, 3]. Данные методы реализованы в пакете программ "Несветай 3Д". Отличительными особенностями методов являются поддержка использования блочно-структурированных и гибридных неструктурированных сеток, применение экономичной неявной схемы высокого порядка аппроксимации на таких сетках и двухуровневой MPI+OpenMP модели параллельных вычислений для использования на современных суперкомпьютерных системах.

В настоящем докладе впервые проведена количественная оценка точности моделирования гиперзвуковых течений разреженного газа на основе численного решения модельного кинетического уравнения путем сравнения с результатами расчетов по методу прямого статистического моделирования (DSMC). Показано, что при больших числах Маха набегающего потока (до 25) около тела возникают параметры течения, которые соответствуют условию применимости S-модели. Использование подробной сетки в физическом пространстве становится более необходимым, чем использование точного уравнения Больцмана. Приводятся примеры расчетов внешнего гиперзвукового обтекания тел сложной пространственной формы с использованием до 280 узлов на системах RSK Petastream [4], установленных в Межведомственном суперкомпьютерном центре РАН и Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 15-07-02986 А.

Литература

1. Шахов Е.М. Об обобщении релаксационного кинетического уравнения Крука // Изв. АН СССР. Механ. жидк. и газа. 1968. № 5. С. 142-145.
2. Титарев В.А. Неявный численный метод расчета пространственных течений разреженного газа на неструктурированных сетках // Ж. вычисл. математики и мат. физики. 2010. Т. 50. № 10. С. 1811-1826.
3. Titarev V.A., Dumbser M. and Utyuznikov S.V. Construction and comparison of parallel implicit kinetic solvers in three spatial dimensions // J. Comp. Phys. 2014. Vol. 256. P. 17-33.
4. Semin A., Druzhinin E., Mironov V., Shmelev A., Moskovsky A. The performance characterization of the RSC PetaStream module // Lecture Notes in Computer Science. 2014. Vol. 8488. P. 420-429.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В РАМКАХ СЛАБОНЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СЖИМАЕМОГО ГАЗА ПРИ $M=2$

Н.М. Терехова

Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН,
Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1
E-mail: terekh@itam.nsc.ru

Начало естественного перехода в пограничных слоях связывается с селективным усилением квазигармонического возмущения, динамику которого требуется описать. Наряду с прямыми методами интегрирования уравнений Навье – Стокса развиваются методы теории возмущений, эффективные при исследовании различных стадий эволюции флуктуаций малой интенсивности. С их помощью удастся построить модель начального этапа развития неустойчивости течения (приближение слабой нелинейности), упрощающую анализ и позволяющую дифференцировать управляющие процессом механизмы.

При малых уровнях возмущений после линейного усиления наступает область нелинейного взаимодействия, одной из наиболее типичных стадий которой является субгармонический трехволновый резонанс. Во втором порядке по амплитудам находятся возмущения более высокого порядка малости, способные повлиять на амплитуду исходных волн. В сверхзвуковом пограничном слое при невысоком уровне возмущений в спектре возмущений преобладают трехмерные моды, а заполнение его представляет собой каскадный процесс выделения трехмерных субгармоник в параметрической области.

В данной работе моделируется область нелинейной эволюции возмущений в сверхзвуковом пограничном слое при числе Маха $M=2$. Рассмотрены как искусственные (контролируемые, продольная динамика их субгармоники показана на рис. 1) [1], так и естественные возмущения, состав и амплитудно-частотные характеристики которых различны. В спектре контролируемых возмущений выделяются две несущие частоты, а сами они представляют собой так называемые «волновые поезда» достаточно широкого спектра азимутальных волновых чисел [2].

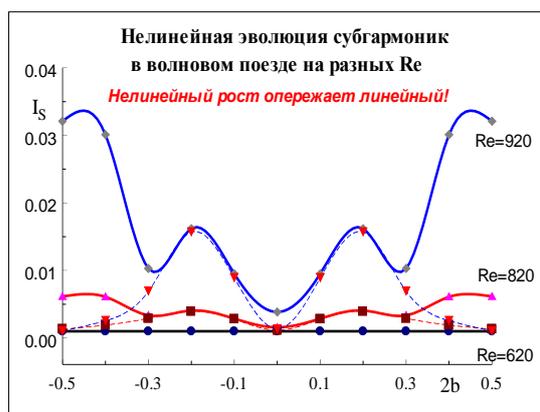


Рис. 1. Продольная динамика субгармонического возмущения (моделирование на основе сложного триплета, составленного из 48 простых).

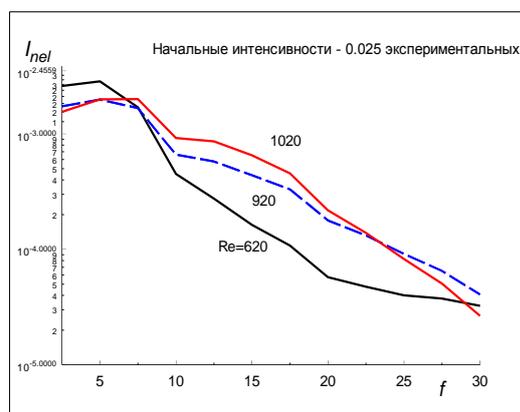


Рис. 2. Продольная динамика естественных возмущений (волновой пакет включает 12 частот), сложный триплет состоит из 36 простых.

Для естественных возмущений (рис. 2) передача энергии от наиболее энергонесущих компонент может происходить не только в субгармоническую, но и в область высоких частот (обертонов). Тогда более реален каскадный процесс, в котором задействовано максимальное число частот. При этом возникает проблема синхронизации не только частот, но и азимутальных волновых чисел.

Хотя данные модели значительно упрощают реальные нелинейные процессы, они отражают ряд важных особенностей эволюции волн в слабонелинейных областях.

Работа поддержана РФФИ (код проекта № 15-01-00866а).

Литература

1. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Трехволновые взаимодействия контролируемых возмущений в сверхзвуковом пограничном // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. Т. 6. № 5. С. 833-838.
2. Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. Характерные особенности слабонелинейного взаимодействия волн неустойчивости в сверхзвуковом пограничном слое // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2008. Т. 3. Вып. 3. С. 3-13.

ТАНГЕНЦИАЛЬНЫЙ ВДУВ КАК МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЯМИ В ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ НА ПОРИСТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРИ $M=2$

Н.М. Терехова

Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН,
Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1
E-mail: terekh@itam.nsc.ru

Данная работа продолжает цикл исследований по моделированию методов управления режимами течения в пограничных слоях сжимаемого газа. В [1, 2] рассмотрено влияние распределенного вдува на линейную устойчивость возмущений. Основное внимание было уделено моделированию как нормального вдува, при котором отлична от нуля только V компонента средней скорости, так и вдув других направлений, включая тангенциальный, когда на стенке не равна нулю только U компонента. Постановка близка к проблеме влияния газовой завесы на развитие малых колебаний. Приближением к реальности является рассмотрение вдува газа разной плотности. В работах это влияние моделируется изменением температурного фактора (нагрев или охлаждение стенки). Рассмотрен вариант реализации так называемого режима «запирания», когда скорости возмущений на пористой поверхности можно брать равными нулю. Получены обнадеживающие данные о том, что таким путем можно осуществить тепловую защиту обтекаемой поверхности, оставаясь в ламинарном режиме.

Естественным продолжением заявленного способа является учет при моделировании свойств самой пористой поверхности (степени пористости, размера пор, толщины покрытия). Как установлено ранее, при умеренных числах Маха учет их свойств приводит к дестабилизации вихревых возмущений, что уменьшает ламинарный участок и приближает переход. В данной работе этот аспект рассмотрен, свойства пористого покрытия включены в граничные условия для возмущений на стенке, что расширяет область практического приложения исследований и приближает их к реальности.

Цель работы формулируется как изучение влияния вдува и теплообмена на средние параметры (скорость и плотность), значения критических чисел Рейнольдса вихревых возмущений и на зависимости их от частот.

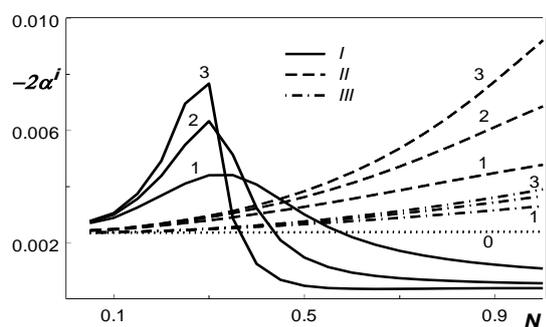


Рис. 1. Влияние параметров пористой поверхности на инкременты 3D вихревых волн при разных значениях радиусов пор и толщин покрытия.

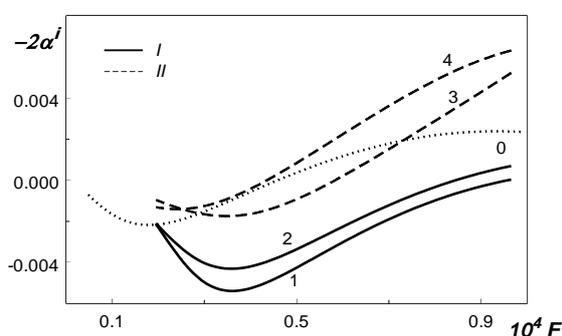


Рис. 2. Частотные разрезы, показывающие α^i 3D волн при тангенциальном вдуве $\varphi = \pi$ и параметрах $R_h = 3000$, $R_r = 1600$ и 1000 (1, 2) для $N=1$ (I) и $N=0.5$ (II).

На рис. 2 показан пример влияния свойств пористой поверхности на инкременты для $Re = 400$. Представлены данные для двух значений N и R_r , сравненные с режимом «запирания» (0). При большом N происходит «проседанию» коэффициентов в область затухания для рассмотренных R_r . Более агрессивно влияние пористости при $N = 0.5$. Видно, что при малых R_r растущие колебания появляются при частотах, близких к режимам «запирания», но обнаруживают значительно более высокие инкременты.

Результаты показали, что в режиме тангенциального вдува на пористой поверхности можно найти области, остающиеся в рамках ламинарного режима обтекания.

Литература

1. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Совместное влияние тепломассообмена на устойчивость пограничного слоя сжимаемого газа // Изв. РАН МЖГ. 2016. № 1. С. 33-42.
2. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Совместное влияние тепломассообмена через пористую стенку на устойчивость пограничного слоя сжимаемого газа при высоком числе Маха // Вест. НГУ. Сер. Физика. 2015. Т. 10. Вып. 3. С. 31-40.

ЭФФЕКТЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

Т.А. Хантулева, О.Н. Граничин

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: khan47@mail.ru, o.granichin@spbu.ru

Проблемы современной техники требуют разработки математических моделей процессов, протекающих вдали от термодинамического равновесия, когда реакция системы на внешние воздействия формируется комплексом многомасштабных и многостадийных процессов переноса импульса и энергии. Сопровождающие перенос коллективные эффекты могут приводить к самоорганизации новой вихре-волновой структуры системы. Для описания таких переходных процессов требуются новые более «гибкие» математические модели, способные адаптироваться к переменным внешним воздействиям за счет обратных связей между эволюцией внутренней структуры системы и ее реакцией на внешнее нагружение. Самосогласованная нелокальная теория неравновесных процессов переноса [1], разработанная на стыке механики, физики и кибернетики позволяет строить адаптивные математические модели систем, активно взаимодействующих с окружением, которые способны предсказать процессы динамического структурообразования и эволюцию реакции системы в будущем.

Разработанный подход к моделированию процессов вдали от термодинамического равновесия, протекающих естественным образом в физических системах, может быть использован и для моделирования искусственных систем, чтобы за счет процессов самоорганизации сделать их более адаптированными к изменению условий окружающей среды. В качестве такой системы в работе рассмотрен самолет с перьями. «Перья» представляют собой миниатюрные интеллектуальные агенты, которые связаны друг с другом, а их целенаправленное коллективное движение способно привести к их самоорганизации и изменению режима обтекания корпуса самолета.

При полете самолета в ламинарном режиме обтекания вдоль заданной траектории с постоянной скоростью, все силы, действующие на него, уравниваются друг друга. При попадании в область турбулентности на разные части самолета действуют разные силы, что помимо отклонения от траектории приводит к вращательным моментам вокруг центра тяжести. Птицы частично умеют контролировать режим полета с помощью перьев. Если построить самолет с большим количеством перьев, управляемых из центра, потребовалось бы обрабатывать данные со всего массива перьев и решать сложные системы уравнений с огромной скоростью, чтобы успеть за изменениями турбулентного потока ветра. Возникает задача: как с помощью поворотов перьев без внешнего управления так изменить режим обтекания, чтобы уменьшить силовое воздействие на разные части самолета.

Для решения задачи предлагается новый мультиагентный подход [2] для синхронизации отклонений сил от стационарных значений и минимизации вращательных моментов, основанный, с одной стороны, на использовании эффектов самоорганизации с помощью нелокальных моделей неравновесного переноса импульса, и, с другой стороны, на алгоритмах теории адаптивного управления сложными системами. Этот подход позволяет за счет коллективного взаимодействия отдельных агентов между собой без участия внешнего управления достигать цели: выравнивания возмущающих сил и затухания вращательных моментов, действующих на самолет.

В работе показано, что при выравнивании возмущающих сил, вращательные моменты исчезают. В процессе выравнивания на поверхности самолета формируются кластеры с близкими значениями возмущающих сил, действующих на перья. Кластеры быстро расплываются в соответствии с нелокальными формулами для потока импульса [1, 2]. При этом количество кластеров уменьшается до одного, когда возмущающие силы выравниваются. Процесс эволюции кластеров описывается алгоритмом скоростного градиента [3], согласно которому система достигает цель наискорейшим путем. В качестве целевой функции выступает минимизация кинетической энергии, переданной самолету турбулентным потоком. В процессе достижения цели энергия вращательного движения преобразуется в энергию поступательного движения и частично диссипирует, увеличивая сопротивление и уменьшая подъемную силу. При этом плавное отклонение от заданной траектории может быть легко компенсировано внешним управлением самолета, а поставленная задача снижения негативных факторов турбулентного режима обтекания и стабилизации полета решена.

Литература

1. Хантулева Т.А. Нелокальная теория неравновесных процессов переноса. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2013. 278 с.
2. Granichin O., Khantuleva T., Granichina O. Local voting protocol for the adaptation of airplane's "feathers" in a turbulence flow // In: Proc. of the 2017 American Control Conference, May 24-26. 2017. P. 5684-5689.
3. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика. СПб.: Наука, 2003. 208 с.

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА АТ-11 СПБГУ: МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ УЗЛОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ТРАКТА

А.И. Цветков, Б.А. Щепанюк

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: acvetkov@yandex.ru, bschepan@gmail.com

В докладе речь идёт об оригинальных конструктивных решениях по узлам аэродинамического тракта промышленной дозвуковой аэродинамической трубы замкнутого типа с открытой рабочей частью. Решения подтверждены в дальнейшем экспериментальными исследованиями параметров потока в открытой рабочей части.

В докладе также представлены координатно-позиционирующие устройства, позволяющие расширить варианты исполнения открытой рабочей части аэродинамической трубы.

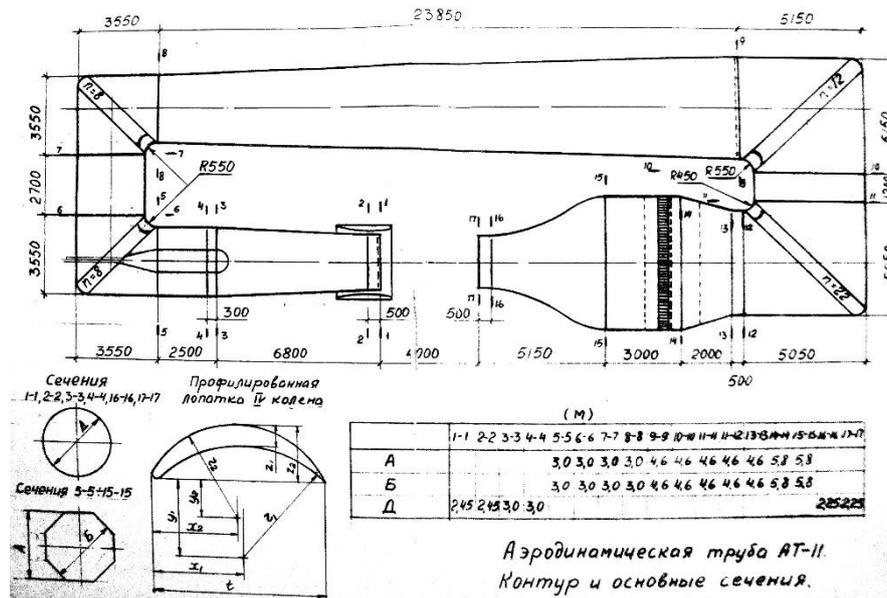


Рис. 1. Аэродинамический контур трубы АТ-11.

Литература

1. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1974. 480 с.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА АТ-11 СПБГУ: ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

А.И. Цветков, Б.А. Щепанюк

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: acvetkov@yandex.ru, bschepan@gmail.com

Оснащение дозвуковой аэродинамической трубы АТ-11 термоанемометрической аппаратурой определялось выбором серийно выпускаемых анемометров исследовательского типа, поставляемых вместе с прикладным программным обеспечением, и достаточных для того, чтобы обеспечить стабильные и надёжные результаты измерений. Выбор практически сразу был предопределён в пользу продукции компании Dantec Dynamics.

Содержание доклада повторяет в кратком изложении содержание руководства Dantec Dynamics [1], любезно предоставленного нам на английском языке и посвященного выбору термоанемометров (анемометров постоянной температуры – АПТ). Наш вклад, если не считать перевод руководства с английского языка на русский, состоит в изложении опыта практического исследования потоков на аэродинамической трубе с помощью аппаратуры Dantec Dynamics.

Для практического исследования потоков на аэродинамической трубе АТ-11 потребовалось, помимо калибровки на калибраторе Dantec Dynamics одно-, двух- и трёхниточных сенсоров, провести эксперимент по валидации измерений этими сенсорами на специально разработанном стенде с малотурбулентной дозвуковой струей несжимаемого газа. Проведено также сравнение получаемых результатов с опубликованными в [2] с результатами по измерению скорости и интенсивности турбулентности в поперечных сечениях дозвуковой струи.

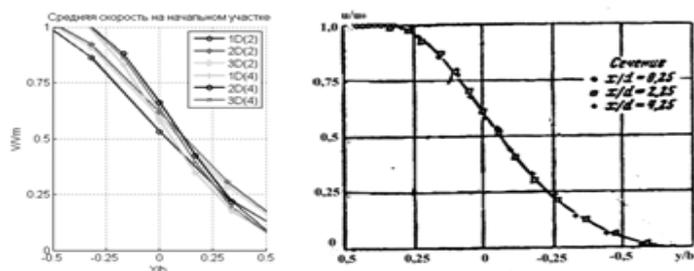


Рис.1. Профили средней скорости в сечениях начального участка дозвуковой струи.

Литература

1. *Jørgensen, F.E.* How to measure turbulence with hot-wire anemometers – a practical guide. Dantec Dynamics. 2002. 73 с.
2. *Абрамович Г.Н.* Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. М. – Л.: Гостехтеоретиздат, 1948. 288 с.
3. *Грек Г.Р., Бойко А.В., Гилев В.М., Зверков И.Д., Сорокин А.М.* Автоматизированная система сбора термоанемометрической информации в аэрофизическом эксперименте // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 5. С. 11-14.

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА АТ-11 СПбГУ: ИЗМЕРЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ

А.И. Цветков, Б.А. Щепанюк

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7-9
E-mail: acvetkov@yandex.ru, bschepan@gmail.com

В докладе излагается информация:

- о выборе интеллектуальных преобразователей, датчиков и аппаратуры для измерения стационарного дифференциального и быстропеременного дифференциального давлений в дозвуковых потоках на аэродинамической трубе АТ-11;
- о компьютерной технологии измерения параметров потока в открытой рабочей части;
- о технологии метрологического обеспечения измерений стационарного и быстропеременного давлений.

Информация иллюстрируется схемами измерений и примерами результатов измерений.

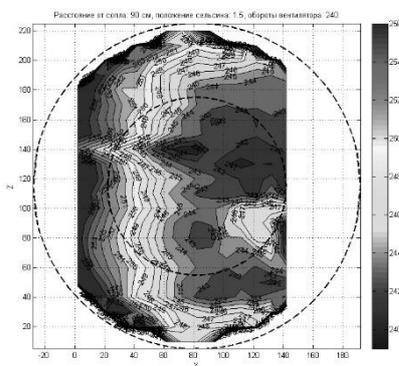


Рис. 1. Распределение скоростного напора в поперечном сечении.

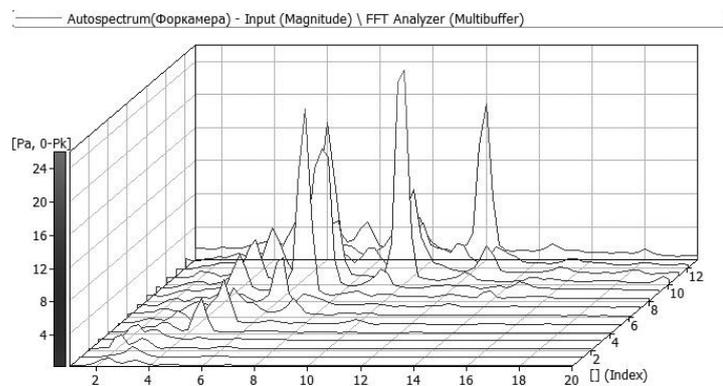


Рис. 2. Спектральный анализ пульсаций давления в форкамере АТ-11.

Литература

1. Гаркуша В.В., Гилев В.М., Запругаев В.И., Яковлев В.В. Многоканальное автоматизированное измерение давления в аэродинамическом эксперименте // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 12. С. 158-164.
2. Леонов Г.А., Цветков А.И., Щепанюк Б.А. Устройство для тарировки измерительных приборов дифференциального давления // Патент на изобретение №2504747. 2014. Бюл. № 2.
3. Михайлов П.Г., Мокров Е.А., Митрохин С.В., Сергеев Д.А. Особенности метрологического обеспечения современных датчиков пульсаций давлений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. Т. 130. № 5. С. 174-179.
4. Харлан А.А. Метрологическое обеспечение создания датчиков давлений для ракетно-космической техники // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза: ИИЦ ПГУ. 2011. С. 94-96.
5. Цветков А.И., Щепанюк Б.А. Аэродинамическая труба АТ-11 СПбГУ: измерение дифференциальных быстропеременных давлений // Молодой ученый. 2016. № 8. С. 340-347.

ВИХРЕВОЙ СЛЕД ЗА МАГИСТРАЛЬНЫМ САМОЛЕТОМ ВО ВРЕМЯ ДВИЖЕНИЯ ПО ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЕ ПРИ ВЗЛЕТЕ И ПОСАДКЕ

Ю.М. Циркунов¹, М.А. Лобанова¹, А.И. Цветков², Б.А. Щепанюк²

¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
Россия, Санкт-Петербург, 190005, ул. 1-я Красноармейская, 1

²Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, 199034, Университетская наб., 7/9

E-mail: tsrknv@bstu.spb.su, lbnv.spb@gmail.com, acvetkov@yandex.ru, bschepan@gmail.com

Пробег самолета по полосе при взлете или приземлении генерирует за ним долгоживущее крупномасштабное вихревое течение, известное как вихревой след. Такой след за большим авиалайнером представляет серьезную опасность для следующего за ним самолетом, и это лимитирует пропускную способность взлетно-посадочной полосы. Для обеспечения вихревой безопасности взлетов и посадок важно предсказывать свойства следов, особенно их крупномасштабную вихревую структуру. Большое число публикаций посвящено изучению следов за самолетами при крейсерском полете (например, [1–3]). Однако работ, посвященных исследованию следов за самолетами во время взлета и посадки, очень мало (например, [4]).

В данной работе численно на основе осредненных уравнений Навье–Стокса с использованием SST модели турбулентности исследована крупномасштабная вихревая структура течения в ближнем следе за авиалайнером типа Боинг-737, движущимся по полосе при взлете и посадке. Расчеты выполнены с применением программного обеспечения ANSYS. Скорость самолета в расчетах соответствовала моменту отрыва переднего шасси от полосы на режиме взлета и моменту касания шасси полосы при посадке. Основное внимание уделено влиянию положения закрылков и интерцепторов крыла на поле течения в ближнем следе. Получены картины течения, поля компонент завихренности, кинетической энергии турбулентности и профили вертикальной скорости в различных поперечных сечениях за самолетом. Результаты сравнивались с полученными ранее для крейсерского полета самолета на эшелоне.

Трехмерная геометрическая модель самолета для численного исследования и тестовых физических экспериментов была построена с использованием пакета SolidWorks15. Она включала все основные элементы: фюзеляж, крылья с винглетами, горизонтальные и вертикальный стабилизаторы, gondолы двигателей, пилоны, направляющие пилонов, внутренние и внешние предкрылки, закрылки, полетные и посадочные интерцепторы. Все предкрылки были полностью выпущены как на режиме взлета, так и режиме посадки. Положение закрылков было различным для условий взлета и посадки: 15 и 40 градусов соответственно. Интерцепторы были полностью убраны для условий взлета и полностью выпущены для условий посадки. Координаты профилей крыла в различных поперечных сечениях были взяты из базы данных профилей Иллинойского университета [5]. Габаритные размеры самолета были взяты из доступных открытых источников [6].

Для проверки адекватности численной модели были проведены тестовые эксперименты в аэродинамической трубе АТ-11 Центра прикладной аэродинамики Научного парка Санкт-Петербургского университета. Модель самолета была изготовлена на 3D принтере. Gondолы двигателей имели профилированные каналы. В трубе модель располагалась вблизи плоского стеклянного экрана, который имитировал взлетно-посадочную полосу. Для измерения поля скорости в следе использовалась PIV-система. Эта система включала двойной импульсный NdYAG лазер Quantel Twins CFR300, объектив Nikkog ED-180 мм с фокусным расстоянием 180 мм, две кросс-корреляционные камеры Videoscanner-11002, синхронизирующий процессор, генератор тумана Magnum ZR33, трехкоординатную траверсу и систему управления. Камера имела матрицу KAI-11002M с размером CCD 36x24 мм и разрешением изображения 4000x2673 px. Засевание потока каплями размера 0.1...5 мм производилось с помощью генератора тумана с использованием гидроглицериновой смеси ‘MT Solid Fog Dense’. Интервал времени между двумя вспышками двойного импульсного лазера составлял 22 мкс. Для обеспечения высокой точности измерений в каждой плоскости лазерного ножа оптической системой записывалось в области следа 200 мгновенных полей скорости. Результаты обрабатывались с использованием программного обеспечения ActualFlow.

Авторы выражают благодарность В. Габдылхаковой за обработку данных PIV измерений. Данное исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-08-07965).

Литература

1. Гиневский А.С., Желанников А.И. Вихревые следы за самолетами. М.: Физматлит, 2008.
2. Гайфуллин А.М. Вихревые течения. М.: Наука, 2015.
3. Gerz Th., Holzapfel F. and Darracq D. // Progress in Aerospace Sciences. 2002. Vol. 38. P. 181-208.
4. Stephan A., Holzapfel F., Misaka T. // In: Proc. of 29th Congress of the Int. Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2014). 2014. N 2014_0796. P. 1-10.
5. <http://www.ae.illinois.edu/m-selig/ads/coord database.html>
6. <http://www.b737.org.uk/>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДОВОГО СОСТАВА ВОЗМУЩЕНИЙ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА

И.С. Цырюльников, С.В. Кириловский, Т.В. Поплавская, А.И. Решетова

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Россия, Новосибирск, 630090, ул. Институтская, 4/1*

*Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Россия, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2*

E-mail: tsivan@itam.nsc.ru , kirilov@itam.nsc.ru, popla@itam.nsc.ru, annareshetova29@gmail.com

Разработка и создание устройств разделения суммарного поля пульсаций потока на вихревую, энтропийную и акустическую моды (модовая декомпозиция) необходима для экспериментальных исследований восприимчивости и развития возмущений в сверхзвуковых пограничных слоях. В данной работе предлагается новый способ модовой декомпозиции, основанный на взаимодействии длинноволновых возмущений внешнего потока с ударной волной (УВ), формирующейся при сверхзвуковом обтекании различных объектов. Возможность выделения пульсаций той или иной моды при наличии информации о пульсациях давления на поверхности объекта появляется за счет различной амплитуды преобразования возмущений внешнего потока различных мод за УВ.

Проведен анализ общего решения невязкой задачи о взаимодействии возмущений с ударной волной на клине [1]. Разложением общего решения по малому параметру (отношение продольной координаты к длине волны возмущения) получены аналитические зависимости коэффициентов преобразования длинноволновых возмущений на УВ от угла наклона УВ, угла клина, угла распространения возмущений и числа Маха набегающего потока.

Для получения коэффициентов преобразования длинноволновых возмущений за ударной волной в вязких потоках проведено численное моделирование обтекания клина возмущенным сверхзвуковым потоком с использованием пакета ANSYS Fluent в постановке [2]. Параметры течения соответствовали условиям экспериментов, проводимым в аэродинамической трубе: $P_0=43$ бар, $T_0=1200$ К, $M=7,8$, $Re_1=4 \cdot 10^6$ 1/м. По данным параметрических расчетов получены зависимости коэффициентов преобразования длинноволновых возмущений от угла наклона УВ, угла распространения возмущений, числа M и Re для вязкого случая. Проведено сравнение коэффициентов преобразования, полученных в численном моделировании и по аналитическим формулам.

Далее в сверхзвуковой высокоэнтапийной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН проведены измерения пульсаций давления на специальном устройстве для экспериментальной реализации метода модовой декомпозиции. Это устройство содержало 4 одинаковых пластины с острой передней кромкой, на верхней поверхности каждой из которых установлен датчик пульсаций давления. Пластины под различными углами наклона устанавливаются на крестовине, которая соединяется с державкой, служащей для закрепления устройства и вывода сигналов с датчиков на регистрирующую аппаратуру. Измеренные среднеквадратичные значения пульсаций давления на поверхности модели и определенные выше коэффициенты преобразования возмущений различных мод на УВ позволяют определить модовый состав возмущений набегающего потока.

Т.о. определен новый способ модовой декомпозиции возмущений сверхзвукового потока и устройство его реализующее.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-08-00674).

Литература

1. Duck P.W., Lasseigne D.G., Hussaini M.Y. // Theor. Comp. Fluid Dyn. 1995. Vol. 7. P. 119-139.
2. Кириловский С.В., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С. Применение пакета ANSYS Fluent для решения задач взаимодействия акустических волн на гиперзвуковой ударный слой на пластине // Математическое моделирование. 2013. Т. 25. № 9. С. 32-42.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЛАМИНАРНЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ НА КОНУСАХ ПАССИВНЫМИ ПОРИСТЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

А.Н. Шиплюк^{1,2}, С.В. Лукашевич¹, С.О. Морозов¹

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Россия, Новосибирск, 630090, ул. Институтская, 4/1

²Новосибирский государственный технический университет,
Россия, Новосибирск, 630073, пр. Карла Маркса, 20
E-mail: shplyuk@itam.nsc.ru

Ламинарно-турбулентный переход пограничного слоя на поверхности гиперзвуковых летательных аппаратах приводит к значительному увеличению тепловых потоков и сопротивления трения. Расчеты по линейной теории устойчивости показали, что в гиперзвуковых безградиентных пограничных слоях наиболее неустойчивыми являются возмущения второй моды [1], приводящие к переходу к турбулентности. Для стабилизации данных возмущений предложено использование пассивных пористых покрытий, способствующих частичному поглощению энергии второй моды возмущений [2].

Экспериментальные исследования, проведенные в ИТПМ СО РАН, подтвердили эффективность подавления второй моды возмущения, ослабление нелинейных процессов и увеличения ламинарного участка с помощью пассивных пористых покрытий [3–7].

Теоретические исследования показали, что пористость и толщина пассивных пористых покрытий влияет на эффективность поглощения второй моды [2]. Авторы теоретической работы [8] указывают на то, что в зависимости от положения пористого покрытия возмущения в гиперзвуковом пограничном слое могут, как стабилизироваться, так и дестабилизироваться.

Для проверки эффекта влияния параметров пассивного пористого покрытия на устойчивость гиперзвукового пограничного слоя, полученного в расчетах, проведена серия экспериментальных работ в гиперзвуковой аэродинамической трубе ИТПМ СО РАН при числе Маха $M=6$. Впервые экспериментально подтверждена зависимость эффективности подавления второй моды возмущений с помощью пассивного пористого покрытия от его толщины и степени пористости. Получено, что с ростом толщины покрытия до оптимального значения его эффективность растет, а затем убывает и выходит на постоянный уровень. Для пористых покрытий с различной степенью пористости найдены значения эффективной толщины покрытия.

Дальнейшие экспериментальные исследования посвящены влиянию положения и протяженности пассивного пористого покрытия на вторую моду возмущений в гиперзвуковом пограничном слое конуса. Обнаружено, что пористое покрытие может как стабилизировать, так и дестабилизировать вторую моду возмущений. Найдены значения положения и протяженности, при которых эффективность подавления второй моды пассивным пористым покрытием максимальна. Сравнение результатов эксперимента и расчета показало, что наличие пористого покрытия в области, где вторая мода неустойчива, приводит к уменьшению ее амплитуды, а наличие пористого покрытия в области, где вторая мода устойчива, к ее увеличению.

Так как угол атаки оказывает сильное влияние как на положение перехода, так и на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое, экспериментально проверена эффективность подавления возмущений второй моды под небольшими углами атаки (до 1°). Для этого выбрано пассивное пористое покрытие с оптимальными параметрами, полученными при нулевом угле атаки. Впервые экспериментально показано, что покрытие эффективно стабилизирует вторую моду возмущений как на наветренной, так и на подветренной сторонах конуса под углами атаки до 1° .

Литература

1. Mack L.M., Linear Stability Theory and the Problem of Supersonic Boundary- Layer Transition // AIAA Journal. 1975. Vol. 13. N 3. P. 278-289.
2. Fedorov A.V., Malmuth N.D., Rasheed A., and Hornung H.G. Stabilization of Hypersonic Boundary Layers by Porous Coatings // AIAA Journal. 2001. Vol. 39. N 4. P. 99-124.
3. Fedorov A.V., Kozlov V.V., Shipliyuk A.N., Maslov A.A., Malmuth N. Stability of Hypersonic Boundary Layer on Porous Wall with Regular Microstructure // AIAA Journal. 2006. Vol. 44. N 8. P. 1866-1871.
4. Fedorov A.V., Shipliyuk A.N., Maslov A.A., Burov E.V., Malmuth N. Stabilization of a hypersonic boundary layer using an ultrasonically absorptive coating // Journal of Fluid Mechanics. 2003. Vol. 479. P. 99-124.
5. Shipliyuk A.N., Burov E.V., Maslov A.A., Fomin V.M. // J. Appl. Mech. and Techn. Phys. 2004. Vol. 45. N 2. P. 286-291.
6. Chokani N., Bountin D.A., Shipliyuk A.N., Maslov A.A. // AIAA Journal. 2005. Vol. 43. N 1. P. 149-155.
7. Lukashevich S.V., Maslov A.A., Shipliyuk A.N., Fedorov A.V., Soudakov V.G. Stabilization of high-speed boundary layer using porous coatings of various thicknesses // AIAA Journal. 2012. Vol. 50. N 9. P. 1897-1904.
8. Wang X., Zhong X. Effect of Porous Coating on Boundary-Layer Instability // AIAA Paper No. 2010-1243. 2010.

ВОПРОСЫ СУЩЕСТВОВАНИЯ ВИХРЕВОЙ ДОРОЖКИ КАРМАНА ПРИ СХОДЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С УТОЛЩЕННОЙ ЗАДНЕЙ КРОМКИ ГИДРОПРОФИЛЯ

Н.А. Щур, Е.М. Смирнов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, 29
E-mail: aero@phmf.spbstu.ru

Вихревая дорожка Кармана, сходящая с задней кромки гидропрофиля - распространенное явление, которое может быть опасным в случае близости частоты схода вихрей к одной из собственных частот механических колебаний обтекаемого тела, или же вызывать кавитационное разрушение кромки [1]. Известно, что интенсивность вихрей Кармана сильно зависит от формы выходной кромки: например, в работе [2] показано, что сглаживание изломов поверхности профиля в случае заостренной кромки снижает амплитуду ее вынужденных колебаний на три порядка.

В настоящей работе представляются результаты двумерных расчетов обтекания профиля NACA0007 (рис. 1а) при числах Рейнольдса от 10^6 до 10^7 и различных формах задней кромки. Рассматривается как случай заостренной кромки (рис. 1б) из работы [2], так и привлекательный с технологической точки зрения вариант трапецевидных кромок (рис. 1в). Нестационарные расчеты на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, с аккуратным разрешением пристенных турбулентных пограничных слоев и ближнего следа, выполнены с применением пакета внутреннего пользования SINF. Использовалась SST модель турбулентности с поправкой на кривизну линий тока.

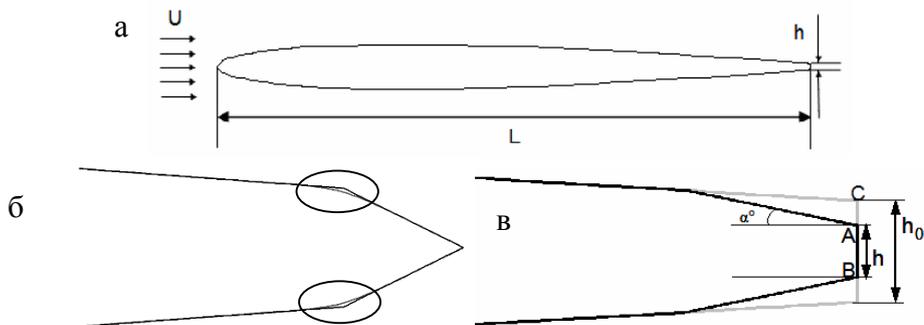


Рис. 1. Геометрия профиля (а) и его задней кромки в двух вариантах (б, в).

Полученная в расчетах амплитуда силового воздействия потока на заднюю часть профиля в случае заостренной кромки с изломом поверхности (рис. 1б) оказалась в семь раз выше, чем в случае прямоугольной кромки, рассмотренном ранее в [3]. При сглаживании излома, иллюстрируемом также на (рис. 1б), дорожка Кармана вырождалась в процессе расчета, даже при старте с полей, взятых из решения задачи с изломом поверхности. Таким образом, можно говорить о адекватном воспроизведении эффектов, наблюдавшихся в работе [2].

Для случая трапецевидных кромок была выполнена обширная серия параметрических расчетов с варьированием угла скоса α и остаточной толщины кромки h (рис. 1в). Установлено, в частности, что при $h=0.44 \cdot h_0$ и значениях α , близких к $17,5^\circ$, дорожка Кармана в полученном решении отсутствует, и решение стационарно. Для остаточной ширины кромки $h=0.46 \cdot h_0$ и большей, дорожка Кармана присутствует в полученных решениях для всего диапазона углов скоса, однако при $\alpha=17,5^\circ$ интенсивность нестационарного силового воздействия потока на кромку минимальна. Важно отметить при этом, что данное значение угла соответствует переходу от случая течения с отрывом пограничного слоя в точке излома к случаю течения с присоединенным пограничным слоем вдоль всего скоса.

Литература

1. Ausoni P.; Farhat M., Xavier E. et al. Cavitation Influence on Kármán Vortex Shedding and Induced Hydrofoil Vibrations // Journal of Fluids Eng. 2007. Vol. 129, N 8. P. 966-973.
2. Donaldson R.M. Hydraulic turbine runner vibration // Journal of Engineering for Power. 1956. Vol. 78. P. 1141-1147.
3. Смирнов Е.М., Сыралева М.Н., Щур Н.А. Влияние формы задней кромки гидродинамического профиля на интенсивность вихрей в дорожке Кармана: численное исследование в рамках RANS-подхода // Тезисы докладов Международной научной конф. по механике "VI Поляховские чтения". СПб. 31 января - 3 февраля 2012 г. С. 186-187.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ АТАКИ И СКОЛЬЖЕНИЯ

Д.С. Яцухно, С.Т. Суржиков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Россия, Москва, 119526, пр-т Вернадского, 101, к. 1
E-mail: yatsukhno-ds@rambler.ru

Особенности назначения и эксплуатации современных высокоскоростных летательных аппаратов обуславливают необходимость выполнения численных экспериментов, связанных с исследованием влияния изменения угла атаки и отклонения от курса на основные аэродинамические характеристики и структуру поля течения в целом. Для объекта настоящего расчетного исследования – высокоскоростного летательного аппарата (ВЛА) Waverider [1], конфигурация которого позволяет достичь более высоких значений аэродинамического качества в сравнении с другими летательными аппаратами – выполнено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными [2].

Численное исследование было проведено с использованием компьютерного кода UST3D [3], в котором был реализован метод расщепления по физическим процессам. Для приближенного решения задачи о распаде произвольного разрыва был применен метод донорных ячеек [4]. Расчеты проводились на неструктурированных тетраэдральных сетках. Были рассмотрены различные варианты чисел Маха набегающего потока, а также углов атаки и скольжения. Для всех расчетных случаев число Рейнольдса на единицу длины было равно $6.57 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

На рис. 1 представлено распределение давления возле поверхности ВЛА Waverider при нулевом угле атаки и угле скольжения равном $\beta = 3^\circ$.

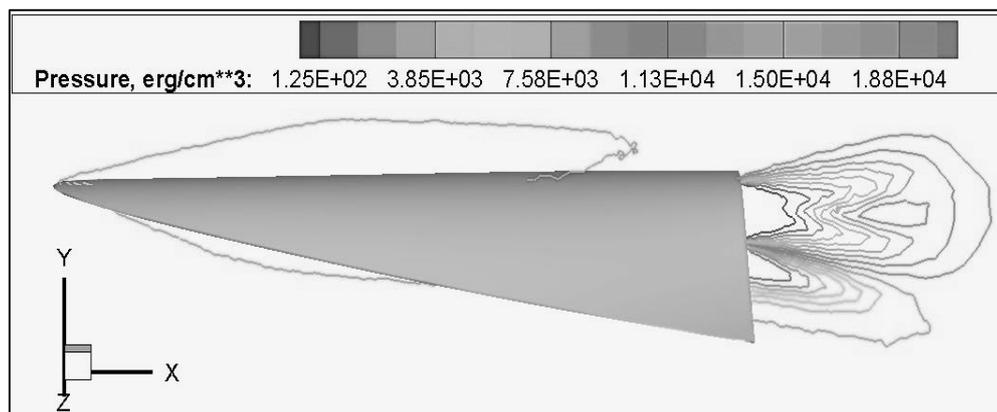


Рис. 1. Поле давления при угле скольжения $\beta = 3^\circ$.

Литература

1. Cockrell Ch.E., Jr., Huebner L.D., Finley D.B. Aerodynamic Characteristics of Two Waverider-Derived Hypersonic Cruise Configurations // NASA Technical Paper. 1996. N 3559.
2. Cockrell Ch.E., Jr. Vehicle integration effects on hypersonic waveriders // M.S. thesis. George Washington University. 132 p.
3. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. Применение метода расщепления по физическим процессам для расчета гиперзвукового обтекания пространственной модели летательного аппарата сложной формы // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 6. С. 897-911.
4. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980.

ПЕРЕЧЕНЬ АВТОРОВ

- Аджиев С.З., **4, 5**
Адрианов А.Л., **6**
Акимов Г.А., **7**
Аксенова О.А., **8**
Алексеева М.М., **9**
Антонов В.И., **87**
Аристов В.В., **10**
Бакалейников Л.А., **24**
Бакулев В.Л., **55**
Барина О.В., **11**
Барышников А.С., **12**
Басаргин И.В., **12**
Безверхний Н.О., **12**
Бестужева А.Н., **13**
Бильченко Г.Г., **14, 15**
Бильченко Н.Г., **14, 15**
Бобашев С.В., **12**
Богатко В.И., **16**
Богомоллов Р.В., **17**
Брыков Н.А., **31**
Быков Н.Ю., **18**
Веденяпин В.В., **4, 5**
Волков К.Н., **19**
Габдылхакова В.Г., **21, 22**
Гайфуллин А.М., **23**
Герасименко А.Б., **24**
Горбачев Ю.Е., **18, 25, 26**
Горенский Ф.С., **27**
Граничин О.Н., **92**
Григорьев Ю.Н., **20**
Груздев К.С., **28**
Гуенько Н.А., **29**
Гуенько Ю.Ф., **29**
Даль Ю.М., **30**
Джайчибеков Н.Ж., **61**
Дук А.А., **57, 58**
Емельянов В.Н., **19, 31**
Емельянова А.В., **57, 58**
Ермолаева Н.Н., **32**
Ерофеев А.В., **54**
Ершов И.В., **20**
Жданов В.М., **33**
Забелок С.А., **10**
Засимова М.А., **35**
Захматов В.Д., **36**
Иванов Н.Г., **35**
Истомин В.А., **37, 38**
Казанцева В.В., **4, 5**
Карпенко А.Г., **37, 39**
Каун Ю.В., **41**
Кашеваров А.В., **42**
Кириловский С.В., **43, 74, 80, 97**
Киселев Н.А., **44**
Колесник Е.В., **45**
Колесников А.Ф., **46**
Корниенко О.В., **37**
Косарева А.А., **37, 47**
Крылов А.А., **48**
Кудрявцев А.Н., **49, 50**
Кузнецов М.М., **51, 52**
Кулешова Ю.Д., **51, 52**
Кунова О.В., **37**
Курбатова Г.И., **32**
Кустова Е.В., **37, 38**
Кутев Н., **77**
Лаврищева Л.С., **53**
Лапушкина Т.А., **54**
Лачугин Д.В., **70**
Лашков В.А., **39**
Левченко Г.Е., **55**
Лежнев Е.В., **85**
Липатов И.И., **56**
Лобанова М.А., **96**
Лукашевич С.В., **98**
Мальков В.М., **57, 58**
Маракуева О.В., **59**
Матвеев С.В., **51**
Матвеев С.К., **60, 61**
Машек И.Ч., **39**
Маштаков А.П., **55**
Мехоношина М.А., **37**
Микаилова Л.Н., **62**
Миронов С.Г., **63, 74**
Мирошин Р.Н., **11**
Моисеев А.А., **64**
Моллесон Г.В., **42**
Молоствин В.Е., **51**
Монахов Н.А., **12**
Морозов С.О., **98**
Набокова М.Н., **37**
Нагнибеда Е.А., **3, 47, 66**
Новосёлов В.Н., **53**
Нурмухамбетов М.С., **68**
Облапенко Г.П., **37**
Павилайнен Г.В., **70**
Павловский В.А., **69, 71**
Панов Д.О., **72**
Папина К.В., **37, 66**
Погосбекян М.Ю., **73**
Поплавская Т.В., **43, 74, 80, 97**
Попов П.А., **12, 75**
Попок И.А., **36**
Потехина Е.А., **16**
Прозорова Э.В., **76**
Пузырева Л.А., **37**
Радев Ст., **77**
Ребров А.К., **78**
Резников Б.И., **75**
Резунков Ю.А., **79**
Решетникова Ю.Г., **52**
Решетова А.И., **80, 97**
Рис В.В., **72**
Рогозин О.А., **81, 82, 83**
Романюк Д.А., **84**
Рудяк В.Я., **85**
Рыдалевская М.А., **88**

Рябинин А.Н., **86**
Ряховский А.И., **87**
Савельев А.С., **37**
Савин А.В., **64**
Сахаров В.А., **12, 75**
Сергиевская А.Л., **73**
Смирнов А.Л., **13**
Смирнов Е.М., **72, 99, 100**
Смотрова Л.В., **52**
Стасенко А.Л., **42**
Степаненко А.А., **33**
Табакова С., **77**
Терехова Н.М., **90, 91**
Тетерина И.В., **19**
Титарев В.А., **89**
Фёдоров С.А., **18**
Флегонтова Е.Ю., **24**
Фролова А.А., **10**
Халидов И.А., **8**
Хантулева Т.А., **92**
Хоронжук Р.С., **39**
Хотяновский Д.В., **49, 50**
Цветков А.И., **21, 22, 93, 94, 96**
Циркунов Ю.М., **59, 62, 68, 84, 96**
Цырюльников И.С., **74, 80, 97**
Чернышов М.В., **36**
Чистов А.Л., **69**
Чистякова М.В., **12**
Шалабаева Б.С., **61**
Шестов К.В., **69**
Шиплюк А.Н., **98**
Шмидт А.А., **79, 87**
Щепанюк Б.А., **21, 22, 93, 94, 96**
Щербак Н.В., **36**
Щур Н.А., **99**
Эндер И.А., **24**
Яковчук М.С., **9, 31, 41**

СОДЕРЖАНИЕ

Е.А. Нагнибеда. Сергей Васильевич Валландер и его научная школа	3
С.З. Аджиев, В.В. Веденяпин, В.В. Казанцева. Н-теорема по Больцману и Пуанкаре	4
С.З. Аджиев, В.В. Веденяпин, В.В. Казанцева. Экстремали Больцмана и эргодическая проблема по Пуанкаре и Гиббсу	5
А.Л. Адрианов. О влиянии краевого эффекта на эволюцию фронта скачка уплотнения в неоднородном потоке вязкого теплопроводного газа	6
Г.А. Акимов. Основные направления развития газодинамических исследований в БГТУ – «Военмех» ...	7
О.А. Аксенова, И.А. Халидов. Аэродинамические характеристики полигауссовской шероховатой поверхности в разреженном газе	8
М.М. Алексеева, М.С. Яковчук. Аэродинамика управляемого снаряда с использованием рулевого управления	9
В.В. Аристов, С.А. Забелок, А.А. Фролова. Неклассический перенос в задачах для кинетических уравнений с неравновесными граничными условиями	10
О.В. Барина, Р.Н. Мирошин. Уравнения для плотности распределения некоторых марковских процессов	11
А.С. Барышников, И.В. Басаргин, Н.О. Безверхний, С.В. Бобашев, Н.А. Монахов, П.А. Попов, В.А. Сахаров, М.В. Чистякова. Распределение заряженных частиц вблизи фронта ударной волны в тлеющем разряде	12
А.Н. Бестужева, А.Л. Смирнов. Влияние начальных условий на динамику распространения диффундирующего вещества	13
Г.Г. Бильченко, Н.Г. Бильченко. Обратные задачи математического моделирования эффективного управления тепломассообменом и трением на проницаемых поверхностях гиперзвуковых летательных аппаратов	14
Г.Г. Бильченко, Н.Г. Бильченко. Прямые задачи математического моделирования эффективного управления тепломассообменом и трением на проницаемых поверхностях гиперзвуковых летательных аппаратов	15
В.И. Богатко, Е.А. Потехина. Об одном методе интегрирования уравнений, описывающих течение газа за фронтом сильной ударной волны	16
Р.В. Богомолов. Экспериментальное изучение вращательных колебаний осесимметричных тел в воздушном потоке	17
Н.Ю. Быков, Ю.Е. Горбачев, С.А. Фёдоров. Прямое статистическое моделирование процессов формирования малых кластеров в свободных струях	18
К.Н. Волков, В.Н. Емельянов, И.В. Тетерина. Визуализация вихревых течений в вычислительной газовой динамике	19
Ю.Н. Григорьев, И.В. Ершов. Устойчивость и подавление турбулентности в релаксирующих молекулярных газах	20
В.Г. Габдылхакова, А.И. Цветков, Б.А. Щепанюк. Аэродинамическая труба АТ-11: интеграция РIV-метода в аэродинамический эксперимент	21
В.Г. Габдылхакова, А.И. Цветков, Б.А. Щепанюк. Аэродинамическая труба АТ-11: моделирование ветровых потоков в дозвуковой аэродинамической трубе с открытой рабочей частью	22
А.М. Гайфуллин. Нестационарные вихрепотенциальные течения	23
А.Б. Герасименко, И.А. Эндер, Л.А. Бакалейников, Е.Ю. Флегонтова. Расчет функции распределения ионов слабоионизованного газа во внешнем электрическом поле моментным методом для различных потенциалов взаимодействия	24
Ю.Е. Горбачев. Уравнения неравновесной химической кинетики	25
Ю.Е. Горбачев. Неравновесная квазихимическая модель нуклеации	26
Ф.С. Горенский. Определение содержания оксидов азота в продуктах сгорания трубчатых печей	27
К.С. Груздев. К задаче обтекания бесконечного клина сверхзвуковым потоком газа	28
Ю.Ф. Гунько, Н.А. Гунько. Структура электрических полей вблизи поверхностей изолированных тел в условиях эмиссии в глубокий вакуум	29
Ю.М. Даль. О задачах Гильберта – Привалова в плоской теории упругости	30
В.Н. Емельянов, М.С. Яковчук, Н.А. Брыков. Нестационарное течение в сопле с изменяемой геометрией	31
Н.Н. Ермолаева, Г.И. Курбатова. О расчете параметров модели неустановившегося турбулентного неизотермического течения газа в трубах	32
В.М. Жданов, А.А. Степаненко. Процессы релаксации и переноса тяжелых частиц в частично ионизированной молекулярной плазме	33

В.И. Запрягаев, И.Н. Кавун. Анализ структуры сверхзвукового отрывного течения с использованием уравнения завихренности	34
М.А. Засимова, Н.Г. Иванов. Численное моделирование вентиляции замкнутого помещения в условиях тестового эксперимента	35
В.Д. Захматов, М.В. Чернышов, Н.В. Щербак, И.А. Попок. Системы импульсной многоплановой защиты	36
В.А. Истомин, А.Г. Карпенко, О.В. Корниенко, А.А. Косарева, О.В. Кунова, Е.В. Кустова, М.А. Мехоношина, М.Н. Набокова, Г.П. Облапенко, К.В. Папина, Л.А. Пузырева, А.С. Савельев. КАРРА – программный комплекс для численного моделирования физико-химических свойств сильнонеравновесных течений газов	37
В.А. Истомин, Е.В. Кустова. Поуровневая кинетика и перенос в ионизованных атомарных газах с электронным возбуждением	38
А.Г. Карпенко, В.А. Лашков, И.Ч. Машек, Р.С. Хоронжук. Экспериментальные исследования аэродинамики тела в условиях локального энергоподвода в сверхзвуковой поток	39
Д.В. Кауфман, А.Н. Рябинин. Влияние формы головной части тела вращения на его вращательные аэродинамические производные	40
Ю.В. Каун, М.С. Яковчук. Сравнение силового воздействия сверхзвуковой струи на преграды различной формы	41
А.В. Кашеваров, Г.В. Моллесон, А.Л. Стасенко. Эвристические модели и численные исследования взаимодействия микрочастиц с поверхностью тела в двухфазном потоке	43
С.В. Кириловский, Т.В. Поплавская. Управление возмущениями гиперзвукового пограничного слоя с использованием волнистой поверхности	43
Н.А. Киселев. Исследование вращательных колебаний цилиндра с соосным диском в воздушном потоке	44
Е.В. Колесник. Сопоставление работоспособности скалярных и квазиодномерных ограничителей при решении тестовых задач на неструктурированных сетках	45
А.Ф. Колесников. Эффективный подход к описанию переноса тепла и многокомпонентной диффузии в частично ионизованных смесях газов при наличии магнитного поля	46
А.А. Косарева, Е.А. Нагнибеда. Неравновесная диссоциация и колебательная кинетика в ударно нагретой смеси $\text{CO}_2/\text{CO}/\text{O}$	47
А.А. Крылов. Экспериментальные исследования по динамике разреженного газа в лаборатории газовой динамики СПбГУ	48
А.Н. Кудрявцев, Д.В. Хотяновский. Численное моделирование вязкого течения в ударной трубе	49
А.Н. Кудрявцев, Д.В. Хотяновский. Численное исследование развития неустойчивых возмущений и перехода к турбулентности в сверхзвуковом пограничном слое	50
М.М. Кузнецов, Ю.Д. Кулешова, С.В. Матвеев, В.Е. Молостин. Аналитические модели нелинейных процессов и релаксации в ударно-сжатых газах	51
М.М. Кузнецов, Ю.Д. Кулешова, Ю.Г. Решетникова, Л.В. Смотрова. Анализ высокоскоростной поступательной неравновесности на основе бимодального и эллипсоидального распределений пар молекул в ударной волне	52
Л.С. Лаврищева, В.Н. Новосёлов. Оптимизация элементов судового движителя	53
Т.А. Лапушкина, А.В. Ерофеев. Взаимодействие ударной волны с ионизованной средой	54
Г.Е. Левченко, А.П. Маштаков, В.Л. Бакулев. Численные методы для расчета динамики плавучих сооружений	55
И.И. Липатов. Некоторые модели динамики вязкого газа	56
В.М. Мальков, А.А. Дук, А.В. Емельянова. Оптимизация геометрии активного диффузора для сверхзвукового химического кислород-йодного лазера	57
В.М. Мальков, А.В. Емельянова, А.А. Дук. Многосопловой эжектор (м-эж): оптимизация геометрии	58
О.В. Маракуева, Ю.М. Циркунов. Моделирование течения во входных ступенях компрессора высокого давления авиадвигателя	59
С.К. Матвеев. О модели турбулентности на основе уравнения для вязкости	60
С.К. Матвеев, Н.Ж. Джайчибеков, Б.С. Шалабаева. Турбулентное двухслойное течение в трубе	61
Л.Н. Микаилова, Ю.М. Циркунов. Обтекание частиц несферической формы при умеренных числах Рейнольдса	62
С.Г. Миронов. Физическое моделирование сверхзвукового обтекания тел с нагреваемыми пористыми вставками	63
А.А. Моисеев, А.В. Савин. Модификация $k-\omega$ -SST модели турбулентности для расчетов фильтрационных течений и горения в пористых средах	64
Е.А. Нагнибеда, К.В. Папина. Поуровневое описание течений воздуха в соплах	65

Е.А. Нагнибеда, И.З. Шарафутдинов. Многотемпературная химическая и колебательная кинетика в потоках воздуха за ударными волнами	66
М.С. Нурмухамбетов, Ю.М. Циркунов. Численное моделирование высокоскоростного движения тел в водной среде.....	67
В.А. Павловский, А.Л. Чистов, К.В. Шестов. Течение в плоском канале со стенками разной шероховатости.....	68
Г.В. Павилайнен, Д.В. Лачугин. Исследование влияния давления льда на вертикальные опоры гидротехнических сооружений из пластически анизотропных материалов	69
В.А. Павловский. О связи профилей скоростей в универсальных координатах с кривыми сопротивления при проявлении эффекта Томса	70
Д.О. Панов, В.В. Рис, Е.М. Смирнов. URANS и LES расчеты турбулентного течения и потерь давления в канале с резким поворотом на 180°	71
М.Ю. Погосбекян, А.Л. Сергиевская. Траекторные расчеты и эксперимент при выборе моделей диссоциации в условиях термической неравномерности.....	72
Т.В. Поплавская, С.В. Кириловский, С.Г. Миронов, И.С. Цырюльников. Высокопористые материалы в сверхзвуковой аэродинамике	73
П.А. Попов, Б.И. Резников, В.А. Сахаров. Измерение тепловых потоков датчиками на анизотропных термоэлементах в газодинамическом эксперименте	74
Э.В. Прозорова. Влияние эффектов самодиффузии и термодиффузии на фронт ударной волны	75
Ст. Радев, С. Табакова, Н. Кутев. Осциллирующее неньютоновское течение в плоском канале.....	76
А.К. Ребров. Проблемы физико-химической кинетики при газофазном осаждении углеродных структур	77
Ю.А. Резунков, А.А. Шмидт. Лазерная тяга для полетов в атмосфере	78
А.И. Решетова, Т.В. Поплавская, С.В. Кириловский, И.С. Цырюльников. Об эффективности подавления возмущений пористым звукопоглощающим покрытием модели в потоке смеси колебательно-возбужденных газов.....	79
О.А. Рогозин. Консервативный проекционный метод решения уравнения Больцмана для неравномерных сеток.....	80
О.А. Рогозин. Численный анализ медленных неизотермических течений слаборазреженного газа	81
О.А. Рогозин. Математическая теория уравнения Больцмана. Обзор современных достижений	82
Д.А. Романюк, Ю.М. Циркунов. Нестационарные течения запыленного газа с крупномасштабной вихревой структурой в решетках.....	83
В.Я. Рудяк, Е.В. Лежнев. Молекулярное стохастическое моделирование процессов переноса в газах ...	84
А.Н. Рябинин. Конфигурация скачков уплотнения в каналах с центральным телом	85
А.И. Ряховский, В.И. Антонов, А.А. Шмидт. Численное моделирование МГД управления гиперзвуковым потоком	86
М.А. Рыдалевская. Обобщенные уравнения Больцмана–Улинга–Уленбека и их свойства	87
В.А. Титарев. Численное решение кинетического уравнения для задач гиперзвукового обтекания тел потоком разреженного газа	88
Н.М. Терехова. Нелинейные взаимодействия возмущений в рамках слабонелинейной теории в пограничном слое сжимаемого газа при $M=2$	89
Н.М. Терехова. Тангенциальный вдув как метод управления возмущениями в пограничных слоях на пористых поверхностях при $M=2$	90
Т.А. Хантулева, О.Н. Граничин. Эффекты самоорганизации для снижения силового воздействия на летательный аппарат в турбулентном потоке	91
А.И. Цветков, Б.А. Щепанюк. Аэродинамическая труба АТ-11 СПбГУ: модернизация конструктивных узлов аэродинамического тракта	92
А.И. Цветков, Б.А. Щепанюк. Аэродинамическая труба АТ-11 СПбГУ: термоанемометрические измерения.....	93
А.И. Цветков, Б.А. Щепанюк. Аэродинамическая труба АТ-11 СПбГУ: измерение стационарных и дифференциальных быстропеременных давлений	94
Ю.М. Циркунов, М.А. Лобанова, А.И. Цветков, Б.А. Щепанюк. Вихревой след за магистральным самолетом во время движения по взлетно-посадочной полосе при взлете и посадке.....	95
И.С. Цырюльников, С.В. Кириловский, Т.В. Поплавская, А.И. Решетова. Определение модового состава возмущений сверхзвукового потока	96
А.Н. Шиплюк, С.В. Лукашевич, С.О. Морозов. Стабилизация ламинарных высокоскоростных пограничных слоев на конусах пассивными пористыми покрытиями	97
Н.А. Щур, Е.М. Смирнов. Вопросы существования вихревой дорожки кармана при сходе турбулентного пограничного слоя с утолщенной задней кромки гидропрофиля.....	98

Д.С. Яцухно, С.Т. Суржиков. Расчетное исследование обтекания высокоскоростного летательного аппарата при различных углах атаки и скольжения	99
ПЕРЕЧЕНЬ АВТОРОВ.....	100

Научное издание

Всероссийская конференция по аэрогидродинамике,
посвященная 100-летию Сергея Васильевича Валландера

Тезисы докладов

Подписано в печать 19.10.2017. Формат 60х90/8.
Печать цифровая. Усл. печ л. 13,25. Тираж 85 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии Издательства СПбГУ
199034, Санкт-Петербург, Менделеевска л., д. 5