

В статье описывается применение суперкомпьютера для обработки больших потоков данных с модельной экспериментальной установки по исследованию быстротекущих процессов в динамической системе “жидкость – деформируемая конструкция”. Рассматривается модельная установка, на которой отработывается методика интеграции установки, суперЭВМ и численной модели в единую экспериментально-вычислительную систему; приводится описание модели взаимодействия установки с суперкомпьютером, сетевой инфраструктуры проекта и управления установкой.

Исследования проводятся при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 14-07-96003-р\_урал\_a).

## Разработка технологической платформы на базе суперкомпьютера для обработки больших потоков экспериментальных данных

Д.Ф. Гайнутдинова, В.Я. Модорский, В.А. Щапов, Д.П. Чугунов, Г.Ф. Масич

### 1. Введение

При работе наукоёмких образцов аэрокосмической техники в ряде случаев возникают непрогнозируемые эффекты, приводящие к параметрическим и функциональным отказам, а иногда и к разрушению конструкции. Некоторые отказы могут быть вызваны возникновением гидроупругих эффектов. Поэтому задача исследования и прогнозирования быстротекущих процессов в динамической системе “жидкость – деформируемая конструкция” является актуальной.

С этой целью разработана экспериментальная установка для анализа динамических процессов взаимодействия жидкости и деформируемой конструкции при различных видах нагружения гидродинамического объема и для верификации численных расчетов [1–8]. Чтобы обработать данные, генерируемые экспериментальной установкой, и управлять экспериментом в реальном времени необходимы большие вычислительные мощности. Рассмотрим модельную установку, на которой отработывается методика интеграции установки, суперЭВМ и численной модели в единую экспериментально-вычислительную систему, что позволяет как оптимизировать процесс измерения параметров реального объекта установкой путем использования численной модели объекта, так и верифицировать численную модель по данным экспериментальной установки. Кроме того, рассмотрим модель взаимодействия установки с суперкомпьютером, сетевую инфраструктуру проекта и управление установкой.

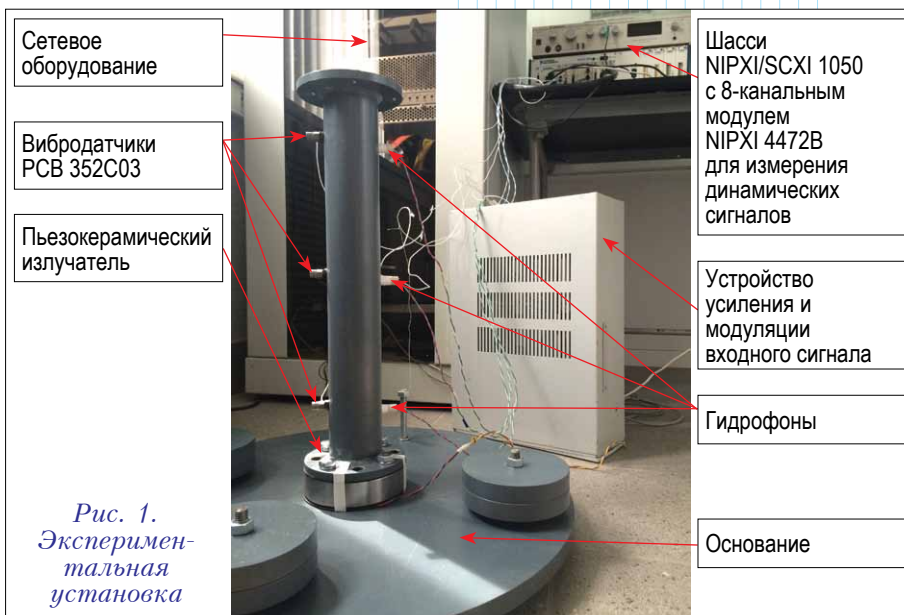
Предлагаемый подход позволяет масштабировать создаваемую экспериментально-вычислительную систему до десятков и сотен датчиков, привлекая

вычислительные ресурсы нескольких суперкомпьютеров, что дает возможность исследовать натурные образцы техники.

### 2. Экспериментальная установка

Экспериментальная модельная установка для анализа динамических процессов взаимодействия жидкости и деформируемой конструкции позволяет исследовать быстротекущие процессы гидрогазоупругости и формировать поток данных по параметрам гидрогазодинамики и вибраций [1–6]. Это дает возможность верифицировать полученные на суперкомпьютере численные решения – с помощью натурального эксперимента и технологической платформы, которая объединяет установку, суперЭВМ и численную модель в единую экспериментально-вычислительную систему.

Установка представляет собой конструкцию (рис. 1), состоящую из рабочей камеры (труба с фланцами и фитингами для установки датчиков



вибраций и гидрофонов) и измерительно-задающего вычислительного комплекса, который включает:

- три датчика давления (гидрофоны);
- три датчика виброускорений *PCB 352C03*;
- модуль согласования сигналов;
- шасси *National Instruments (NI) PXI 1050*, с установленным 8-канальным модулем *NIPXI 4472B* измерения динамических сигналов и программным обеспечением *LabVIEW.11*;

- устройство усиления и модуляции входного сигнала;
- узел нагружения – пьезокерамический излучатель.

В камеру заливается рабочее тело – жидкость. Входной сигнал для узла нагружения формируется в *National Instruments*; задаются амплитуда и частота сигналов. Далее сформированный сигнал поступает на устройство усиления и модуляции и затем – на пьезокерамический излучатель.

Сигналы, полученные в эксперименте, поступают на шасси *NIPXI 1050*, где происходит измерение динамических сигналов с гидрофонов и вибродатчиков. Далее они подаются на виртуальный прибор, созданный на базе программного комплекса *LabVIEW.11*, где происходит запись и обработка сигналов с датчиков. Виртуальный прибор программного комплекса *LabVIEW.11* представлен на рис. 2.

В верхней части имеются окна (поля) для ввода, которые позволяют производить следующие действия:

### 1 Настройка записи файлов

Перед началом эксперимента оператору необходимо указать полный путь к выходному файлу в текстовом поле “Путь к файлу для записи измерений”. Дополнительно в текстовом поле “Описание измерений” можно ввести комментарии к эксперименту. Комментарии сохраняются в том же файле.

### 2 Настройка полученных данных

В поле управления “Период цикла опроса, мс” оператор задает частоту считывания данных из буфера. Количество выборок на канал указывается в

окне “Размер буфера (выборки на канал)”. Если настройки получения данных заданы правильно, то постоянно светится зеленый индикатор “Чтение из буфера в норме” – в противном случае компьютер не будет успевать считывать из буфера, и на графиках будут пропуски.

### 3 Задание частоты дискретизации сигнала

Это значение оператор вводит в поле “Частота дискретизации”. Чем выше частота, тем выше точность измеряемого сигнала.

### 4 Задание частоты сигнала

Задание частоты сигнала отмечается в поле “Заданная частота (Гц)”, где оператор задает требуемую частоту, в соответствии с планом физического эксперимента. Эту функцию можно реализовать двумя режимами управления: “Ручное” или “Авто”. Нужный вариант оператор выбирает с помощью “переключателя”. Для режима автоматического управления оператор может задать диапазон изменения параметров (в данном случае – частоты), прописывая значение в поле “Максимальная частота (Гц)”. В поле “Шаг изменения частоты (Гц)” нужно ввести значение, которое определяет шаг измерений.

### 5 Проведение эксперимента

Для проведения измерения оператору необходимо нажать кнопку “Старт”, чтобы остановить – кнопку “Стоп”. В автоматическом режиме управления измерения автоматически прекратятся при завершении расчетов всех шагов.

В большом окне слева выводятся семь графиков, которые отображают результаты эксперимента с накоплением. Метка-название вертикальной оси на графике соответствует номеру измерительного канала на модульном приборе, к которому подключен датчик. По горизонтальной оси откладываются номера выборок.

Справа от графиков выводится легенда. Три верхних графика (*ai0*, *ai1*, *ai2*) показывают данные, получаемые с вибродатчиков. При переключении элемента управления оператор может выбрать отображение на графике виброускорений [ $\text{m/s}^2$ ], виброскорости [ $\text{mm/s}$ ] или виброперемещений [ $\mu\text{m}$ ]. Текущее значение параметра отображается в поле справа от элемента управления.

Следующие три графика (*ai3*, *ai4*, *ai5*) показывают данные, получаемые с гидрофонов. При переключении элемента управления оператор может выбрать отображение на графике исходного сигнала – в вольтах или децибелах. Текущее значение параметра также отображается в поле справа.

Последний график (*ai6*) отображает данные, подаваемые на генератор сигнала.

## 3. Инфраструктура технологической платформы

### 3.1. Измерительная система

Измерительная система создана на платформе сбора данных *National Instruments*. Используется

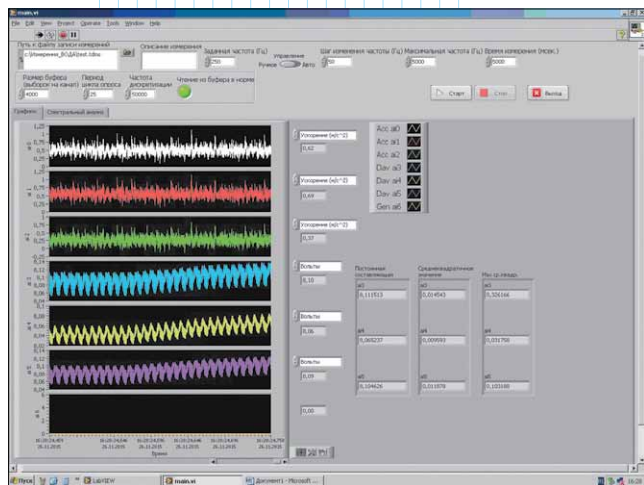


Рис. 2. Виртуальный прибор *LabVIEW.11*

модульная платформа *NIPXI-1050*, состоящая из комбинированного шасси *PXI/SCXI*: 8 слотов *PXI/Compact PCI* и 4 слота системы согласования сигналов *SCXI*. Установленный в шасси вычислительный модуль позволяет проводить предварительную обработку поступающих от установки данных. *Ethernet*-порт вычислительного модуля служит для связи с суперкомпьютером.

Ввод аналоговых динамических сигналов от датчиков осуществляется в модуль *NI PXI-4472B*, который установлен в шасси *NI PXI-1050*. Характеристики модуля: 8 каналов, 24 бит, 102.4 килоотсчетов в секунду.

На вход установки подаются управляющие воздействия через специализированные модули, установленные в *PXI/SCXI*-шасси. Эти модули генерируют сигналы с программно задаваемыми амплитудой и частотой, возбуждающие колебания в установке. Амплитуда и частота этих сигналов зависят от результата спектрального анализа выходного сигнала с гидрофонов.

### 3.2. Суперкомпьютер

В исследованиях использовался высокопроизводительный вычислительный кластер (*HPC cluster*) Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ с пиковой производительностью 24 терафлопс.

Кластер построен на 128-ми четырехъядерных процессорах *AMD Barcelona-3* и 48-ми восьмиядерных процессорах *IntelXeon E5-2680*. В составе *HPC cluster* имеются: сервер доступа, система хранения данных емкостью 12 терабайт, сервер виртуальных машин и сервер мониторинга. Для межузлового обмена во время счета параллельных задач служит *Interconnect Infiniband* на коммутаторе *VoltaireISR-9096*. Соединение *Ethernet Interconnet*, построенное на базе коммутатора *HPProCurveSwitch 5406zl*, используется для загрузки данных, выгрузки результатов и для мониторинга.

Сопряжение платформы сбора данных *NI PXI-1050c* с *HPCcluster* выполнено по оптическому волокну, обеспечивая скорость передачи данных 1 Гбит/с (с возможностью перехода на 10–100 Гбит/с).

### 4. Модель потоков данных

Гибкость проводимых исследований обеспечивается согласно двум моделям обработки на суперкомпьютере измеряемых данных и управления экспериментом [7, 8].

Модель “память–хранилище” предусматривает три этапа:

- 1) загрузка данных от Источника в систему хранения данных (СХД);
- 2) обработка размещенных в СХД данных на суперкомпьютере;

3) выгрузка результатов обработки с СХД на Источник.

Загрузка/выгрузка данных в/из хранилище (этапы 1 и 3) и последующая обработка (этап 2) выполняются либо с использованием протоколов передачи файлов (*FTP/GridFTP* и *SCP*), либо путем прямого доступа к хранилищу данных при помощи протоколов работы с файловой системой (*CIFS* и *NFS/pNFS*). Эта модель является классической схемой обработки больших данных на суперкомпьютере, в которой процесс измерений и процесс счета разорваны во времени и в ряде случаев не обеспечивают требования управления экспериментом.

Модель “память–память” ориентирована на обработку на суперкомпьютере интенсивного потока данных от Источника в режиме реального времени. Идея этой модели основана на прямом вводе интенсивного потока структурированных данных в память вычислительных узлов суперкомпьютера, минуя внешнюю систему хранения данных (рис. 3).

### 4.1 Процесс обработки

Обработка результатов при работе экспериментальной установки происходит в пакетном режиме. Суть пакетного режима работы заключается в следующем. На вход установки подается кортеж управляющих параметров, состоящий из совокупности воздействующих на установку сигналов с заданной амплитудой, частотой и т.д. На выходе установка генерирует кортежи измеряемых параметров, состоящих из совокупности измеряемых величин (давление, виброускорение и т.д.). Каждый измеряемый параметр определяется свойствами

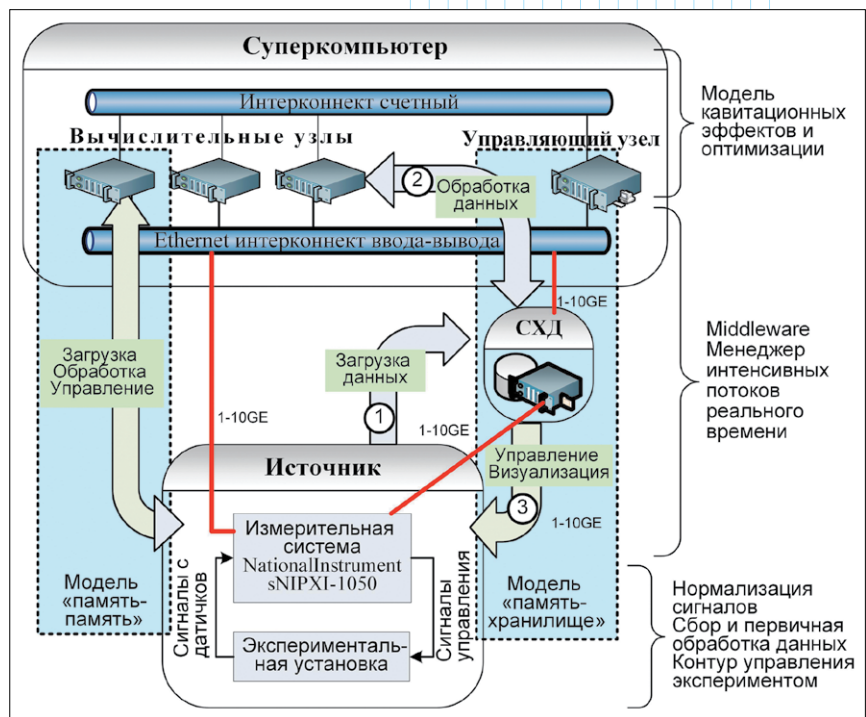


Рис. 3. Инфраструктура обработки распределенных данных

исследуемого объекта и набором управляющих параметров.

Последовательность кортежей управляющих параметров, подаваемых на вход экспериментальной установки, порождает поток кортежей измеряемых параметров. Каждый кортеж измеряемых параметров допускает независимую обработку – следовательно, возможна их параллельная обработка на суперкомпьютере.

Большая часть входных параметров задается программно, без изменения физической конфигурации экспериментальной установки. Поэтому становится возможным автоматизировать процесс проведения серии измерений и совместить его с одновременным проведением обработки данных на суперкомпьютере.

Процесс взаимодействия экспериментальной установки с *HPCcluster* происходит следующим образом:

1 Измерительная система при экспериментальной установке получает от суперкомпьютера начальный список кортежей управляющих параметров, воздействует на установку и проводит измерение.

2 Измерительная система формирует кортеж измеряемых параметров, который передается в суперкомпьютер для обработки.

3 Суперкомпьютер обрабатывает полученный кортеж измеряемых параметров и формирует результаты счета, в том числе новые кортежи управляющих параметров.

4 Суперкомпьютер передает сформированные кортежи управляющих параметров в измерительную систему при установке и цикл повторяется.

Следует отметить, что обработка результатов измерений является самым трудоемким этапом. Наравнение вычислительной мощности при установке экономически невыгодно. Целесообразно использовать вычислительные ресурсы суперкомпьютерных центров и крупных ЦОД. Этому способствуют оптические сети, по которым возможна передача данных на скоростях от 1 до 100 Гбит/с.

Однако общепризнанное несоответствие между вычислительной производительностью и компонентами ввода/вывода высокопроизводительных систем текущего поколения сделало ввод/вывод наиболее узким местом. И одним из основных источников ухудшения совокупной производительности территориально распределенных высокоскоростных приложений является плохая *end-to-end*-производительность повсеместно применяемого протокола *TCP*. А основным механизмом повышения пропускной способности является параллельная передача (*GrtidFTP*, *pNFS*).

В этом случае, на первый план выходит необходимость обеспечения эффективной передачи данных на вычислительные узлы удаленного суперкомпьютера и решение задачи распределения элементов потока данных по вычислительным узлам.

## 5. Промежуточное программное обеспечение

Предложенный метод ввода интенсивного потока данных в удаленный суперкомпьютер требует распределения кортежей измеряемых параметров, генерируемых экспериментальной установкой, по вычислительным узлам. Передача и диспетчеризация потока данных между экспериментальной установкой и суперЭВМ будет осуществляться с помощью программного обеспечения **SciMQ** [8].

*SciMQ* – это программный комплекс, состоящий из сервера очередей, рассчитанного на диспетчеризацию потоков данных до 10 Гбит/с, клиентских библиотек и управляющего ПО в виде веб-интерфейса и приложения командной строки. Используемый в *SciMQ* алгоритм диспетчеризации распределяет исходные измерения по вычислительным узлам в порядке очереди по принципу *FIFO* (“первым пришел – первым ушел”). При этом гарантируется передача кортежа измерений и его обработка на супервычислителе даже в случае отключения некоторых вычислительных узлов.

Сервер очередей рекомендуется располагать достаточно близко к экспериментальной установке (в пределах одного здания), что решает проблему передачи данных по протяженной скоростной линии связи в удаленные вычислители. В реализуемой инфраструктуре это может быть сервер доступа, один из управляющих узлов суперкомпьютера или выделенная виртуальная машина на сервере виртуализации *VMWare*.

Сетевое взаимодействие программного обеспечения с экспериментальной установкой и расчетных приложений с сервером очередей будет производиться через клиентскую библиотеку, предоставляющую разработчикам интерфейс программирования приложений *C++*.

## Заключение

Мы рассмотрели модель использования суперкомпьютера для обработки больших потоков данных. На данный момент реализован первый этап, в рамках которого методика работы отлажена на модельной экспериментальной установке по исследованию быстропротекающих процессов в динамической системе “жидкость – деформируемая конструкция”. При этом разработана технологическая платформа, интегрирующая компоненты в единую экспериментально-вычислительную систему. 😊

### Об авторах

Д.Ф. Гайнутдинова – сотрудник Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ)

В.Я. Модорский – сотрудник ПНИПУ

Д.П. Чугунов – сотрудник Института механики сплошных сред УрО РАН

В.А. Шапов – сотрудник обоих учреждений

Г.Ф. Масич – сотрудник обоих учреждений

### Литература

1. Решение инженерных задач на высокопроизводительном вычислительном комплексе Пермского национального исследовательского политехнического университета / под ред. В.Я. Модорского. Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2014, 314 с.

2. Модорский В.Я., Соколкин Ю.В. Газоупругие процессы в энергетических установках. Москва: Наука, 2007, 176 с.

3. Гайнутдинова Д.Ф., Модорский В.Я., Масич Г.Ф. Проектирование технологической платформы для экспериментальных и вычислительных исследований быстропротекающих процессов гидроупругости // Научно-технический вестник Поволжья. Казань, 2014, №5, с. 155–158.

4. D.F. Gaynutdinova, V.Ya. Modorsky, V.Yu. Petrov Vibration and wave processes in view of non-linear deformation of components in aircraft engine hydraulic systems // APM 2015. Advanced Problems in Mechanics : proceedings of the XLIII Summer School – Conf., June 22-July 27 2015, St. Petersburg / Inst. for Problems in Mechanical Engineering. – St. Petersburg, 2015.

5. Гайнутдинова Д.Ф., Модорский В.Я., Петров В.Ю. Разработка методики проведения экспериментов по оценке параметров быстропротекающих процессов в динамической системе “жидкость–газ–конструкция”

на модельной установке // Научно-технический вестник Поволжья. Казань, 2015, №5, с. 178–180.

6. Gaynutdinova D.F., Modorsky V.Ya., Masich G.F. Infrastructure of data distributed processing in high-speed process research based on hydroelasticity tasks // Procedia Computer Science, 2015, vol. 66., p. 556–563.

7. Матвеев А.М., Чаплыгин В.Я. Исследование течения жидкости в несимметричных гидравлических каналах // Вестник Московского авиационного института, 2012, т. 19, №1, с. 58–64.

8. Матвеев А.М., Чаплыгин В.Я. Кавитация в зазорах с учетом вязкости жидкости и ускорения элементов конструкций // Материалы XX Международного симпозиума “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” им. А.Г. Горшкова. Москва, 2014, с. 142–144.

9. Щапов В.А., Масич А.Г., Масич Г.Ф. Модель потоковой обработки экспериментальных данных в распределенных системах // Вычислительные методы и программирование, 2012, раздел 2, с. 139–145.

10. Shchapov V., Masich A. Protocol of high speed data transfer from particle image velocimetry system to supercomputer // Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST), September 18–21, 2012. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2012, vol. 2, p. 653–657.

### ◆ Выставки ◆ Конференции ◆ Семинары ◆



## Белорусский промышленный форум

Международный выставочный проект

Проводится под патронажем  
Правительства Республики Беларусь

[www.promforum.by](http://www.promforum.by)

## 3–6 мая 2016

Футбольный манеж,  
пр. Победителей, 20/2,  
Минск, Беларусь

#### МЕЖДУНАРОДНЫЕ ВЫСТАВКИ

##### ПРОМЭКСПО – СОВРЕМЕННЫЙ ЗАВОД

оборудование, инструменты и материалы для  
оснащения промышленных предприятий.  
Промышленная продукция

##### ПРОЭНЕРГО

энергетическое и электротехническое оборудование  
для промышленности

##### ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ

энергоэффективные и ресурсосберегающие  
технологии, оборудование и материалы, технологии  
охраны окружающей среды

##### НАУКА И ИННОВАЦИИ

научные разработки и передовые технологии для

Международный симпозиум  
«Технологии. Оборудование. Качество»

Международный конкурс  
энергоэффективных и  
ресурсосберегающих технологий и  
оборудования

Конкурс сварщиков Беларуси  
с международным участием



ЭКСПОФОРУМ  
[www.expoforum.BY](http://www.expoforum.BY)

тел./факс: (+375 17) 314 34 35  
(+375 17) 314 34 30

e-mail: [pva@expoforum.by](mailto:pva@expoforum.by)  
[sharko@expoforum.by](mailto:sharko@expoforum.by)

Унитарное предприятие Экспофорум, УНН 100702781