

УДК 533.6.011

ФУНДАМЕНТАЛЬНОСТЬ КОНЦЕПЦИИ СВОБОДНОГО ВЯЗКО-НЕВЯЗКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТРАНСЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

© 2011 г. А.Н. Богданов¹, В.Н. Диесперов², В.И. Жук³, Г.Л. Королев⁴, А.В. Чернышев³

¹НИИ механики Московского госуниверситета им. М.В. Ломоносова

²Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

³Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, Москва

⁴Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский

bogdanov@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Несмотря на стремительное развитие вычислительных технологий, описание (понимаемое в глубоком смысле) течений вязкой жидкости и газа при больших числах Рейнольдса по-прежнему остается исключительно сложной задачей. Сингулярный характер вхождения числа Рейнольдса в уравнения Навье–Стокса делает иллюзорной возможность перейти не только к более простым уравнениям Эйлера, но и к уравнениям классической теории пограничного слоя Прандтля для решения таких принципиальных вопросов, как отрыв, неустойчивость, ламинарно-турбулентный переход, ближняя и дальняя структура следа, бафтинг (при трансзвуковом обтекании), передача возмущений вверх по потоку. Ряд перечисленных явлений может быть продолжен, их анализ привел к обобщению представлений Прандтля и созданию теории пограничного слоя с самоиндуцированным давлением. Речь идет о создании и развитии асимптотической теории свободного взаимодействия, которая позволяет выявить множество достаточно тонких эффектов, недоступных для изучения другими методами.

Ключевые слова: пограничный слой с самоиндуцированным давлением, свободное взаимодействие, многопалубная структура, асимптотические разложения, трансзвуковые течения, отрыв, устойчивость, волна Толлмина–Шлихтинга, дисперсионное соотношение, фазовая скорость, волновое число, инкремент нарастания, сингулярный параметр.

Пограничный слой с самоиндуцированным давлением

Концепция свободного взаимодействия (free interaction theory), предложенная более сорока лет назад В.Я. Нейландом [1] для исследования вязко-невязких взаимодействующих сверхзвуковых течений и затем распространенная на трансзвуковой режим О.С. Рыжовым [2], по-прежнему остается весьма эффективным инструментом для исследования задач теории пограничного слоя [3].

Трактовка процессов и явлений с точки зрения взаимодействия вязко-невязких структур газовых течений оказалась исключительно плодотворной и вышла за рамки первоначального частного вопроса об отрыве пограничного слоя. Она позволила вскрыть внутренние механизмы генерации волн Толлмина–Шлихтинга, возникновение вихрей Гертлера, описать резонансные тройки – инициаторы ранних стадий ламинарно-турбулентного перехода и т.д. Исследование важных для приложений задач устойчивости и восприимчи-

вости пограничного слоя в различных условиях позволяет сформулировать практические предложения и рекомендации.

Асимптотический анализ нелинейных пульсационных полей в рамках названной теории и обоснование применимости уравнений Бюргерса и Бенджамина–Оно к описанию эволюции возмущений дает ключ к исследованию солитонных решений, в частности их обобщений на неоднородный случай.

Остановившись на этом вопросе более подробно, можно указать приемы асимптотического упрощения уравнений Навье–Стокса с целью описания нестационарных процессов в пограничном слое. Хотя главное внимание фокусировалось на трансзвуковых скоростях внешнего течения, был проведен сравнительный анализ с асимптотической теорией устойчивости пограничного слоя в дозвуковом потоке. В случае четырехъязырусной схемы флуктуационного поля задача сводится к одному нелинейному интегро-дифференциальному уравнению. Указаны солитонные, а также не-

линейные периодические решения данного уравнения. Эти решения могут интерпретироваться как когерентные структуры.

Приложения к теории устойчивости. Эффекты вязко-невязкого взаимодействия в случае пространственных трансзвуковых течений

Не вполне очевидная заранее связь феномена свободного взаимодействия и неустойчивости течений вязкого газа может быть проиллюстрирована на примере трехмерных возмущений в пограничном слое в случае до- и сверхзвукового внешнего потока. В частности, рассматриваемая асимптотическая теория описывает механизмы возбуждения волн Толлмина–Шлихтинга. Хотя пограничный слой в сверхзвуковом потоке оказывается устойчивым по отношению к двумерным возмущениям, введение эффекта трехмерности приводит к появлению неустойчивых мод. Небезынтересный характер имеет изученная зависимость инкрементов нарастания от числа Маха и ориентации фронта трехмерной волны Толлмина–Шлихтинга.

Поведение первой моды колебаний при различных значениях трансзвукового параметра представляет собой специальный вопрос, предназначенный для самостоятельного изучения. Анализ дисперсионных соотношений в математической среде MatLab позволил установить, что траектории первой дисперсионной кривой на комплексной плоскости имеют различные асимптотики при различных значениях трансзвукового параметра. Начиная с некоторого критического значения трансзвукового параметра (численно установлена его точная величина, которая соответствует некоторому числу Маха, большему единицы), качественно меняется вид основных зависимостей так, что первая мода становится устойчивой. Таким образом, асимптотический подход в теории устойчивости обнаруживает ряд особенностей решений дисперсионных уравнений на комплексных плоскостях: качественное изменение конфигурации дисперсионных кривых, существование особой точки типа седла.

Исследования пограничного слоя с профилем невозмущенной скорости, отличным от линейного вблизи стенки, позволяют получить некоторые новые важные закономерности развития картины рассматриваемых течений и избежать абсолютизации результатов, полученных при сохранении лишь первого члена тейлоровского разложения функции скорости. В частности, отмечается, что колебательный характер производной функции

Эйри на вещественной отрицательной полуоси не реализуется в условиях иных моделей, и, следовательно, полученные ранее результаты анализа управляющих уравнений представляют собой хотя и важный, но не исключительный случай.

Как некоторое обобщение асимптотической теории пограничного слоя с самоиндуцированным давлением была предложена модификация уравнений нестационарного свободного вязко-невязкого взаимодействия для трансзвуковых течений – модифицированная трехпалубная модель. Модификация модели заключается в использовании содержащего сингулярный член (модифицированного) уравнения Линя–Рейснера–Цзяня. Исследовано модифицированное дисперсионное соотношение. Численно, при помощи определенного инструментария, удалось зафиксировать процесс «переключения» мод решения модифицированного дисперсионного уравнения на комплексной плоскости между различными нулями производной и интеграла функции Эйри. Таким образом, с введением сингулярного параметра (фигурирующего в модифицированном уравнении Линя–Рейснера–Цзяня) конфигурация дисперсионных кривых меняется не только количественно, но и качественно.

Использование представлений концепции свободного вязко-невязкого взаимодействия позволяет создавать конструктивные процедуры для численного исследования задач обтекания пространственных тел трансзвуковым потоком [4] с возникновением локальных сверхзвуковых зон, ударных волн, зон локального отрыва и других особенностей течения.

В качестве примера исследовано трансзвуковое ламинарное осесимметричное течение газа в окрестности малой неровности, расположенной на теле вращения на некотором расстоянии от его носика. Предполагалось, что тело вращения имеет протяженный цилиндрический участок, длина которого намного больше длины участка неровности, и набегающий поток является однородным. Радиус толщины цилиндрической части тела считается малым по сравнению с упомянутой длиной. Число Рейнольдса, определенное по значениям газодинамических величин в набегающем потоке, параллельном оси вращения, предполагалось, как обычно, стремящимся к бесконечности. Число Маха набегающего потока полагается близким к единице. Если высота неровности на поверхности является малой, то набегающий поток слабо возмущается, а пограничный слой в первом приближении описывается двумерными уравнениями плоского пограничного слоя и решением Блазиуса.

В этих предположениях неровность индуцирует свободное взаимодействие набегающего трансзвукового потока с пограничным слоем. Трехслойная область свободного взаимодействия состоит из нижнего подслоя пограничного слоя, примыкающего к обтекаемой поверхности, основной части пограничного слоя и внешнего подслоя, граничащего с набегающим внешним потоком и пограничным слоем. Структура течения и характерные эффекты в зоне свободного взаимодействия подробно изучены и, тем самым, задача нахождения деталей поля трансзвукового потока в рамках управляющих асимптотических уравне-

ний полностью решена.

Список литературы

1. Нейланд В.Я. // III Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике: Сб. аннот. докл. М.: Наука, 1968. С. 224.
2. Рыжов О.С. // ДАН СССР. 1977. Т. 236, №5. С. 1091–1094.
3. Богданов А.Н., Диеперов В.Н., Жук В.И., Чернышев А.В. // ЖВМ и МФ. 2010. Т. 50, №12. С. 2208–2222.
4. Диеперов В.Н., Королев Г.Л. // ЖВМ и МФ. 2009. Т. 49, №7. С. 1295–1305.

FUNDAMENTAL ROLE OF FREE VISCID-INVISCID INTERACTION CONCEPT IN UNSTEADY TRANSONIC BOUNDARY LAYER INVESTIGATION

A.N. Bogdanov, V.N. Diesperov, V.I. Zhuk, G.L. Korolev, A.V. Chernyshev

Although there is unprecedented progress of computational technique, the profound theoretical description of fluid and gas viscous flows at high Reynolds numbers remains as usual in exceptionally complicated problem. The singular character of Reynolds number presence in Navier – Stokes equations makes illusive not only the opportunity to treat flows by more simple Euler equations, but the choice as a dynamical principle the classic Prandtl equations of boundary layer theory. The latter are unacceptable for valid understanding such questions, as separation, instability, laminar-turbulent transition, trailing vortex structure (for small and large distance), buffeting (at transonic velocities), forward propagation of disturbances in boundary layers. An analysis of above mentioned phenomena resulted in the generalization of Prandtl notions and gave rise to creation the theory of boundary layer with self-induced pressure. The proposed free-interaction theory in the process of its birth and development permits to reveal a number of sufficiently interesting effects, which are not accessible for investigation by others methods.

Keywords: boundary layer with self-induced pressure, free interaction, multideck structure, asymptotic expansions, transonic flows, separation, stability, Tollmien – Schlichting wave, dispersion relation, phase velocity, wave number, increase increment, singular parameter.