

УДК 532.526

НЕЛИНЕЙНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОАМПЛИТУДНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ

© 2011 г.

Н.М. Терехова, Г.В. Петров

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

terekh@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассмотрена нелинейная эволюция возмущений повышенной интенсивности в рамках модели парных комбинационных взаимодействий. В изучаемую модель были включены самовоздействие волны и перекрестное комбинационное взаимовлияние двух волн. Такой механизм может быть как альтернативным, так и дополнительным к более простому механизму резонансных связей в синхронизированных по фазе триплетах. Рассмотренная модель третьего порядка дает относительно точное описание динамики нестабильных возмущений повышенной интенсивности в пограничном слое несжатой жидкости или сжатого газа.

Ключевые слова: до- и сверхзвуковой пограничный слой, гидродинамическая устойчивость, ламинарно-турбулентный переход.

Известно, что при некоторых условиях в пограничные слои как дозвукового течения, так и высокоскоростных потоков, приходится вводить контролируемые возмущения достаточно большой интенсивности. При этом, как замечено в экспериментах, наблюдаются искажения средних характеристик пограничных слоев (продольной скорости, плотности или массового расхода). Меняется и характер нелинейного взаимодействия. Наиболее часто реализуемый механизм субгармонической неустойчивости, который можно описать в рамках резонансных взаимодействий триплетов при невысоких интенсивностях возмущений, ослабевает и эффективность его явно не отражает реалии нелинейных процессов в области перехода.

Подобное несоответствие возникает в пограничных слоях при высоких числах Маха, особенно в условиях наличия теплообмена на стенке [1]. Заметим, что при исследованиях высокоскоростных потоков сжимаемого газа, кроме возмущений скорости, необходимо учитывать возмущения температуры и плотности. При высоких числах Маха, помимо вихревых колебаний (волны Толлмина – Шлихтинга или возмущения первой моды), необходимо рассматривать неустойчивые возмущения акустических мод, из которых в диапазоне рассматриваемых чисел Маха ($M = 2-6$) наиболее быстро нарастающей является вторая мода. Эти возмущения имеют очень высокие линейные инкременты, особенно на охлаждаемых поверхностях. Естественно, что пограничный слой, как естествен-

ный селекторный усилитель, обладающий определенным запасом устойчивости, корректирует этот высокий уровень роста, изменяя свои параметры.

При этом может быть реализован еще один тип нелинейной эволюции, так называемый механизм парных или комбинационных взаимодействий [2]. Для сверхзвукового пограничного слоя исследование проведено в рамках слабонелинейной теории для сжимаемого газа. Рассматриваемый механизм можно описать следующей схемой. Самовоздействие волны второго порядка ϵ^2 (по амплитуде первичной волны ϵ) приводит к генерации нулевых вторичных гармоник, вызывающих искажение среднего поля потока, и индуцированию обертонов с удвоенной фазой. При комбинационном взаимодействии двух волн могут образовываться суммарные и разностные вторичные гармоники. В третьем порядке по ϵ взаимодействие указанных вторичных волн с исходными возмущениями определяет нелинейную эволюцию амплитуд первичных колебаний. Описанная эволюция изучается на основе интегрирования амплитудных уравнений, в основе которых лежит известное уравнение Ландау. Рассмотрены многочисленные примеры реализации данного нелинейного механизма для разных типов возмущений при умеренных и высоких числах Маха.

На рис. 1 показана нулевая вторичная гармоника u_{00} , которая есть не что иное, как искажение средней продольной скорости (режим

самовоздействия) на двух частотах (1 – 10 кГц, 2 – 20 кГц) при числе Маха $M = 2$, для $Re = 600$. Как видно, при высоких амплитудах возмущений средний профиль деформируется, он становится более наполненным в пристенной области и менее наполненным в области внешней границы. Такое искажение характерно для переходных режимов.

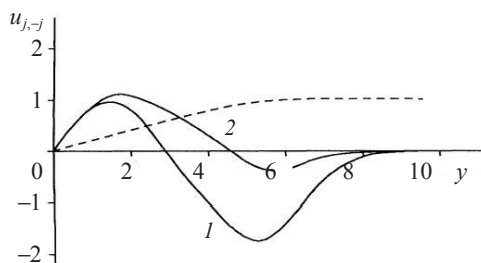


Рис. 1

Рисунок 2 демонстрирует один из вариантов расчета – нелинейные амплитуды двух плоских волн в режиме самовоздействия и режиме комбинационного взаимовлияния. Рассмотрены также нелинейные взаимодействия в парах – акустическая/вихревая и вихревая/вихревая волны при $M = 6$.

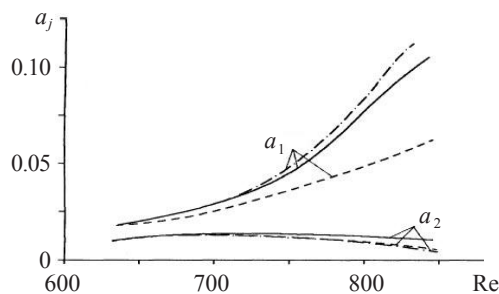


Рис. 2

Второй подход к изучению поставленной проблемы связан с прямым численным интегрированием нелокальной системы уравнений для двух гармоник волны Толлмина–Шлихтинга и осредненных параметров несжимаемого пограничного слоя на пластине для дозвукового пограничного слоя [3]. Рассмотрены две плоские волны, имеющие на заданной частоте разные амплитуды. Показано, что взаимодействие приводит к нелинейному росту амплитуд гармоник. В отличие от линейной теории, в соответствии с которой возмущения всегда затухают при достаточно больших числах Рейнольдса, нелинейная волна не затухает, а когда амплитуда второй гармоники сравнивается с амплитудой основной гармоники, счет теряет устойчивость, что можно интерпретировать как ускоренное начало перехода пограничного слоя в турбулентное состояние.

На рис. 3 изображена зависимость амплитуд

гармоник от R при $\omega = 5.6 \cdot 10^{-5}$. Основная гармоника (1, 2), вторая гармоника (3, 4), без учета влияния на стационарные параметры пограничного слоя (2, 4), линейная теория (5).

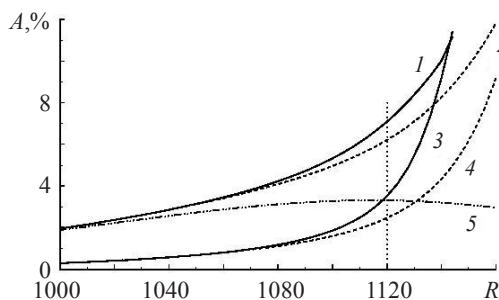


Рис. 3

Воздействие волны на осредненные характеристики пограничного слоя демонстрируют профили средней продольной скорости (рис. 4) для возмущенного и невозмущенного (пунктирная линия) пограничных слоев в сечении $Re = 1120$ при $\omega = 5.6 \cdot 10^{-5}$. Установлено также, что замеченное резкое увеличение трения на стенке является признаком начала перехода пограничного слоя в турбулентное состояние, в данном случае оно предваряется быстрым и необратимым отклонением формы волны Толлмина–Шлихтинга от синусоиды.

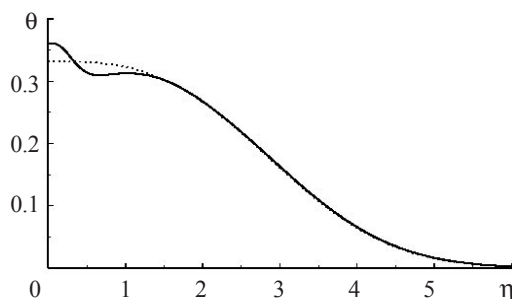


Рис. 4

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-01-00047-а).

Список литературы

1. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Устойчивость и трехволновое взаимодействие возмущений в сверхзвуковом пограничном слое с охлаждением // Вестник НГУ. 2010. Т. 5. Вып. 3. С. 52–62.
2. Терехова Н.М. Комбинационное взаимодействие возмущений в сверхзвуковом пограничном слое // ПМТФ. 2002. Т. 43, №5. С. 41–48.
3. Петров Г.В. Воздействие волны Толлмина – Шлихтинга на осредненные параметры пограничного слоя // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, №3. С. 1–11.

NONLINEAR INTERACTION OF HIGH-INTENSITY DISTURBANCES IN THE BOUNDARY LAYERS

N.M. Terekhova, G.V. Petrov

A nonlinear model of interaction of disturbances in the regime of coupled combinatorial relations is used to explain the dynamics of unstable waves. The model includes the effects of self-action and combinatorial interaction of unstable waves. The third-order model considered offers a fairly accurate description of the stream-wise dynamics of unstable waves of high-intensity disturbances into the boundary layers of uncompressed liquid and compressed gas.

Keywords: under- and supersonic boundary layer, hydrodynamic stability, laminar-turbulent transition.