ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. ФИЗИКА, ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ, 2020, том 490, с. 63–65

МЕХАНИКА

УДК 532.527

ИНТЕГРАЛЬНО НЕСИММЕТРИЧНОЕ ТЕЧЕНИЕ ОКОЛО ПЛАСТИНЫ С ДВИЖУЩЕЙСЯ ПРОТИВ ПОТОКА ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2020 г. Член-корреспондент РАН А. М. Гайфуллин[1,2,*], С. А. Накрохин[2]

Поступило 30.05.2019 г.
После доработки 30.05.2019 г.
Принято к публикации 05.12.2019 г.

Рассмотрено обтекание потоком вязкого совершенного газа пластины с движущейся против потока поверхностью. При трансзвуковых скоростях набегающего потока обнаружен новый тип нестационарного периодического течения с интегральной несимметрией аэродинамических характеристик.

Ключевые слова: вихрь, рециркуляционные течения, подвижные поверхности, несимметрия

DOI: 10.31857/S2686740020010137

ВВЕДЕНИЕ

Задача об обтекании неподвижной пластины с движущейся против потока несжимаемой жидкости поверхностью исследовалась в работах [1–4], в которых получено, что в рамках уравнений пограничного слоя решение существует только при относительной скорости поверхности пластины β, меньшей 0.3541. При больших β решение было получено уже в рамках уравнений Навье–Стокса [5]. При скоростях движения поверхности пластины, больших скорости набегающего потока, течение около пластины становится нестационарным, периодическим по времени [6]. В диапазоне $1 \le \beta \le 1.6$ период слабо зависит от β и составляет примерно 25 времен пролета невозмущенным потоком длины пластины. Появляется подъемная сила, действующая на пластину. При этом половину периода подъемная сила положительная, половину – отрицательная. Если взять интеграл по периоду, то средняя подъемная сила оказывается нулевой.

Данная работа посвящена исследованию течения около пластины с движущейся против потока поверхностью в сжимаемом газе, при трансзвуковых скоростях, которые характерны для современных самолетов. Подвижные поверхности могут быть использованы для управления течением. Теоретические исследования таких течений на трансзвуковых скоростях практически отсутствуют. В результате анализа решения обнаружено новое явление – нестационарное, несимметричное в среднем изменение характеристик течения около пластины на некоторых режимах скоростей набегающего потока и поверхности пластины.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим плоское обтекание неподвижной пластины, установленной под нулевым углом атаки к скорости набегающего потока вязкого совершенного газа u_∞. Скорость движения обеих поверхностей пластины направлена против набегающего потока и равна по абсолютной величине βu_∞.

Длина пластины L. Число Маха набегающего потока M_∞, характерное число Рейнольдса Re составлено по скорости набегающего потока, длине пластины и кинематическому коэффициенту вязкости невозмущенного газа, t – время, обезразмеренное на величину L/u_∞, число Прандтля Pr и показатель адиабаты k будем считать постоянными величинами.

На бесконечном удалении от пластины задаются параметры однородного потока, а на поверхности – условие прилипания и температурный фактор η, равный отношению температуры пластины к температуре торможения набегающего газа. Течение предполагается ламинарным с коэффициентом вязкости, определяемым законом Сазерленда.

Расчеты производились с помощью метода конечного объема на структурированных сетках. Прямоугольная граница расчетной области отступала от пластины на 25 длин пластины. Тести-

[1] *Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Московская обл., Россия*

[2] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия*

**E-mail: gaifullin@tsagi.ru*

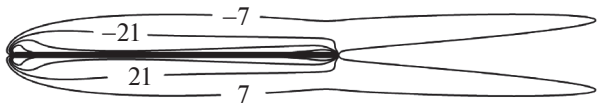

Рис. 1. Изолинии завихренности от –49 до 49 с шагом 14 при $M_\infty = 0.9$, $\beta = 1.6$.

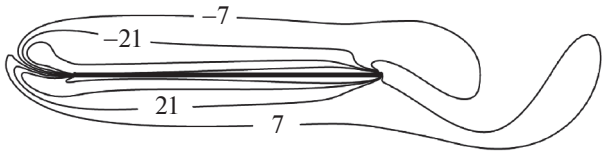

Рис. 2. Изолинии завихренности от –49 до 49 с шагом 14 при $M_\infty = 0.8$, $\beta = 3.2$.

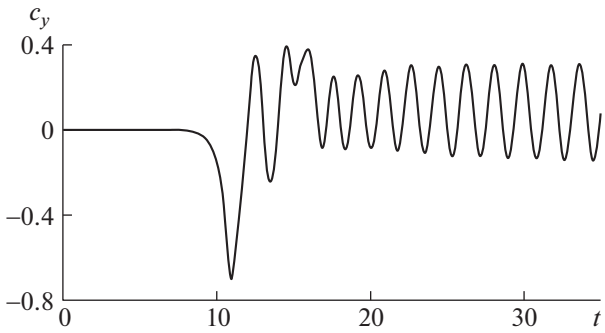

Рис. 3. Изменение коэффициента подъемной силы при $M_\infty = 0.8$, $\beta = 3.2$.

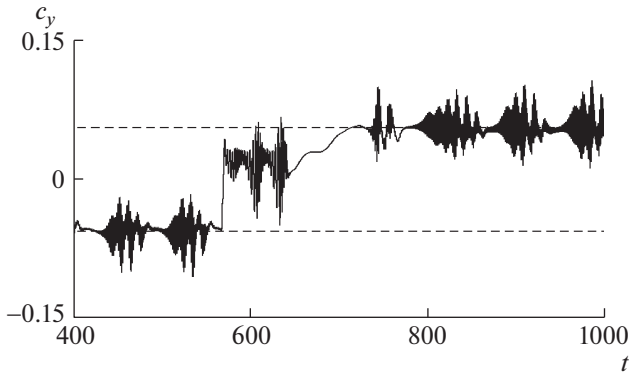

Рис. 4. Изменение знака коэффициента подъемной силы после сильного возмущения течения при $M_\infty = 0.9$, $\beta = 4$.

рование программы производилось с помощью сравнения при малых числах M_∞ с результатами, полученными в [6] и с помощью расчетов на сетках с разными количествами узлов. Так, период изменения характеристик при $\beta = 1.6$, рассчитанный с помощью уравнений для несжимаемой жидкости, составил $t_0 = 25.6$, а при $M_\infty = 0.1$ период $t_0 = 25.7$.

ИНТЕГРАЛЬНО НЕСИММЕТРИЧНОЕ ТЕЧЕНИЕ ПРИ ТРАНСЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ

Сжимаемость газа при трансзвуковых скоростях сильно влияет и на границу устойчивых режимов, и на период изменения характеристик течения, и на симметрию течения. Результаты, приведенные ниже, соответствуют параметрам $\mathrm{Re} = 1000$, $\mathrm{Pr} = 0.72$, $k = 1.4$, $\eta = 1$.

Как и при малых числах M_∞, с двух сторон от пластины образуются рециркуляционные зоны. Вместе с тем эти зоны с ростом числа M_∞ поджимаются к поверхности пластины и, таким образом, становятся более удлиненными, что сказывается на устойчивости течения. Так, в случае $\beta = 1.6$ при $M_\infty = 0$ течение периодическое с $t_0 = 25.6$, при $M_\infty = 0.6$ – периодическое с $t_0 = 2.2$, а при $M_\infty = 0.9$ – устойчивое, симметричное (рис. 1). Уменьшение периода колебаний потока с ростом числа M_∞ связано с тем, что при $M_\infty = 0$ рециркуляционные зоны толстые и область неустойчивости охватывает всю завихренную область, а при $M_\infty = 0.6$ из-за существенного поджатия этих зон область неустойчивого течения локализуется в окрестности задней кромки пластины.

В случаях, описанных выше, при неустойчивых течениях интеграл за период по времени от подъемной силы равен нулю, т.е. можно назвать такого рода течения интегрально симметричными. Эволюция поля завихренности во вторую половину периода повторяет эволюцию в первую половину при зеркальном отражении рециркуляционных областей через поверхность пластины и смене знака завихренности. При $\beta \geq 3.2$ течение теряет интегральную симметрию, начиная с $M_\infty = 0.8$. Геометрия завихренных областей становится существенно загнутой вверх (или вниз, выбор случайный, зависит от процесса выхода на периодическое решение, от вида возмущений), интеграл от подъемной силы за период перестает быть равным нулю. На рис. 2 приведен характерный вид рециркуляционных областей при $M_\infty = 0.8$ и $\beta = 3.2$, а на рис. 3 – зависимость для этого случая коэффициента подъемной силы c_y от времени. Как видно из рис. 3, на меньшей части периода подъемная сила отрицательная, а на большей части – положительная. При увеличении числа M_∞ или β коэффициент c_y может перестать менять знак с течением времени, оставаясь все время либо положительным, либо отрицательным.

Наличие интегрально несимметричного решения предполагает и наличие зеркального ему решения. Так, для примера на рис. 3 должно существовать и решение с преимущественно отрицательной подъемной силой. Для того чтобы это показать, был выполнен следующий численный эксперимент. Исследовалось течение с $M_\infty = 0.9$, $\beta = 4$ (рис. 4). С течением времени установилось интегрально несимметричное течение с отрицательной подъемной силой. В определенный промежуток времени задавалось сильное возмущение в виде увеличенной до $\beta = 8$ скорости нижней границы. Еще через некоторое время скорость движения нижней границе опять становилась равной $\beta = 4$, но после этого устанавливалось интегрально несимметричное течение с положительной подъемной силой и знак силы с течением времени не менялся. Пунктирными линиями на рис. 4 отмечены среднее значение коэффициента подъемной силы до изменения скорости движения поверхности пластины и эта же величина с другим знаком.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружен новый тип нестационарного периодического течения с интегральной несимметрией характеристик течения по времени. Такая несимметрия присуща трансзвуковым скоростям и достаточно большим β. В этом случае в потоке появляются большие области сверхзвуковых течений, заканчивающиеся скачками уплотнения. Возможно, что нестационарное взаимодействие скачков уплотнения с вихревыми областями и приводит к интегральной несимметрии.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 19–01–00163.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Klemp J.B., Acrivos A.* A Method for Integrating the Boundary-Layer Equations Through a Region of Reverse Flow // J. Fluid Mech. 1972. V. 53. Pt. 1. P. 177–191.
2. *Черный Г.Г.* Пограничный слой на движущейся поверхности // Избранные проблемы прикладной механики. Сборник работ, посвященный 60-летию академика В.Н. Челомея. М.: Наука, 1974. С. 709–719.
3. *Черный Г.Г.* Пограничный слой на движущейся поверхности // Аэромеханика. К 60-летию академика В.В. Струминского. М.: Наука, 1976. С. 99–104.
4. *Klemp J.B., Acrivos A.* A Moving-Wall Boundary Layer with Reverse Flow // J. Fluid Mech. 1976. V. 76. Pt. 2. P. 363–381.
5. *Гайфуллин А.М., Зубцов А.В.* Обтекание пластины с подвижной поверхностью // Изв. РАН. МЖГ. 2009. № 4. С. 73–78.
6. *Гайфуллин А.М., Киселев Н.Н.* Неустойчивость течения около пластины с движущейся против потока поверхностью // Ученые записки ЦАГИ. 2016. Т. XLVII. № 1. С. 23–30.

INTEGRALLY ASYMMETRIC FLOW PAST A PLATE WITH AN UPSTREAM – MOVING SURFACE

Corresponding Member of the RAS A. M. Gaifullin[1,2] and S. A. Nakrokhin[2]

[1]*Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Moscow Region, Russian Federation*

[2]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation*

Received May 30, 2019

The flow of a viscous ideal gas past the plate with an upstream-moving surface is considered. Under a transonic stream a new type of nonstationary periodic flow with integral asymmetric of aerodynamic characteristics is discovered.

Keywords: vortex, recirculation currents, moving surfaces, asymmetry