

# Разработка расчетно-экспериментального комплекса на базе супер-ЭВМ для анализа процессов в энергетических установках\*

Н.В. Горбушина, П.В. Писарев, В.Я. Модорский  
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»

Разработан расчетно-экспериментальный комплекс для численного и физического моделирования междисциплинарных задач механики сплошных сред, в частности изучения и верификации динамических процессов в системе «поток газа – деформируемая конструкция»

Действие на динамические системы различных возмущений приводит к тому, что их выходные характеристики отклоняются от расчетных. При определенных условиях возможно возникновение колебаний с увеличивающейся во времени амплитудой, появляются неустойчивые режимы работы, что, как правило, недопустимо.

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

Различные неустойчивые рабочие процессы реализуются при наличии возмущений, образующих волны давления. Источником неустойчивости может являться резонансное взаимодействие системы «поток газа – конструкция» [1]. Резонанс возникает, когда частота колебаний давления газа близка к частоте колебаний конструкции. Частота и форма наблюдающихся при этом волн зависят от геометрических и физико-механических характеристик конструкции и от параметров нагрузки.

Для поиска опасных резонансных режимов в газонаполненной конструкции необходимо провести комплексное экспериментально-теоретическое исследование параметров динамического поведения системы «поток газа – конструкция». Данный подход предполагает проведение взаимодополняющих физического и вычислительного экспериментов. Вычислительный эксперимент по исследованию процессов в динамической системе «газ-конструкция» предполагает использование высокопроизводительного вычислительного комплекса ПНИПУ, производительностью 4 ТФлопса.

Подготовку реализации расчетно-экспериментального подхода можно провести в два этапа. На первом этапе - реализация вычислительных экспериментов, моделирующих работу экспериментальной установки и уточнение ее проектных параметров. На втором этапе – проектирование, изготовление установки и проведение экспериментальных работ по исследованию динамических процессов и верификации математических моделей.

Для реализации первого этапа предполагается использование системы инженерного анализа ANSYS CFX и ANSYS Mechanical. Рассматривается консольный тонкостенный конечномерный цилиндр, нагруженный изменяющимся внутренним давлением (**Рис.1**).

Для проведения численного эксперимента данной работы были задействованы 2 восьмиядерных вычислительных узла кластера Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ. Расчеты проводились по схеме, показанной на **Рис. 2**. Математическая модель изложена в [2]. В качестве приоритетной исполнительской среды была выбрана Windows Compute Cluster Server 2003. Вместе с тем, на кластере ПНИПУ реализована возможность одновременной работы разноплатформенных операционных систем Linux и Windows. Использование Windows Compute Cluster Server 2003 позволило пользователям

---

\* Работы выполнены при поддержке гранта РФФИ №11-07-96003.

работать в более привычной среде, так как работа под Linux зачастую требует специальных знаний, это в свою очередь затрудняет работу рядовых инженеров-пользователей.

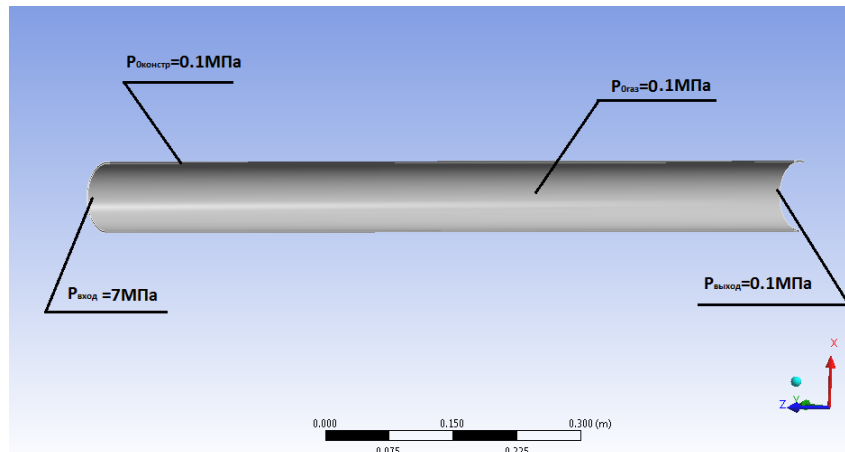


Рис. 1. Граничные условия

В ходе вычислительных экспериментов имеется возможность расчета временных зависимостей для перемещений в оболочке и давлений в газодинамической полости. Следовательно, имеется возможность оценки частот как в газе, так и в конструкции. Их совпадение свидетельствует о резонансе в системе.



Рис. 2. Схема проведения вычислительного эксперимента на кластере

На Рис. 3 и Рис. 4 приводятся изображения расчетной сетки для конструкции (300000 ячеек) и газодинамической полости (800000 ячеек), соответственно.

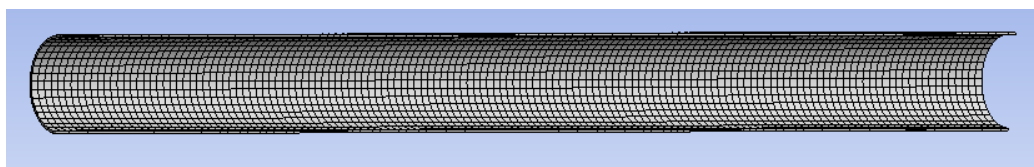


Рис. 3. Общий вид расчетной сетки для упругой трубы

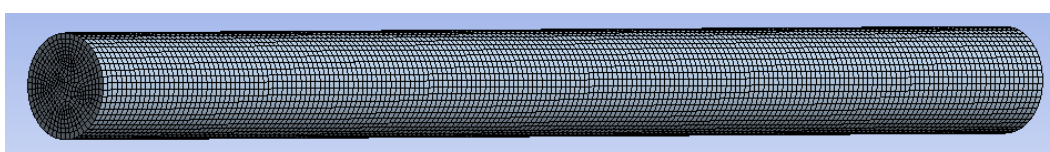


Рис. 4. Общий вид расчетной сетки для проточной части

Проводится анализ переходных процессов в газодинамическом потоке и конструкции. Рассчитываются поля давлений и скоростей в потоке газа (Рис.5,6).

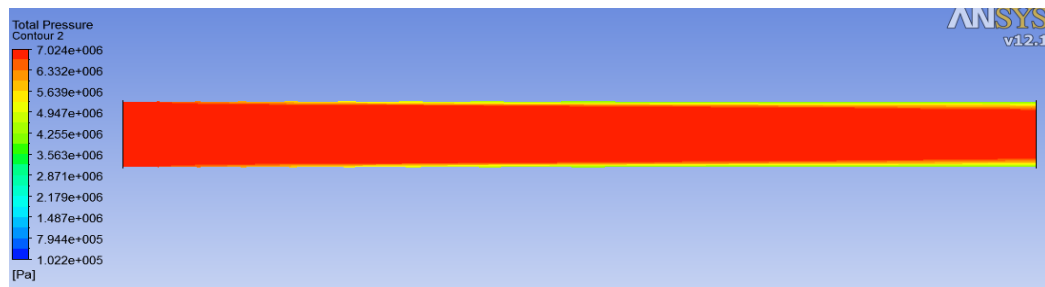


Рис. 5. Распределение полного давления по продольному сечению трубы

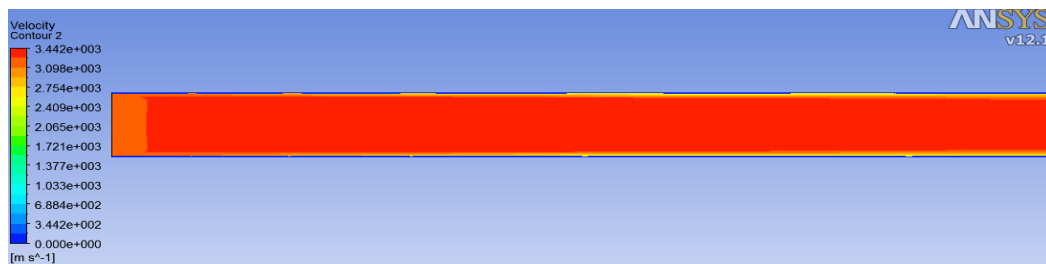


Рис. 6. Распределение модуля скорости по продольному сечению трубы

Производится оценка напряженно-деформированного состояния цилиндрической конструкции (Рис.7,8).

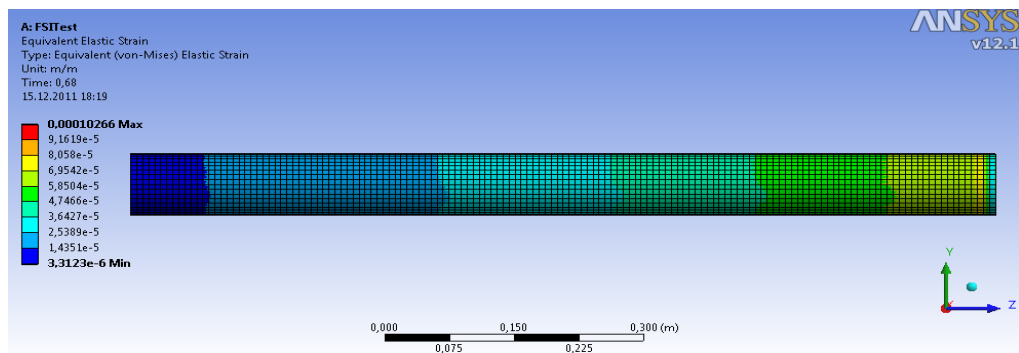


Рис. 7. Деформации по Мизесу

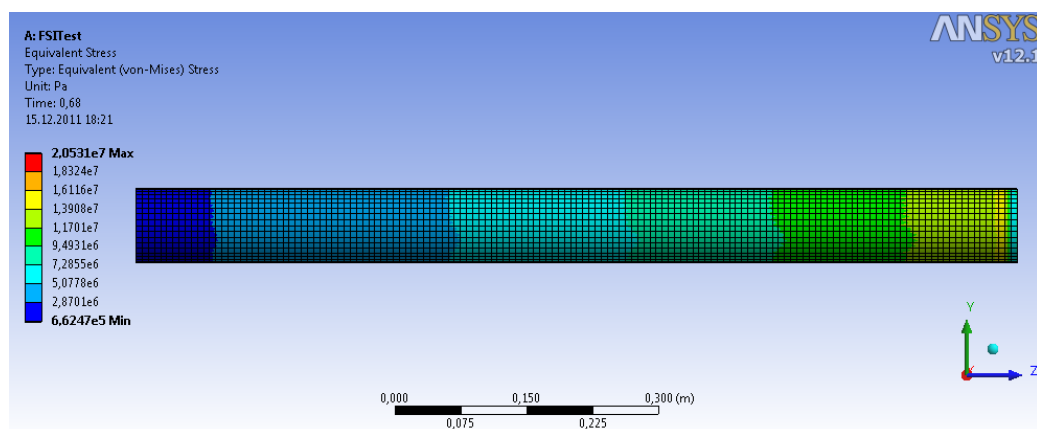
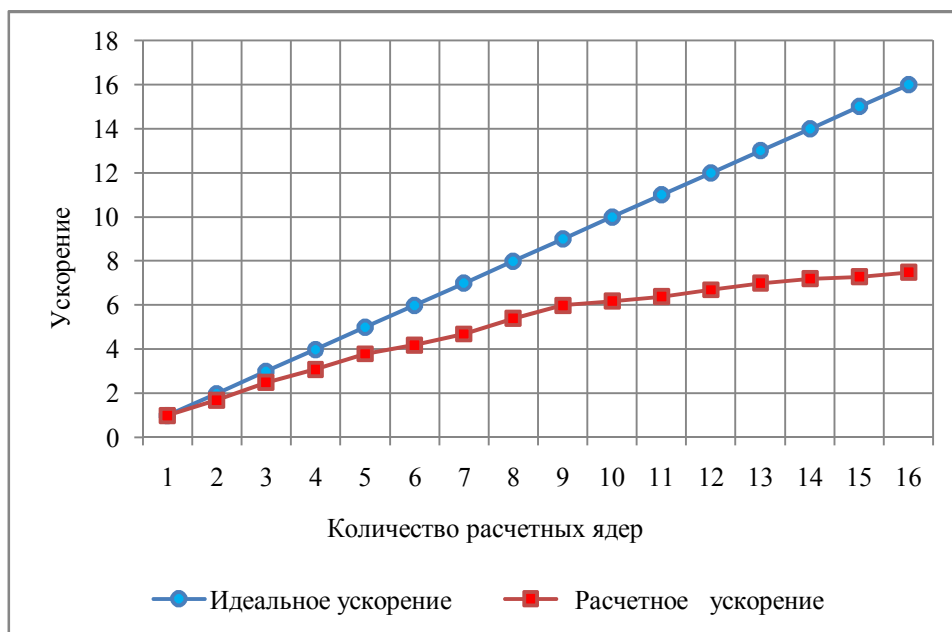


Рис. 8. Напряжения по Мизесу.

Производится гармонический анализ колебательных процессов в газе и конструкции.

На **Рис. 9** представлен график масштабируемости - зависимость ускорения (по вертикали) от количества расчетных ядер (по горизонтали).



**Рис. 9.** График масштабируемости

Из графика видно, что эффективное ускорение для данного класса задач, количества расчетных узлов и используемого ПО наблюдается при использовании от 2 до 8 ядер, при последующем увеличении количества ядер до 16 ускорение резко снижается.

Для верификации численных расчетов и проведения физических экспериментов разработана специальная модельная установка, конструкция которой обеспечивает выполнение условий резонансного взаимодействия потока газа с деформируемой конструкцией.

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

Экспериментальная установка состоит из следующих основных частей: стапель, модельная камера, система подачи и отвода рабочего тела, измерительный комплекс.

Сформулированы следующие требования, предъявляемые к экспериментальной установке:

- стапель должен обладать необходимым запасом прочности и жесткости, обеспечивать необходимую ориентацию и надежное крепление средств эксперимента;

- 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 высокого давления;

- система подачи рабочего тела должна иметь предохранительный клапан, редуктор, автоматическое пуск-выключение и обеспечивать постоянное давление на входе (до 1 МПа) с возможностью контроля по манометру; система отвода рабочего тела должна обеспечивать безопасную эксплуатацию установки;

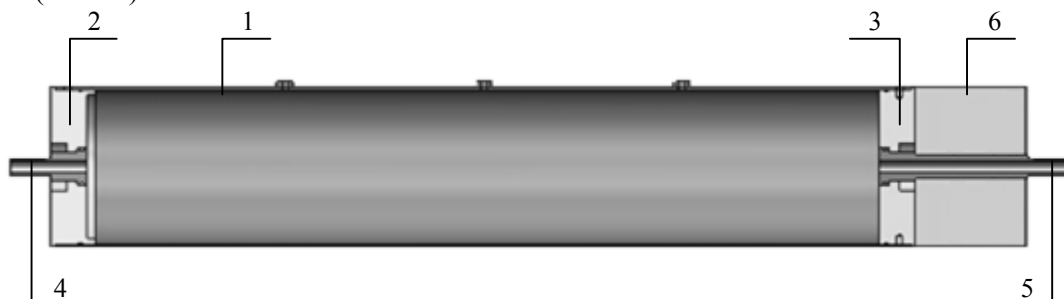
- измерительный комплекс должен обеспечивать высокую надежность и точность измерений; помехоустойчивость измерительной аппаратуры при работе ее в условиях стенда; многоканальность системы измерения; регистрацию и обработку временных зависимостей на персональном компьютере.

- для повышения безопасности при работах на установке необходимо использовать бронекабину.

Стапель конструктивно выполняется в виде силовой рамы с ложементом, на которую вертикально устанавливается модельная камера. Ложемент ограничивает возможность углового 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.

Исходя из предъявляемых требований, разработана конструктивная схема модельной камеры (Рис.10).



**Рис. 10.** Конструктивная схема модельной камеры: 1– корпус, 2– передняя крышка, 3– задняя крышка, 4,5– входной и выходной штуцеры, 6– груз

Чтобы получить качественную и количественную оценку рабочих процессов, протекающих в экспериментальной установке, используется комплекс измерительных средств и устройств. Измеряемые параметры: давление внутри модельной камеры определяется датчиками давления общего назначения и деформации корпуса определяются пьезоэлектрическими датчиками динамических деформаций.

Для измерения, регистрации и анализа результатов экспериментов предлагается модульная платформа PXI компании National Instruments. Архитектура PXI включает в себя шасси, в которое устанавливаются модульные приборы, контроллеры или интерфейсы для удаленного управления платформой.

Объектом эксперимента является модельная камера, корпус которой конструктивно представляет собой трубу.

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.

$$f_z = f_k \quad (1)$$

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  $c = \frac{2\pi ER\delta}{l}$  – жесткость конструкции,  $E$  – модуль Юнга материала,  $R$  – радиус,  $\delta$  – толщина стенки,  $l$  – длина;  $M$  – масса груза.

Частота продольных колебаний газа в замкнутой трубе:

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

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

Согласно (1) можно приравнять правые части выражений (2) и (3) и записать:

$$\frac{a}{l} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{M}} \quad (4)$$

Пусть выбранная модель имеет следующие характеристики:  $l = 1\text{ м}$ ,  $R = 0,0825\text{ м}$ ,  $\delta = 0,001\text{ м}$ ,  $E = 2 \cdot 10^{11}\text{ Па}$ ,  $k = 1,49$ ,  $P = 1,013 \cdot 10^5\text{ Па}$ ,  $\rho = 1,29\text{ кг/м}^3$ .

Тогда, согласно (3), частота продольных колебаний в газе:  $f_z = 330\text{ Гц}$ .

Из условия резонансного взаимодействия (1) следует  $f_k = 330\text{ Гц}$ .

Тогда, согласно (2), масса присоединенного груза  $M = 24,12\text{ кг}$ .

Следовательно, для обеспечения необходимой резонансной частоты колебаний к торцу модели модельной камеры должен быть присоединен груз массой 24,12 кг.

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

## Литература

1. Модорский В.Я. Нелинейное деформирование стержневой конструкции при наддуве. – Авиационная техника, 2003, №3, с.63 – 64.
2. Методическое руководство по ANSYS CFX 12.1 2010.
3. Модорский В.Я., Соколкин Ю.В. Газоупругие процессы в энергетических установках//Под ред. Соколкина Ю.В. М.: Наука. Физматлит, 2007.-176 с.
4. Численное исследование актуальных проблем машиностроения и механики сплошных и сыпучих сред методом крупных частиц: монография / Ю.М. Давыдов [и др.]. – М.: Национальная академия прикладных наук, Международная ассоциация разработчиков и пользователей метода крупных частиц, 1995. – 1595с.