

# ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ЗАДАЧ

*В.Я. Модорский*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

В процессе работы сформулированы физическая и математическая модели газогидродинамического процесса. Произведены численные эксперименты по моделированию потока в канале, проведены вычислительные эксперименты по оценке напряженно-деформированного состояния силовой конструкции. Разработана экспериментальная установка по анализу газопругих процессов в энергетических установках. Выявлены закономерности усиления колебаний в модельных каналах при варьировании параметров потока и конструкции. В результате работы накоплен и структурирован банк данных численных экспериментов по исследованию газогидродинамических процессов в каналах наукоемких изделий, сформулированы рекомендации по уменьшению интенсивности непрогнозируемых эффектов.

## **Введение**

Воздействие на динамические системы может приводить к тому, что их выходные характеристики отклоняются от расчетных. При определенных условиях может оказаться, что параметры движения системы начинают колебаться с увеличивающейся со временем амплитудой, что недопустимо [1].

Неустойчивость существенно снижает надежность конструкции, ухудшает ее рабочие характеристики и может привести к ее разрушению. Поэтому выявлению причин неустойчивости рабочих процессов, ликвидации колебаний или снижению их амплитуды до допустимого уровня уделяется большое внимание.

Неустойчивые рабочие процессы реализуются при наличии возмущений, образующих волны давления [1]. Источником неустойчивости может являться резонансное взаимодействие системы «поток газа – конструкция» [2]. При резонансе, когда одна из собственных частот колебаний конструкции близка или кратна частоте газодинамических колебаний в этой же конструкции, могут проявляться неустойчивые эффекты типа «флаттер». Частота и форма наблюдающихся при этом волн зависят от геометрических и физико-механических характеристик конструкции и от параметров нагрузки.

## **1. Исследования взаимодействия в динамической системе «газ–конструкция»**

Моделирование течения газа для принятой модели проточной части экспериментальной установки выполнялось в программном комплексе *FlowVision*.

Программный комплекс *FlowVision* предназначен для моделирования трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также визуализации этих течений методами компьютерной графики.

Моделируемые течения включают в себя стационарные и нестационарные, сжимаемые, слабосжимаемые и несжимаемые потоки жидкости и газа. Использование различных моделей турбулентности и адаптивной расчетной сетки позволяет моделировать сложные движения жидкости, включая течения с сильной закруткой, горением, течения со свободной поверхностью.

*FlowVision* основан на конечно-объемном методе решения уравнений газодинамики и использует прямоугольную адаптивную сетку с локальным измельчением. Для ап-

проксимации криволинейной геометрии с повышенной точностью *FlowVision* использует технологию подсеточного разрешения геометрии. Эта технология позволяет импортировать геометрию из систем САПР и обмениваться информацией с системами конечно-элементного анализа. Использование этой технологии позволило решить проблему автоматической генерации сетки – чтобы сгенерировать сетку, достаточно задать всего лишь несколько параметров, после чего сетка автоматически генерируется для расчетной области, имеющей геометрию любой степени сложности.

Процесс расчета течения рабочего тела включает в себя следующие шаги, выполняемые пользователем:

- создание области расчета («геометрии» устройства) в САПР и импорт ее через форматы *VRML*, *STL*, *DEFORM*, *ABAQUS*, *ANSYS* или *NASTRAN* в *FlowVision* (*IGES*, *PARASOLID*, *VDAFS* с помощью *Flow3D Vision*);
- задание физических параметров;
- задание математической модели;
- задание граничных условий;
- задание исходной расчетной сетки и критериев её адаптации по решению и по граничным условиям;
- задание параметров методов расчета;
- проведение расчета;
- просмотр результатов расчета в графической форме («визуализация» результатов расчетов) и сохранение данных в файлы;
- оценка точности расчетов методом сходимости по сетке [4].

В работе рассмотрено два возможных варианта возбуждений колебаний воздуха в экспериментальной установке: при резком открытии штуцера для отвода рабочего тела и при работе динамика с частотой 330 Гц.

Расчет собственных частот модельной камеры экспериментальной установки выполняется в инженерном пакете *ANSYS Workbench*.

*ANSYS* – многоцелевой конечно-элементный пакет для проведения анализа в широком спектре инженерных дисциплин. Он занимает одно из ведущих мест среди универсальных *CAE*-систем и предметно ориентированных (или методо-ориентированных) САПР на основе метода конечных или граничных элементов (*Cosmos*, *Pro-Engineering*, *ABAQUS*, *NASTRAN* и другие).

*Workbench* – это новое поколение программных продуктов, использующих возможности решателей *ANSYS*. Эта среда инженерного анализа предоставляет уникальные возможности по интеграции с САД системами (в том числе двунаправленную ассоциативную связь). Можно сочетать процесс проектирования в САД пакете с получением достоверных данных расчетов и проведением оптимизации конструкции. *Workbench Products* состоят из модулей: *Design Simulation* (использует лицензии *DesignSpace*, *Professional*, *Structural*, *Mechanical*), *Design Modeler*, *Design Explorer*, *FE Modeler* [5].

Последовательность решения задач в *ANSYS Workbench* следующая:

- загрузить геометрическую модель;
- задать параметры сетки и создать сеточную модель;
- задать свойства материалов;
- закрепить конструкцию;
- выбрать опции расчета;
- настроить решатель;
- провести расчет;
- провести анализ результатов.

## 2. Разработка конструктивной схемы экспериментальной установки

В рамках этого этапа сформулированы требования к рабочим параметрам и конструкции и в соответствии с ними разработана экспериментальная установка.

При проектировании экспериментальной установки вопрос обеспечения необходимой резонансной частоты колебаний в системе «поток газа – конструкция» является очень важным.

Известно, что резонанс наблюдается при близости частот продольных колебаний в газе и в конструкции.

$$f_r = f_k. \quad (1)$$

Из этого следует, что геометрические и физико-механические характеристики модельной камеры должны быть подобраны так, чтобы выполнялось условие (1).

Подберем геометрические характеристики модельной камеры.

В качестве математической модели продольных колебаний корпуса модельной камеры рассмотрим упругий консольный стержень длиной  $l$ , на свободном конце которого находится сосредоточенная масса. В данной задаче инерционностью стержня можно пренебречь и учитывать только его упругость.

Тогда частоты продольных колебаний, возникающие в корпусе камеры, можно вычислить по формуле [3]:

$$f_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{M}}, \quad (2)$$

где  $c$  – жесткость конструкции,  $M$  – масса груза.

Частота продольных колебаний газа в замкнутой трубе:

$$f_z = \frac{a}{2l}, \quad (3)$$

где  $a = \sqrt{k \frac{P}{\rho}}$  – скорость распространения возмущений в газе,  $k$  – показатель адиабаты,  $P$  – давление,  $\rho$  – плотность.

Параметры установки (рис. 1) выбраны так, что частота продольных колебаний в газе  $f_r = 330$  Гц.

Из условия резонансного взаимодействия (1) следует  $f_k = 330$  Гц.

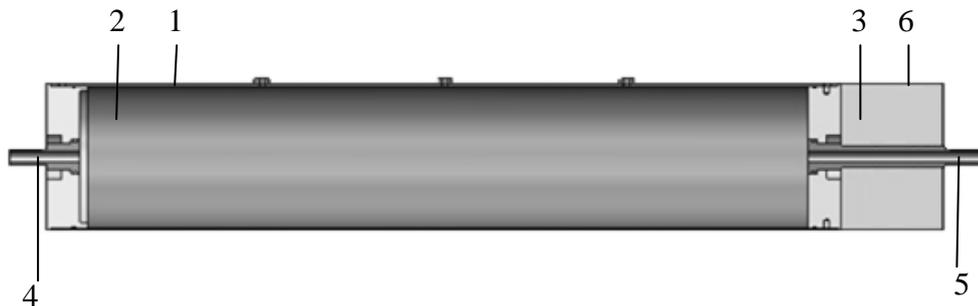


Рис. 1. Конструктивная схема модельной камеры: 1 – корпус; 2, 3 – крышки; 4, 5 – штуцеры; 6 – модельные элементы

В ряде случаев для системы в целом значения  $f_r$  и  $f_k$  могут отличаться от парциальных [4]. Необходимые значения частот мы можем получать при варьировании (подборе) характеристик конструкции и параметров нагрузки. Таким образом, потребуются дополнительная настройка модельной камеры на резонансный режим.

Сформулированы следующие требования, предъявляемые к экспериментальной установке:

- основание должно обладать необходимым запасом прочности и жесткости, обеспечивать необходимую ориентацию и надежное крепление модельной камеры экспериментальной установки;
- конструкция модельной камеры должна обеспечивать настройку резонансного взаимодействия в системе «поток газа – конструкция»; возможность оснащения корпуса модельной камеры необходимыми средствами измерения, с помощью которых можно получить информацию о параметрах потока рабочего тела и уровне деформаций конструкции в контрольных точках; возможность установки сменных корпусов, отличающихся материалом и геометрическими характеристиками; модельная камера не должна являться сосудом, работающим под давлением;
- система регистрации, измерения и анализа должна обеспечивать регистрацию на ПК временных зависимостей давления, виброускорений, виброскоростей и виброперемещений в нескольких контрольных точках конструкции; точность измерений; проведение комплексного анализа сигналов, включая спектральный анализ; обработку файлов измерения в *MS Excel*;
- система возбуждения колебаний должна обеспечивать безопасную работу на экспериментальной установке.

Исходя из этого, можно предложить схему экспериментальной установки, которая представлена на рис. 2.

Модельная камера вертикально устанавливается на основание. Крепление ограничивает возможность смещения модельной камеры под действием волн давления.

Для моделирования потока газа предусмотрена система подачи и отвода рабочего тела (газа). На первом этапе в качестве рабочего тела взят воздух.

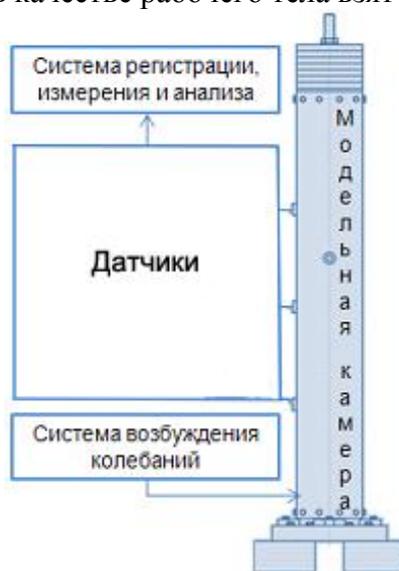


Рис. 2. Конструктивная схема экспериментальной установки

Такая конструкция модельной камеры позволяет реализовать несколько вариантов возбуждений колебаний воздуха в экспериментальной установке.

В результате проведения вычислительных экспериментов получены временные зависимости изменения параметров и кинограммы процессов. В ходе проведения физических экспериментов получены показания вибродатчиков и микрофонов. Проведен спектральный анализ этих сигналов и подтверждены результаты вычислительных экспериментов.

## Литература

1. Присняков В.Ф. Динамика ракетных двигателей твердого топлива. – М.: Машиностроение, 1984. – 248 с.
2. Модорский В.Я. Нелинейное деформирование стержневой конструкции при наддуве // Авиационная техника. 2003. №3. С. 63–64.
3. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т. / Ред. В.Н. Челомей. – Т.1 Колебаний линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. – М.: Машиностроение, 1978. 352 с.
4. Модорский В.Я., Соколкин Ю.В. Газоупругие процессы в энергетических установках / Под ред. Ю.В. Соколкина. – М.: Физматлит, 2007. – 176 с.
5. Котов А.Г. САПР изделий из композиционных материалов. Моделирование процессов деформирования и разрушения в среде ANSYS. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 351 с.