

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧЕЙ ПЛАСТИНЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПНЕВМОКЛАПАНА

© 2011 О. А. Журавлев, С. Ю. Комаров, Г. М. Макарьянц, Р. Н. Сергеев, Ю. В. Харчикова

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Представлены результаты применения разработанного авторами цифрового спекл-интерферометра с непрерывным лазером для исследования резонансных характеристик рабочей пластины (подвижной заслонки) пневмоклапана при акустическом возбуждении и взаимодействии с корпусом и протекающим газовым потоком.

*Модель клапана, рабочая пластина, акустическое возбуждение, резонансные частоты, взаимодействие с газовым потоком и корпусом.*

Наибольшую сложность для измерения и теоретического описания представляют резонансные колебания элементов конструкций, находящихся во взаимодействии с потоками жидкости или газа. Данный механизм возбуждения является характерным для целого ряда высоконагруженных элементов авиационных ГТД, включая агрегаты пневмо- и гидроавтоматики [1,2]. Проблемность исследования связана с нелинейностью процессов нагружения, требующих применения панорамных диагностических средств для отслеживания как пространственно-временных распределений нагрузок во всех точках колеблющейся поверхности, так и структурных образований в потоках рабочих сред.

Созданный для данных целей панорамный диагностический комплекс [3] включает виброметрический цифровой спекл-интерферометр (ЦСИ) с непрерывным лазером, оснащенный программным методом повышения помехоустойчивости [4], и лазерные визуализаторы структуры течения жидкости и газа [5]. Данный комплекс получил применение для отслеживания нелинейных процессов преобразования резонансных форм колебаний в газовом потоке модельных объектов, отличающихся простотой конфигурации и наличием жесткой заделки по контуру (для круглой мембраны) [6] или по нижней кромке (для прямоугольной пластины) [7]. Упрощение геометрии модельных объектов, определенность условий их заделки и возбуждения снижают проблемность анализа регистрируемых нелинейных видоизменений

резонансных форм колебаний за счет возможности сравнения с известными расчетными и экспериментальными результатами [8]. Однако совершенствование динамических характеристик агрегатов пневмоавтоматики требует перехода к исследованию конструкций, приближенных к реальным.

В работе рассматриваются результаты применения лазерного диагностического комплекса для определения вибрационных характеристик рабочей пластины в экспериментальной модели клапана прямого действия. Новизна данных исследований заключается в том, что определение резонансных характеристик рабочего элемента необходимо проводить в условиях его взаимодействия как с седлом клапана, так и с проходящим через клапан потоком воздуха.

### Описание конструкции пневмоклапана

Основными элементами клапана являются корпус 1, рабочая пластина 2 и массивное основание 3 с встроенным тисочным устройством (рис. 1). Корпус 1 выполнен в виде массивного стального цилиндра с внутренним диаметром 100 мм, имеющим на боковой поверхности плоскую посадочную площадку для закрепления на основании 3 с помощью скобы 4. На рабочем торце цилиндра имеется кольцевая дорожка шириной 3 мм, выполняющая роль седла клапана. Рабочая пластина 2 толщиной 1,4 мм выполнена из алюминиевого сплава и играет роль подвижной заслонки или тарели клапана. Пластина 2 жестко закреплялась в основании 3 по нижней кромке в тисочном устройстве

основания 3 с помощью планки опорной 5 и трех болтов 6.

При сборке конструкции обеспечивалось слабое поджатие пластины 2 по боковой поверхности к торцу седла клапана.

Возбуждение колебаний пластины 2 производится акустическим полем звукового динамика мощностью до 10 Вт, установленного в подвижном поршне внутри цилиндрического корпуса 1. Частота и интенсивность акустического поля задаются звуковым генератором типа ГЗ-56/1. Кроме этого, уровень акустического возбуждения рабочей пластины 2 клапана регулировался путем перемещения поршня в корпусе 1 с возможностью фиксации на расстоянии от 5 до 60 мм.

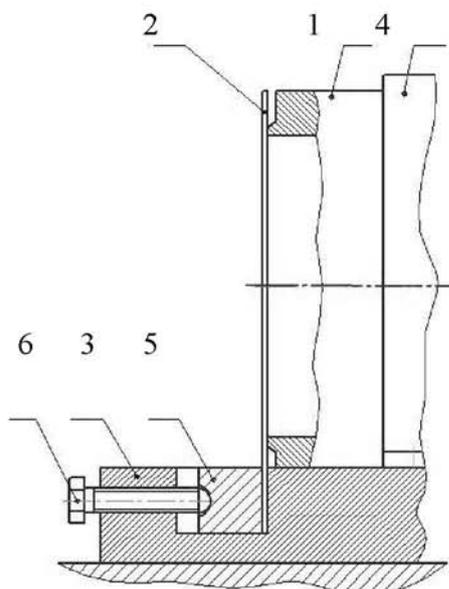


Рис. 1. Схема модели клапана: 1 - корпус; 2- рабочая пластина; 3 – основание; 4 – скоба крепежная; 5 - планка опорная; 6 - болт крепежный

Моделирование условий пульсационного возбуждения клапана обеспечивается подачей сжатого воздуха в полость внутри цилиндрического корпуса, образованную в промежутке между поршнем и рабочей пластиной. Уровень пульсационного возбуждения регулировался с помощью установленного в магистрали клапана расходомера типа SFEI-LE фирмы Dantec с диапазоном измерения до 200 л/мин.

Характерной особенностью созданной модели клапана явилось наличие неравномерности прижатия рабочей пластины к седлу на торце корпуса с образованием двух щелевых зазоров разной длины и высотой не более 100 мкм (рис. 2).

Неравномерность прижатия пластины к седлу клапана определяет условия её работы и требует применения панорамного метода контроля вибрационных характеристик, обеспечивающего выявление особенностей распределения резонансных форм колебаний рабочей пластины. На основании данных о резонансных частотах и формах колебаний пластины, полученных в реальных условиях её прижатия к седлу клапана, можно будет говорить об особенностях взаимодействия пластины с потоком рабочей среды как и о динамических характеристиках клапана в целом.

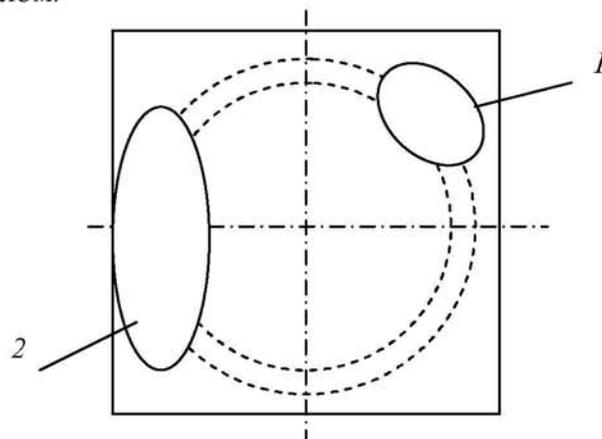


Рис. 2. Схема расположения щелевых зазоров 1, 2 по периметру окружности седла клапана при виде со стороны наружной поверхности рабочей пластины

С другой стороны, задача исследования резонансных характеристик пластин в условиях их закрепления в составе конструкции является актуальной для широкого класса механизмов и машин [9,10]. Поэтому отработка методики применения ЦСИ для получения вибрационных характеристик пластин, возбуждаемых в составе реальных конструкций, имеет определенный научно-практический интерес.

### Результаты исследования вибрационных характеристик рабочей пластины в модели пневмоклапана

Возбуждение колебаний пластины клапана в акустическом поле звукового динамика. Для повышения достоверности результатов исследования вибрационных характеристик выделялись только те формы колебаний рабочей пластины, которые не перестраивались при варьировании интенсивности акустического возбуждения без изменения частоты сигнала. Кроме этого, применялась экспериментально выявленная в [6,7] мето-

дика повышения контрастности получаемых спекл-интерферограмм, основанная на задании некоторого уровня случайных воздействий на регистрируемый колеблющийся объект. Данная методика реализовалась путем подачи предельно малого расхода ( $\leq 4$  л/мин) сжатого воздуха в полость перед рабочей пластиной.

Выполненные исследования показали, что при акустическом возбуждении получаемые формы резонансных колебаний рабочей пластины отслеживают характер её взаимодействия с седлом клапана (рис. 3,а,б).

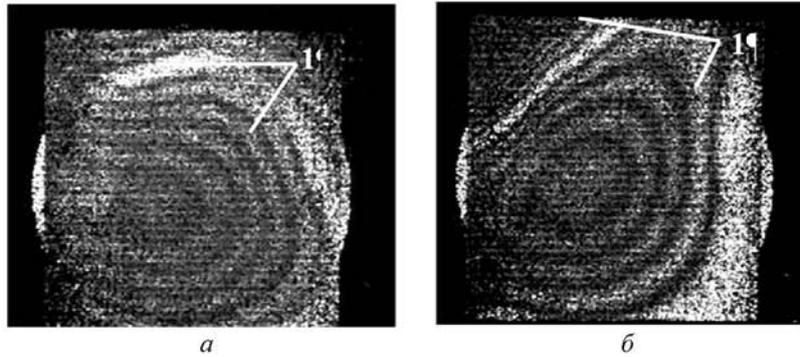


Рис.3. Характерный вид спекл-интерферограмм форм колебаний пластины на резонансных частотах: а-293 Гц; б-725 Гц (1-узловая полоса)

Из рис. 3,а видно, что получаемая на резонансной частоте 293 Гц форма колебаний имела конфигурацию узловой полосы 1 близкую к окружности. Так как конфигурация узловой полосы и ее расположение на рабочей пластине были близки к геометрическим характеристикам седла на торце корпуса клапана, то можно представить, что пластина за счет упругого прижатия к седлу совершала колебания, свойственные мембране с заделкой по контуру [2]. Важным является также то, что разрывы в конфигурации узловой полосы 1 соответствуют расположению зазоров между пластиной и седлом клапана. При этом меньший по протяженности зазор в верхней части окружности контакта пластины с седлом проявляется лишь

в снижении контраста узловой полосы 1. Более наглядно области расположения зазоров между рабочей пластиной и седлом клапана представлены на спекл-интерферограмме, соответствующей форме резонансных колебаний заслонки на частоте 725 Гц (рис. 3,б).

При генерации акустического поля на промежуточной частоте в диапазоне от 376 до 410 Гц наблюдались резонансные формы колебаний пластины, которые по конфигурации узловой полосы можно отнести к крутильным (рис. 4,а,б). Из рис. 4,а видно, что при частоте возбуждения 376 Гц узловая полоса 1 проходит по диагонали и разделяет пластину на две зоны, колеблющиеся в противофазе. Эти зоны колебаний приходятся на область зазоров пластины с седлом клапана.

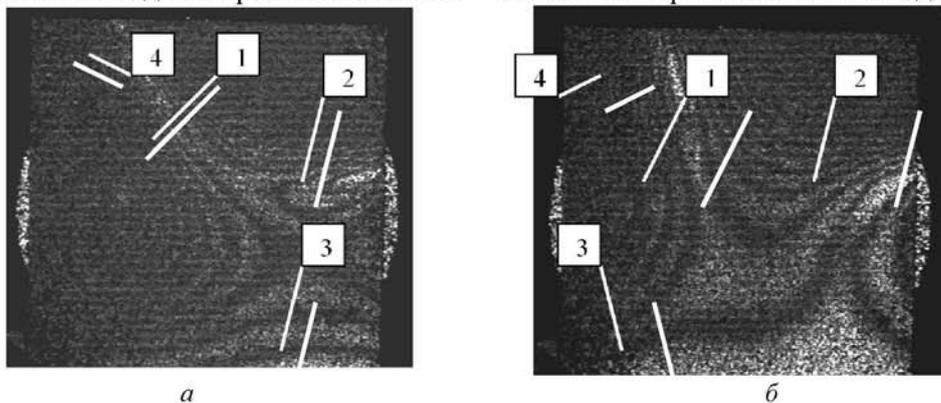


Рис. 4 Крутильная форма резонансных колебаний рабочей пластины на частотах 376 Гц (а) и 405 Гц (б): 1 – узловая полоса; 2 и 4 – области упругого контакта пластины с седлом клапана; 3 – узловая полоса в области жесткой заделки нижней кромки пластины

Конфигурация узловой полосы 1 на рис. 4,а,б характеризует ее расщепление в нижней части на два направления. Здесь можно выделить две области контакта пластины с седлом клапана. Область 2 связана с наличием некоторой кривизны пластины, а область 3 соответствует силовому прижатию пластины к седлу клапана в корпусе тисков. Из рис. 4,б следует, что на частоте 405 Гц узловая полоса 1 опирается на единую узловую полосу, проходящую через области контакта 2 и заделки 3. При этом отмечается тенденция к смещению нижней части узловой полосы на область заделки 3.

Особенностью резонансных форм колебаний пластины в рассматриваемом диапазоне частот является эффективность перестройки конфигурации полос при незначительном смещении частоты колебаний. В качестве подтверждения рассмотрим резонансную форму колебаний пластины на частоте 410 Гц (рис. 5). Из рисунка видно, что узловые полосы колебаний 1, 2 опираются на единую область жесткой заделки пластины в тисках. Следует отметить, что узловая полоса, проходящая через область упругого контакта с седлом, отличается своей сплошностью и повышенной контрастностью

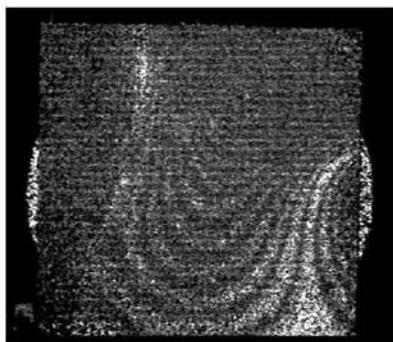


Рис. 5. Резонансная форма колебаний рабочей пластины клапана на частоте 410 Гц: 1, 2 – узловые полосы

### Возбуждение колебаний рабочей пластины клапана потоком проходящего воздуха

Наличие протяженных зазоров в контактной паре рабочая пластина – седло приводит к возбуждению пульсационных колебаний рабочего элемента клапана при малых расходах проходящего воздуха (рис. 6).

Данный режим колебаний пластины в потоке газа лишь условно можно отнести к гармоническому. При отсутствии стабильности частоты и амплитуды колебаний объекта

в потоке газа применение виброметрического ЦСИ на основе метода усреднения во времени становится неэффективным [11]. Для обеспечения возможности применения ЦСИ в данных исследованиях необходимо введение механизмов, способствующих «упорядочиванию» процесса пульсационных колебаний. В [7] в качестве упорядочивающего фактора можно рассматривать минимизацию площади контакта пластины с потоком воздуха за счет применения щелевого сопла. При этом взаимодействие пластины с обтекающим её потоком происходило только по верхней кромке. Это позволило с помощью ЦСИ выделить в зависимости от величины расхода газа две характерные формы колебаний (изгибная и крутильная), которые соответствовали режиму резонансного возбуждения пластины.



Рис. 6. Характерный вид структуры турбулентного потока воздуха, выходящего через область верхнего зазора между пластиной 1 и седлом клапана при расходе 8 л/мин

В наших условиях возбуждение пульсационных колебаний рабочей пластины соответствовало режиму открывания клапана при малом расходе воздуха ( $\leq 10$  л/мин). Малая величина расхода воздуха приводила к столь незначительному смещению рабочей пластины, что сохранялись области упругого контакта пластины с седлом клапана. Отсутствие отрыва пластины от опоры позволило применить ЦСИ для визуализации характера изменения площади контакта пластины с седлом клапана при нарастании величины расхода газа.



### **Заключение**

На основе помехоустойчивого ЦСИ с непрерывным лазером разработана и создана экспериментальная установка для определения резонансных характеристик рабочих пластин (заслонок, тарелей) широкоапертурных клапанов при их акустическом и газодинамическом возбуждении на этапе разгерметизации.

Для созданной модели клапана с рабочей пластиной прямоугольной формы, имеющей жесткую заделку по нижней кромке, выявлено изменение модальных характеристик заслонки в условиях акустического и акустико-вихревого возбуждения. Определение резонансных характеристик рабочей пластины выполнено в реальных условиях неравномерности упругого прижатия пластины к седлу клапана и наличия зазоров.

Впервые разработана методика применения ЦСИ с непрерывным лазером для контроля полноты прилегания рабочих кромок заслонки и седла клапана.

### **Библиографический список**

1. Бугаенко, В.Ф. Пневмоавтоматика ракетно-космических систем [Текст] / В.Ф. Бугаенко. – М.: Машиностроение, 1979. -168 с.
2. Полухин, Д.А. Отработка пневмогидросистем двигательных установок и космических аппаратов с ЖРД [Текст] / Д.А. Полухин, В.Н. Орешенко, В.А. Морозов – М.: Машиностроение, 1987. - 247 с.
3. Диагностический комплекс для исследования пульсационно-вибрационных процессов гидрогазовых систем [Текст] / В.П. Шорин, Е.В. Шахматов, О.А. Журавлев [и др.] // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двига-

телестроения». – Самара: СГАУ, 2003. -Ч.1. - С. 147-149.

4. Автоматизированная виброметрия механических конструкций на основе помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра [Текст] / под ред. В.П. Шорина. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2007. - 124 с.

5. Журавлев, О.А. Лазерная диагностика двухфазных течений [Текст]: учеб. пособие / О.А. Журавлев, Л.Н. Мединская, В.П. Шорин – Куйбышев: КуАИ, 1989. – 74 с.

6. Экспериментальное исследование пульсационно-вибрационных процессов взаимодействия потока с конструкцией [Текст] / О.А. Журавлев, С.Ю. Комаров, Ю.Н. Шапошников [и др.] // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. -№1. - С.69-76.

7. Исследование резонансных колебаний пластины в условиях пульсационно-вибрационного возбуждения [Текст] / О.А. Журавлев, А.В. Ивченко, А.Н. Крючков [и др.] // Материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». – Самара: СГАУ, 2009. -Ч.1. - С. 194-196.

8. Макаева, Р.Х. Исследование резонансных форм и частот колебаний пластин применительно к лопаткам турбомашин [Текст] / Р.Х. Макаева, А.М. Царева, А.Х. Каримов // Изв. вузов. Авиационная техника, 2008. -№3. - С.14-18.

9. Вибрация в технике [Текст]: справочник. В 6 т. Т. 5: измерения и испытания / Под ред. М.Д. Генкина. – М.: Машиностроение, 1995. - 456 с.

10. Явленский, К.Н. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем [Текст] / К.Н. Явленский, А.К. Явленский - М.: Машиностроение, 1983. - 239с.

## **INVESTIGATION OF RESONANT OSCILLATIONS WORKING PLATES IN EXPERIMENTAL MODELS OF PNEUMATIC VALVE**

© 2011 O. A. Zhuravliov, S. Y. Komarov, G. M. Makaryants, R. N. Sergeev, Ju. V. Harchikova

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

The article presents the results of the application developed by the authors of digital speckle interferometer with a continuous laser to study the resonance characteristics of the working plate (rolling shutter) pneumatic valve with acoustic stimulation and interaction with the body and the flowing gas stream.

*The valves, the working plate, the acoustic excitation, the resonant frequency, the interaction with the gas stream and the body.*

### Информация об авторах

**Журавлев Олег Анатольевич**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-63. Область научных интересов: лазерные контрольно-измерительные системы.

**Комаров Сергей Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-63. Область научных интересов: лазерные контрольно-измерительные системы.

**Макарьянц Георгий Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-63. Область научных интересов: вибрационно-пульсационные процессы конструкций.

**Сергеев Роман Николаевич**, аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [romansr@yandex.ru](mailto:romansr@yandex.ru). Область научных интересов: космонавтика, механика, оптика, лазерные контрольно-измерительные системы.

**Харчикова Юлия Владимировна**, магистр кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-63. Область научных интересов: двигателестроение, автоматика, механика, оптика.

**Zhuravlev Oleg Anatolievich**, Doctor of Technical Science, Professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-63. Area of research: laser test and measuring system.

**Komarov Sergey Yurievich**, Candidate of Technical Science, senior lecturer, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-63. Area of research: laser test and measuring system.

**Makaryants Georgy .Michailovich**, Candidate of Technical Science, senior lecturer, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-63. Area of research: engine building, automation, mechanics and acoustic.

**Sergeev Roman Nikolaevich**, postgraduate, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [romansr@yandex.ru](mailto:romansr@yandex.ru). Area of research: astronautics, mechanics, optics and laser test and measuring system.

**Harchikova Yulia Vladimirovna**, the master, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-63. Area of research: engine building, automation, mechanics and optics.