

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННО-ВИБРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКА С КОНСТРУКЦИЕЙ

© 2006 О. А. Журавлев¹, С. Ю. Комаров¹, Ю. Н. Шапошников²,
Ю. Д. Щеглов³, Н. Ю. Устиченко¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет

²Самарский научный инженерный центр АПИДМ

³ОАО «Моторостроитель», г. Самара

Разработан и прошел апробацию автоматизированный диагностический комплекс, созданный на основе совместного применения помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра и шлирен-метода Теплера. Выполнены исследования процессов комбинированного возбуждения мембраны звуковым полем и газовым потоком. Выявлены такие физические явления, как усиление интенсивности акустического возбуждения мембраны в ламинарном газовом потоке и нелинейные изменения конфигурации узловых полос исследуемой формы колебаний в турбулентном потоке. Диагностический комплекс найдет применение для исследования волнового взаимодействия рабочих сред и конструкций во многих отраслях науки и техники.

Одной из актуальных задач является изучение процессов акустического возбуждения резонансных колебаний конструкций при одновременном воздействии потока газа. Такой механизм возбуждения объекта является характерным для целого ряда реальных конструкций, включающих духовые инструменты, форсунки – горелки, лопатки турбины и компрессора, выхлопную трубу и элементы кузова автомобиля и т. д. Трудности экспериментального исследования здесь связаны с тем, что существующие методы регистрации не обеспечивают одновременного изучения вибрационных характеристик конструкций и структурных образований в потоках [1-3]. Для проведения экспериментальных исследований впервые был создан автоматизированный диагностический комплекс на основе помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра (ПЦСИ) и системы визуализации потоков шлирен-методом Теплера [4, 5].

Диагностический комплекс на основе помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра и оптической схемы шлирен-метода Теплера

Оптико-электронная схема созданного диагностического комплекса приведена на рис. 1. Комплекс содержит два измерительных канала, имеющих самостоятельные электронные системы регистрации. По каждому

измерительному каналу зарегистрированные спеклограммы и структуры потоков в реальном масштабе времени вводятся в ПЭВМ и обрабатываются. Первый измерительный канал представляет собой помехоустойчивый ЦСИ. В схеме ПЦСИ (рис. 1) излучение от лазера 1 расширяется микрообъективом 2 и делится полупрозрачным зеркалом 3 на опорный и предметный пучки. Предметный пучок, отразившись от зеркала 7, освещает объект исследования 8 и, отразившись от него, направляется в телекамеру 10. Опорный пучок транспортируется системой зеркал 4, 5 и фокусируется линзой 6 на светочувствительную площадку телекамеры 10. Плоскопараллельная пластина 9 сводит предметный и опорный пучки вместе. Зарегистрированное телекамерой спекл-изображение передается в ПЭВМ 11 и обрабатывается по алгоритму, приведенному в [5].

Второй измерительный канал представляет собой автоматизированную установку на основе оптической схемы шлирен-метода Теплера. Излучение лазера 12 проходит через коллиматор 13 с формированием на выходе светового пучка диаметром примерно 40 мм с плоским фронтом. Зеркало 14 направляет лазерный пучок через область исследования с фазовым объектом на линзу 15. В фокусе линзы 15 устанавливается нож Фуко

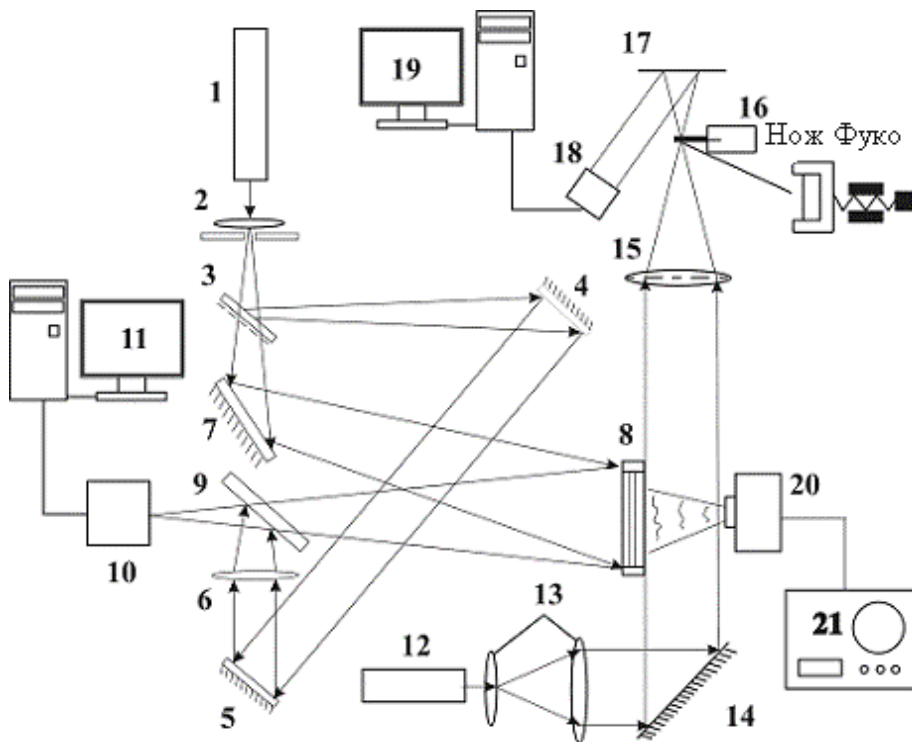


Рис. 1. Оптико-электронная схема диагностического комплекса на основе ЦСИ и шпирен-метода Теллера: 1, 12 - лазер; 2 - микрообъектив; 3 - светоделитель; 4, 5, 7, 14 - поворотные зеркала; 6, 15 - линза; 8 - объект исследования; 9 - плоскопараллельная пластина; 10, 18 - телекамера; 11, 19 - ПЭВМ; 13 - коллиматор; 16 - нож Фуко; 17 - экран; 20 - звуковой динамик; 21 - звуковой генератор

16 в виде тонкой нити, которая находится в державке с микрометрической подвижкой. После дифрагирования на нити 16 лазерное излучение проецируется на экран 17. Получаемая на экране 17 динамическая картина структурных образований регистрируется телевизионной камерой 18 и покадрово передается в ПЭВМ 19 для обработки и сравнительного анализа по разработанному алгоритму.

Объект исследования 8 бесконтактно возбуждался в акустическом поле звукового динамика 20, сигнал на который подавался от звукового генератора (ГЗ-56) 21.

В качестве объекта исследования использовалась фольговая мембрана толщиной 100 мкм и диаметром 75 мм. Мембрана создавалась путем натяжения металлической фольги 1 (рис. 2) в кольцевой оправке 2, 3. Возбуждение мембраны проводилось акусти-



Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 - мембрана; 2 - корпус; 3 - прижимное кольцо; 4 - звуковой динамик; 5 - формирователь потока; 6 - подводная трубка; 7 - редуктор; 8 - баллон; 9 - звуковой генератор

ческим возбудителем, который конструктивно состоял из электромагнитного звукового динамика 4 и формирователя потока 5.

Формирователь потока выполнен так, что имеется возможность подвода в его полость сжатого газа через трубку 6, которая через редуктор 7 подключается либо к баллону 8 с гелием, либо к магистрали сжатого воздуха.

Мембрана 1 с кольцевой оправкой 2, 3 устанавливается в плоскости регистрации помехоустойчивого ЦСИ, а рабочий промежуток шириной $L = 40$ мм между мембраной 1 и торцом формирователя 5 контролируется оптическим каналом шпирен-метода. Звуковой динамик 4 с формирователем потока 5 устанавливался на оси мембраны 1.

Результаты исследования акустического возбуждения мембраны в потоке газа

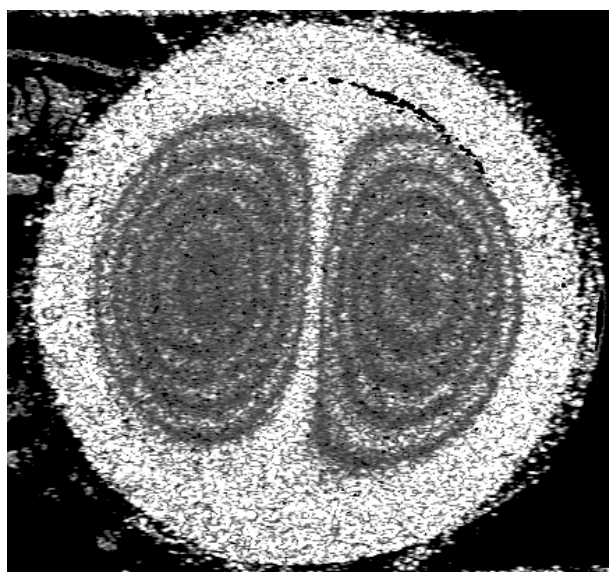
Первоначально регистрировались собственные частоты и формы колебаний мембраны, возбуждаемой звуковым полем без подачи газа в формирователь 5. Были выделены три частоты ($f = 1093$ Гц, 1203 Гц и 1665 Гц) наиболее эффективного возбуждения мембраны (рис. 3).

Затем из пневмомагистрали воздух подавался в формирователь потока 5. При этом уровень возбуждения звукового динамика от генератора 9 оставался неизменным. Расход

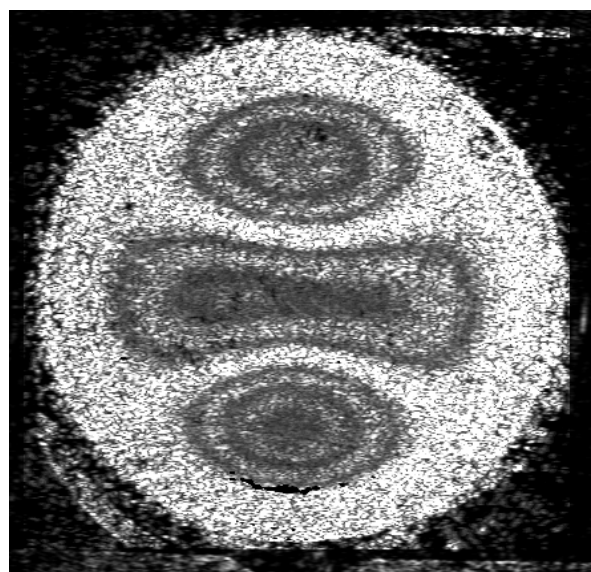
воздуха ступенчато увеличивался. На каждой из ступеней расхода регистрировались спеклограммы собственных колебаний мембраны. На рис. 4 представлены спеклограммы собственных колебаний мембраны на частоте 1203 Гц при взаимодействии с обдувающим ее потоком воздуха.

Стабильность формы колебаний мембраны (рис. 4) прежде всего подтверждает работоспособность созданного программного обеспечения помехоустойчивого ЦСИ, позволяющего производить запись спеклограмм в условиях механической нестабильности оптической схемы, обусловленной как общим снижением виброзащищенности оптического стола, так и наличием пульсационного воздействия потока воздуха на резонансно-колеблющийся объект. Более детальное изучение представленных на рис. 4 спеклограмм позволяет отметить, что воздействие потока при минимальном расходе воздуха приводит к некоторому увеличению амплитуды колебаний мембраны (рис. 3,а и рис. 4,а). В то же время дальнейшее увеличение расхода газа и соответственно дестабилизирующего воздействия сопровождается снижением амплитуды колебаний мембраны и ослаблением видности изолиний спеклограммы с резонансной формой (рис. 4,б).

Для более контрастного выделения отмеченных особенностей видоизменения кар-



а)

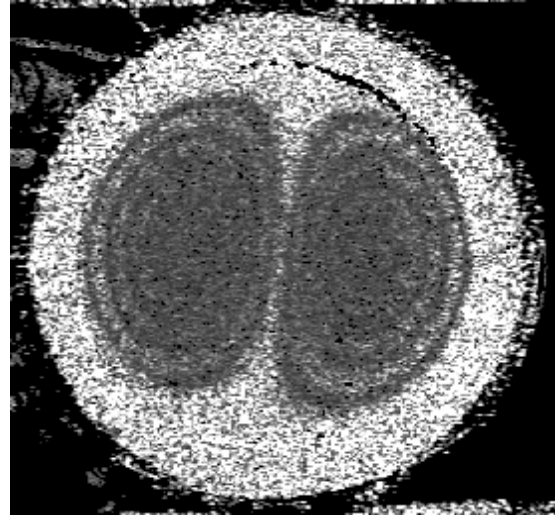


б)

Рис. 3. Формы собственных колебаний мембраны в воздушной среде на частотах: а) 1203 Гц; б) 1665 Гц



а)



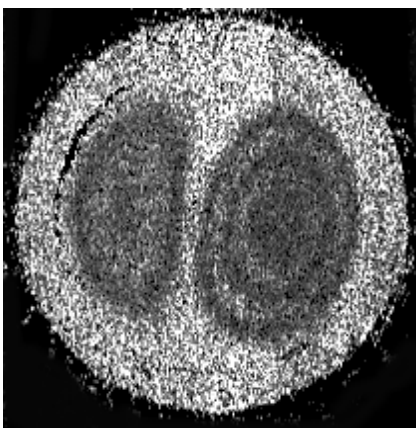
б)

Рис. 4. Видоизменение формы колебаний мембраны на собственной частоте 1203 Гц при увеличении расхода воздуха от а) к б)

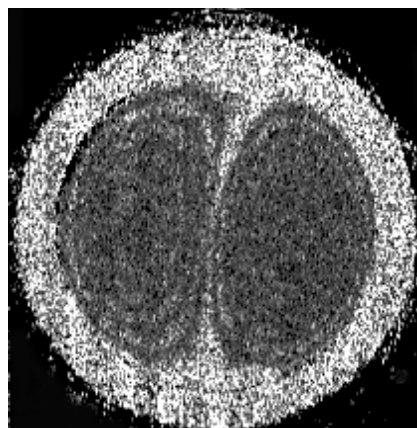
тины колебаний мембраны вышеописанный эксперимент был повторен на частоте 1093 Гц при значительно меньшей амплитуде исходного возбуждения мембраны без потока воздуха (рис. 5,а). При этом зафиксированы ярко выраженные эффекты резкого возрастания амплитуды колебания мембраны при малом расходе воздуха (рис. 5,б) и полное размывание изолиний формы колебаний (рис. 5,в) при максимальном уровне пульсационного воздействия потока на мембрану.

Общий недостаток проведенных экспериментов заключается в отсутствии инфор-

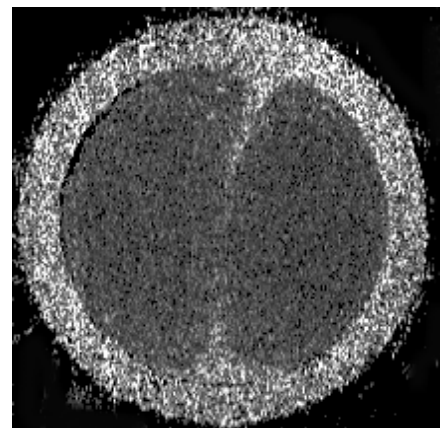
мации о структуре потока воздуха, воздействующего на мембрану. Для визуализации потока в шликрен-методе Теплера необходимо применение газа с отличным от окружающей среды коэффициентом преломления. Поэтому на следующем этапе эксперимента в формирователь потока подавался гелий, и на частоте 1665 Гц регистрировались колебания мембраны в звуковом поле, возбуждаемом в гелий-воздушной среде. Расход гелия ступенчато увеличивался, и для каждого из уровней расхода с помощью ПЦСИ проводилась регистрация видоизменений формы ко-



а)



б)



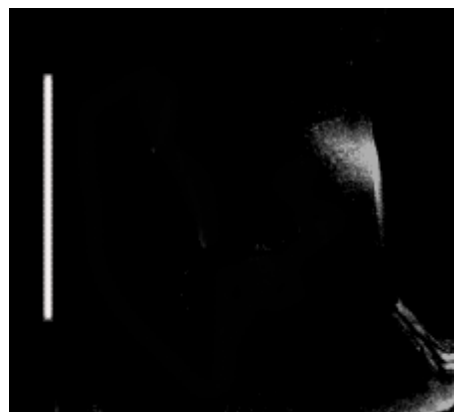
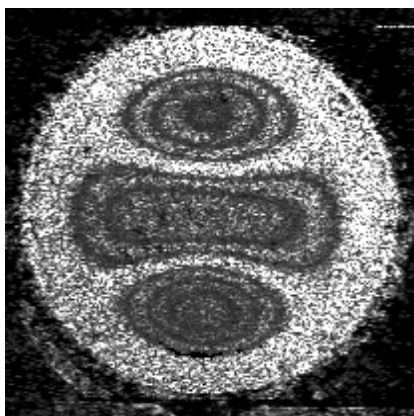
в)

Рис. 5. Видоизменение формы колебаний мембраны на резонансной частоте 1093 Гц при увеличении расхода воздуха: а - без потока воздуха; б - минимальный уровень расхода воздуха; в - максимальный уровень расхода воздуха

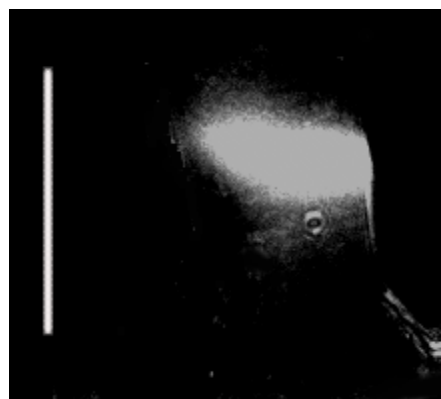
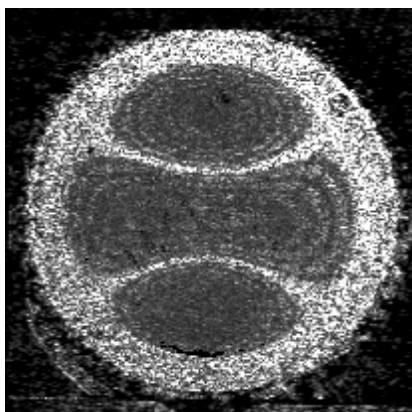
лебаний мембраны. Одновременно с регистрацией колебаний мембраны шпирен-методом визуализировалось истечение гелия из сопла формирователя потока. Характерные формы колебаний мембраны на частоте 1665 Гц и соответствующие им шпиренграммы потока гелия приведены на рис. 6. В процессе проведения эксперимента при подаче гелия в формирователь звука динамика был отмечен (на слух) эффект резкого уси-

ления интенсивности звука. При незначительном увеличении расхода гелия уровень интенсивности звука не снижался.

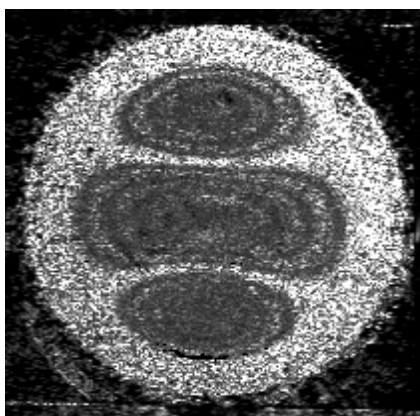
Анализ зарегистрированных спеклограмм и сопоставление их с полученными шпиренграммами (рис. 6,б) показали, что при подаче гелия в формирователь потока с небольшим расходом уровень возбуждения мембраны увеличивается. Из рис. 6,а,б видно, что в гелий-воздушной среде мембрана



а)

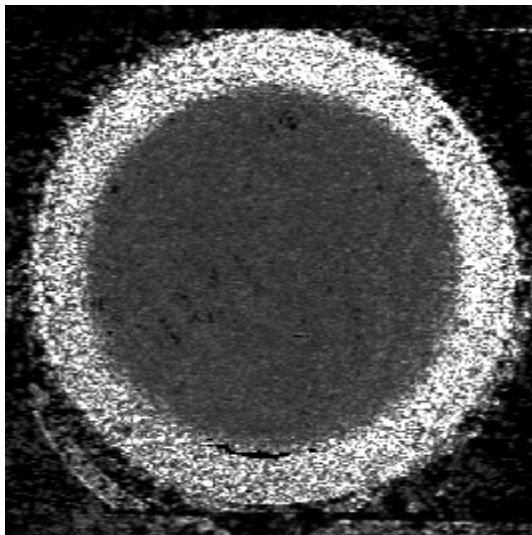


б)

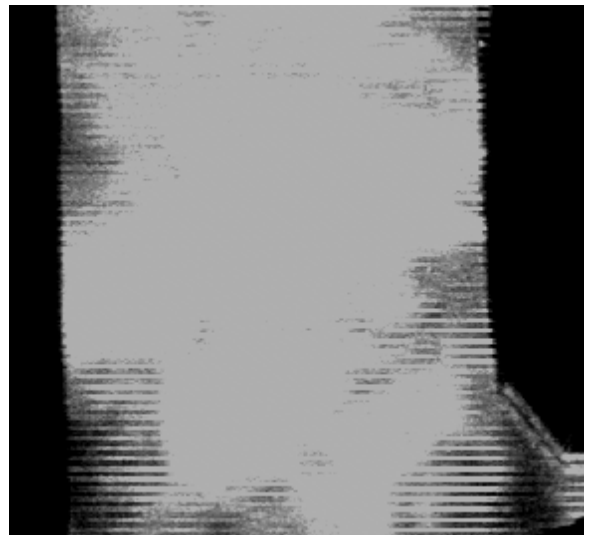


в)

Рис. 6. Изменение картины колебаний мембраны на собственной частоте 1665 Гц при увеличении расхода гелия: формы колебаний мембраны, зарегистрированные помехоустойчивым ЦСИ (слева); шпиренграммы расширения потока гелия на выходе из сопла звукового генератора (справа)



а)



б)

Рис. 7. Эффект полного подавления формы колебаний мембраны на собственной частоте 1665 Гц при максимальном расходе гелия: а - спектрограмма силового кольца мембраны; б - шлиренграмма потока гелия

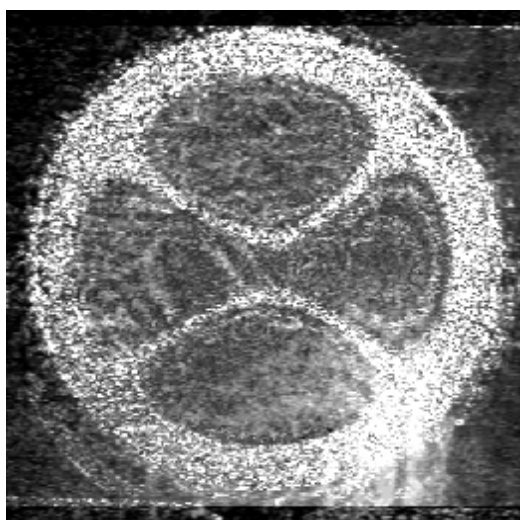
колеблется с большей амплитудой, чем в воздухе (число полос увеличивается). Шлиренграммы на рис. 6,а,б показывают, что поток гелия на начальном этапе не доходил до плоскости мембраны и не оказывал на нее непосредственного влияния. Поэтому можно сделать вывод о том, что на данном этапе эксперимента преобладала акустическая составляющая возбуждения мембраны.

При увеличении расхода гелия поток распространялся до плоскости мембраны (рис. 6,в) и вступал в непосредственное взаимодействие с ней. При этом на спектрограмме (рис. 6,в) наблюдается сокращение числа интерференционных полос, что свидетель-

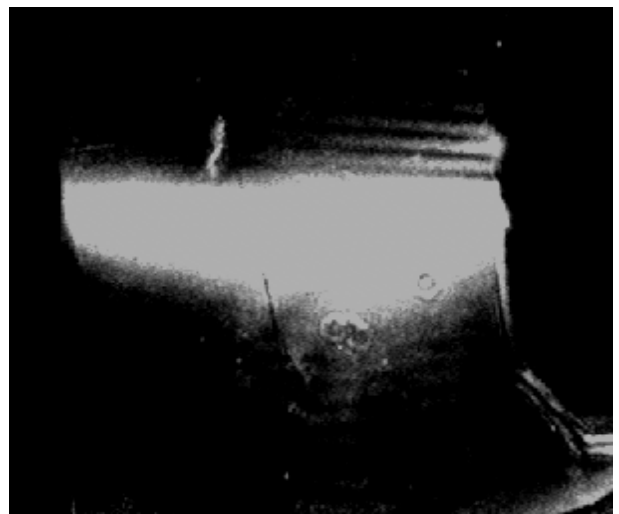
ствует о снижении уровня возбуждения мембраны. В этом случае поток оказывал пульсационное газодинамическое воздействие на мембрану, и амплитуда ее собственных колебаний уменьшалась.

При дальнейшем увеличении расхода гелия турбулентный поток расширился на всю площадь мембраны (рис. 7,б) и хаотическое пульсационное воздействие потока возросло настолько, что анализируемая форма собственных колебаний мембраны полностью подавлялась (рис. 7,а).

На рис. 8 показан эффект локальных видоизменений формы колебаний мембраны на частоте 1665 Гц. Поток гелия распростра-



а)



б)

Рис. 8. Локальные видоизменения формы колебаний мембраны на частоте 1665 Гц с узкой струей гелия: а - форма колебаний мембраны; б - шлиренграмма струи гелия

нялся до плоскости мембраны в виде узкой струи. Нелинейные искажения и перестройка формы собственных колебаний мембраны происходит как за счет пульсационного воздействия потока, так и за счет изменения потерь звукового поля в канале струи.

К следующему эффекту акусто-газодинамического возбуждения колебаний мембраны следует отнести зафиксированную картину нелинейных изменений конфигурации узловых полос формы её колебаний на частоте 1665 Гц (рис. 9).

Представленные на рис. 8 и 9 картины нелинейных искажений позволяют утверждать, что меньшей устойчивостью к воздействию потока характеризуются не узловые полосы, а изолинии пучностей. На рис. 8,а, например, выделен момент, когда пульсационное воздействие нарушает упорядоченную структуру изолиний пучностей. При этом конфигурация узловых полос остается неизменной. На рис. 9 выделены моменты времени, когда пульсационное воздействие начинает превалировать над акустическим. Данные картины с нелинейными узловыми полосами являются неустойчивыми. Они предшествуют моменту полного подавления упорядоченной формы колебаний мембраны пульсацией давления газового потока.

Для объяснения другого крайнего случая, а именно эффекта увеличения уровня

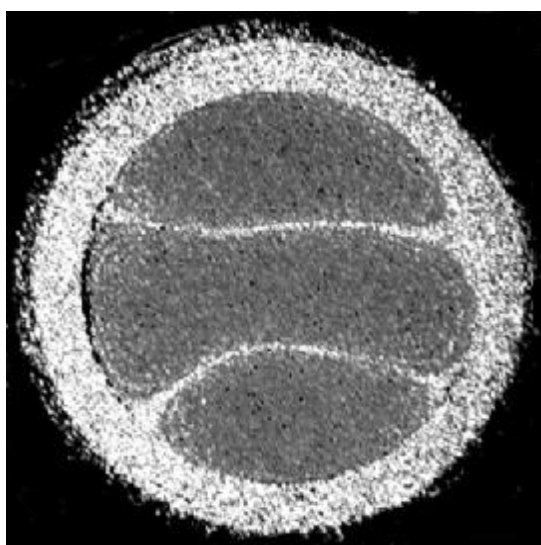
возбуждения мембраны при малых расходах гелия (рис. 6,а,б), можно воспользоваться соотношением между коэффициентами поглощения звука a в гелиевой и воздушной средах. Сравнивая эти рисунки, можно показать, что с увеличением протяженности вытекающей из сопла струи гелия интенсивность возбуждения растет. Это подтверждает то, что струя гелия, находящаяся в звуковом поле динамика, позволяет снизить потери звука на рабочем участке.

Проведен оценочный расчет коэффициентов поглощения звука a в воздухе и гелии в соответствии с выражением [6]:

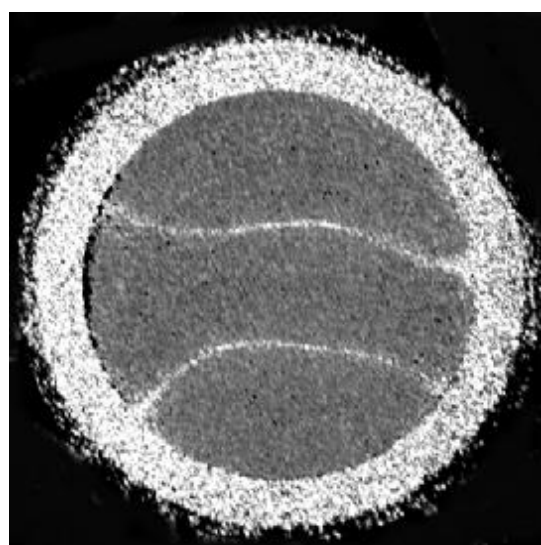
$$a = \frac{w^2}{2rc^3} \left(\frac{4}{3}h + x + c \left(\frac{1}{C_p} + \frac{1}{C_v} \right) \right), \quad (1)$$

где r - плотность газовой среды; c - скорость звука в газе; κ - коэффициент теплопроводности; h, x - коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости, соответственно; w - круговая частота ($w = 2\pi f$); C_p, C_v - теплоемкости среды при постоянном давлении и объеме.

После подстановки в (1) соответствующих значений параметров газовых сред было получено отношение: $a_{\text{возд}}/a_{\text{гелий}} = 3,2$. С другой стороны, рассчитанное по спеклограммам (рис. 3,б и 6,б) отношение максимальных значений амплитуд колебаний мембра-



а)



б)

Рис. 9. Характерный вид картины колебаний мембраны на частоте 1665 Гц с нелинейным изменением конфигурации узловых полос при акусто-газодинамическом возбуждении

ны A_{max} для воздуха и гелия дало значение: $A_{max\ гелий} / A_{max\ воздух} = 3$.

Хорошая сходимость полученных результатов может служить подтверждением достоверности высказанного предположения о необходимости учета распределения коэффициента a среды в звуковом поле при исследовании пульсационно-вибрационных взаимодействий.

Заключение

1. Разработан и прошел апробацию панорамный диагностический комплекс на основе помехоустойчивого ЦСИ и шпирен-метода Теплера, позволяющий проводить бесконтактное определение резонансных частот и форм колебаний конструкций с одновременной регистрацией структурных образований потоков, взаимодействующих с конструкцией.

2. Выявлены эффекты как резкого возрастания амплитуды колебаний мембраны при возбуждении звукового поля в спутном потоке газа малой интенсивности, так и полного подавления формы колебаний мембраны на резонансной частоте при возрастании скорости потока газа. Выделена промежуточная стадия нелинейных изменений конфигурации узловых полос резонансной формы колебаний мембраны в турбулентном потоке газа.

3. Созданный панорамный диагностический комплекс является новым видом высокоинформативного инструментария для исследования динамических процессов нелинейного волнового взаимодействия рабочих

сред и конструкций во многих отраслях науки и техники.

Список литературы

1. Клочков В. П., Козлов Л. Ф., Потыкевич И. В. и др. Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия. Справочник. - Киев: Наукова Думка, 1985.

2. Холдер Д., Порт Р. Теневые методы в аэродинамике. - М.: Мир, 1966.

3. Журавлев О. А., Мединская Л. Н., Шорин В. П. Лазерная диагностика двухфазных течений: Уч. пособ. /Куйбыш. авиац. инс-т, Куйбышев, 1989.

4. Диагностический комплекс для исследования пульсационно-вибрационных процессов гидрогазовых систем/ В. П. Шорин, Е. В. Шахматов, О. А. Журавлев, С. Ю. Комаров, Ю. Н. Шапошников, Ю. Д. Щеглов // Тез. докл. международной научно-технич. конференции "Проблемы и перспективы развития двигателестроения", Ч. 1. – Самара: СГАУ, 2003. - С. 147-149.

5. Применение методов голографической и спекл-интерферометрии для исследования вибрации и шума механических конструкций: Уч. пособ./ Д. С. Еленевский, О. А. Журавлев, Ю. Н. Шапошников, Ю. Д. Щеглов, С. Ю. Комаров; Под редакцией В. П. Шорина / Самарск. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 2005.

6. Справочник по технической акустике. Пер. с нем. / Под. ред. М. Хекла и Х. А. Мюллера. - Л.: Судостроение, 1980.