

Хотяновский Дмитрий Владимирович

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ
СО СЛОЖНЫМИ УДАРНО-ВОЛНОВЫМИ СТРУКТУРАМИ

01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск 2007

Работа выполнена в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор
Иванов Михаил Самуилович

кандидат физико-математических наук,
Кудрявцев Алексей Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Усков Владимир Николаевич

доктор физико-математических наук, профессор
Федорова Наталья Николаевна

Ведущая организация: Институт математического моделирования РАН

Защита состоится “13” ноября 2007 г. в ___ ч. __ мин. на заседании
Диссертационного совета Д 003.035.02 в Институте теоретической
и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу:
630090, Новосибирск, ул. Институтская 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТПМ СО РАН.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный печатью,
просим высылать по адресу: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1,
ИТПМ СО РАН, ученому секретарю диссертационного совета Д003.035.02.

Автореферат разослан “___” _____ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук

Засыпкин И.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Благодаря быстрому прогрессу вычислительной техники и появлению новых эффективных алгоритмов сквозного счета стало возможным проводить на основе численного решения уравнений Эйлера и Навье – Стокса исследование сверхзвуковых течений со сложными взаимодействиями ударных волн и других газодинамических особенностей. Одной из таких задач является задача об отражении скачка от твердой поверхности или плоскости симметрии. Исследование критериев перехода между регулярным и маховским отражением было начато в 40-х годах прошлого века в работах Дж. фон Неймана, который показал, что для достаточно сильных ударных волн существует диапазон углов падения скачка $\alpha_N < \alpha < \alpha_d$ (область двойного решения), внутри которого теоретически возможно существование обоих типов отражения. Вопрос о том, при каком же именно угле будет действительно происходить переход, оставался без точного ответа в течение нескольких последующих десятилетий. Господствовало мнение, что, скорее всего, при стационарном отражении ударных волн маховское отражение возникает, как только это становится возможным, т. е. вблизи α_N . В 1979 г. американским ученым Х. Хорнунгом была выдвинута гипотеза о возможности существования гистерезиса при изменении угла падения скачка. Согласно этой гипотезе, реализация того или иного типа отражения в области двойного решения определяется предысторией процесса: при увеличении α регулярное отражение должно сохраняться в области двойного решения вплоть до значения α_d , где происходит переход к маховскому отражению. Наоборот, при уменьшении угла падения маховское отражение должно сохраняться вплоть до значения α_N , где происходит переход к регулярному отражению. Однако эксперименты (Hornung, Robinson, 1982) показали, что в области двойного решения всегда наблюдалось маховское отражение, переходы от регулярного отражения к маховскому и обратно происходили вблизи α_N . Интерес к этой проблеме значительно возрос после того, как в 1995 г. было численно показано существование гистерезиса регулярного и маховского отражения (Ivanov et al., 1995) в полном соответствии с гипотезой Хорнунга. В том же году было также получено первое экспериментальное свидетельство существования гистерезиса (Chroun et al., 1995): при увеличении угла α переход от регулярного к маховскому отражению происходил на несколько градусов выше α_N , хотя и значительно ниже α_d . После этого в различных лабораториях мира было проведено большое количество исследований. В большинстве численных работ переход от регулярного к маховскому отражению происходит вблизи угла α_d , обратный переход – вблизи α_N . В экспериментах наблюдается большой разброс углов перехода к маховскому отражению. Объяснение причин расхождения экспериментальных данных друг с другом и с результатами численного моделирования является весьма актуальной задачей. В аэродинамическом эксперименте имеется большое число факторов, которые могут влиять на переход: возмущения потока аэродинамической трубы; трехмерность течения; нестационарные эффекты, связанные с изменением угла атаки клина, генерирующего падающий скачок; возможная асимметрия течения из-за неточной установки модели; и др. Кроме того, для понимания механизма перехода необходим ана-

лиз влияния некоторых физических особенностей течения: волн разрежения, исходящих с задней кромки клина; слоев смешения, исходящих из тройных точек при маховском отражении скачка; и т.п.

Цели работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является численный анализ особенностей течения, важных для понимания механизма перехода между регулярным и маховским отражением скачков уплотнения. В соответствии с этим представляется необходимым решить следующие задачи.

Исследовать нестационарный процесс перехода между регулярным и маховским отражением при непрерывном изменении угла клиньев. Нужно получить ответ на вопрос, как скорость вращения клиньев влияет на углы перехода.

Проанализировать влияние конечного размаха клина на конфигурацию регулярного и маховского отражений и углы переходов.

Исследовать возможность существования гистерезиса регулярного и маховского отражения при изменении числа Маха набегающего потока.

Изучить особенности асимметричного взаимодействия скачков, проверить существование теоретически возможных конфигураций взаимодействия.

Исследовать процесс перехода в условиях взаимодействия скачка с волной разрежения.

Исследовать возможность инициировать переходы между регулярным и маховским отражением в области двойного решения с помощью возмущений потока.

Исследовать механизмы неустойчивости слоя смешения и двух параллельных слоев смешения. Определить влияние параметров течения (чисел Маха смешивающихся потоков) на характер развития неустойчивости.

Методы исследования. Рассматриваемая задача представляет значительные трудности для численного моделирования. Это связано как с самой природой изучаемого явления (неединственность стационарного состояния, его зависимость от предыстории), так и с тем, что расчеты необходимо выполнять при больших числах Маха потока, когда поле течения включает сильную, почти прямую ударную волну (ножку Маха) с замкнутой зоной дозвукового течения за ней и область очень сильного разрежения с подветренной стороны клина. Во многих случаях, особенно для сравнения с экспериментом, необходимо проводить трехмерные расчеты, учитывая конечный размах клиньев – генераторов ударных волн.

Моделирование процессов, происходящих при отражении скачков, проводится путем численного решения нестационарных уравнений Эйлера с помощью современной схемы сквозного счета на основе MUSCL TVD (монотонная с разностями против потока и уменьшением полной вариации решения) реконструкции высокого порядка точности (Yamamoto, Daiguji, 1993) и алгоритма HLLE (Harten – Lax – van Leer – Einfeldt) приближенного решения задачи Римана. Этот численный метод обладает высокой надежностью при моделировании течений с сильными ударными волнами. Высокий порядок точности позволяет адекватно воспроизводить тонкие детали течения, такие как вихревые неоднородности. При численном моделировании развития неустойчивостей в слоях смешения используется другой алгоритм, основанный на WENO (суще-

ственно неосцилляторная с весами) схеме пятого порядка (Jiang, Shu, 1995). WENO схемы позволяют надежно рассчитывать течения с ударными волнами и, в отличие от TVD схем, сохраняют высокий порядок точности на гладких экстремумах решения. Эти схемы являются наиболее подходящими для корректного описания волновых процессов, таких как развитие волн неустойчивости в свободных сдвиговых течениях. Для дискретизации вязких членов уравнений Навье–Стокса используется центрально-разностная аппроксимация численных потоков на компактном шаблоне. Оба численных алгоритма являются явными, для интегрирования по времени используются схемы Рунге–Кутты. Для решения трехмерных задач численные алгоритмы были распараллелены методом декомпозиции расчетной области.

Научная новизна. В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Показано существование гистерезиса регулярного и маховского отражений при непрерывном изменении угла клина, исследовано влияние скорости вращения на углы перехода.
2. Обнаружено существование гистерезиса перехода при изменении числа Маха набегающего потока.
3. Детально изучена пространственная трехмерная структура регулярного и маховского отражений.
4. Полностью подтверждено существование теоретически возможных конфигураций асимметричного маховского взаимодействия. Обнаружено существование специфической конфигурации асимметричного регулярного взаимодействия, в которой один из отраженных скачков принадлежит сильному семейству.
5. Показано, что локализованные возмущения плотности в набегающем потоке могут вызывать переходы между регулярным и маховским отражением в области двойного решения.
6. Показана возможность управляемого перехода от регулярного к маховскому отражению с помощью импульсного подвода энергии в поток.
7. Показан существенно различный механизм нелинейного развития неустойчивости в слое смещения и плоской струе при дозвуковых и сверхзвуковых конвективных числах Маха. Также показано, что синусоидальные возмущения являются определяющими для неустойчивости плоской струи как при дозвуковых, так и сверхзвуковых конвективных числах Маха.

Практическая ценность. Полученные результаты способствуют значительному продвижению в понимании особенностей течения и механизма перехода между регулярным и маховским отражениями. Результаты исследований имеют большое значение для широкого круга приложений в аэрокосмической технике и энергетике, в частности при разработке воздухозаборников перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов, анализе течений газа в соплах, сверхзвуковых струях и других газодинамических устройствах.

Достоверность результатов. Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается использованием апробированных численных алгоритмов, подтверждается сравнением с существующими теоретическими решениями, согласованием результатов с экспериментальными данными.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты численного исследования перехода между регулярным и маховским отражением скачка при непрерывном изменении угла клина, зависимость углов перехода от скорости вращения клина.
2. Переход между регулярным и маховским отражением скачка при изменении числа Маха набегающего потока, гистерезис перехода.
3. Результаты исследования влияния конечного размаха клина на регулярное и маховское отражение.
4. Результаты исследования асимметричного взаимодействия скачков, гистерезис перехода, конфигурация регулярного взаимодействия с отраженным скачком сильного семейства.
5. Результаты исследования влияния догоняющей волны разрежения на падающий скачок; переход между регулярным и маховским отражением при изменении геометрических параметров задачи в условиях взаимодействия с догоняющей волной разрежения.
6. Результаты численного моделирования перехода между регулярным и маховским отражением под действием локализованного возмущения плотности, необходимые для этого пороговые амплитуды возмущений.
7. Результаты исследования влияния импульсного подвода энергии в поток на регулярное и маховское отражение, управляемый переход к маховскому отражению.
8. Характеристики линейной устойчивости сжимаемого слоя смещения и плоской изобарической струи со спутным потоком; результаты численного моделирования нелинейного развития волн неустойчивости.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах ИТПМ СО РАН, семинаре Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН, научном семинаре Отдела вычислительных наук Исследовательской лаборатории ВВС США AFRL/VAAC, а также следующих ведущих российских и международных научных конференциях: Всероссийских съездах по теоретической и прикладной механике (Пермь 2001, Н.-Новгород 2006), Международных конференциях по методам аэрофизических исследований ISMAR (Новосибирск, 1998, 2000), Международном семинаре по устойчивости течений гомогенных и гетерогенных жидкостей (Новосибирск, 1998), Международных симпозиумах по ударным волнам (ISSW22, Лондон, Великобритания, 1999, ISSW23, Форт-Уэрт, США, 2001, ISSW26, Геттинген, Германия 2007), VIII Европейской конференции по турбулентности (Барселона, Испания, 2000), Международной конференции по параллельным вычислениям Parallel CFD (Москва, 2003), V Международном семинаре по взаимодействию ударных волн и вихрей ISWI (Гаосюн, Тайвань, 2003), Европейском конгрессе по вычислительным методам в прикладных науках ECCOMAS'2004 (Ювяскюля, Финляндия, 2004).

Публикации. Основные результаты опубликованы в 34 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. При выполнении работ по теме диссертации диссертант принимал активное участие в постановке задач, обсуждении результатов,

подготовке печатных работ и докладов на конференциях. Основные результаты диссертации получены автором, им произведены расчеты для всех рассмотренных в работе задач. Результаты совместных работ представлены в диссертации с согласия соавторов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 90 наименований. Работа содержит 148 страниц и 73 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их практическая ценность, представлены положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

В первой главе формулируется математическая модель течения, основанная на уравнениях Эйлера и Навье – Стокса сжимаемого газа, излагаются методы численного решения систем уравнений. Описанные методы используют для пространственной дискретизации конвективных потоков конечно-объемную MUSCL TVD схему 4-го порядка точности или WENO схему 5-го порядка. Здесь же обсуждаются вопросы постановки граничных условий, параллельной реализации алгоритмов. В конце главы приведены результаты тестовых расчетов, проведенных с целью верификации используемых численных алгоритмов путем сравнения с существующими точными аналитическими решениями. Проведенные тестовые расчеты включают решение одномерной задачи о распаде разрыва (задачи Сода и Лакса); одномерную задачу о внутренней структуре ударной волны – одну из немногих задач газовой динамики, для которой существует аналитическое решение уравнений Навье – Стокса (решение Беккера); двумерную задачу об отражении косога скачка от плоскости симметрии; а также задачу о распространении акустической волны в сверхзвуковом потоке. Путем сравнения с точными решениями показаны преимущества использования схем высокого порядка точности для моделирования течений со сложными конфигурациями газодинамических разрывов. Используемые численные методы позволяют надежно улавливать ударные волны и корректно воспроизводить другие газодинамические особенности, такие как контактные разрывы и волны разрежения. На примере распространения акустической волны показаны преимущества использования WENO схемы 5-го порядка точности для моделирования течений с волновыми процессами. В отличие от TVD схемы, которая теряет точность вблизи гладких экстремумов решения, WENO схема корректно воспроизводит синусоидальное решение во всей расчетной области.

Вторая глава посвящена численному исследованию перехода между регулярным и маховским отражением скачка при параметрах потока, соответствующих области двойного решения. Исследуется нестационарный процесс перехода при непрерывном изменении угла клина. Показано существование гистерезиса перехода при изменении угла клина (рис. 1): при увеличении угла клина в области двойного решения сохраняется регулярное отражение. При $\theta > \theta_d$ происходит переход к маховскому отражению. При последующем уменьшении θ маховское

отражение, в свою очередь, сохраняется при $\theta_N < \theta < \theta_d$. При $\theta < \theta_N$ происходит переход к регулярному отражению.

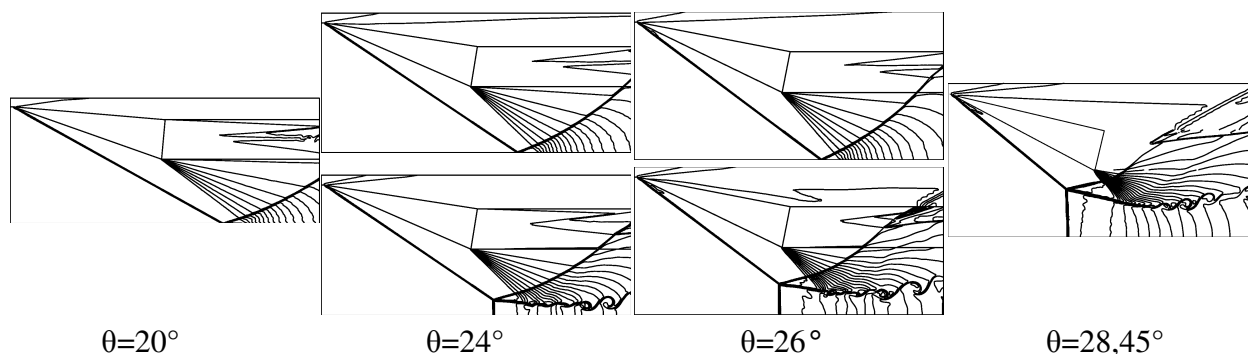


Рис. 1. Петля гистерезиса при непрерывном изменении угла клина. Число Маха потока $M=5$, скорость вращения клина $\omega w/U_\infty=2 \times 10^{-3}$. Изолинии плотности. Теоретические критерии $\theta_N=20,9^\circ$, $\theta_d=27,8^\circ$.

Исследовано влияние скорости вращения клина $\omega w/U_\infty$ (здесь w – длина клина, U_∞ – скорость набегающего потока) на углы перехода $\theta_{RR \rightarrow MR}$ от регулярного к маховскому отражению и $\theta_{MR \rightarrow RR}$ обратного перехода, представленные в таблице. При больших скоростях вращения происходит значительное отставание угла падающего скачка от его стационарного значения, соответствующего текущему углу клина. Это приводит к задержке переходов между регулярным и маховским отражением. Углы переходов, полученные при малой скорости вращения $\omega w/U_\infty=2,0 \times 10^{-4}$, оказываются близки к углам, полученным в расчетах с помощью квазистационарной процедуры, в которой угол клина меняется ступенчато с получением стационарного решения при каждом значении угла. При этом угол перехода к маховскому отражению $\theta_{RR \rightarrow MR}$ стремится к теоретическому значению $\theta_d=27,8^\circ$. Угол обратного перехода $\theta_{MR \rightarrow RR}$ оказывается несколько выше критерия Неймана $\theta_N=20,9^\circ$, что связано с недостаточным разрешением сетки. Как показали квазистационарные расчеты на последовательности сгущающихся сеток, угол скачка, соответствующий переходу к регулярному отражению, приближается к углу Неймана α_N при измельчении шага.

Таблица. Углы перехода при разных скоростях вращения клина

$\omega w/U_\infty$	$\theta_{RR \rightarrow MR}$, град.	$\theta_{MR \rightarrow RR}$, град.
Квазистац. режим	28,0	22,3
2×10^{-4}	28,05	22,10
2×10^{-3}	28,45	21,25
1×10^{-2}	29,75	18,88

Проведено численное моделирование перехода между регулярным и маховским отражением при изменении числа Маха набегающего потока. При этом угол клина оставался фиксированным, а угол скачка менялся в соответствии с числом Маха потока. Как показывают результаты расчетов (рис. 2), в данном случае также возможен гистерезис регулярного и маховского отражения.

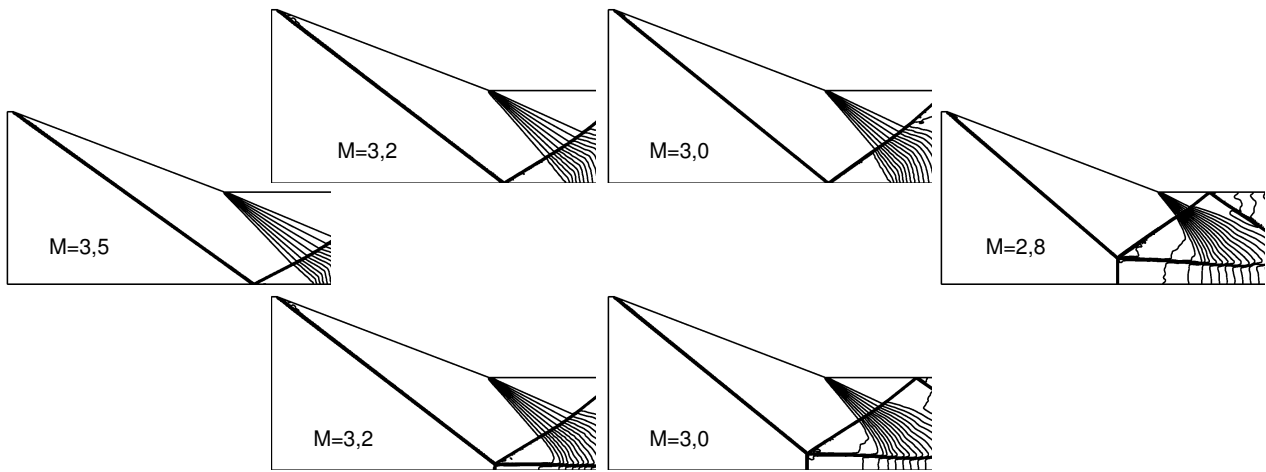


Рис. 2. Переход от регулярного к маховскому отражению при изменении числа Маха потока и фиксированном угле клина $\theta=20,5^\circ$

Число Маха изменялось от 3,5 до 2,8, и затем обратно к исходному значению. Значения числа Маха, соответствующие теоретическим критериям Неймана и максимального поворота потока в данном случае, равны соответственно 3,47 и 2,84. Первый расчет этой серии при $M=3,5$ соответствует области, где возможно только регулярное отражение, которое и было получено численно. При уменьшении числа Маха потока регулярное отражение сохраняется во всей области двойного решения. Переход к маховскому отражению происходит при изменении M от 2,9 к 2,8, т.е. вблизи значения, соответствующего критерию максимального угла поворота.

При последующем обратном увеличении числа Маха маховское отражение сохраняется в области двойного решения, и при возвращении числа Маха к исходному значению происходит переход к регулярному отражению.

На основе результатов трехмерных численных расчетов проведен детальный анализ пространственной конфигурации скачков при регулярном и маховском отражении, и влияния трехмерности течения на переход. Численное моделирование позволяет реконструировать трехмерную форму ударных волн. На рис. 3 показаны формы ударных волн для регулярной и маховской конфигураций, полученные при числе Маха потока $M=4$ и угле падения скачка $\alpha=38^\circ$ внутри области двойного решения (при $M=4$ $\alpha_N=33,4^\circ$, $\alpha_d=39,2^\circ$). Важной деталью регулярной конфигурации является существование периферийного маховского отражения

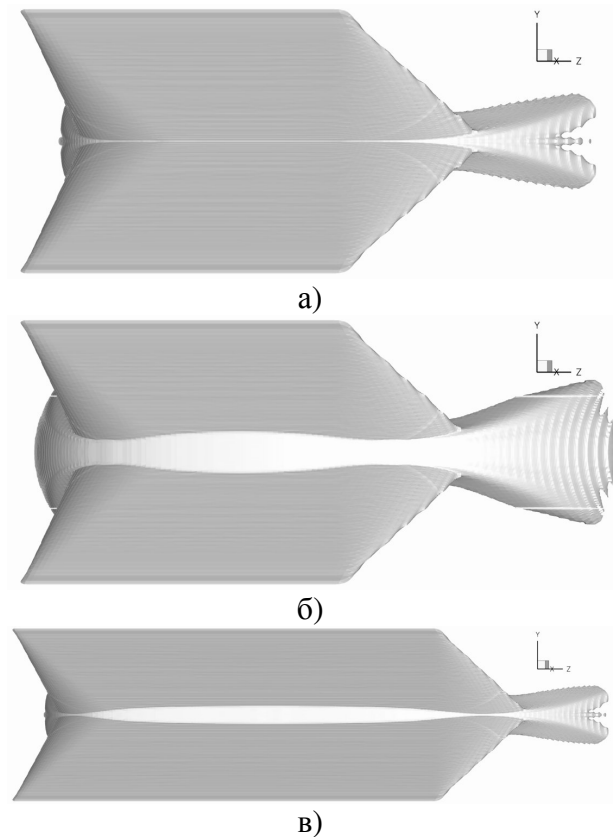


Рис.3. Трехмерные ударно-волновые конфигурации. Изоповерхности плотности $\rho/\rho_\infty=2,2$ для регулярного (а), маховского (б) и комбинированного (в) отражения

со сверхзвуковым течением за поверхностью маховского скачка. Наиболее неожиданной деталью трехмерного маховского отражения является немонотонное изменение высоты маховского скачка в направлении по размаху. Эта высота максимальна в вертикальной плоскости симметрии, ближе к периферии она уменьшается, а затем, на самой периферии, быстро растет, образуя периферийное маховское отражение. Оказывается, что если высота ножки Маха в центральной плоскости достаточно мала, то возможна особая конфигурация ударных волн с комбинированным типом отражения: маховским – вблизи вертикальной плоскости симметрии, регулярным – на некотором расстоянии от нее и снова маховским – на периферии. Существование подобной конфигурации было подтверждено в недавних экспериментах, проведенных в ИТПМ СО РАН, с помощью визуализации течения методом «лазерного ножа».

На рис. 4 приведены нормированные на длину клина высоты ножки Маха, полученные в трехмерных численных расчетах.

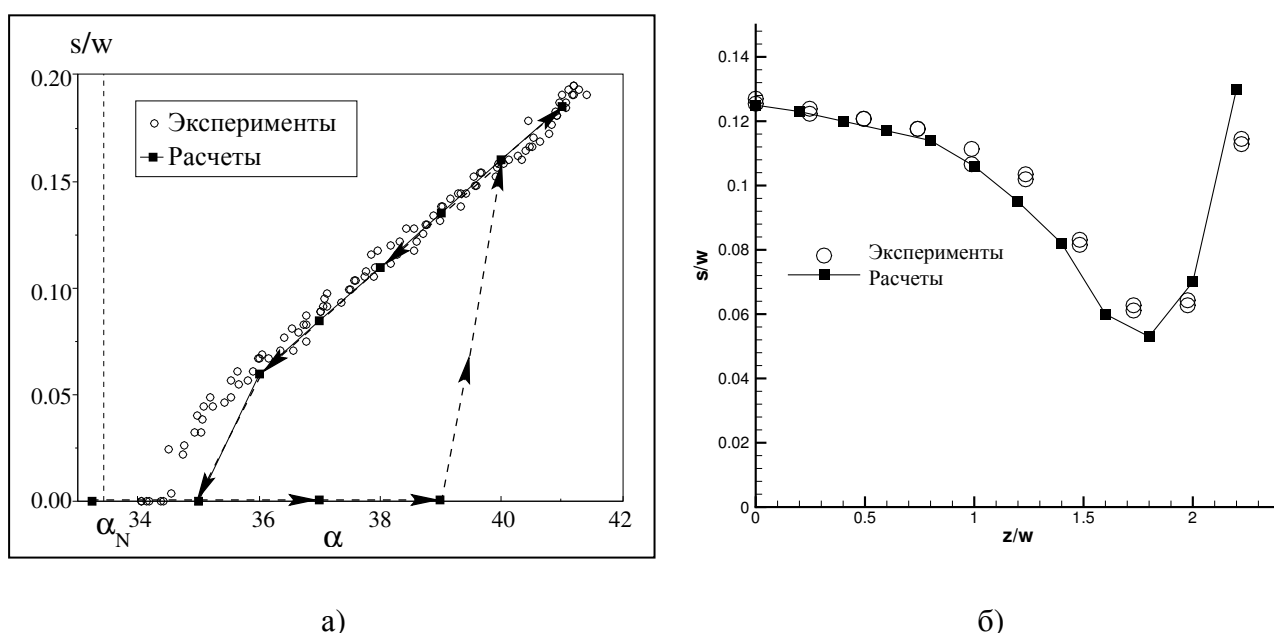


Рис.4. Высоты маховского скачка в зависимости от угла падения (а) и значения трансверсальной координаты (б), полученные в трехмерных расчетах, в сравнении с данными экспериментов ИТПМ СО РАН

Для сравнения приведены также экспериментальные данные, полученные в ИТПМ СО РАН при соответствующих параметрах. Число Маха потока $M=4$, соответствующие теоретические критерии $\alpha_N = 33,4^\circ$, $\alpha_d = 39,2^\circ$. При увеличении угла клина, и соответственно угла падения скачка, регулярное отражение сохраняется в области двойного решения. На рис.4а регулярному отражению соответствует нулевая высота ножки Маха. Переход к маховскому отражению происходит при увеличении α от 39° до 40° . При последующем уменьшении α маховское отражение сохраняется вплоть до углов, близких к α_N , где происходит переход к регулярному отражению. Таким образом, результаты численного моделирования дают ясное свидетельство того, что внутри области двойного решения финальный тип отражения зависит от начальных условий, и, так же, как и в двумерных расчетах, существует гистерезис. Более того, углы перехода

находятся в хорошем согласии с теоретическими значениями. На рис. 4б представлено изменение высоты ножки Маха в трансверсальном направлении в сравнении с экспериментальными данными ИТПМ, измеренными с помощью визуализации методом «лазерного ножа» в различных продольных сечениях. Отметим хорошее совпадение экспериментальных и численных зависимостей высоты ножки Маха от координаты по размаху.

Рассмотрены особенности асимметричного взаимодействия скачков. Показано наличие гистерезиса перехода между регулярным и маховским типами взаимодействия при изменении угла атаки одного из клиньев. В расчетах при маховском взаимодействии обнаружены предсказанные ранее теоретически (Li, Ven-Dor, 1999) конфигурации прямого, стационарного и инверсного отражения. Показано существование в некотором диапазоне параметров потока специфической конфигурации регулярного взаимодействия, в которой один из отраженных скачков принадлежит сильному семейству (рис. 5). При этом за сильным отраженным скачком образуется замкнутая дозвуковая область. Ниже по потоку течение ускоряется до сверхзвуковой скорости благодаря влиянию волн разрежения, распространяющихся с задних кромок клиньев.

Проведено численное исследование перехода в условиях взаимодействия падающего скачка с догоняющей волной разрежения. Если расстояние от задней кромки клина до плоскости симметрии g/w превышает некоторое значение $(g/w)_{\max}$, то веер волн разрежения взаимодействует непосредственно с падающим скачком до его отражения от плоскости симметрии, что вызывает искривление скачка и уменьшение локального угла падения на плоскости симметрии. Для этой задачи была численно показана возможность гистерезиса регулярного и маховского отражения при изменении геометрических параметров задачи. На рис. 6 приведены результаты расчетов при числе Маха потока $M=10$ и угле падения скачка $\alpha=44^\circ$, что значительно выше угла $\alpha_d=39,75^\circ$, соответствующего критерию максимального угла поворота потока. Благодаря влиянию волны разрежения локальный угол падения при $g/w=0,747$ становится равным 38° , и становится возможным регулярное отражение скачка, которое и было получено в численном расчете. Затем, расстояние от клина до плоскости симметрии было уменьшено до $g/w=0,637$, что соответствует углу падения на плоскости симметрии 41° , т.е. выше α_d . В результате происходит переход к маховскому отражению. Рисунок 6б показывает установившееся поле

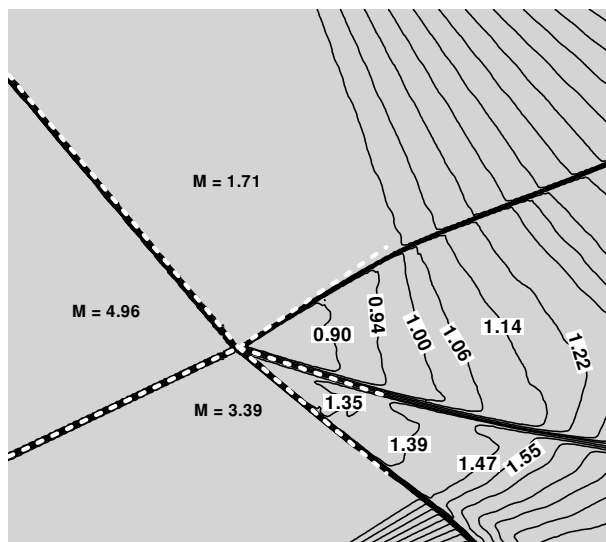


Рис. 5. Конфигурация с отраженным скачком сильного семейства, полученная в численном моделировании асимметричного регулярного взаимодействия при $M=4,96$ и углах клиньев $\theta_1=35^\circ$ и $\theta_2=15,98^\circ$. Изолинии числа Маха. Белые пунктирные линии соответствуют аналитическим углам газодинамических разрывов

течения для маховского отражения, полученное в этом случае. Данный результат подтверждает применимость критерия максимального угла поворота (в смысле локального угла падения) для предсказания перехода от регулярного к маховскому отражению при изменении геометрических параметров задачи в условиях взаимодействия с волной разрежения.

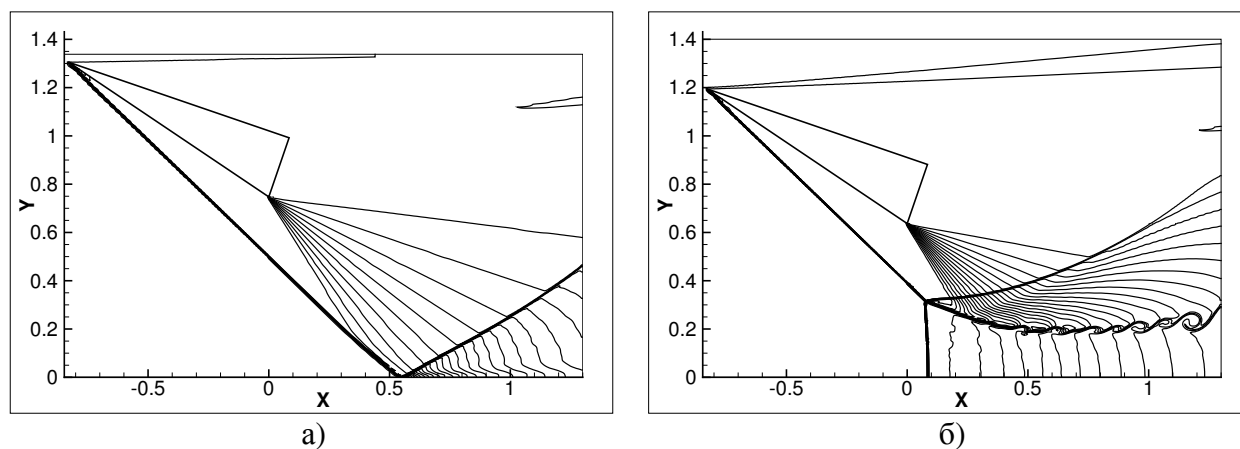


Рис.6. Изолинии плотности для $M=10$, $\alpha=44^\circ$. Регулярное отражение при $g/w = 0,747$ (а), маховское отражение при $g/w = 0,637$ (б)

Третья глава посвящена исследованию влияния возмущений потока на переход между регулярным и маховским отражениями. Рассматривается изобразительное возмущение плотности, локализованное в небольшой области, не оказывающее значительного влияния на структуру течения в целом. Численно исследуется способность таких возмущений вызывать переходы между регулярным и маховским отражениями в области двойного решения. На рис. 7 и 8 приведены результаты численного моделирования взаимодействия возмущения плотности с регулярной и маховской конфигурацией для $M=4$ и угла падения скачка $\alpha=36^\circ$, т.е. внутри области двойного решения ($\alpha_N = 33,4^\circ$, $\alpha_d = 39,2^\circ$). Сначала методом установления по времени рассчитывалась стационарная ударно-волновая конфигурация. Затем на левой границе области вводилось возмущение. Для этого плотность втекающего потока в нескольких ближайших к нижней границе ячейках изменялась на величину $\Delta\rho$. Такое изменение граничных условий сохранялось в течение некоторого времени, после чего возмущение «выключалось», и плотность во всех ячейках на левой границе задавалась равной ее невозмущенному значению ρ_∞ . Механизм, вызывающий смену типа отражения, в обоих случаях один и тот же. Падающая ударная волна преломляется при входе в зону с измененной плотностью. В результате она приходит на нижнюю границу или в тройную точку под иным, чем в отсутствие возмущения, углом. Понижая плотность, можно добиться того, что этот угол станет больше критического угла α_d , рассчитанного по параметрам возмущенного набегающего потока. Это делает переход к маховскому отражению неизбежным. Аналогично, повышая плотность, можно сделать угол, под которым падающая ударная волна приходит в тройную точку, меньше α_N и вызвать, таким образом, переход к регулярному отражению.

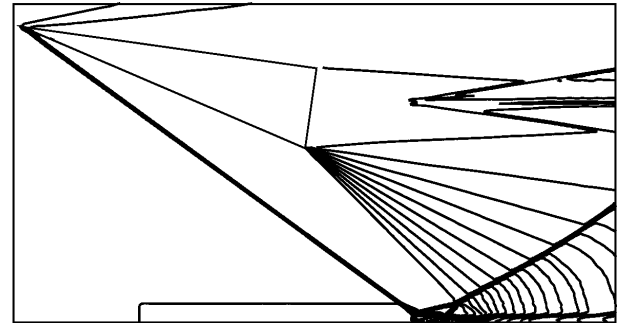
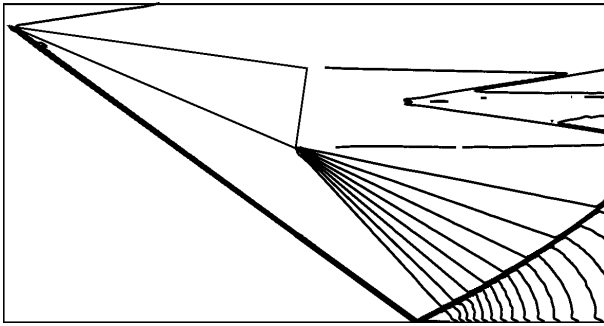


Рис.7. Переход к маховскому отражению под действием возмущения плотности. $M=4$, $\alpha=36^\circ$, амплитуда возмущения плотности $\Delta\rho/\rho_\infty = -0,25$

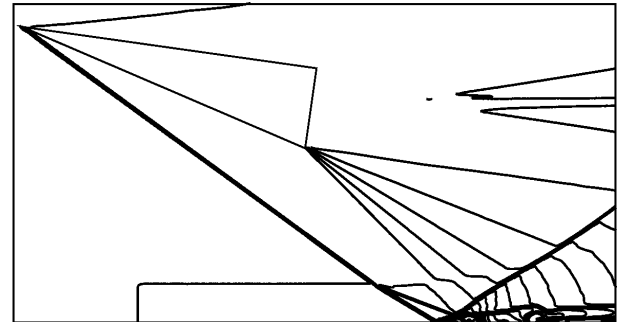
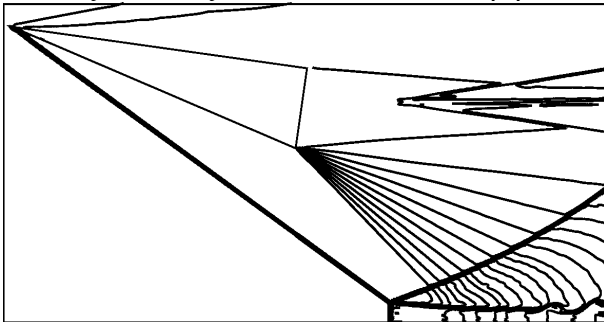


Рис.8. Переход к регулярному отражению под действием возмущения плотности. $M=4$, $\alpha=36^\circ$, $\Delta\rho/\rho_\infty=0,5$

Пороговые амплитуды возмущений необходимые для инициирования переходов, определены аналитически из решения задачи о преломлении скачка в возмущенной области течения и приведены на рис. 9.

Во втором разделе главы рассмотрено влияние импульсного энергоподвода, например, с помощью сфокусированного лазерного импульса, на конфигурацию регулярного и маховского отражения, детально исследован процесс взаимодействия возмущения с трехмерной конфигурацией скачков, показана возможность инициирования перехода от регулярного к маховскому отражению в области двойного решения с помощью данного возмущения (рис. 10). Трехмерные нестационарные расчеты проводились на параллельном суперкомпьютере с использованием от 30 до 120 млн. ячеек сетки. Мгновенное выделение энергии в поток вызывает сильный нагрев газа в области фокального объема, и соответственно — резкое увеличение давления, которое сопровождается образованием взрывной волны. В последующие моменты времени взрывная волна и тепловое пятно взаимодействуют с регулярной конфигурацией скачков. Когда тепловое пятно достигает область отражения скачка, регулярная конфигурация полностью разрушается с

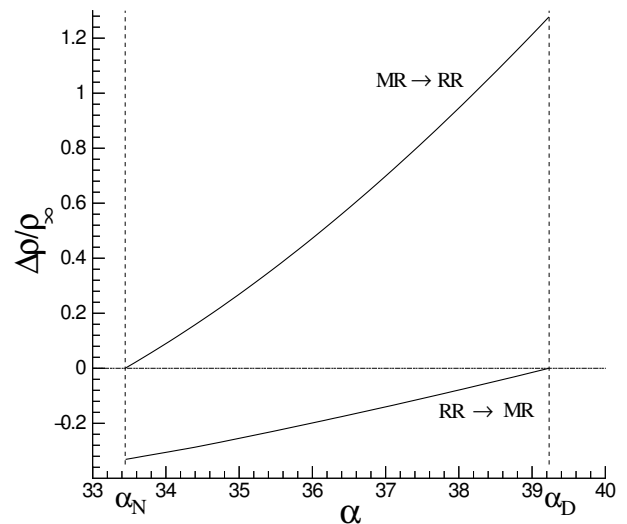


Рис.9. Пороговые амплитуды возмущения плотности необходимые для перехода от регулярного к маховскому ($RR \rightarrow MR$) и от маховского к регулярному отражению ($MR \rightarrow RR$)

образованием сложных ударно-волновых и вихревых структур. Эта конфигурация постепенно трансформируется в маховское отражение скачка.

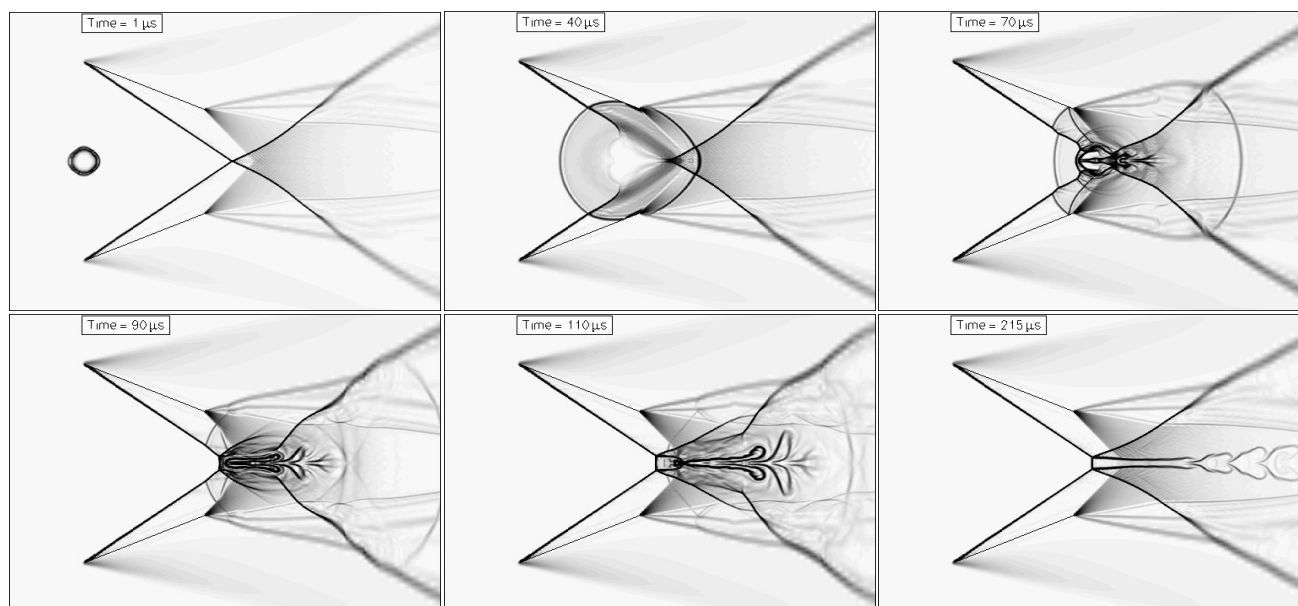
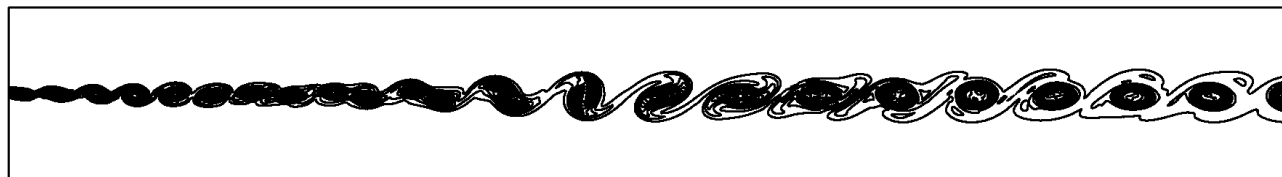


Рис.10. Переход от регулярного к маховскому отражению под действием импульсного энергоподвода в поток. Число Маха потока $M=4$, угол падения скачка $\alpha=36^\circ$. Энергия импульса $\Delta E=0.1$ Дж.

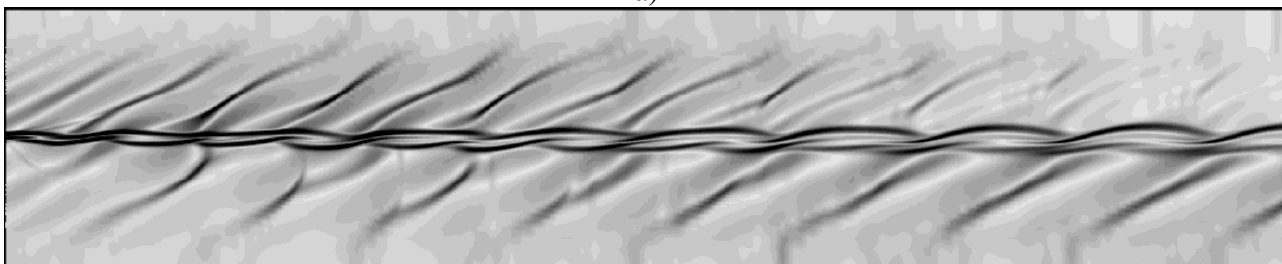
Было также проведено исследование влияния импульсного энергоподвода на маховское отражение с асимметричным расположением фокального объема. Показано, что для данной задачи ключевое значение приобретают вопросы адекватного разрешения тонких деталей течения. Так, например, управляемый переход от маховского к регулярному отражению, который наблюдался в расчетах американских авторов (Yan et al., 2003), не был подтвержден в проведенном здесь численном моделировании с достаточным разрешением сетки.

В **четвертой главе** численно исследуется неустойчивость свободных сдвиговых течений, таких как слои смешения и изобарические плоские струи. Развитие волн неустойчивости в слоях смешения при маховском отражении скачка и связанные с этим нестационарные процессы могут влиять на ударно-волновую конфигурацию через дозвуковую область за маховским скачком. На основе линейной теории устойчивости исследуются существующие моды возмущений, изменение характеристик устойчивости при увеличении конвективного числа Маха. На основе результатов линейной теории, путем прямого численного моделирования исследуются нелинейные стадии развития возмущения. Эффекты сжимаемости течения характеризуются конвективным числом Маха $M_c=(U_1-U_2)/(a_1+a_2)$, где U_1, U_2 – скорости смешивающихся потоков, a_1, a_2 – соответствующие скорости звука. Увеличение конвективного числа Маха качественно меняет динамику развития волн неустойчивости в слое смешения и приводит к появлению двух новых неустойчивых мод возмущений, фазовая скорость которых относительно потока сверхзвуковая. При $M_c=0,5$ характер нелинейного развития неустойчивости определяется известным механизмом Кельвина – Гельмгольца (рис.11а), т.е. сворачиванием слоя смешения в вихревые валики с последующим попарным слиянием соседних вихрей. При трансзвуко-

вых конвективных числа Маха расчеты демонстрируют присутствие в течении местных скачков уплотнения, связанных с крупномасштабными вихревыми структурами. При сверхзвуковом конвективном числе Маха $M_c=1,5$ обнаружено наличие во внешнем потоке наклонных ударных волн, которые можно отождествить с волнами Маха, которые излучаются во внешнее пространство (рис. 11б).



а)



б)

Рис. 11. Развитие дозвуковой неустойчивости Кельвина–Гельмгольца в слое смешения двух потоков с числами Маха $M_1=2,5$ (верхний поток) и $M_2=1,5$ (нижний поток) (а) и сверхзвуковой неустойчивости при смешении потоков с числами Маха $M_1=4,5$ и $M_2=1,5$ (б)

При исследовании нелинейного развития неустойчивости плоской изобарической струи также обнаружены качественные различия в механизме неустойчивости при различных конвективных числах Маха и для различных мод возмущений (синусоидальной и варикозной). Показано, что синусоидальная (асимметричная) мода возмущений является определяющей как при дозвуковых, так и при сверхзвуковых M_c . На рис. 12 приведена визуализация нелинейной эволюции первой синусоидальной моды возмущения при $M_c=1,5$.

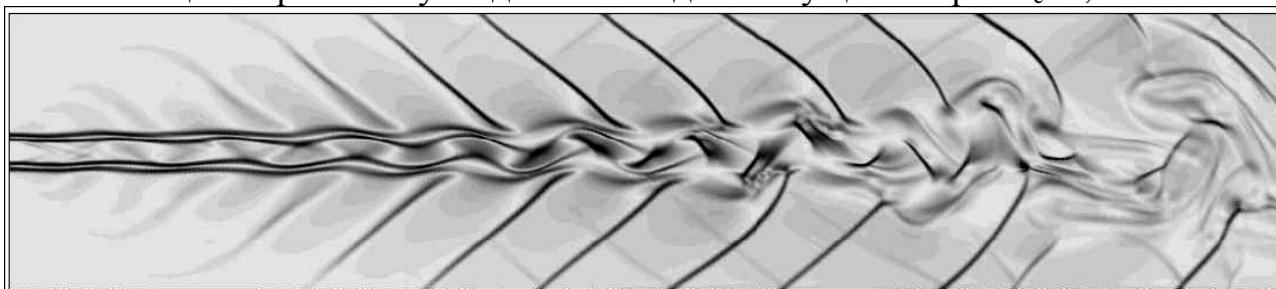


Рис. 12. Развитие сверхзвуковой синусоидальной моды неустойчивости в плоской струе с числом Маха 4,5, истекающей в спутный поток с числом Маха 1,5

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Численно исследованы особенности течения, важные для понимания механизма перехода между регулярным и маховским отражением скачков. Показано наличие гистерезиса регулярного и маховского отражения при изменении параметров течения (угла клина, числа Маха потока, расстояния от клина до плоскости симметрии). Обнаружено существование трехмерной конфигурации комбинированного отражения, регулярного

асимметричного взаимодействия с отраженным скачком сильного семейства.

2. Показано, что возмущения плотности набегающего потока могут вызывать переходы между регулярным и маховским отражением в области двойного решения. Аналитически определены пороговые амплитуды таких возмущений.
3. Показано, что локализованный импульсный энергоподвод может использоваться для управляемого перехода от регулярного к маховскому отражению.
4. Показано, что увеличение конвективного числа Маха приводит к качественному изменению динамики развития неустойчивости в слоях смешения и струях. При сверхзвуковом конвективном числе Маха обнаружено наличие во внешнем потоке наклонных ударных волн, которые можно отождествить с волнами Маха, которые излучаются во внешнее пространство. Показано, что неустойчивость плоской сверхзвуковой струи, истекающей в спутный поток, определяется главным образом развитием синусоидальной моды возмущений.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

1. *Иванов М.С., Кудрявцев А.Н., Хотяновский Д.В.* Численное моделирование перехода между регулярным и маховским отражением ударных волн под действием локальных возмущений // Доклады Академии наук. – 2000. – Т. 73. – № 3. – С. 332–336.
2. *Ivanov M.S., Ben-Dor G., Elperin T., Kudryavtsev A.N., Khotyanovsky D.V.* Flow-Mach-number-variation-induced hysteresis in steady shock wave reflections // *AIAA Journal*. – 2001. – V. 39. – No. 5. – P. 972–974.
3. *Ivanov M.S., Vandromme D., Fomin V.M., Kudryavtsev A.N., Hadjadj A., Khotyanovsky D.V.* Transition between regular and Mach reflection of shock waves: new numerical and experimental results // *Shock Waves*. – 2001. – V. 11. – N. 3. – P. 199–207
4. *Kudryavtsev A.N., Khotyanovsky D.V., Ivanov M.S., Hadjadj A., Vandromme D.* Numerical investigations of transition between regular and Mach reflections caused by free-stream disturbances // *Shock Waves*. – 2002. – V. 12. – No. 2. – P. 157–165.
5. *Иванов М.С., Кудрявцев А.Н., Никифоров С.Б., Хотяновский Д.В.* Переход между регулярным и маховским отражением ударных волн: новые численные и экспериментальные результаты // *Аэромеханика и газовая динамика*. – 2002. – № 3. – С. 3–12.
6. *Ivanov M.S., Ben-Dor G., Elperin T., Kudryavtsev A.N., Khotyanovsky D.V.* The reflection of asymmetric shock waves in steady flows: A numerical investigation // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2002. – V. 469. – P. 71–87.
7. *Kudryavtsev A.N., Khotyanovsky D.V.* Numerical investigation of high speed free shear flow instability and Mach wave radiation // *International Journal of Aeroacoustics*. – 2005. – V. 4. – N. 34. – P. 325–344.
8. *Khotyanovsky D.V., Kudryavtsev A.N., Ivanov M.S.* Effects of a single pulse energy deposition on steady shock wave reflection // *Shock Waves*. – 2006. – V. 15. – No. 5. – P. 353–362.
9. *Кудрявцев А.Н., Поплавская Т.В., Хотяновский Д.В.* Применение схем высокого порядка точности при моделировании нестационарных сверхзвуковых течений // *Математическое моделирование*. – 2007. – Т. 19. – № 7. – С. 39–55.
10. *Kudryavtsev A.N., Khotyanovsky D.V.* Numerical simulation of nonlinear interactions in subsonic and supersonic free shear layers. // *IUTAM Symp. on Dynamics of Slender Vortices*. – Kluwer, 1998. – P. 133–142.

11. *Ivanov M.S., Klemenkov G.P., Kudryavtsev A.N., Nikiforov S.B., Pavlov A.A., Fomin V.M., Kharitonov A.M., Khotyanovsky D.V.* Experimental and numerical study of the transition between regular and Mach reflection of shock waves in steady flows // Proc. 21st Inter. Symp. Shock Waves, Great Keppel Island, Australia, 1997. – Panther Publishing, Fyshwick, Australia, 1998. – V. 2. – P. 819–824.
12. *Kudryavtsev A.N., Khotyanovsky D.V.* A numerical method for simulation of unsteady phenomena in high speed shear flows // Inter. Conf. Methods Aerophysical Research. – Novosibirsk, 1998. – Pt. 3. – P. 165–170.
13. *Kudryavtsev A.N., Khotyanovsky D.V.* Nonlinear evolution of shear layer disturbances in a supersonic plane jet // Intern. Conf. Methods Aerophysical Research. – Novosibirsk, 1998. – Pt. 3. – P. 171–176.
14. *Kudryavtsev A.N., Khotyanovsky D.V.* Numerical Simulation of Compressible Shear Layers Development with Weighted ENO Schemes // Comput. Fluid Dynamics '98: Proc. 4th ECCOMAS Comput. Fluid Dynamics Conf., Athens, Greece, 1998. – John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1998 – V. 1. – Pt.–2. – P. 900–905.
15. *M.S. Ivanov, S.F. Gimelshein, A.N. Kudryavtsev, G.N. Markelov, D.V. Khotyanovsky.* Numerical simulation of three-dimensional regular and Mach reflections of shock-waves in steady flows // Comput. Fluid Dynamics '98: Proc. 4th ECCOMAS Comput. Fluid Dynamics Conf., Athens, Greece, 1998. – John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1998– V. 1. – Pt.–2. – P. 869–874.
16. *Кудрявцев А.Н., Хотяновский Д.В.* Численное моделирование развития неустойчивостей в сверхзвуковых течениях со свободными сдвиговыми слоями // Устойчивость течений гомотенных и гетерогенных жидкостей. – Новосибирск, 1998. – Ч. 1. – С. 202–208.
17. *Khotyanovsky D.V., Kudryavtsev A.N., Ivanov M.S.* Numerical study of transition between steady regular and Mach reflection caused by free-stream perturbations // Proc. 22nd Inter. Symp. Shock Waves, London, 1999. – Univ. of Southampton, Southampton, 1999 – V. 2. – P. 1261–1266.
18. *Kudryavtsev A.N., Khotyanovsky D.V., Markelov G.N., Ivanov M.S.* Numerical simulation of reflection of shock waves generated by finite-width wedge // Proc. 22nd Inter. Symp. Shock Waves, London, 1999. – Univ. of Southampton, Southampton, 1999 – V. 2. – P. 1185–1190.
19. *Hadjadj A., Ivanov M.S., Khotyanovsky D., Kudryavtsev A.N., Vandromme D.* Further numerical investigations on transition to Mach reflection // Proc. Europ. Congr. Comput. Methods Appl. Sciences and Engineering, Barcelona, Spain, 2000. – CIMNE, Barcelona, 2000 – Paper 742. – 18p.
20. *Kudryavtsev A.N., Khotyanovsky D.V., Ivanov M.S.* Numerical simulation of asymmetrical steady shock wave interactions // Proc. Europ. Congr. Comput. Methods Appl. Sciences and Engineering, Barcelona, Spain, 2000. – CIMNE, Barcelona, 2000– Paper 741. – 13 p.
21. *Ivanov M.S., Kudryavtsev A.N., Khotyanovsky D.V., Markelov G.N.* Numerical study of 3D Regular and Mach reflections of steady shock waves // Inter. Conf. Methods Aerophysical Research – Novosibirsk, 2000. – Pt. 1. – P. 122–127.
22. *Kudryavtsev A., Khotyanovsky D.* Numerical simulation of the spatial evolution of the instabilities in a supersonic plane jet // Advances in Turbulence VIII: Proc. 8th Europ. Turbulence Conf.. – CIMNE, Barcelona, 2000. – P. 161–164.
23. *Khotyanovsky D.V., Kudryavtsev A.N., Ben-Dor G., Ivanov M.S.* Strong regular reflection of steady shock waves // Proc. 23rd Inter. Symp. Shock Waves – Univ. of Texas, Fort Worth, 2002. – Paper 1870. – 7p.
24. *Ivanov M.S., Kudryavtsev A.N., Khotyanovsky D.V.* Numerical study of peculiarities of asymmetrical reflection of steady shock waves // AIAA Paper 2001-2893. – 7p.
25. *Ivanov M.S., Kharitonov A.M., Khotyanovsky D.V., Kudryavtsev A.N., Markelov G.N., Nikiforov S.B.* Numerical and experimental study of 3D steady shock wave interactions // AIAA Paper 2001-0740. – 10p.
26. *Fomin V.M., Buzjurkin A.E., Vashchenkov P.V., Gilyov V.M., Ivanov M.S., Khotyanovsky D.V.* Parallel computational technologies in mathematical simulation of problems of continuum me-

- chanics // Inter. Conf. Methods of Aerophysical Research. – Novosibirsk, 2002. – Pt. 3. – P. 46–50.
27. *Ivanov M.S., Kudryavtsev A.N., Khotyanovsky D.V., Nikiforov S.B.* New experimental and numerical results on transition between steady regular and Mach reflections // ESA SP-487: Proc. 4th Europ. Symp. Aerothermodynamics for space vehicles, Capua, Italy, 2001. – ESA Publication Division, Noordwijk, The Netherlands, 2002. – P. 341–347.
 28. *Yan H., Adelgren R., Elliott G., Knight D., Buetner T., Ivanov M., Kudryavtsev A., Khotyanovsky D.* Laser Energy Deposition in Quiescent Air and Intersecting Shocks // Proc. 4th Workshop Magneto- and Plasma Aerodynamics for Aerospace Applications – Moscow, 2002. – 10p.
 29. *D.V. Khotyanovsky, D.D. Knight, A.N.Kudryavtsev, M.S. Ivanov.* Numerical study on laser-induced shock wave reflection transition // Shock Wave/Vortex Interaction: Proc. 5th Inter. Workshop on Shock Wave/Vortex Interaction, Kaohsiung, Taiwan, 2003. – National Cheng Kung Univ., Tainan, 2003. – P. 84–90.
 30. *Yan H., Adelgren R., Elliott G., Knight D., Ivanov M., Khotyanovsky D., Beutner, T.* Control of Mach Reflection-Regular Reflection Transition in Dual Solution Domain by Laser Energy Deposition // Proc. 5th Workshop Magneto- and Plasma Aerodynamics for Aerospace Applications. – Moscow, 2003. – 9p.
 31. *Khotyanovsky D.V., Knight D.D., Kudryavtsev A.N., Ivanov M.S.* Parallel simulation of laser-induced shock wave reflection transition // Parallel Comput. Fluid Dynamics: Proc. Parallel CFD 2003 Conf., Moscow, Russia, 2003. – Elsevier, 2004. – P. 365–372.
 32. *Adelgren R., Yan H., Elliott G., Knight D., Beutner T., Zheltovodov A., Ivanov M., Khotyanovsky D.* Localized Flow Control by Laser Energy Deposition Applied to Edney IV and Intersecting Shocks // AIAA Paper No. 2003-0031. – 2003. – 37p.
 33. *Khotyanovsky D.V., Kudryavtsev A.N., Knight D.D., Ivanov M.S.* Control of shock wave interaction by impulse laser energy deposition // Proc. 4th Europ. Congr. Comput. Methods Appl. Sciences and Engineering, Jyväskylä, Finland, 2004. – Univ. of Jyväskylä, Jyväskylä, 2004. – V. 2. – Paper 546. – 11p.
 34. *Ivanov M.S., Kharitonov A.M., Khotyanovsky D.V., Kudryavtsev A.N., Nikiforov S.B., Pavlov A.A.* Three-dimensional steady shock wave interactions. Numerical simulations and experimental validation // Proc. 4th Europ. Congr. Comput. Methods Appl. Sciences and Engineering, Jyväskylä, Finland, 2004. – Univ. of Jyväskylä, Jyväskylä, 2004. – V. 2. – Paper 543. – 16p.

Ответственный за выпуск Д.В. Хотяновский
Подписано в печать 10.10.2007

Формат бумаги 60 . 84/16, Усл. печ. л. 1.0,
Уч.-изд. л. 1.0, Тираж 110 экз., Заказ № 22

Отпечатано в ЗАО «ДокСервис»
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1