

УДК 533.6.013.42

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ОДНОМОДОВОГО ПАНЕЛЬНОГО ФЛАТТЕРА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА

© 2009 г. В. В. Веденеев, С. В. Гувернюк, А. Ф. Зубков, М. Е. Колотников

Представлено академиком А.Г. Куликовским 09.04.2009 г.

Поступило 15.04.2009 г.

Панельный флаттер является важной проблемой, возникшей в авиации и ракетостроении более полувека назад. С тех пор опубликованы сотни статей и ряд книг, посвященных этой проблеме [1–3]. Задача состоит из двух частей – упругой и аэродинамической. Упругая часть детально исследована в самых разнообразных постановках: различные формы пластин и оболочек, металлические и композитные материалы, линейное и нелинейное поведение и т.д. При моделировании аэродинамической части задачи, наоборот, обычно используются упрощающие предположения о локальности взаимодействия потока и упругой конструкции. Чаще всего это “поршневая теория”, хорошо работающая лишь при числах Маха более 1.7. Только в нескольких исследованиях панельного флаттера использовалась точная теория потенциального потока газа, допускающая корректное рассмотрение более низких числах Маха  $M$ .

В теории панельного флаттера известны два типа потери устойчивости [2, 3]. Первый – флаттер связанного типа, возникающий из-за взаимодействия двух собственных мод пластины. Этот тип детально исследован с помощью поршневой теории, и при  $M > 1.7$  наблюдается хорошее совпадение с экспериментом. Второй тип – одномодовый флаттер (в литературе он также называется флаттером с одной степенью свободы и высокочастотным флаттером). Он может быть описан только с помощью точной аэродинамической теории потенциального потока и, согласно теории, должен возникать при низких сверхзвуковых числах Маха. До последнего времени подробные исследования этого типа флаттера отсутствовали, более того, высказывались сомнения в его существовании. Недавно одномодовый флаттер был детально изучен аналитически [4–7] с помо-

щью теории глобальной неустойчивости [8, 9], и был выявлен простой физический механизм его возникновения. Затем были проведены численные расчеты [10]. Однако экспериментов, где одномодовый флаттер мог быть в явном виде обнаружен, не проводилось. Целью настоящей работы является экспериментальное подтверждение существования одномодового панельного флаттера.

### СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводился в трансзвуковой аэродинамической трубе А-7 НИИ механики МГУ [11] (сечение рабочей части  $600 \times 600$  мм, нижняя и верхняя стенки – перфорированные, боковые – сплошные). Схема эксперимента показана на рис. 1. Пластина изготовлена из стали и приварена по периметру к раме, устанавливаемой на нижней стенке трубы. Сварка как способ закрепления пластины выбрана для получения наименьшего конструкционного демпфирования. Размеры свободной части пластины  $300 \times 540 \times 1$  мм. Полость под пластиной сообщается через перепускные отверстия с областью течения, так что давление в полости равно статическому давлению в потоке (т.е. пластина в свободном состоянии невыпучена). Размер пластины подобран так, чтобы флаттер связанного типа не мог реализоваться для нее в данной трубе.

В общем случае при обтекании пластины в аэродинамической трубе возможны пять источников возбуждения вибраций пластины с большой амплитудой: 1) резонанс, вызванный вибрациями трубы в целом; 2) резонанс, поддерживаемый пульсациями давления в потоке; 3) отклик на шумовое возбуждение; 4) флаттер связанного типа; 5) одномодовый флаттер.

Для выявления определенного источника возбуждения движение пластины контролировалось 12 тензодатчиками, наклеенными на нее со стороны полости, вибрации трубы – датчиком вибраций, установленным на стенке рабочей части трубы,

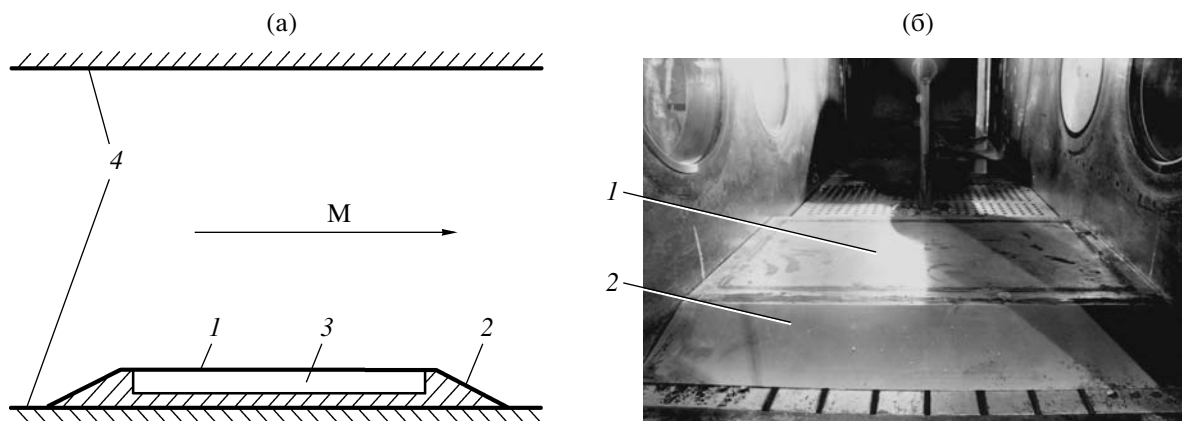


Рис. 1. Схема эксперимента (а) и модель, установленная в трубу (б). 1 – пластина, 2 – рама, 3 – полость, 4 – перфорированные стенки трубы.

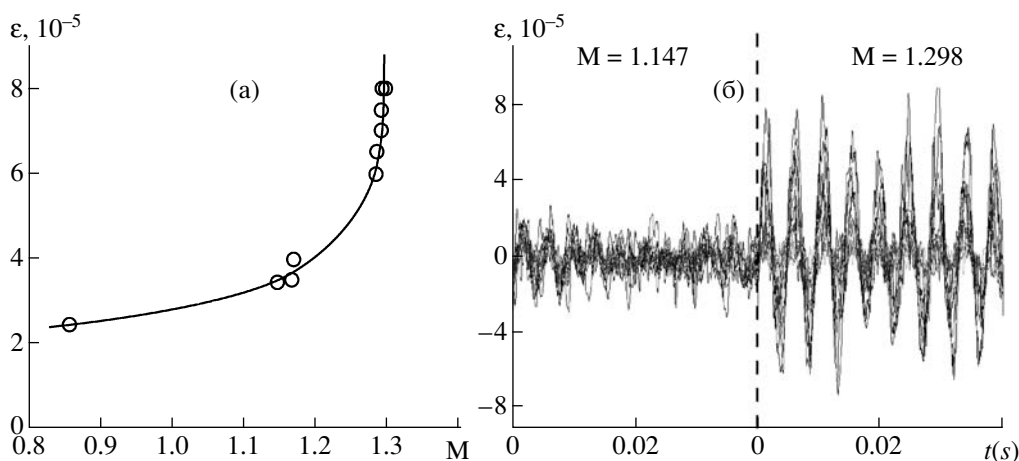


Рис. 2. Амплитуда динамических деформаций пластины как функция числа Маха (а) и изменение динамических деформаций во времени (показаны данные с нескольких тензодатчиков) на режиме  $M = 1.15$  (устойчивость) и  $1.30$  (флаттер) (б).

пульсации давления в рабочей части – датчиком давления. Анализ спектра сигналов указанных датчиков позволяет однозначно определить тип колебаний пластины.

Число Маха воздушного потока между пластиной и верхней перфорированной стенкой трубы определялось по показаниям датчиков полного и статического давлений.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование проведено на 11 режимах работы трубы с числами Маха  $M = 0.85 < M < 1.30$ , а также при  $M = 3.0$ . Амплитуда колебаний пластины как функция  $M$  показана на рис. 2а. Видно, что в области  $1.2 < M < 1.3$  происходит резкий рост амплитуды колебаний пластины. Детальный анализ спектров данных с тензодатчиков, датчика вибраций трубы и датчика давления показывает, что усиление колебаний не может происходить

из-за первых четырех возможных причин. Следовательно, оно происходит из-за возникновения одномодового флаттера.

Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетом по теории [6]. Так, теоретически наиболее неустойчивыми к флаттеру модами являются моды (1, 1) и (2, 1), первое число означает число полуволн в прогибе в направлении потока, второе – в перпендикулярном направлении. В эксперименте наиболее выделяющиеся пики в спектре колебаний пластины соответствуют этим же модам. Мода (2, 1) входит в область неустойчивости при  $M = 1.17$ , мода (1, 1) – при  $M = 1.19$ , остальные – при более высоких  $M$ . Эти значения соответствуют экспериментальной границе флаттера (рис. 2).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 08–01–00618) и

программы поддержки ведущих научных школ (НШ–1959.2008.1).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотин В.В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. М.: Физматгиз, 1961. 339 с.
2. Дауэлл Е. // Ракет. техника и космонавтика. 1970. Т. 8. № 3. С. 3–24.
3. Dowell E.H. Aeroelasticity of Plates and Shells. Leyden: Nordhoff, 1975. 139 p.
4. Веденеев В.В. // Изв. РАН. МЖГ. 2005. № 5. С. 155–169.
5. Веденеев В.В. // Изв. РАН. МЖГ. 2006. № 2. С. 163–172.
6. Веденеев В.В. // Изв. РАН. МЖГ. 2006. № 4. С. 173–181.
7. Веденеев В.В. // Изв. РАН. МЖГ. 2007. № 5. С. 197–208.
8. Куликовский А.Г. // Изв. АН СССР. ПММ. 1966. Т. 30. В. 1. С. 148–153.
9. Куликовский А.Г. // ПММ. 2006. Т. 70. В. 2. С. 257–263.
10. Веденеев В.В. // Изв. РАН. МЖГ. 2009. № 2. С. 169–178.
11. Аэродинамические установки Института механики Московского университета / Под ред. Г.Г. Черного, А.И. Зубкова, Ю.А. Панова. М.: Изд-во МГУ, 1985. 44 с.