

ЗУБКОВ Александр Федорович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ И
ФЛАТТЕРА ПЛАСТИН В ДО- И СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ

Специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2011

Работа выполнена на кафедре газовой и волновой динамики механико-математического факультета МГУ и в лаборатории аэромеханики и волновой динамики Научно-исследовательского института механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

<i>Научный руководитель:</i>	кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник <i>Гувернюк Сергей Владимирович</i>
<i>Научный консультант:</i>	кандидат физико-математических наук <i>Веденеев Василий Владимирович</i>
<i>Официальные оппоненты:</i>	доктор технических наук Коровин Борис Борисович кандидат физико-математических наук Малашин Алексей Анатольевич
<i>Ведущая организация:</i>	«Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»

Защита диссертации состоится 18 февраля 2011 г. в 15 часов на заседании Диссертационного совета Д 501.001.89 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, главное здание МГУ, механико-математический факультет, аудитория 12-13.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан « 17 » января 2011 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д.501.001.89,
д.ф.-м.н.

А.Н. Осипцов

Общая характеристика работы

Объект исследования и актуальность темы. Задачи взаимодействия подвижных и деформируемых элементов конструкций с потоками жидкости и газа широко распространены в науке, промышленности, медицине. Примерами таких задач являются флаттер крыльев или панелей обшивки летательных аппаратов, колебания купола парашюта, деформация лопаток турбины в потоке, работа сердца и движение крови по упруго деформируемым сосудам. В различных отраслях техники, где используются струи жидкости или газа, производительность ряда технологических процессов может быть существенно повышена, если вместо установившихся струй применять пульсирующие. Пневматические пульсаторы применяются для обогащения минерального сырья, очистки волокнистых материалов, например, хлопка или шерсти, транспортировки сыпучих материалов, газоструйного обезвоживания тканей и др. Существует также ряд технологий, в которых полностью пульсирующие (иначе – прерывистые) струи используются непосредственно для динамического силового воздействия на тела, например, при очистке поверхностей от рыхлых наслоений или при сборе легких предметов с растений (пневматические хлопкоуборочные машины, аппараты для сбора вредных насекомых и внесения защитных аэрозолей). Значительный вклад в это направление внесли Х.А. Рахматулин, Г.И. Северин, А.М. Бахрамов, С.В. Гувернюк, И.И. Слезингер и др. При этом проблемой является обеспечение низких гидравлических потерь и предотвращение паразитных обратных волн пневмоудара в подводящих каналах к генераторам пульсирующих струй.

Взаимодействие стесненных потоков в каналах с телами, имеющими одну и больше степеней свободы, в ряде случаев сопровождается возникновением интенсивных автоколебаний, при которых тело самопроизвольно перемещается от одной стенки канала к противоположной. Явление автоколебаний цилиндрического тела в плоскопараллельном канале и сферы в круглой трубе экспериментально исследовано в работах В.П. Карликова и др. Конструкция рассмотренного в диссертации генератора импульсных струй (ГИС) представляет собой диффузор с продольной

перегородкой в виде прямоугольной пластины с шарнирно закрепленной задней кромкой. Возбуждаемые в ГИС автоколебания позволяют получать на выходе из диффузора пару высоконапорных противофазно пульсирующих прерывистых струй, при этом не происходит возникновения обратных волн пневмоудара в подводящем канале.

Флаттером называются автоколебания системы поток – упругое тело. Панельный флаттер – известное явление, приводящее к быстрому усталостному разрушению панелей обшивки летательных аппаратов. Если скорость полёта небольшая, то статическое ненапряженное состояние панели (упругой пластины) устойчиво. Однако если превышает критическая скорость полёта (критическое число Маха M_{cr}), то пластина становится неустойчивой и начинает вибрировать. Вибрации происходят из-за перекачки энергии от потока к пластине и могут иметь большую амплитуду, приводя к разрушению.

В классической теории панельного флаттера (А.А. Ильюшин, В.В. Болотин, А.А. Мовчан, И.А. Кийко и др.) для вычисления давления, действующего на колеблющуюся пластину, используется, так называемая, поршневая теория, с помощью которой объяснен и продолжает изучаться флаттер связанного типа, когда возбуждению нарастающих колебаний всегда предшествует сближение и слияние двух соседних (как правило, первой и второй) собственных частот. В последние годы появилась более общая теория (А.Г. Куликовский, В.В. Веденеев), указывающая на возможность одномодового флаттера, при котором демпфирование со стороны газа одного из собственных колебаний пластины сменяется антидемпфированием, при этом какого-либо взаимодействия между собственными колебаниями не происходит. Актуальность постановки физических экспериментов, направленных на подтверждение существования одномодового флаттера, определяется тем, что отмеченные новые аналитические результаты в теории панельного флаттера предсказывают возможность существования флаттера в диапазоне низких сверхзвуковых чисел Маха, где классический флаттер связанного типа существовать не может и, обычно, при проектировании конструкций не учитывается. Современные требова-

ния повышения надежности при проектировании ряда технических конструкций в сочетании с потребностями снижения их материалоемкости еще более обостряют актуальность экспериментальной проверки существования флаттера нового типа.

Таким образом, **целью** диссертационной работы является экспериментальное исследование характеристик угловых автоколебаний шарнирно закрепленных пластин в ограниченных дозвуковых потоках и характеристик аэроупругих колебаний заземленных по периметру прямоугольных пластин при сверхзвуковом обтекании с акцентом на экспериментальной проверке существования одномодового панельного флаттера при трансзвуковых скоростях воздушного потока.

На защиту выносятся:

1. результаты экспериментального исследования автоколебаний потока в плоском диффузоре с подвижной продольной перегородкой;
2. феноменологическая модель переключения активности смежных каналов и приближенная квазистатическая теория автоколебаний в плоском диффузоре с разделительной пластиной;
3. конструкция генератора импульсных струй ГИС-2, формирующего пару высоконапорных противофазно пульсирующих струй без образования обратных волн пневмогидроудара в питающей устройстве трассе и результаты экспериментальных исследований влияния геометрических и физических параметров ГИС-2 на частоту возбуждаемых автоколебаний;
4. результаты экспериментального определения амплитудно-частотных характеристик аэроупругих колебаний прямоугольной упругой пластины в воздушном потоке при числах Маха в диапазоне 0.9-1.5;
5. критерии и методика идентификации типов аэроупругих колебаний пластины в аэродинамической трубе с учетом известных теоретических представлений о физических механизмах панельного флаттера;
6. результаты анализа экспериментальных спектров аэроупругих колебаний пластины в сверхзвуковом потоке, подтвердившие существование одномодового панельного флаттера при малых сверхзвуковых числах Маха.

Научной новизной обладают:

- экспериментальное обнаружение явления автоколебаний потока в плоском диффузоре с подвижной продольной перегородкой, феноменологическая модель переключения активности смежных каналов;
- конструкция генератора импульсных струй ГИС-2 и экспериментальные данные о влиянии геометрических и физических факторов конструкции на частоту возбуждаемых автоколебаний и параметры пульсирующих струй;
- экспериментальные данные об амплитудно-частотных характеристиках аэроупругих колебаний плоской прямоугольной пластины в сверхзвуковом потоке в зависимости от числа Маха в диапазоне 0.9-1.5;
- экспериментальное подтверждение существования одномодового панельного флаттера.

Практическая значимость

Разработанный на основе обнаруженного автором нового свойства течений через диффузор с внутренним подвижным элементом генератор импульсных струй ГИС-2 формирует пару высоконапорных противофазно пульсирующих прерывистых струй без образования обратных волн пневмоудара в питающей устройстве трассе. Он также отличается исключительной простотой и надежностью в работе. Исследование свойств движения и автоколебаний перегородки в диффузоре представляет также самостоятельный интерес как удобное средство верификации различных моделей нестационарного взаимодействия сплошной среды с движущимся телом.

Результаты выполненных в работе экспериментов по обнаружению одномодового панельного флаттера упругих пластин в трансзвуковом диапазоне скоростей воздушного потока важны для совершенствования существующих методик проектирования обшивок конструкций, функционирующих при сверхзвуковых скоростях обтекания. По существу, в работе подтверждена экспериментально возможность существования флаттера в диапазоне низких сверхзвуковых чисел Маха, где классический флаттер связанного типа существовать не может и, поэтому, в соответствующих ин-

женерных методиках проектирования конструкций возможность возникновения флаттера ранее не учитывалась. Соответствующие дополнения в методики проектирования позволят повысить безопасность и долговечность конструкций.

Достоверность результатов. В диссертации используются обоснованные экспериментальные методики аэрофизических исследований с применением стационарных аэродинамических установок НИИ механики МГУ и апробированные научные подходы к математической обработке экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя. Основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Работы [1, 9] – без соавторов. Работы [2-5] выполнены в соавторстве с научным руководителем и научным консультантом, в них автор участвовал в постановке задачи, анализе результатов и формулировке выводов, а также самостоятельно провел все эксперименты и их обработку. Работы [8, 10] и изобретения [11-14] выполнены в соавторстве с научным руководителем и коллегами, в них автору принадлежит экспериментальное и расчетное обоснование конструкции. Автор выражает признательность С.Н. Баранникову, О.Н. Иванову, Е.П. Козлину, А.Ф. Мосину, Д.В. Мурашову, С.И. Сабурову за техническое содействие при подготовке и проведении экспериментов.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и научных семинарах: XIV сессия международной школы по моделям механики сплошной среды (г. Жуковский, Россия, 17-24 августа **1997** г.); Международная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов (г. Жуковский, Россия, 23-26 мая **2000**.); Научно-практическая конференция «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» (Москва, Россия, 14-15 ноября, **2003**); Научная конференция МГУ «Ломоносовские чтения», секция механики в **2005, 2006, 2007, 2008, 2010** годах; Всероссийская Школа-семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики» под руководством академика Г.Г. Черного в **2003, 2006, 2007** годах; Международная школа-семинар «Модели и методы аэродинамики» в **2006, 2008** годах; Между-

народная конференция «Современные проблемы газовой и волновой динамики» посвященная памяти академика Х.А. Рахматулина в связи со 100-летием со дня его рождения, **2009**; Научный семинар кафедры газовой и волновой динамики мех.-мат. ф-та МГУ под руководством академика Е.И. Шемякина, **2004**, и академика Р.И. Нигматулина, **2010**; Научный семинар кафедры гидродинамики мех.-мат. ф-та МГУ под руководством академика А.Г. Куликовского, профессора В.П. Карликова и чл.-корр. РАН О.Э. Мельника, **2010**.

По теме диссертации опубликовано 14 работ.

Структура работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. В работе содержится 159 рисунков, 10 таблиц и 98 библиографических ссылок. Общий объем диссертации 156 страниц.

Краткое содержание работы

Во **введении** описываются цели работы, обосновывается ее актуальность и практическая значимость, перечисляются основные результаты. В частности, отмечается, что взаимодействие потока с телом в ряде случаев приводит к возникновению автоколебаний. Выделяется два класса задач, в одном тело взаимодействует с ограниченным дозвуковым потоком в канале, имея ненулевую степень свободы, в другом – заземленная по периметру упругая панель взаимодействует с движущимся вдоль неё сверхзвуковым потоком. Отмечается актуальность вопросов совершенствования генераторов пульсирующих дозвуковых струй и экспериментальной проверки новых результатов в теории панельного флаттера.

Первая глава посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия дозвукового потока в плоском диффузоре с подвижной продольной перегородкой. Дается описание разработанного экспериментального стенда, содержащего плоский диффузор с регулируемым сечением горловины и угла раскрытия и с возможностью размещения в нем прямоугольной в плане продольной разделительной пластины, имеющей шарнирное закрепление задней по потоку кромки в плоскости симметрии диффузора, рис.1. Система измерений позволяет синхронно контроли-

ровать полное давление в форкамере, статическое давление в дренажных точках на стенках диффузора, скоростной напор в нескольких точках выходного сечения, а также угловое отклонение пластины от симметричного положения.

С помощью данного стенда экспериментально обнаружено, что при определенных соотношениях геометрических размеров конструкции, взаимодействие подвижной перегородки и нагнетаемого в диффузор потока воздуха приобретают ярко выраженный автоколебательный характер, рис.2.

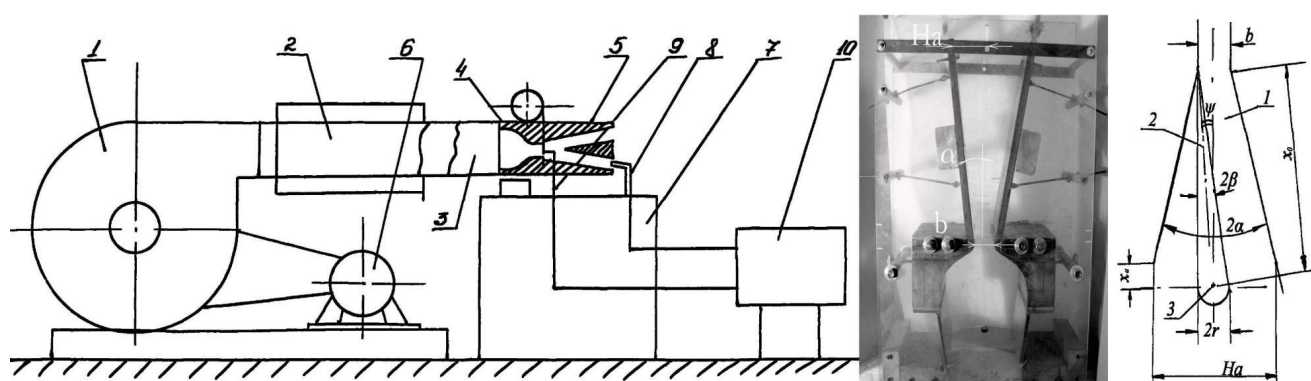


Рис. 1. а— схема установки (1- вентилятор, 3 - подводящий канал, 4- форкамера, 5- диффузор, 10- измерительный блок); б— фотоснимок форкамеры и регулируемого диффузора; в— схема диффузора с подвижной перегородкой.

Установлены следующие качественные свойства этого явления. Если при любом угловом отклонении перегородки от симметричного положения, она образует со стенками диффузора два смежных расширяющихся канала, то в процессе автоколебаний поступающий в горло диффузора поток газа периодически переключается из одного канала в другой, а на выходе образуется две полностью пульсирующих (прерывистых) струи, колебания напора, в которых находятся в противофазе.

При этом пластина колеблется с максимально возможной амплитудой $|\psi| < \psi_m$, периодически ударяясь о стенки диффузора. Переключение активности каналов носит пороговый характер и происходит в моменты выхода перегородки за пределы области $|\psi| < \psi_*$, внутри которой имеет место гистерезис: состояние активности или пассивности одного и того же канала зависит от направления движения

пластины. При увеличении давления в форкамере частота автоколебаний возрастает, а величина критического угла отклонения пластины ψ_* остается практически постоянной. Пиковые значения полного давления в выходном сечении активного канала близки к постоянному давлению в форкамере. Автоколебания в диффузоре не сопровождаются какими-либо заметными пневматическими ударами в подводящем тракте.

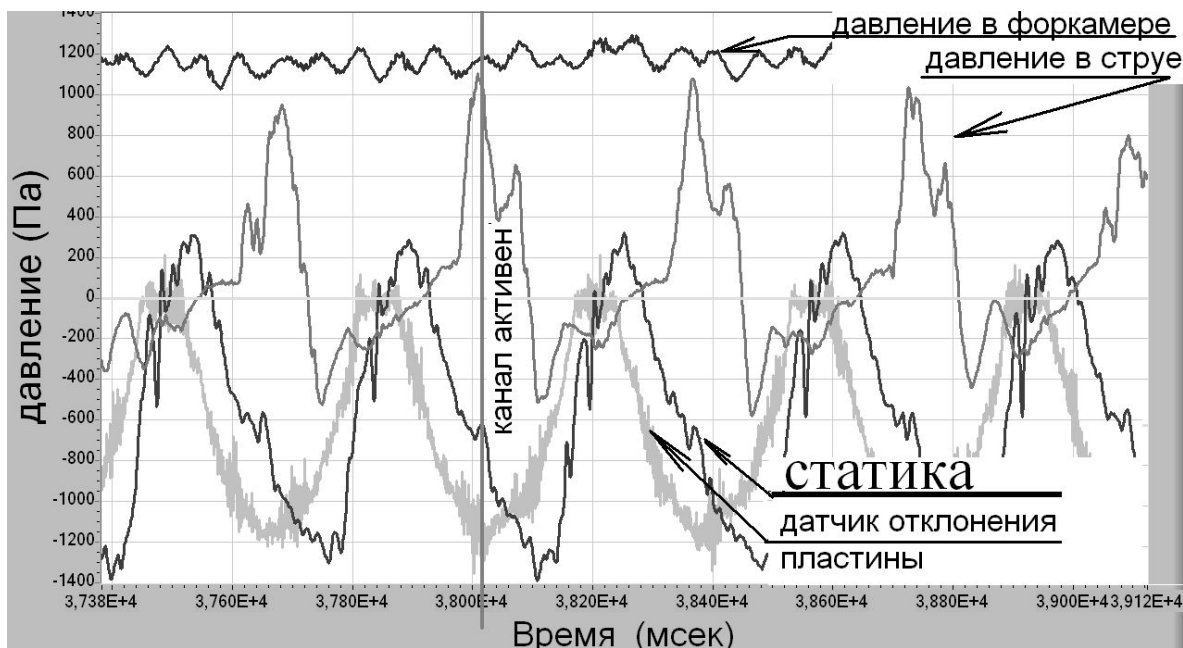


Рис. 2. Оциллограммы полного давления в форкамере, статического давления на стенке диффузора и скоростного напора в выходном сечении одного из каналов, а также сигнал датчика углового отклонения перегородки.

Предложена следующая квазистационарная модель переключения направления потока среды при движении пластины от одной стенки диффузора к противоположной. Любой плоский диффузор с прямолинейными стенками характеризуется двумя безразмерными параметрами: углом раскрытия 2θ и удлинением $\lambda = L/w$, рис.3,а. Известно, что точкам, расположенным ниже некоторой кривой «b–b» на параметрической плоскости (λ , 2θ), рис.3,б, соответствуют безотрывные диффузоры, точкам выше – диффузоры с различными типами отрыва. Кривая «b–b» известна из многочисленных экспериментов, ее положение зависит от числа Рейнольдса, степени турбулентности потока, но качественный вид примерно соответствует изо-

браженному на рис.3,б. Пусть исходный диффузор имеет угол раскрытия 2α и удлинение λ_0 . Если ось вращения бесконечно тонкой перегородки расположена в выходном сечении диффузора, то сам диффузор, его левый «1» и правый «2» каналы отображаются на параметрической плоскости $(\lambda, 2\theta)$, рис.3,б, точками

$$A_0(\lambda_0, 2\alpha); A_1((1/\lambda_0 + \psi)^{-1}; \alpha - \psi), A_2((1/\lambda_0 - \psi)^{-1}, \alpha + \psi).$$

При отклонении перегородки в допустимом диапазоне $|\psi| < \psi_m \approx 1/\lambda_0$, точки A_1 и A_2 остаются на одной и той же кривой $C: 2\theta = \alpha + \psi_m - \frac{1}{\lambda}$ параметрической плоскости $(\lambda, 2\theta)$, рис. 3,б, двигаясь в противоположных направлениях и встречаясь в точке (λ_0, α) , соответствующей оси симметрии основного диффузора. Видно, что точки «1», «2», двигаясь по кривой «С», попеременно попадают в область отрыва. Следовательно, ордината $2\theta = \alpha + \psi_*$ точки пересечения кривых «b-b» и «С» может служить для определения критического угла отклонения перегородки.

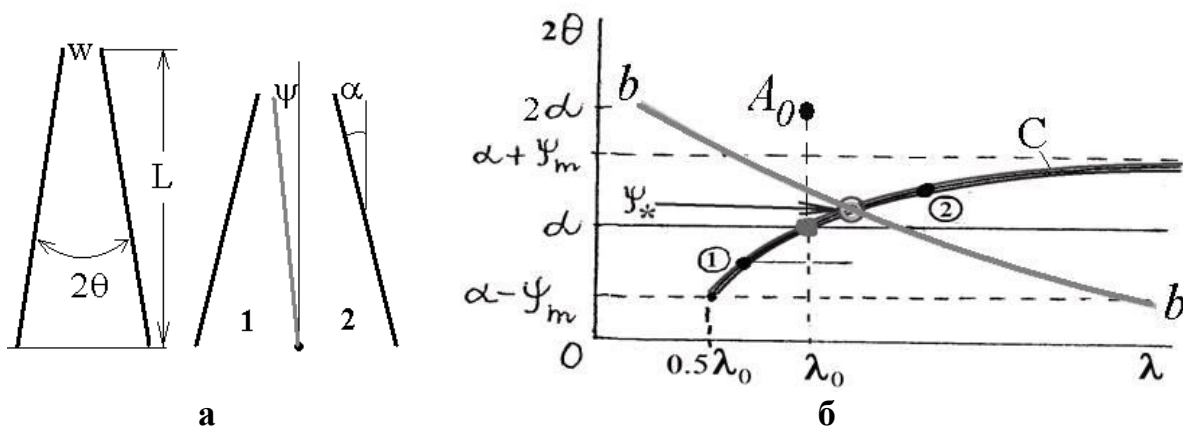


Рис. 3. Квазистатическая модель переключения

Соответствующий механизм переключения такой: По мере сужения входного сечения активного канала «1», соответствующая ему точка на кривой «С» движется слева направо и при $\psi > \psi_*$ попадает в область отрыва, в то время как пассивный канал уже приобрел благоприятную форму для безотрывного течения. После переключения потока при $\psi = \psi_*$ и соприкосновения пластины со стенкой диффузора (при $\psi = \psi_m$) процесс повторяется в обратном направлении.

Выявленные свойства диффузоров с подвижной перегородкой были использованы для создания семейства конструкций генераторов импульсных струй ГИС-

2, которые отличались размерами и формой диффузора, профилем перегородки и др. Выделено три группы факторов, влияющих на работу устройства: **(I)** массово-габаритные и внешние факторы, включающие геометрические размеры и параметры формы, массу, вес и момент инерции J перегородки, угол отклонения её оси качания от вертикали, сухое и вязкое трение при повороте; **(II)** газодинамические факторы, в том числе избыточное давление P_0 в ресивере диффузора, плотность и вязкость среды и уровень турбулентности; **(III)** контактные факторы, такие как контактная упругость и контактная вязкость, зависящие от типа материалов перегородки и стенок диффузора, от площади контакта, от изгибной жесткости перегородки и др. В диссертации представлены результаты испытаний макетов различных конструкций ГИС-2. Из размерных параметров, характеризующих влияние перечисленных факторов были составлены безразмерные комбинации, позволяющие выявить общие закономерности функционирования ГИС-2.

На рис. 4 представлены результаты измерения частоты f для конструкции, в которой площадь контакта фиксирована, менялись параметры P_0 и J . В безразмерных переменных все эти данные группируются в окрестности единой для данной разновидности конструкции зависимости, видна существенная роль сухого трения.

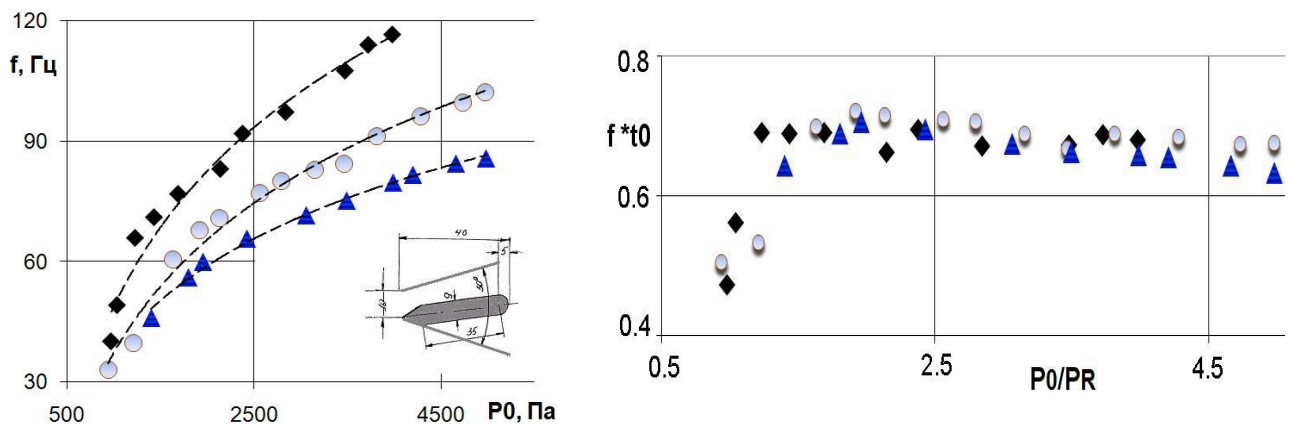


Рис.4. $t_0=J^{1/2} P_0^{-1/2} L^{-2}$; P_R – приведенный параметр трения.

На рис. 5-6 показана фотография и результаты испытаний модели другой разновидности ГИС-2, в ней перегородка сделана из материала с внутренним трением и обладает невысокой изгибной жесткостью, площадь контакта не фиксиро-

вана и зависит от скорости соударения, сухое трение в оси крепления практически отсутствует. Данная разновидность использовалась на практике.



Рис. 5.

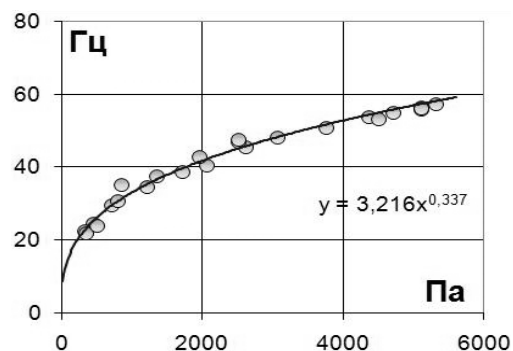


Рис. 6.

Обилие параметров подобия, затрудняет возможность целенаправленного конструирования устройств с желаемыми частотными характеристиками, поэтому весьма актуальным было разработать приближенную теорию автоколебаний в ГИС, позволяющую прогнозировать качественное влияние различных конструктивных и режимных факторов.

Во **второй** главе построена упрощенная одномерная математическая модель периодических автоколебаний в ГИС, рис.7, основанная на предложенной в главе 1 квазистатической модели переключения активности каналов.

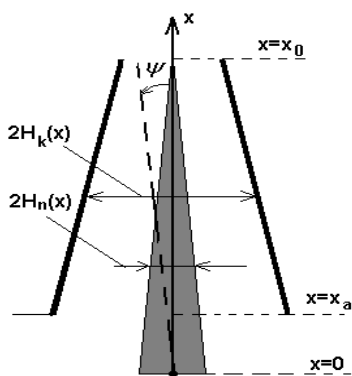


Рис. 7. Схема ГИС.

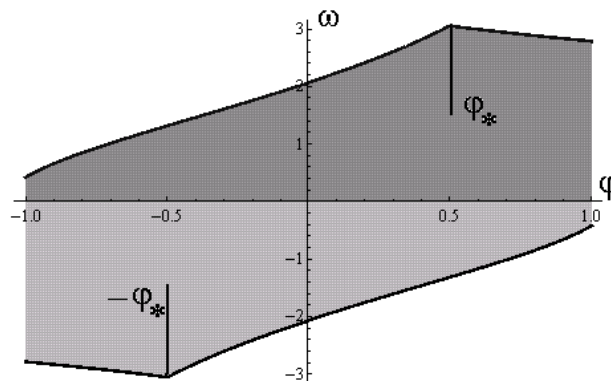


Рис. 8. Предельный цикл периодических колебаний пластины в ГИС,

$$\varphi = \psi / \psi_m, \quad \varphi_* = \psi_* / \psi_m, \quad \omega = \psi' J^{1/2} P_0^{-1/2} x_0^{-1} \psi_m^{-1/2}$$

Приняты следующие допущения:

1. в каждый момент времени поток среды вытекает из диффузора только через один из двух смежных каналов, который называется «активным», при

- этом другой канал остается «пассивным», в нем среда приближенно неподвижна и имеет давление окружающего затопленного пространства;
2. переключение активности смежных каналов происходит мгновенно, в моменты достижения перегородкой критического угла отклонения $\psi = \pm \psi_*$, в соответствии с предложенной квазистатической моделью переключения;
 3. движение среды в активном канале подчиняется одномерным уравнениям идеальной несжимаемой жидкости со следующими граничными условиями: в выходном сечении $x = x_a$ статическое давление вытекающей струи равно атмосферному, а в начальном сечении $x = x_0$ полное давление равно заданному полному давлению на входе в диффузор;
 4. подвижный элемент достаточно массивен, так что скорость его углового перемещения под действием перепада давления на перегородке не слишком велика, и в каждый момент времени распределение скорости и давления среды в активном канале определяется только его мгновенной геометрией.
 5. контактное взаимодействие перегородки со стенками диффузора $\psi = \pm \psi_m$ подчиняется закону: $\psi'(t_m + 0) = -k\psi'(t_m - 0)$, $|\psi(t_m)| = \psi_m$, где k – коэффициент "отскока по Ньютону" – может изменяться от 0 до 1 (предельный случай $k = 0$ соответствует абсолютно неупругому удару).

Задача отыскания периодического решения $\psi(t)$ с неизвестным периодом T сводится к следующей краевой задаче на полупериоде $0 < t < T/2$:

$$J\psi'' = M_n(\psi, E) - \text{sign}(\psi')M_R, \quad E(\psi, \psi') = \begin{cases} \text{sign}(\psi'), & |\psi| < \psi_* \\ -\text{sign}(\psi), & |\psi| > \psi_* \end{cases}$$

$$\psi'(+0) = k\psi'(\frac{T}{2} - 0), \quad \psi(0) = \psi_m, \quad \psi(\frac{T}{2}) = -\psi_m,$$

где J, M_n, M_R – момент инерции перегородки, результирующий момент сил перепада давления на перегородке и момент сил сухого трения, отнесенные к единице высоты диффузора; $E = \pm 1$ — переключатель, учитывающий последовательность смены активности каналов в соответствии с квазистатической моделью переключе-

ния. Аналитическое решение данной задачи получено в квадратурах, в частности, получено выражение для периода автоколебаний T через геометрические и режимные параметры задачи. На рис.8 дан пример конкретных вычислений по полученным формулам для предельного цикла в фазовой плоскости (ψ, ψ') при $\alpha=15^\circ$, $\psi_m = 2.9^\circ$, $\psi_* = 0.5\psi_m$, $x_a = 0.1x_0$, $k=0.15$, соответствующий расчетный период автоколебаний $T_0 = 1.542 J^{1/2} P_0^{-1/2} x_0^{-1} \psi_m^{1/2}$

Полученные приближенные теоретические соотношения дают возможность проводить оценки качественного влияния различных сочетаний массово-габаритных, газодинамических и контактных факторов на частотную характеристику различных конструкций ГИС-2, в частности, дают объяснение поведения некоторых из полученных в эксперименте зависимостей.

Третья и четвёртая главы посвящены экспериментальному исследованию аэроупругих колебаний прямоугольной пластины в сверхзвуковом потоке воздуха. В третьей главе приводится описание экспериментальной установки, модели, ряда предварительных экспериментов и методики обработки результатов, четвёртая глава посвящена обсуждению полученных результатов. Цель этих исследований – зафиксировать возникновение одномодового флаттера пластины в сверхзвуковом потоке. Теоретическая модель этого явления была создана лишь недавно, а экспериментальных исследований до сих пор не проводилось. Опыты выполнены в трансзвуковой аэродинамической трубе А-7 НИИ механики МГУ. На нижней плоскости рабочей части трубы устанавливается модель, частью которой является тонкая пластина, которая может колебаться около положения равновесия (рис. 9).

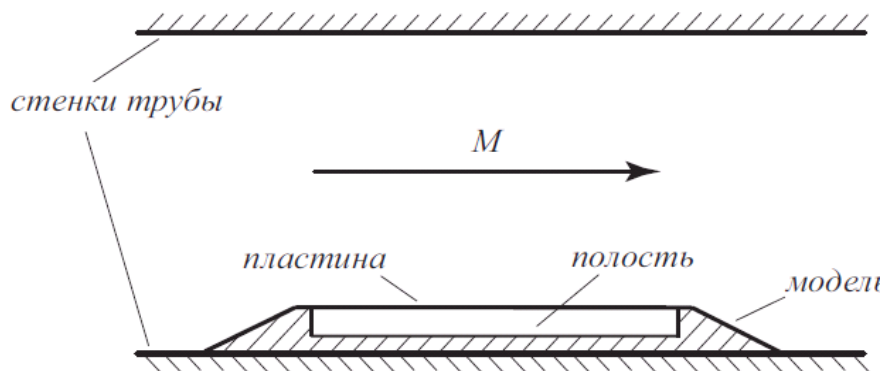


рис. 9

Основные условия, которые необходимо создать в эксперименте для корректного сравнения с известным теоретическим решением, – равномерное защемление по периметру исследуемой пластины и отсутствие перепада давления на плоскостях пластины. Условие защемления обеспечивалось приваркой модели к раме или креплением на винтах; низкий перепад давления создавался за счёт сообщения полости под пластиной с течением в рабочей части и установкой панелей рабочей части так, чтобы минимизировать перепад. Для обработки выбирались только режимы с нулевым перепадом давления на пластине. Условие равномерности потока в рабочей части аэродинамической трубы также является необходимым условием правильно поставленного эксперимента.

В ходе эксперимента контролировалась равномерность потока вдоль модели. С этой целью использовались дренажные отверстия №9, №12, №16 размещенные на боковой стенке рабочей части, на высоте 150 мм над плоскостью модели. Точка №9 размещена над передней кромкой модели, точка №12 находится над серединой модели, точка №16 размещена над задней кромкой модели. Контроль давления в полости под пластиной в модели выполняется датчиком давления. При описании экспериментальных исследований в аэродинамической трубе А-7 везде используется давление в абсолютных величинах. Для измерения температуры потока в форкамере установлен приемник температуры торможения. Так же используется датчик для контроля температуры пластины. Контроль пульсаций давления в потоке осуществляется датчиками, измеряющими давление статики. Для измерения вибраций корпуса аэродинамической трубы и панелей, на которых крепится модель, использовался датчик ускорений (акселерометр)

Контроль величины деформации пластины осуществляется тензометрическими датчиками резистивного типа. Для измерения динамических деформаций пластины в широкой полосе частот используется специальная тензометрическая аппаратура АТМ/Д-10 созданная в ЦАГИ.

Для получения динамических характеристик модели – частот и форм собственных колебаний – был изготовлен вибростенд. Экспериментальное определение собственных частот и мод колебаний пластины проводится методом песочных фигур Хладни. На резонансных частотах резко возрастает амплитуда колебаний пластины, в результате собственные моды пластины определяют на поверхности пластины зоны пучности и линии узлов. Около линий узлов поверхность пластины остается практически неподвижной, в центре пучности же амплитуда колебаний максимальна. Насыпанный на пластину мелкий песок проявляет расположение узлов и пучностей. Количество зон пучности вдоль каждой из сторон определяют номер моды колебаний.

Число Маха потока определяется по измерениям полного давления p_0 в форкамере и статического давления p_{cm} в рабочей части и вычисляется по адиабатической формуле $M^2 = 2((p_0 / p_{cm})^{(\gamma-1)/\gamma} - 1) / (\gamma - 1)$. На трансзвуковых режимах статическое давление получают из коллектора, расположенного за перфорированными стенками рабочей части.

В ходе эксперимента выполнялась регистрация и электронная запись цифрового сигнала. Все измеренные данные обрабатываются в программе, написанной на языке визуального программирования LabView. Алгоритм обработки данных заключается в следующем. На первом этапе обработки данных вычленились только те моменты эксперимента, когда на пластине отсутствовал перепад давления. По всему массиву данных строилась таблица режимов, где указывался номер серии экспериментов, номер эксперимента в этой серии, номер секунды и длительность установившегося режима. Для каждой режима из таблицы вычислялись: давление в форкамере (среднее), давление статики в рабочей части (среднее), давление статики над пластиной (среднее). Выполнялся контроль амплитуды пульсаций в потоке, амплитуды вибраций корпуса трубы, температура модели.

В ходе эксперимента регистрируются деформации пластины в 10 точках. Выделение вклада амплитуды деформации на заданной частоте выполняется поло-

совым фильтром. В общем случае любые колебания модели можно описать суммой гармонических колебаний (разложение по Фурье). На собственных и близких к ним частотах амплитуда колебаний, как правило, существенно превышает вклад от других частот. Если к сигналу применить полосовой фильтр на заданной частоте (ширина полосы – плюс-минус 10 Гц), то можно выделить вклад в полный сигнал амплитуды колебаний на выбранной частоте. На некоторых режимах амплитуда колебаний на собственных частотах возрастает значительно (в разы), что, при выполнении ряда других признаков (см. главу 4), свидетельствует о возникновении режима одномодового панельного флаттера.

Для исследования были изготовлены три модели, которые закреплялись на поверхности нижней перфорированной панели рабочей части аэродинамической трубы А-7. Модель представляет собой стальную раму прямоугольной формы с прямоугольным вырезом в средней части. К верхней плоскости рамы прикреплена плоская пластина, которая оснащена тензодатчиками. Пластина приваривается (модели М300, М400) или привинчивается (модель МД300) к раме, так что её можно считать закреплённой по контуру. Рама крепится по контуру к массивным перфорированным панелям, составляющим нижнюю стенку рабочей части трубы. Размер исследуемой пластины поперек рабочей части составляет 500мм. Протяженность исследуемой области пластины вдоль потока различна и составляет 300 и 400мм.

В четвертой главе представлены результаты экспериментов по идентификации одномодового панельного флаттера в трансзвуковом потоке.

В результате случайных пульсаций давления в сверхзвуковом потоке и общей вибрации трубы в пластине, размещенной вдоль потока, возникают вынужденные колебания. Так как целью экспериментов является обнаружение возникновения автоколебаний (флаттера), происходящих с большой амплитудой, необходимо рассмотреть все возможные виды колебаний модели:

- резонансные колебания, вызванные пульсациями давления потока;

- резонансные колебания, вызванные общей вибрацией трубы;
- отклик на шумовое возбуждение (без выраженных гармоник) со стороны потока или трубы;
- флаттер связанного типа;
- одномодовый флаттер.

Каждый вид колебаний может быть идентифицирован путём анализа спектральных характеристик сигнала. Колебания первых двух типов характерны тем, что в спектре возбуждающего воздействия (пульсаций давления или вибраций трубы) и отклика (колебаний пластины) имеются гармонические составляющие с одинаковой частотой. Отсутствие таких гармоник исключает резонанс.

Колебания третьего типа отличаются тем, что при изменении режимов работы трубы и, соответственно, изменении амплитуды возбуждения, амплитуда отклика (колебаний пластины) изменяется пропорционально. Непропорциональное изменение возмущающего воздействия и отклика исключает вынужденный отклик на общее шумовое воздействие.

Флаттер связанного типа характерен тем, что перед потерей устойчивости происходит сближение двух низших собственных частот в спектре колебаний пластины. Отсутствие такого сближения исключает этот тип флаттера.

В случае если на каких-то режимах работы аэродинамической трубы происходит интенсивное увеличение амплитуды колебаний пластины, а первые четыре типа колебаний исключены рассмотрением указанных признаков, то такое усиление колебаний свидетельствует о возникновении одномодового панельного флаттера.

Результаты эксперимента. При конструировании модели был выполнен расчет собственных частот и границ устойчивости в зависимости от физических и геометрических характеристик модели. Изготовленная модель перед экспериментом проверяется на вибростенде, проводится поиск собственных частот, методом песочных фигур выявляются области пучности и узлы колебаний пластины при ре-

зонансе. После установки модели на перфорированную панель рабочей части трубы и подключения всех систем, выполняется тест измерительной системы (по пластине производится удар резиновым шаром диаметром 25мм со стальным сердечником). Соответствующие спектральные характеристики модели показаны на рис. 10.

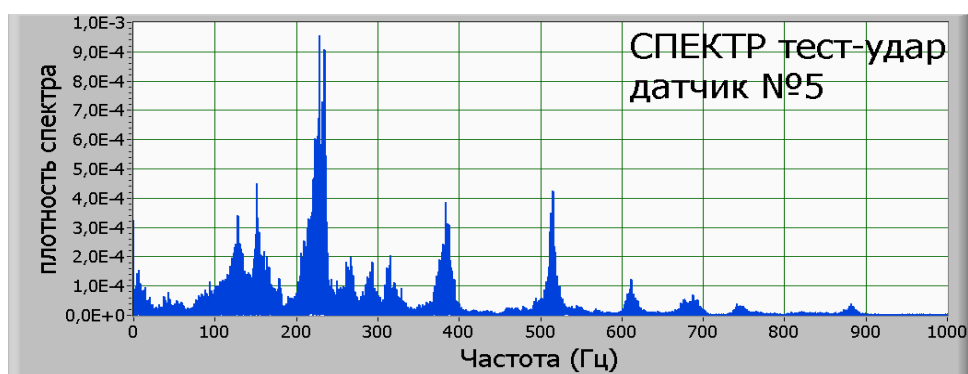


Рис. 10. Спектр колебаний по датчику №5

Анализ результатов измерения динамики колебаний пластины в сверхзвуковом потоке выполнен по списку частот, на которых наблюдалось увеличение амплитуды спектральной плотности. Для каждой частоты построен график зависимости амплитуды колебаний от числа Маха. При $M=1.2$ наблюдается значительное приращение амплитуды вследствие увеличения амплитуды на частоте 125Гц. Графики спектральной плотности деформации в точках закрепления датчиков № 4 и №7 представлены на рис. 11. Здесь же представлены фигуры Хладни для резонанса на данной частоте.

Режим $M=1.2$ был достигнут в эксперименте №4 в серии №5 на 91 секунде. Режим удерживался 8 секунд. На рис. 12 показаны статическое давление в потоке над средней линией модели, давление под пластиной, число Маха в эксперименте №4, серия №5 (сигнал синхронизации показан прямоугольными импульсами).

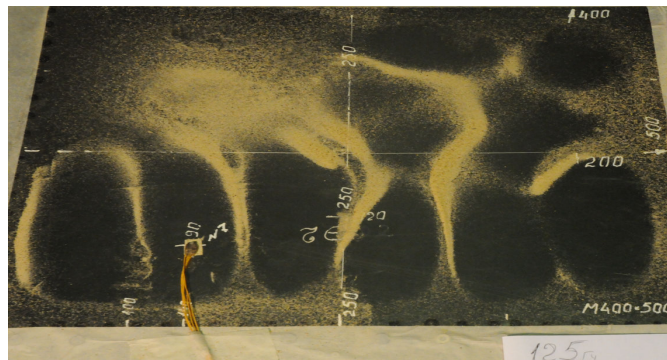
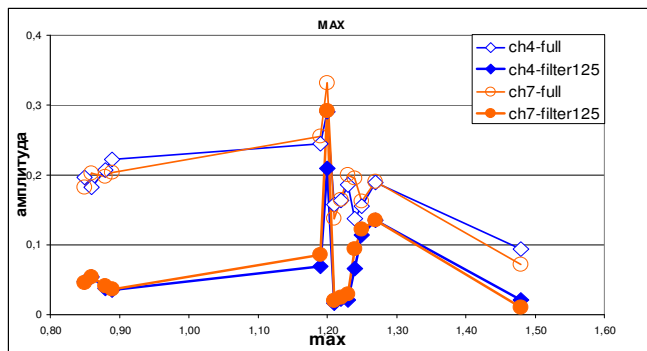


Рис.11

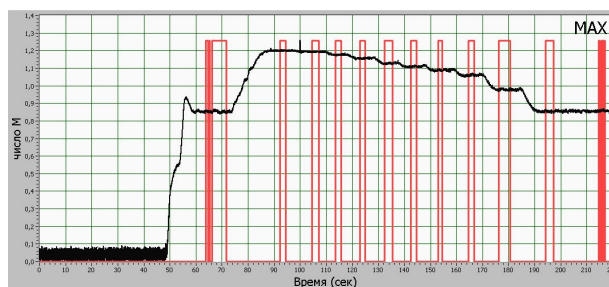
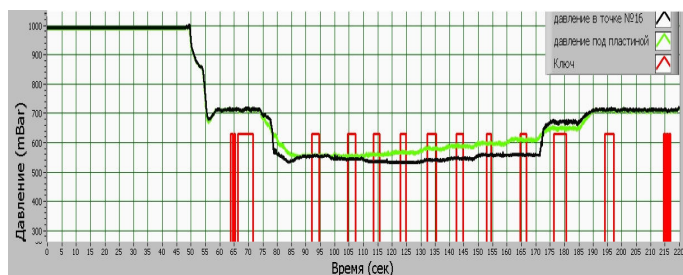


Рис. 12. Модель М400, серия 5, эксперимент 4, давление на пластине и число Маха
 Возрастание амплитуды колебаний вследствие увеличения вибраций корпуса аэродинамической трубы исключено (показания датчика вибраций).

Изменение температуры модели приводит к незначительному дрейфу собственных частот модели. Дрейф частоты собственных колебаний не более чем на 10 герц за 100 секунд эксперимента.

Измерение пульсаций давления потока выполнено по точке статики, установленной перед передней кромкой модели (вверх по потоку). Амплитуда пульсаций давления в потоке во время сверхзвукового режима не изменяется.

Вклад в общую амплитуду колебаний модели деформации на частоте 125Гц показан на рис. 13. Фильтр применен в диапазоне от 115 до 135 герц. На 91 секунде эксперимента №4 (серия №5) $M=1.2$, режим в течение 8 сек. Амплитуда деформации пластины в точке №7 при этом значительно выросла. Основной вклад в амплитуду колебаний от деформации с частотой 125 (± 10)Гц.

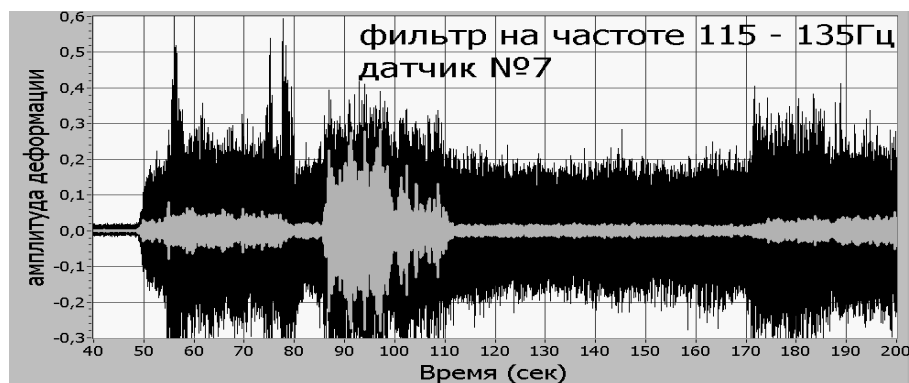


Рис. 13. Модель М400, серия 5, эксперимент 4, датчик №5.

Структура, показанная на рис.13 чёрным, – это полная амплитуда, серым – составляющая на выделенных частотах. На дозвуковом режиме (50-80 сек и 175-200 сек) прирост амплитуды деформации произошел вследствие значительного градиента скорости вдоль рабочей части, эти колебания вынужденные.

Анализ колебаний по фигурам Лиссажу. Если колебания имеют вид стоячих волн (в противоположность бегущим волнам) то фигуры Лиссажу, построенные по показаниям датчиков в двух точках пластины (рис. 14) будут выглядеть прямыми линиями. Фазовое смещение амплитуды деформации на 90 градусов изменит угол наклона линии фигуры Лиссажу.

Анализ экспериментальных данных по модели М400 позволяет утверждать, что при числе Маха вблизи 1,2 возникает одномодовый панельный флаттер. При $M=1,5$ одномодовый флаттер не наблюдается. Данный вывод базируется на анализе пяти перечисленных выше критериев условий возникновения интенсивных колебаний пластины, обтекаемой сверхзвуковым потоком.

Модель М400 в ходе эксперимента претерпела некоторую пластическую деформацию, что изменило ее собственные частоты и условие равномерного закрепления по периметру. Однако зарегистрированное увеличение амплитуды колебаний при $M=1.2$ позволяет утверждать, что режим одномодового панельного флаттера получен для пластины с неравномерным закреплением по контуру.

Для моделей М300 (стальная пластина с размерами 400X500X1.21мм), и МД300 (дюралюминиевая пластина с размерами 300X500X2,5мм), были выполне-

ны аналогичные эксперименты. Анализ полученных данных позволяет утверждать, что для модели МД300 наблюдается предфлаттерный режим в диапазоне чисел Маха до 1.5, что хорошо согласуется с предсказанием теории.

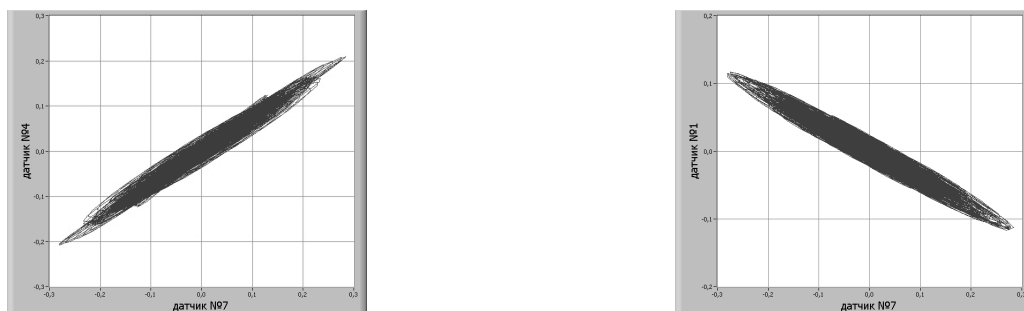


Рис. 14. Модель М400, 125Гц. Фигуры Лиссажу амплитуды деформации.

В **Заключении** перечисляются следующие основные результаты диссертации.

1. В задаче о шарнирных движениях пластины в плоском дозвуковом диффузоре:
 - экспериментально обнаружено явление возникновения в диффузоре интенсивных автоколебаний, при которых пластина самопроизвольно совершает квазипериодические угловые движения, а полное переключение потока из одного отсека диффузора в другой носит пороговый характер, благодаря чему на выходе образуются две противофазных полностью пульсирующих (прерывистых) струи; на этом принципе разработаны, испытаны и доведены до практического использования генераторы импульсных струй ГИС-2;
 - предложена квазистационарная модель переключения активности смежных каналов, механизм заключается в том, что в параметрической плоскости «угол раскрытия»-«удлинение» диффузора траектория движения перегородки пересекает универсальную границу области существования безотрывного и отрывного состояния течений в плоских диффузорах; построена приближенная одномерная теория автоколебаний, позволяющая прогнозировать качественное влияние раз-

личных конструктивных и режимных факторов на частотную характеристику автоколебаний в ГИС.

2. В задаче об аэроупругом взаимодействии пластины с движущимся вдоль неё сверхзвуковым потоком:

- экспериментально определены амплитудно-частотные характеристики аэроупругих колебаний прямоугольной защемленной по периметру упругой пластины при числах Маха воздушного потока в диапазоне 0.9-1.5;
- предложены критерии и методика идентификации типов аэроупругих колебаний пластины в аэродинамической трубе с учетом известных теоретических представлений о физических механизмах панельного флаттера;
- впервые экспериментально установлен факт возникновения одномодового панельного флаттера.

Основные публикации по теме диссертации

- 1 Зубков А.Ф. Вопросы методики экспериментального изучения высокочастотного панельного флаттера // Ломоносовские чтения. Тезисы научной конференции. Секция механики. Апрель 2010, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова – М.: Изд-во Моск. ун.-та, 2010. С. 92-93.
- 2 **В. В. Веденеев, С. В. Гувернюк, А. Ф. Зубков, М. Е. Колотников. Экспериментальное исследование одномодового панельного флаттера в сверхзвуковом потоке газа// Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 2. С. 161-175.**
- 3 Vasily V. Vedeneev, Sergey V. Guvernyuk, Alexander F. Zubkov. Studies of panel flutter phenomenon at low supersonic speeds// Proceedings of Taiwan-Russian bilateral symposium on problems in advanced mechanics. М.: Изд-во Моск. ун.-та, 2010. С. 244-250.
- 4 **Vasily V. Vedeneev, Sergey V. Guvernyuk, Alexander F. Zubkov, Mikhail E. Kolotnikov. Experimental observation of single mode panel flutter in supersonic gas flow// Journal of Fluids and Structures. 2010. Vol. 26. P. 764-779.**
- 5 **В. В. Веденеев, С. В. Гувернюк, А. Ф. Зубков, М. Е. Колотников. Экспериментальное наблюдение одномодового панельного флаттера в сверхзвуковом потоке газа// ДАН. 2009. Т. 427. № 6. С. 768-770.**

- 6 С.Н.Баранников, Зубков А.Ф., С.В. Гувернюк, А.Ф. Мосин, Экспериментальное исследование автоколебаний и авторотации тел в потоке воздуха / Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции.-Секция механики. 18–28 апреля 2005, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова // М.: Изд-во Моск. ун-та, стр. 31.
- 7 С.Н. Баранников, С.В. Гувернюк, Зубков А.Ф., А.Ф. Мосин, Е.С. Павлова, Экспериментальное определение нестационарных аэродинамических характеристик тел при испытаниях моделей в аэродинамической трубе / Тезисы докладов XI школы-семинара “Современные проблемы аэрогидродинамики” // М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. С. 15-16.
- 8 Guvernyuk S.V., Mossakovsky P.A., Zubkov A.F. Generator of pulse jets (GPJ) // FEA Information Inc. Worldwide News. October - Volume 3, Issue 10-2002. P.8-11.
- 9 Зубков А.Ф., Автоколебательный процесс в плоском диффузоре с продольной перегородкой / Современные проблемы аэрокосмической науки и техники. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (23-26 мая 2000г.)/ г. Жуковский, 2000 (по материалам отчета НИИ механики МГУ, 1988. №3684. С.1-93).
- 10 Гувернюк С.В., Андронов П.Р., Зубков А.Ф. Распространение пульсирующих турбулентных струй в затопленное пространство/ Труды XIV сессии международной школы по моделям механики сплошной среды (г. Жуковский, 17-24 августа 1997 г.) // Москва, 1998. С.3-8.
- 11 Аппарат для сбора легких предметов с растений // М., Роспатент.1995. Патент N 2048771. Стр.1-13 (авторы: Гитерман Х.Ф. , Гувернюк С.В., Зубков А.Ф, Слезингер И.И.)
- 12 Струйно-механический усилитель // Авторское свидетельство № 1590712, приоритет 1 февраля 1988г. (авторы: Гувернюк С.В., Зубков А.Ф., Левушкин А.Н., Лощинин И.М., Слезингер И.И., Фалунин М.П.)
- 13 Генератор импульсных струй // Авторское свидетельство № 1492117, приоритет 7 июля 1987г. (авторы: Гувернюк С.В., Зубков А.Ф., Левушкин А.Н., Лощинин И.М., Слезингер И.И., Фалунин М.П.).
- 14 Генератор импульсных струй // Авторское свидетельство № 1383015 приоритет 8 сентября 1986г. (авторы: Бахрамов А.М., Гувернюк С.В., Зубков А.Ф., Левушкин А.Н., Лощинин И.М., Макшин А.А., Слезингер И.И., Ульянов Г.С., Фалунин М.П.)