

# Численное моделирование колебательных процессов центробежного насоса на кластере ПНИПУ

П.В. Писарев, В.Я. Модорский

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

В рамках данной работы произведены численные эксперименты с использованием высокопроизводительной вычислительной техники, по моделированию потока в соединительном канале с учетом прилегающих свободных объемов. Выявлены особенности усиления колебаний в модельных каналах при варьировании параметров потока и геометрии канала. Учитывается работа крыльчатки первой ступени центробежного насоса.

Цель исследования заключается в изучении влияния конструктивных и технологических параметров на характеристики потока жидкости в каналах центробежного насоса. На первом этапе исследования произведены численные эксперименты по моделированию потока в соединительном канале с учетом прилегающих свободных объемов. Выявлены условия усиления колебаний в модельных каналах.

В рамках данной работы, на втором этапе исследований производилось уточнение твердотельной модели и произведен учет особенностей поступления и отвода рабочего тела в полость первой ступени модельного двухступенчатого насоса. В данной работе учитывается работа крыльчатки первой ступени. Учет данных факторов вызвал необходимость использования многопроцессорной вычислительной техники.

Для решения задач по расчету гидродинамических характеристик в свободном объеме первой ступени центробежного насоса, с учетом допущений была принята следующая расчетная модель:

- конструкция полагается трехмерной  $(x, y, z)$ ;
- расчет нестационарный;
- стенки конструкции не поглощают и не выделяют тепло;
- сила трения между стенками и рабочей жидкостью не учитывается;
- рабочее тело представляет собой вязкую сжимаемую жидкость (вода);
- стенки конструкции не деформируются;
- сила тяжести не учитывается;
- давление на входе подается через осевой двусторонний вход;
- реализуется Лагранжев подход. При этом кинетическая энергия вращения колеса передается жидкости и приводит ее в движение;
- колесо представляет собой вращающееся тело, состоящее из втулки и 12 одинаковых непрофилированных лопастей.

Математическое описание гидродинамического процесса в указанной постановке включает в себя следующие соотношения:

-уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad ; \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $\vec{V}$  – вектор скорости жидкости;  $t$  – время;

$\nabla$  - оператор Гамильтона.

-уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \vec{S}_M \quad ; \quad (2)$$

где  $P$ -давление;  $\vec{S}_M$  - источниковый член для импульса;  $\tau$ - тензор напряжений, записываемый в виде:

$$\tau = \mu_e \left[ \nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \vec{V} \right] \quad (3)$$

где  $\delta$  - дельта-функция Кронекера,  $\mu_e$ - эффективная вязкость.

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (4)$$

где  $\mu$  - вязкость,  $\mu_t$  - турбулентная вязкость.

-уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{V} \cdot \tau) + \vec{V} \cdot \vec{S}_M + S_E \quad ; \quad (5)$$

где  $h_{tot}$  - полная энтальпия;  $h_{stat}$  - статическая энтальпия;  $S_E$  - источниковый член для энергии;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности жидкости.

$$h_{tot} = h_{stat} + \frac{\vec{V}^2}{2} \quad ; \quad (6)$$

$$h_{stat} = c_p(T - T_0) \quad ; \quad (7)$$

где  $c_p$ -теплоемкость жидкости;  $T$  – текущая температура;  $T_0$  - начальная температура.

-уравнение состояния сжимаемой жидкости:

$$\rho = \rho(T, P) \quad (8)$$

-уравнение турбулентной энергии:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} k) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon \quad ; \quad (9)$$

где  $k$ -турбулентная энергия;  $\sigma_k$ -константа;  $G$ - определяет скорость генерации турбулентной энергии;  $\varepsilon$ -скорость диссипации турбулентной энергии.

$$G = D_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad ; \quad (10)$$

$$D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{V} + \frac{\rho k}{\mu_t}) \delta_{ij} \quad ; \quad (11)$$

где  $S_{ij}$ -удвоенный тензор скоростей деформации,

$$S_{ij} = \frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \quad (12)$$

-уравнение скорости диссипации турбулентной энергии:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \varepsilon) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (13)$$

где  $\varepsilon$ -скорость диссипации турбулентной энергии,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ -константы.

-уравнение турбулентной вязкости вычисляется по формуле Колмогорова-Прандтля:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (14)$$

где  $C_\mu$ -константа.

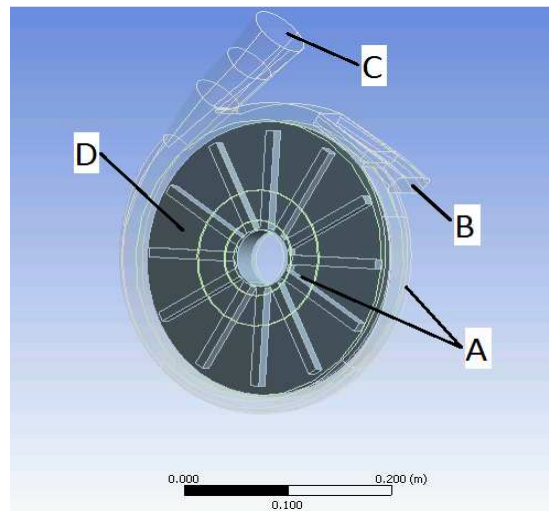
Система уравнений (1-14) замыкается начальными и граничными условиями. При этом жидкость в момент времени  $t=0$  полагается невозмущенной и ее параметры соответствуют нормальным условиям для воды.

Для проведения вычислительного эксперимента была построена, геометрическая модель, которая состоит из свободного объема первой ступени (жидкостной регион) и крыльчатки (подвижное твердое тело).

Свободный объем первой ступени имеет два входа и два выхода. На боковых поверхностях модели расположены элементы осевого двустороннего входа А (рис. 1). Первый выход В – выход из соединительного канала (рис. 1). Второй выход С имеет большее сечение (рис. 1). Крыльчатка, представляет из себя твердое тело D (рис. 1). Геометрическая модель построена с учетом тангенциального расположения выходов первой ступени. Учитывалось геометрическое расширение каналов.

Твердотельная модель для данной задачи была построена в инженерном пакете *Solid Works*, для проведения вычислительного эксперимента было необходимо построить геометрическую модель, состоящую из двух регионов:

- 1) Жидкостной регион, представляет собой свободный объем первой ступени.
- 2) Твердотельный регион, представляет собой крыльчатку первой ступени, крыльчатка помещена в свободный объем первой ступени, сносно.



**Рис. 1.** Общий вид геометрической модели.

Для проведения численного эксперимента были заданы следующие граничные условия:

- движение крыльчатки задавалось через постоянную скорость вращения  $n=8500$  об/мин.
- для граничного условия входа в первую ступень задавалось постоянное давление 0,05, 0,3 и 0,5 МПа.

- для граничного условия выхода из первой ступени задавалось граничное условие «свободный выход».

Структура расчетной сетки следующая. Для лучшей сходимости решения и снижения погрешностей получаемых результатов необходимо применить сетку, ячейки которой имеют равномерную форму, близкую к форме тетраэдра.

Вместе с тем, при измельчении сетки желательно избегать резких отличий геометрических размеров соседних ячеек – линейные размеры не должны отличаться более, чем в 2 раза. На рисунке 2 представлена тетраэдральная расчетная сетка, примененная для решения поставленной задачи.

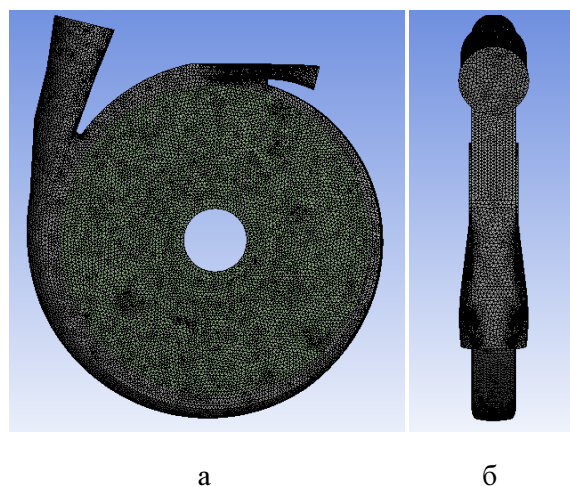


Рис. 2. Расчетная сетка: а – вид спереди; б – вид справа.

Расчетная сетка имеет равномерную структуру. Количество элементов расчетной сетки 20 млн. В области взаимодействия крыльчатки и жидкости была проведена адаптация расчетной сетки первого уровня.

В рамках вычислительных экспериментов исследовалось влияние давления на входе в первую ступень центробежного насоса, на колебательные процессы в соединительном канале. Давление на входе в первую ступень задавалось равным 0,05, 0,3 и 0,5 МПа.

Для данного класса задач так же проводилось исследование масштабируемости. Количество используемых ядер варьировалось от 2 до 64.

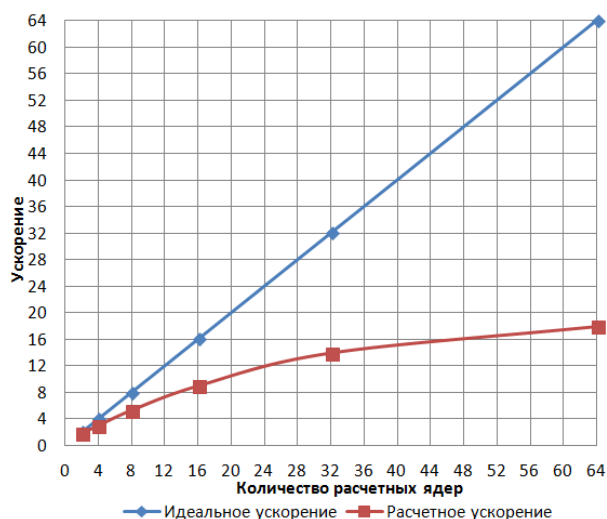


Рис. 3. График масштабируемости.

Из графика видно, что эффективное ускорение при решении данной задачи, для данного количества расчетных узлов и используемого ПО наблюдается при использовании от 2 до 16 ядер, при последующем увеличении количества ядер до 32 ускорение резко снижается.

На рисунке 4 изображена схема расположения математического «датчика давления». «Датчик давления» располагается в центре поперечного сечения.

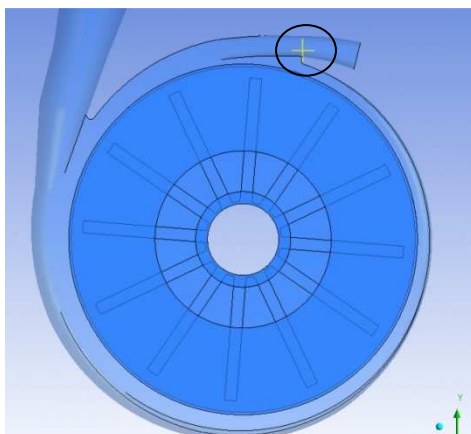


Рис. 4. Схема расположения «датчика давления».

Графики зависимости давления от времени в контрольной точке представлены на рисунке 5(а,б).

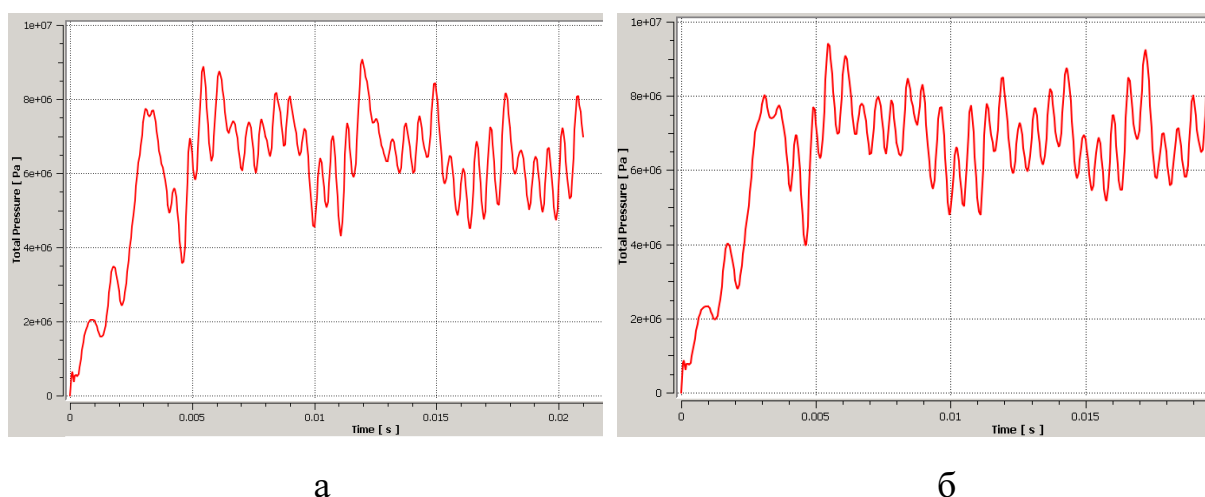


Рис. 5. График зависимости полного давления от времени  
 $P_{\text{вх}}$ : а –  $P_{\text{вх}} = 0,05$  МПа.; б –  $P_{\text{вх}} = 0,5$  МПа.

Анализ полученных зависимостей показал, что в модельной конструкции обнаружены высокочастотные колебания ( $\approx 1700$  Гц), модулированные низкочастотными колебаниями ( $\approx 222 - 333$  Гц). По результатам вычислительных экспериментов выявлено, что с увеличением давления на входе частота модулирующего сигнала повышается ( $\approx 100$  Гц).

Выводы:

1. Обнаружена модуляция высокочастотных колебаний давления в области входа в соединительный канал.
2. Модуляция обусловлена формированием пульсирующей области высокого давления в межлопаточном пространстве. Частота модуляции близка к частоте вращения крыльчатки.
3. Обнаружена прямая зависимость частоты модуляции от давления на входе.
4. Проведен анализ масштабируемости данного класса задач.

## Литература

1. Модорский В.Я., Бульбович Р.В., Бутымова Л.Н., Зимин Д.В., П.В.Писарев. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния активной заглушки резонатора. Научно-технический вестник Поволжья №1, 2012, Казань, с.95-100.
2. Модорский В.Я., Бутымова Л.Н., Зимин Д.В., Писарев П.В., Соколкин Ю.В. Численное моделирование деформированного состояния крупногабаритной конструкции из композиционного материала. Научно-технический вестник Поволжья №1, 2012, Казань, с.116-120.
3. Модорский В.Я., Бутымова Л.Н., Зимин Д.В., Петров В.Ю., Писарев П.В. Разработка экспериментального комплекса для анализа резонансных процессов в энергетических установках. Научно-технический вестник Поволжья №1, 2012, Казань, с.111-115.
4. Модорский В.Я., Щенятский Д.В., Арбузов И.А., Бульбович Р.В., Кириевский Б.Е., Писарев П.В., А.А. Ташкинов. Численное моделирование колебательных процессов в центробежном насосе. Научно-технический вестник Поволжья №3, 2012, Казань, с.44-49.
5. Модорский В.Я., Козлова А.В., Петров В.Ю., Поник А.Н. Инженерная методика определения настроек газохода переменного сечения для отвода и охлаждения горячих газов энергетических установок. Научно-технический вестник Поволжья №2, 2012, Казань, с. 216-219.