

МР8094

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ
РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н.Э.БАУМАНА

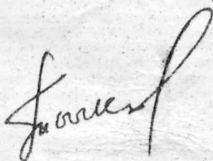
На правах рукописи

ТЫЧКОВ ВАЛЕРИЙ ВИТАЛЬЕВИЧ

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ДОЗВУКОВЫХ И ТРАНСЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ
ВЯЗКОГО И НЕВЯЗКОГО ГАЗА
ОКОЛО ТЕЛА КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ

05.13.16 — Применение вычислительной техники, математических методов,
математического моделирования в научных исследованиях

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва - 1993

Работа выполнена в институте Автоматизации проектирования РАН.

Научный руководитель - кандидат физико-математических наук А.В.Бабаков.

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук, профессор
В.В.Щенников, доктор технических наук, доцент В.В.Феохтистов

Ведущая организация - Институт математического моделирования РАН.

Защита диссертации состоится "12" октября 1993 г. в 11 часов на заседании
специализированного совета при Московском Государственном техническом уни-
верситете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Автореферат разослан " ____ " _____ 1993 г. Ваш отзыв в двух экземплярах,
заверенный печатью учреждения, просьба присылать по адресу: 107005, Москва,
2-я Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им Н.Э.Баумана

Ученый секретарь специализ.
кандидат технических наук, д.

Заказ 39

Типогр

М88094

Актуальность темы. Область физики, занимающаяся исследованием движения сплошной среды - гидро- и аэродинамика - претерпевает период бурного развития, связанный с совершенствованием вычислительных машин и численных методов решения дифференциальных и интегральных уравнений. Исследователи имеют в своем распоряжении мощное средство, позволяющее дополнять традиционные натурные методы, уменьшать число дорогостоящих экспериментов, моделировать режимы течений, трудно реализуемые в экспериментальных установках, проводить детальное исследование влияния различных факторов и параметров потока на такие важнейшие аспекты разработки гидро-, аэротехнических и летательных аппаратов, как экономичность, устойчивость, управляемость, стоимость и качество проектирования и испытаний.

Современная прикладная и теоретическая аэродинамика характеризуется высоким уровнем развития исследований в области отрывных течений - наиболее часто встречающихся и в то же время наиболее трудных и важных для исследования режимов течения реальной жидкости или газа. Необходимость учета возможности и исследования условий возникновения отрыва связано с тем, что, во-первых, многие практические течения жидкости и газа происходят в режимах, когда возможен или возникает отрыв. Во-вторых, возникновение отрыва характеризуется резким качественным изменением структуры потока, что приводит к таким последствиям, как увеличение сопротивления движению тела в сплошной среде, резкое уменьшение подъемной силы крыла, возникновение нестационарных силовых нагрузок на элементы конструкций, концентрация тепловых потоков при движении со сверхзвуковыми скоростями, скачкообразное изменение эффективности и условий функционирования элементов управления летательного аппарата.

Задача внешнего обтекания до- и трансзвуковым потоком сжимаемого газа является чрезвычайно актуальной в области разработки и конструирования летательных аппаратов. Численное моделирование позволяет определять аэродинамические характеристики, картины и поля течений, дополняет и сокращает необходимый объем натурных испытаний. До- и особенно трансзвуковые течения характеризуются распространением возмущений как вниз, так и вверх по потоку, сложной картиной течения вблизи тела. Необходимость разрешения местных до- и сверхзвуковых зон, скачков уплотнения, возвратно-циркуляционных зон в донной области, значительный объем области интегрирования предъявляют высокие требования к качеству используемых разностных схем, организации и методике численного эксперимента.

В последнее десятилетие стало реальностью применение в вычислительной физике новых высокопроизводительных суперкомпьютеров. После того, как возмож-

НИИ МАТИ им. Н. С. Баумана



1088094

Тычков В.В. Численное исс

МВТУ
Н. С. Баум
БИБЛИОТЕКА

ности непосредственного увеличения быстродействия функциональных устройств процессора были практически исчерпаны, увеличение производительности вычислительных систем происходит за счет качественных изменений их архитектуры. Векторно-конвейерные и матричные многопроцессорные комплексы позволяют достичь быстродействия в сотни миллионов операций в секунду. Это делает реальным решение таких задач, как дозвуковое трехмерное нестационарное обтекание тела конечных размеров, решение аэродинамических задач в реальном масштабе времени с непосредственным участием экспериментатора. С другой стороны, применение такой вычислительной техники требует адаптации разработанных алгоритмов к архитектуре вычислительной системы, приближения реально достигаемой производительности компьютера к теоретически возможной максимальной.

Цель работы. Вышеизложенное определяет актуальность настоящей работы, посвященной численному исследованию условий и механизма образования отрыва потока вязкого сжимаемого теплопроводного газа за поперечным круговым цилиндром при умеренном числе Рейнольдса и до- и трансзвуковых числах Маха набегающего потока, влиянию сжимаемости среды и вращения тела на возникающий отрыв и переход течения в устойчивый колебательный режим типа вихревой дорожки, а также разработке методики численного эксперимента для определения аэродинамических характеристик и полей течения при обтекании тел сложной формы на основе модели Эйлера, адаптации разработанных алгоритмов для эффективного использования на высокопроизводительной вычислительной технике многопроцессорной архитектуры.

Научная новизна. Промоделированы малоисследованные режимы течения сжимаемого теплопроводного газа, определена зависимость реализующегося режима обтекания кругового цилиндра от вязкости и числа Маха набегающего потока, наличия и скорости вращения обтекаемого тела. Разработана методика численного эксперимента, включающая модификацию разностного метода для расчета обтекания тел сложной (в том числе и трехмерной) формы в декартовой системе координат, алгоритм построения разностной сетки с высокими разрешающими свойствами для этого класса задач, адаптацию алгоритма для применения на многопроцессорной ЭВМ.

Практическая ценность. Детальное исследование механизма отрыва потока и перехода течения в колебательный режим, определение аэродинамических характеристик реальных летательных аппаратов позволяет повысить качество проектирования аэродинамической техники. Использование численного эксперимента на этапе эскизного и технического проектирования дает возможность повысить скоро-

сть и качество разработок, снизить его стоимость за счет уменьшения числа необходимых дорогостоящих натурных испытаний, использовать обширную информацию о течении, получаемую в ходе численного эксперимента. Проведенная адаптация алгоритма для использования на высокопроизводительных ЭВМ существенно расширяет класс задач, доступных для моделирования, позволяет эффективно использовать современную вычислительную технику.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на IV Всесоюзной школе по методам аэрофизических исследований (1986 г.), на Советско-Японском симпозиуме по вычислительной гидродинамике (Хабаровск, 1989 г.), Восьмой Всесоюзной школе по математическим методам (Можайск, 1990), на Всесоюзных конференциях "Современные проблемы физики и ее приложений" (Москва, 1990г.) и "Современные проблемы информатикки, вычислительной техники и автоматизации" (Москва, 1991г.), на Третьем Российско-Японском совместном симпозиуме по вычислительной гидродинамике (Владивосток, 1992г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, двух глав и заключения, изложенных на 112 страницах машинописного текста и иллюстрированных 73 рисунками и 8 таблицами, списка использованной литературы из 93 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В первой главе изложены результаты численных исследований течения вязкого сжимаемого теплопроводного газа около кругового цилиндра при умеренных числах Рейнольдса и до и трансзвуковых значениях числа Маха набегающего потока.

В п.1.1 приводится обзор литературы, связанной с натурными и численными экспериментальными работами по обтеканию кругового цилиндра. Многочисленные исследования, проводившиеся в основном для течений несжимаемой жидкости, свидетельствуют, что при умеренных числах Рейнольдса в зависимости от вязкости набегающего потока реализуются три основных режима течения около цилиндра: ламинарный безотрывный, стационарный отрывной и устойчивый нестационарный режим типа вихревой дорожки.

п.1.2 содержит описание применявшихся при расчетах разностных схем, построенных на основании консервативного метода потоков. Основная идея метода состоит в численном решении разностных уравнений, аппроксимирующих законы сохранения (1) основных аддитивных характеристик рассматриваемой сплошной среды,

выписанных в интегральной форме для конечных пространственных объемов, возникающих на этапе дискретизации при введении разностной сетки:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} F d\Omega + \iint_{S_0} Q_F \vec{n} dS = \iiint_{\Omega} J_F d\Omega \quad (1)$$

Здесь $F = \{\rho, \xi_i, \epsilon\}$ - плотности распределения массы, компонент импульса и полной энергии соответственно, S_0 - боковая поверхность объема с внешней нормалью $\vec{n}$, J_F - плотности распределения источников в объеме Ω , Q_F - соответствующие вектора плотностей потоков:

$$Q_\rho = \rho \vec{V}$$

$$Q_{\xi_i} = \xi_i \vec{V} - \vec{\sigma}_i P$$

$$Q_\epsilon = \epsilon \vec{V} - (\vec{\sigma}_i P) \vec{V} - \lambda \nabla T,$$

где $\vec{V}$ - вектор скорости, P - симметричный тензор напряжений, $\vec{\sigma}_i$ - орт декартовой системы координат, λ - коэффициент теплопроводности.

Для численного решения уравнений (1) строится явная разностная схема; (1) (в отсутствии источников) записывается в виде:

$$\Omega_{k,l} \frac{F_{k,l}^{i+1} - F_{k,l}^i}{\tau} = - \sum_{S_i} (Q_{F_{k,l}})_{S_i} \vec{n} \cdot \vec{S}_i \quad (2)$$

верхний индекс указывает на значение функции на соответствующем временном слое. Суммирование в (2) производится по всем граням S_i объема $\Omega_{k,l}$, а нижний индекс s_i указывает на значение функции в характерной точке грани S_i .

При вычислении проекций векторов плотностей потоков в характерных точках поверхностей S_i аппроксимация плотностей распределения осуществляется по несимметричным аппроксимационным формулам, учитывающим направление скорости конвективного переноса. Такой подход позволяет выделить "конвективную" составляющую процесса, что отвечает физическому характеру конвективного переноса.

Для улучшения монотонных свойств разностной схемы в областях больших градиентов и сложной структуры потока, строится гибридная схема. Например, для точки $(k+1/2, l)$ значение F вычисляется следующим образом:

$$F_{k+1/2,l} = \beta F_{k,l/2,l} + (1-\beta) F_{k+1,l/2,l},$$

где F^N - значение плотности распределения, вычисленное со вторым порядком аппроксимации, а F^P - вычисленное с первым порядком. Выбор значений коэффициента β из диапазона $[0, 1]$ производится локально на основе анализа свойств потока в окрестности рассматриваемого объема-ячейки Ω_k .

В п.1.3 приводится постановка задачи обтекания поперечного кругового цилиндра потоком совершенного сжимаемого вязкого теплопроводного газа.

Решение задачи ищется в плоском слое, заключенном между обтекаемым цилиндром и коаксиальной цилиндрической поверхностью большего радиуса. В плоскости задачи, с центром, совпадающим с центром цилиндра, наравне с декартовой системой координат (x, y) вводится полярная (r, φ) и производится сгущение расчетной сетки, задаваемое преобразованием:

$$r = 1 + (R - 1) \frac{e^{\alpha z} - 1}{e^{\alpha} - 1},$$

$$\varphi = \psi$$

В переменных (z, ψ) , в которых расчетная область образует прямоугольник $0 \leq z \leq 1, 0 \leq \psi \leq 2\pi$, строится равномерная прямоугольная сетка, переходящая в неравномерную, сгущающуюся к телу при $\alpha > 0$ в координатах (x, y) .

На наветренной части внешней границы области интегрирования (когда течение направлено в область), задаются параметры невозмущенного набегающего потока: $u = u_{\infty}, v = 0, \rho = \rho_{\infty}, T = T_{\infty}$.

На подветренной части (где поток вытекает из области), для всех функций ставится условие $\frac{\partial F}{\partial n} = 0$, $\vec{n}$ - нормаль к внешней границе области.

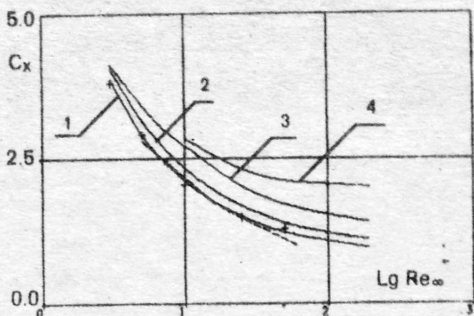


Рис. 1

Стационарное обтекание цилиндра. Коэффициент сопротивления. 1 - $M_{\infty}=0.4$, 2 - $M_{\infty}=0.6$, 3 - $M_{\infty}=0.8$, 4 - $M_{\infty}=1.0$. --- — расчет [Гушин, 1985], + — эксперимент [Tritton, 1959].

На теле используется условие прилипания $u = u_b$, $v = v_b$, где (u_b, v_b) - линейная скорость поверхности цилиндра, равная нулю в случае обтекания неподвижного тела и отличная от нуля, если цилиндр вращается. Тепловой поток к телу полагается равным нулю. При моделировании симметричных относительно плоскости $y = 0$ течений, расчет проводится в верхней полуплоскости, а на плоскости симметрии ставятся условия $v = 0$, производные по нормали к оси симметрии остальных функций полагаются равными нулю.

В п.1.4 численно исследованы стационарные режимы течения около цилиндра при $0.4 \leq M_\infty \leq 1.0$ и $3 \leq Re_\infty \leq 200$



Рис.2.

Нестационарное обтекание кругового цилиндра. $M_\infty = 0.9$, $Re_\infty = 100$. Образование вихревой дорожки за хвостовым скачком.

(число Рейнольдса здесь и далее вычисляется по радиусу цилиндра). Приведены параметры и картины обтекания, проведено сравнение с имеющимися экспериментальными данными как по геометрическим, так и по интегральным силовым характеристикам течения. Сравнение показало совпадение результатов, полученных для $M_\infty = 0.4$, с результатами натурных и численных экспериментов для несжимаемой жидкости других авторов (рис.1). Из приведенных результатов видно, что при $M_\infty \leq 0.6$ сжимаемость среды оказывает лишь количественное влияние на течение. Качественно обтекание практически совпадает с картиной течения несжимаемой жидкости для соответствующего числа Рейнольдса. При увеличении M_∞ сжимаемость газа проявляется в возрастании устойчивости безотрывного течения.

Определены значения Re^* критического числа Рейнольдса, при котором течение переходит от безотрывного к стационарному отрывному режиму с образованием в донной области двух симметричных вихрей. Для $M_\infty = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ они оказались

соответственно равными 3.4, 3.6, 4.7, 8.9. Экстраполирование кривой $Re^*(M_\infty)$ к значению $M_\infty = 0$ приводит к значению $Re^*(0) = 3.2$, хорошо согласующимся с соответствующим значением для несжимаемой жидкости $Re^* = 3.1$.

Нестационарные режимы обтекания цилиндра, сопровождающиеся возникновением вихревой дорожки в следе, исследованы в п.1.5. Проведены методические расчеты для исследования влияния параметров разностной сетки и машинной точности представления результатов на решение.

На примере течения с хорошо развитой вихревой дорожкой проанализированы явления, сопровождающие нестационарный отрыв, получены временные зависимости для различных параметров течения, приведены картины соответствующие различным способам визуализации течения.

Проведены серийные расчеты для выбранных чисел Маха (0.4, 0.6, 0.8, 0.9) при уменьшающихся числах Рейнольдса. Построены зависимости параметров течения от чисел Маха и Рейнольдса на бегающего потока. При увели-

чении числа Маха, критическое число Рейнольдса Re^{**} , при котором течение из колебательного нестационарного переходит в стационарное, увеличивается. При $M_\infty = 0.9$ течение существенно перестраивается, вихревая дорожка образуется не за цилиндром, а за присоединенным хвостовым скачком, что хорошо видно на рис.2. Для $M_\infty = 1.0$ колебательный режим не реализовывался, и решение выходило на стационарный режим при любом числе Рейнольдса вплоть до $Re_\infty = 400$.

При $M_\infty = 0.4$ Re^{**} лежит в интервале (22, 27), что близко к экспериментальным данным для несжимаемой жидкости, где вихревая дорожка существует, начиная с $Re_\infty = 20$. При $M_\infty = 0.6$ точка потери устойчивости лежит в интервале (25, 30), при



Рис. 3

Области различных режимов обтекания кругового цилиндра. 1 - кривая, ограничивающая область безотрывного безвихревого обтекания. 2 - кривая, разделяющая области устойчивого стационарного отрывного обтекания и нестационарного устойчивого периодического обтекания типа вихревой дорожки. 0 - результаты для несжимаемой жидкости.

$M_\infty = 0.8$ в интервале (55, 60), при $M_\infty = 0.9$ в интервале (80, 90). По результатам расчетов п.п.1.4-1.5 на рис.3

плоскость (M_∞, Re_∞) разделена на области, в которых реализуется тот или иной режим обтекания, в зависимости от параметров набегающего потока.

В качестве расширения постановки задачи в п.1.6 рассмотрено обтекание вращающегося цилиндра. Реализованы две постановки задачи: вращение цилиндра с постоянной угловой скоростью (п.1.6.1): и авторотационный режим обтекания (п.1.6.2) нестационарное течение, сопровождающееся вращением цилиндра, закрепленного в центре, под действием переменных вязких сил набегающего потока. Исследованы зависимости режимов обтекания и интегральных силовых характеристик от угловой скорости вращения цилиндра для всех трех областей течения рис.3.

Особенности обтекания вращающегося цилиндра, заключаются в возникновении подъемной силы, действующей на цилиндр, а также в том, что критическая точка сходит с поверхности цилиндра, и вокруг тела образуется область газа, вращающаяся с ним как одно целое (линии тока в этой области замкнуты). Толщина слоя замкнутых линий тока увеличивается при данном Re с ростом скорости вращения и уменьшается при постоянной скорости вращения с ростом Re .

При $Re_\infty = 10$ для малых скоростей вращения за телом сохраняется застойная зона с двумя вихрями разного размера. С увеличением угловой скорости вращения один из вихрей разрушается. С дальнейшим увеличением оставшийся вихрь отодвигается от тела, уменьшаясь в размерах, после чего течение становится подобно безотрывному обтеканию (рис.4).

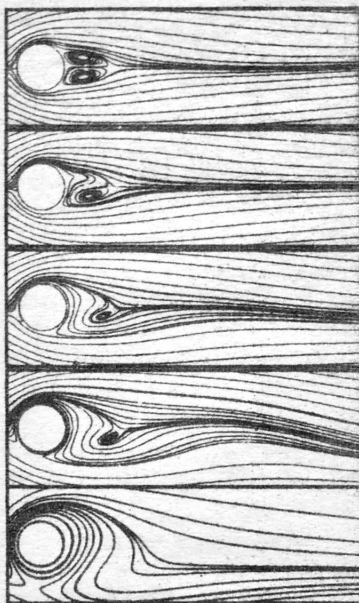


Рис.4

Стационарный режим обтекания вращающегося цилиндра. Линии тока в связанной системе координат. $M_\infty = 0.6$, $Re_\infty = 10$; $\kappa = 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 2.5$.

При нестационарном обтекании вращающегося цилиндра процесс периодического отрыва вихрей утрачивает свою симметричность. Амплитуда колебаний интегральных силовых характеристик увеличивается при увеличении угловой скорости приблизительно до 1, а затем начинает уменьшаться.

Моделирование авторотационного вращения требует постановки на теле нестационарных граничных условий на тангенциальную компоненту скорости с использованием основного уравнения динамики вращательного движения:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_r$$

где M_r - суммарный момент сил, действующих на тело, I - момент инерции цилиндра, ω - угловая скорость вращения.

Приведены зависимости параметров течения, в том числе угловой скорости вращения и угла поворота цилиндра для $M_\infty = 0.6$, $Re_\infty = 100$ от времени и от момента инерции цилиндра. В целом можно сказать, что авторотация сопровождается некоторым увеличением амплитуды колебаний параметров потока и не вызывает качественных изменений общей картины вихревой дорожки. Это связано с тем, что авторотация вызывается явлениями чисто вязкой природы, с другой стороны, авторотационные процессы требуют существования развитого нестационарного режима обтекания, который может быть осуществлен только при уменьшении вязкости потока, когда влияние вязких сил становится невелико.

Во второй главе решается задача определения аэродинамических характеристик тела сложной формы на до и трансзвуковых режимах течения.

П.2.1 содержит обзор литературы по методам аэродинамического расчета, применяемых для определения аэродинамических характеристик летательных аппаратов. В отличие от большинства инженерных методов, включающих упрощение исходных уравнений и разбиение тела на отдельно рассчитываемые элементы, в данной работе использован подход, основанный на применении для расчетов полной модели Эйлера.

В п.2.2 приводится описание модификации численного метода, позволяющей проводить расчеты тел сложной формы. Суть подхода состоит в решении уравнений (2) непосредственно в декартовой системе координат, без преобразований. При этом область интегрирования покрывается сеткой, состоящей из четырехугольников, и рассчитываются необходимые площади, объемы ячеек и вектора нормалей к граням. Постановка задачи обтекания тела вращения заданной формы невязким сжимаемым газом отличается от рассмотренной в п.1.3 граничными условиями на теле (условия непротекания для вектора скорости) и на входной границе (для

дозвуковых потоков при втекании потока в область использовалось условие на C_x характеристике в одномерном акустическом приближении). Особое внимание уделяется алгоритму построения слабodeформированной расчетной сетки, допускающей сгущение сетки к выбранным точкам расчетной области и совмещение угловых точек ячеек на поверхности тела с изломами образующей.

Результаты численных расчетов приведены в п.2.3. Исследовано обтекание четырех конфигураций тел различной сложности на до и трансзвуковых режимах. Формы тела варьировались от продольного цилиндра, сопряженного с конусом, до сложных поверхностей, имеющих технологические выемки и выступы на боковой образующей, различные виды затупления носка, при этом часть поверхности задавалась в виде табличной функции. Приведенные поля течений и распределение параметров по поверхности тела обеспечивают информацию, необходимую для проектирования и конструирования. При сравнении с имеющимися экспериментальными результатами (рис.5), получено совпадение по основным аэродинамическим характеристикам.

Возможность применения разработанной модификации численного метода к расчету трехмерных течений показана в п.2.4. Изложен процесс распараллеливания алгоритма для применения многопроцессорной вычислительной системы (п.2.4.1), включающий декомпозицию расчетной области на подобласти, рассчитываемые на отдельных процессорах, при этом после каждой итерации организуется обмен информацией между процессорами о параметрах потока на смежных границах подобластей. Приведены сравнения производительности полученной в результате программы на различных скалярных и матричных вычислительных системах. При увеличении числа процессоров получен практически линейный рост про-

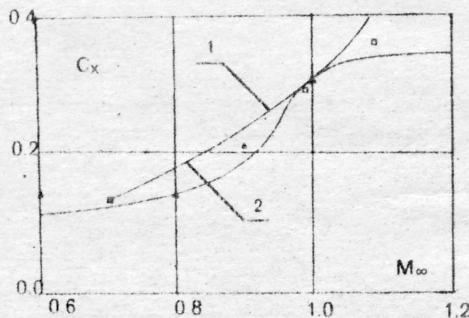


Рис 5

Зависимость коэффициента сопротивления от числа Маха набегающего потока. 1 - расчетная кривая для тела А. 2 - экспериментальные продувки для тела А. 3 - расчетная кривая для тела Б. 4 - экспериментальные продувки для тела Б.

изводительности программы.

В качестве тестового расчета, в п.2.4.2 приведены результаты численного моделирования обтекания трехмерного автомобиля дозвуковым потоком сжимаемого невязкого газа, сопровождающегося образованием устойчивого нестационарного колебательного режима. Пространственная картина мгновенных линий тока полученного течения приведена на рис.6.

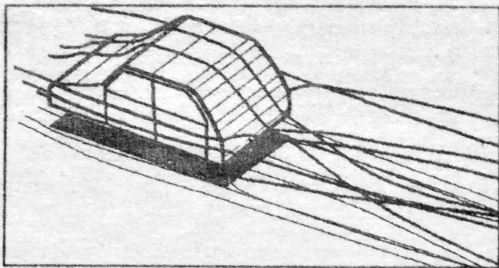


Рис.6

Пространственная картина мгновенных линий тока течения около автомобиля.

ВЫВОДЫ

1. Проведено численное исследование течений вязкого сжимаемого газа около поперечного кругового цилиндра для до и трансзвуковых числах Маха при умеренных числах Рейнольдса набегающего потока. Промоделированы основные режимы обтекания цилиндра: безотрывной, стационарный отрывной и устойчивый нестационарный режим типа вихревой дорожки. Проведено сравнение с экспериментальными данными, подтверждающее пригодность полученных результатов.

2. Выявлено влияние сжимаемости среды на картину обтекания, проявляющееся в основном в донной области и области ближнего следа. Особое внимание уделено влиянию сжимаемости на условия перехода от одного режима обтекания цилиндра к другому, состоящее в повышении устойчивости потока к возникновению отрыва и переходу в колебательный режим. При трансзвуковом обтекании часть возмущений ближнего следа экранируется от тела хвостовым скачком уплотнения.

3. Определены критические числа Рейнольдса набегающего потока для каждого из исследованных чисел Маха, при которых изменяется режим обтекания цилиндра. В плоскости (M_∞ , Re_∞) построены кривые, ограничивающие области, в которых, в

зависимости от параметров набегающего потока, может реализовываться тот или иной режим обтекания (рис.3).

4. Исследовано обтекание вращающегося цилиндра. Выявлено влияние вращения на различные режимы обтекания цилиндра. Кроме расчета обтекания цилиндра, вращающегося с постоянной угловой скоростью, реализовано также моделирование авторотационного вращения, когда закрепленный в центре цилиндр может поворачиваться под действием вязких сил набегающего потока.

5. Разработана методика численного моделирования обтекания тел сложной формы на основе полной модели Эйлера на до- и трансзвуковых режимах. Метод потоков модифицирован для решения задач со сложной геометрией без преобразования системы координат. Разработан алгоритм построения расчетных разностных сеток с высокими разрешающими свойствами для этого класса задач. Методика применена для определения полей течения и аэродинамических характеристик четырех конфигураций реальных летательных аппаратов.

6. Показана возможность применения разработанной модификации численного метода к расчету трехмерных течений. Изложен процесс распараллеливания алгоритма для применения многопроцессорной вычислительной системы, проведены сравнения производительности полученной в результате программы на различных скалярных и многопроцессорной вычислительных системах. В качестве тестового расчета проведено численное моделирование пространственного нестационарного обтекания автомобиля потоком сжимаемого невязкого газа.

Содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. А.В.Бабаков, С.Ю.Пинчук, В.В.Тычков. Численное моделирование стационарных и нестационарных отрывных режимов течения газа у тела конечных размеров // 4 Всесоюзная школа по методам аэрофизических исследований: Тезисы докл. - ИТПМ, СО АН СССР. - Новосибирск, 1986. - С.78-81.

2. A.V.Babakov, V.V.Tychkov. Numerical Simulation of Steady and Unsteady Gas Regimes near Confined Body using Euler and Navier-Stokes Models // Soviet-Union-Japan Symposium on Computational Fluid Dynamics. - Moscow: CCUSSR AS, 1989. - P.183-189.

3. Численное моделирование стационарных и нестационарных потоков на до и трансзвуковых режимах течения у тела конечных размеров с использованием моделей Эйлера и Навье-Стокса / А.В.Бабаков, Е.М.Купченко, В.В.Тычков и др. // Конструирование алгоритмов и решение задач математической физики: Сб. / Под ред. Г.П.Воскресенского, А.В.Забродина. - Москва, 1991. - С.15-19.

4. В.В.Тычков. Численное моделирование течения вязкого газа у цилиндра // Современные проблемы физики и ее приложений. Всесоюзная конференция: Тезисы докл. - Москва, 1990. - С.47.

5. В.В.Тычков. Моделирование до и трансзвуковых стационарных режимов течения идеального газа // Современные проблемы информатитки, вычислительной техники и автоматизации. Всесоюзная конференция: Тезисы докл. - Москва, 1991. - С.37.

6. A.V.Babakov, K.A.Konkov, V.V.Tychkov. Numerical Simulation of Nonsteady 3D-flows around a Finite Size Body // The 3d Russian-Japan Joint Symposium on Computational Fluid Dynamics: Book of abstracts. - Vladivostok. - 1992. - Pt. 1. - P.1-2.