## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПЕРЕСТРОЙКЕ РЕЖИМОВ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ПЛОСКОЙ РЕШЕТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ С.В. Гувернюк<sup>1</sup>, Ф.А. Максимов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> НИИ механики МГУ, <sup>2</sup> ИАП РАН, Москва, Россия

Рассматривается задача об обтекании регулярной системы цилиндров, образующих плоскую решетку поперек равномерного сверхзвукового потока вязкого газа. D – диаметр цилиндров, H – период решетки, M – число Маха набегающего потока совершенного газа с отношением теплоемкостей γ, Re – число Рейнольдса, вычисленное по диаметру элемента решетки.

Перед цилиндрами образуются локальные ударные волны (отошедшие скачки уплотнения), которые взаимодействуют друг с другом, не выходя за рамки масштаба периода решетки. Условие существования таких режимов обтекания решетки определено в [1] в виде критерия  $H/D > f(M, \gamma)$ . Пересечение головных скачков от соседних цилиндров может происходить по схемам регулярного или маховского отражений с известной неоднозначностью таких взаимодействий. В работе [2] показано, что отбор фактически реализующейся схемы пересечения головных скачков может зависеть от предыстории установления течения и в определенных диапазонах параметров носит гистерезисный характер (эти расчеты были выполнены для невязкой постановки задачи и не описывают отрывное течение за цилиндрами).

Другой тип гистерезиса [1], определяется взаимодействием отраженных ударных волн с областью ближнего следа за элементами решетки. В ряде случаев это приводит к многократному увеличению размеров донной отрывной области и значительному изменению аэродинамического сопротивления решетки. Такое взаимодействие имеет ярко выраженный гистерезисный характер. Исследования [1] были проведены для M = 6 при варьировании отношения H/D. В настоящей работе представлены результаты аналогичных исследований для диапазона H/D = 5,  $2.5 \le M \le 4$ ,  $\gamma = 1.4$ ,  $Re=10^5$ . Обнаружен новый режим взаимодействия, сопровождающийся возбуждением автоколебаний в ближнем следе и распространением ярко выраженной вихревой дорожки в сверхзвуковой части дальнего следа, рис. 1.

На каждой из составляющих рис. 1 набегающий сверхзвуковой поток направлен слева направо. Представлено распределение модуля градиента плотности, что позволило эффективно визуализировать ударные волны, контактные разрывы и

локализованные вихревые области. Декартовы координаты X, Y нормированы на радиус цилиндров. Верхняя и нижняя границы расчетной области проходят посредине между соседними цилиндрами, на них ставилось условие периодичности (в отличие от [2], где применялось условие симметрии). На поверхности цилиндра выполнялось условие прилипания.



Рис. 1 Изменения структуры течения при последовательном уменьшении и увеличении М

Соответствующая пристеночной области расчетная сетка имела необходимое сгущение. В целом, вычислительная технология соответствовала описанию в [1]. Тактика проведения расчетов включала задание в качестве начальных условий мгновенного поля течения, полученного на предыдущем шаге по параметру M, после чего расчет продолжался до установления стационарного или периодического по времени решения, а затем делался очередной шаг приращения параметра M в направлениях, показанных стрелками на рис. 1. Выше и ниже по параметру M, чем показано на рис. 1, расчеты проводились в диапазоне от 2.5 до 6.0 и дополнительных качественных особенностей структуры течения обнаружено не было.

Наблюдается три качественно различных режима течения, отличающиеся также размерами области донного отрывного течения (рис. 1). Средний режим с образованием периодической вихревой дорожки в сверхзвуковой части следа обнаружен впервые.

На рис. 2 приведен коэффициент сопротивления C<sub>x</sub> элемента решетки. Линия 1 со светлыми маркерами, соответствует сценарию с последовательным увеличением M, линия 2 с темными маркерами – сценарию с уменьшением M. B соответствии с тремя качественно различными схемами течения (рис. 1) реализуются три уровня значений C<sub>x</sub>, переходы между которыми характеризуются интервалами двузначности решения.



Рис. 2 Зависимость от М коэффициента аэродинамического сопротивления элемента решетки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-01-00242). Расчеты проводились на МВС-100К МСЦ РАН.

- 1. *Гувернюк С.В., Максимов Ф.А.* Сверхзвуковое обтекание плоской решетки цилиндрических стержней // ЖВММФ. 2016. Т. 56. -№ 6. -С. 1025-1033.
- 2. *Кудрявцев А.Н., Эпштейн Д.Б.* Явление гистерезиса при обтекании системы цилиндров сверхзвуковым потоком //Изв. РАН, МЖГ. -2012. -№3. -С.122–131.