

УДК 621.453/.457

П.В. Писарев, В.Я. Модорский

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОУПРУГИХ ПРОЦЕССОВ В СОЕДИНИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ МОДЕЛЬНОГО ДВУХСТУПЕНЧАТОГО НАСОСА

Представлено исследование влияния конструктивных и технологических параметров на напряженно-деформированное состояние стенок соединительного канала, нагруженного динамическим потоком жидкости, и разработка рекомендаций по уменьшению интенсивности непрогнозируемых режимов в каналах наукоемких изделий.

Сформулированы физическая и математическая модели гидроупругих процессов в модельном двухступенчатом центробежном насосе. Произведены численные эксперименты в связанной постановке по моделированию потока в соединительном канале, с различной толщиной стенок, а также с учетом прилегающих свободных объемов. Построены зависимости максимальных напряжений в стенках соединительного канала от их толщины. В рамках вычислительных экспериментов рассматривался расчетный вариант при угле сдвига фаз $\varphi = 0$.

В результате работы накоплен и структурирован банк данных вычислительных экспериментов по исследованию гидроупругих процессов в каналах наукоемких изделий, сформулированы рекомендации по уменьшению интенсивности непрогнозируемых эффектов на основе физических, математических и твердотельных моделей гидродинамического процесса.

Ключевые слова: двухступенчатые центробежные насосы турбонасосного агрегата, гидроупругость, численное моделирование, связанные задачи, соединительный канал, колебательные процессы.

P.V. Pisarev, V.Ya. Modorskiy

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

NUMERICAL SIMULATION OF HYDROELASTIC PROCESSES IN THE CONNECTING PASSAGE OF TWO-STAGE PUMP MODEL

The paper considers study of influence of design and technological parameters on stress-strain state of connecting passage walls loaded with dynamic fluid and develop of recommendations on reduction of intensity of unpredictable mode in passages of scientific products.

The physical and mathematical models of hydroelastic processes in two-stage pump model are formulated. Numerical simulation of coupled problem is carried out for fluid in connecting passage with various widths of walls and accounting of adjoined free volumes. The curves of maximal stress of connecting passage walls on their width are plotted. The computing experiments consider the case at phase-shift angle $\varphi = 0$.

In consequence of the study the databank of computing experiments on hydroelastic processes in passages of scientific products has been accumulated and structured. The recommendations on reduction of intensity of unpredictable effects have been formulated on the basis of physical, mathematical and solid state simulation of hydrodynamic process.

Keywords: two-stage centrifugal pump of turbine-pump assembly, hydroelasticity, numerical simulation, coupled problems, connecting passage, oscillating processes.

Введение

Двухступенчатые центробежные насосы широко применяются в технике, в частности в системах питания топливом космических летательных аппаратов, в системах отопления и горячего водоснабжения, в пищевой, химической промышленности, при перекачке нефти и нефтепродуктов и др.

Одной из основных тенденций при проектировании двухступенчатых центробежных насосов является снижение относительной массы. Особенно ярко эта тенденция наблюдается при создании турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей, где предъявляются жесткие требования к снижению массы при одновременном увеличении напорных характеристик. Это позволяет добиться увеличения массы выводимой полезной нагрузки или высоты орбиты полета, что достигается повышением нагрузки в рабочем тракте и снижением массы, а следовательно, жесткости конструкции. А это, в свою очередь, может приводить к усилению динамических эффектов [1–3], в частности к пульсациям давления. Колебательные процессы в рабочей жидкости могут сопровождаться кавитацией, пульсациями рабочих характеристик и приводить к разрушению конструкции.

Перспективным путем решения этой проблемы является разработка и создание комплекса методик по расчету колебательных процессов в свободном объеме первой, второй ступеней и гидроупругих процессов в соединительном канале двухступенчатого центробежного насоса.

Реальный исследуемый объект обладает следующими особенностями (рис. 1, *a*): осевой двухсторонний встречный вход в первую ступень 1; свободный объем первой и второй ступени с учетом крыльчаток 2; площадь поперечного сечения 3; соединительный канал имеет определенную длину 4; рабочее колесо первой и второй ступеней 5; пульсирующая подача и отвод жидкости в тракте центробежного двухступенчатого насоса 6, обусловленные воздействием отдельных лопаток рабочих колес 7.

Для решения модельной задачи геометрия исходной расчетной области (см. рис. 1, *а*) была сведена к трем объемам (рис. 1, *б*). Первый соответствует свободному объему первой ступени, второй соответствует свободному объему соединительного канала с учетом его значимых геометрических размеров (длина и объем). Сечение модельного канала представляет собой круг. Третий объем соответствует свободному объему второй ступени.

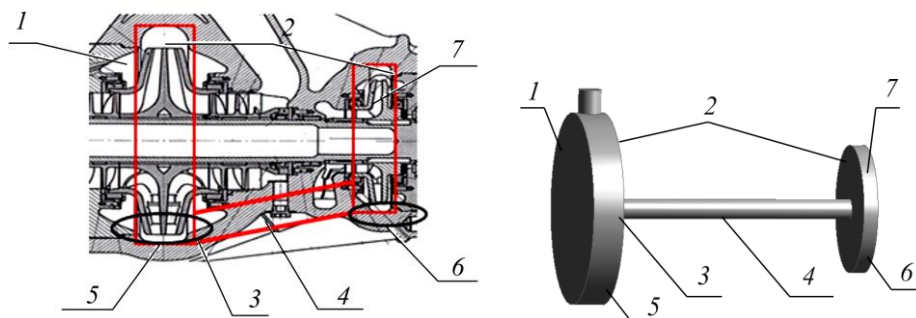


Рис. 1. Исследуемый двухступенчатый центробежный насос: *а* – конструкция реального объекта; *б* – общий вид проточного тракта модельного насоса

Свободный объем первой ступени имеет один вход и два выхода. Первый выход – в соединительный канал и по рис. 1, *б* направлен вправо. Второй выход имеет большее сечение и по рис. 1, *б* направлен вверх. Этот выход имеет также круговое сечение. Свободный объем второй ступени имеет один вход (на рис. 1, *б* – слева) и один выход (на рис. 1, *б* – справа) с круговыми поперечными сечениями.

Анализ исходной конструкции показал, что возможна реализация различных процессов в соединительном канале, так как подача жидкости из свободного объема насоса первой ступени в соединительный канал и втягивание жидкости в свободный объем насоса второй ступени могут быть не синхронизированы.

Расчетная область при решении связанной задачи

Для решения поставленной задачи была разработана и построена геометрическая модель расчетной области, которая состоит из двух регионов (рис. 2): 1 – жидкостной регион представляет собой проточный тракт модельного двухступенчатого центробежного насоса и учитывает характерные особенности колебательной системы «вход – свободный

объем насоса первой ступени – крыльчатка первой ступени – соединительный канал – крыльчатка второй ступени – свободный объем насоса второй ступени – выход». Твердотельный регион 2 представляет собой тонкостенную конструкцию (трубу). В рамках вычислительных экспериментов толщина стенок трубы задавалась равной 10; 15; 20; 25 мм. Между твердотельным и жидкостным регионом помещен интерфейс взаимодействия двух сред 3.

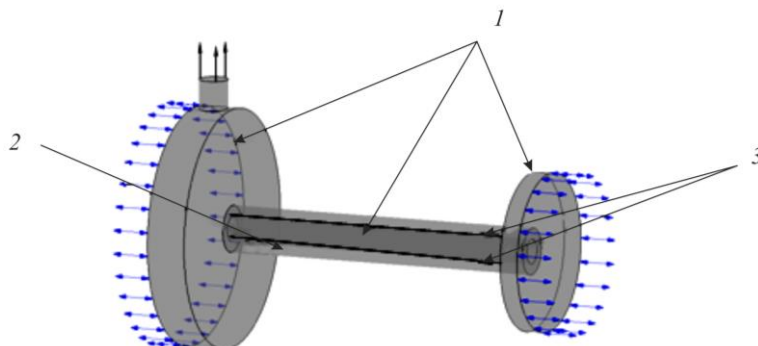


Рис. 2. Общий вид расчетной области: 1 – жидкостной регион; 2 – твердотельный регион; 3 – интерфейс взаимодействия двух сред

Физическая модель

Для решения задач по расчету гидродинамических характеристик в соединительном канале с прилегающими свободными объемами была сформирована физическая модель с учетом следующих допущений:

1. Процессы рассматриваются в трехмерной динамической постановке.
2. Рабочее вещество представляет собой вязкую, невесомую, сжимаемую, однофазную жидкость.
3. Принята стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности.
4. Стенки конструкции непроницаемые и неподвижные.
5. Стенки адиабатически изолированы (продолжительность работы насоса в вычислительном эксперименте намного меньше, чем время прогрева стенки).
6. Расход жидкости через входное сечение свободного объема первой ступени и входное сечение свободного объема второй ступени изменяется по синусоидальному закону [4–7].

Для расчета напряженно-деформированного состояния принята следующая физическая модель. Процессы рассматриваются в трехмер-

ной статической постановке задачи. При снятии нагрузок конструкция полностью восстанавливает свою исходную форму (не учитывается необратимая деформация). Вместе с тем принималось, что максимальное расчетное перемещение значительно меньше характерного размера детали (теория малых деформаций) [8, 9].

При формировании физической модели были приняты следующие допущения:

1. Влияние напряжений в конструкции на ее жесткость не учитывается.
2. Не учитываются эффекты термпрочности.
3. Зона контакта твердотельного и жидкостного региона рассматривается как идеальный контакт.
4. Стенки конструкции не нагреваются и не поглощают тепло.
5. Расчеты проводились без учета гравитации, так как предварительные вычислительные эксперименты показали, что результаты с учетом и без учета гравитации близки.

Математическая модель жидкостной области

Для расчета колебательных процессов в проточном тракте двухступенчатого центробежного насоса предложена следующая математическая модель:

– уравнение сохранения массы

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

где ρ – плотность жидкости; $\vec{v}$ – вектор скорости жидкости; t – время; ∇ – оператор Гамильтона;

– уравнение сохранения импульса

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

где p – давление; $\vec{S}_M$ – источниковый член для импульса; $\vec{\tau}$ – 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 δ – дельта-функция Кронекера; μ_e – эффективная вязкость,

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

– уравнение сохранения энергии:

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

где h_{tot} – полная энтальпия; S_E – источниковый член для энергии и вязкости; λ – коэффициент теплопроводности жидкости.

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

$$h_{stat} = c_p (T - 298,5), \quad (7)$$

где h_{stat} – статическая энтальпия; c_p – теплоемкость жидкости;

– уравнение состояния сжимаемой жидкости

$$\rho = \rho(T, p); \quad (8)$$

– уравнение турбулентной энергии

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

где σ_k – константа; G – определяет скорость генерации турбулентной энергии; ε – скорость диссипации турбулентной энергии.

$$G = \left(S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \cdot \vec{v} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \right) \delta_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j}, \quad (10)$$

где S_{ij} – удвоенный тензор скоростей деформации,

$$S_{ij} = \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) / 2. \quad (11)$$

– уравнение скорости диссипации турбулентной энергии

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (12)$$

где σ_ε , C_1 , C_2 – константы.

– уравнение турбулентной вязкости вычисляется по формуле Колмогорова – Прандтля

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (13)$$

где C_μ – константа.

Система уравнений (1)–(13) замыкается начальными и граничными условиями. При этом жидкость в момент времени $t = 0$ полагается невозмущенной и ее параметры соответствуют нормальным условиям для воды.

При описании граничных условий учитывалось, что крыльчатки насосов первой и второй ступеней жестко закреплены на одном валу, их вращение происходит с заданной частотой и моделируется пульсирующей подачей жидкости в проточный тракт, что можно описать синусоидальной функцией подачи.

Угол сдвига фаз φ колебаний на входе относительно колебаний на выходе из соединительного канала определяется взаимным расположением крыльчаток друг относительно друга на валу и не изменяется в процессе работы.

Тогда граничное условие входа в первую ступень на рис. 1, б, в запишется в виде

$$v_1(t) = v_{\text{ном}_1} + v_{A_1} \sin(\omega t + \varphi), \quad (14)$$

где $v_{\text{ном}_1}$ – номинальная скорость подачи жидкости в первую ступень; v_{A_1} – амплитуда колебания скорости потока; ω – угловая частота вращения крыльчатки; t – время расчета.

$$\omega = 2\pi z f_r, \quad (15)$$

где z – количество лопаток крыльчатки; f_r – частота вращения ротора, $f_r = 142$ Гц.

Граничное условие выхода из второй ступени насоса на рис. 1, б, в запишется в виде

$$v_2(t) = v_{\text{ном}_2} + v_{A_2} \cdot \sin \omega t, \quad (16)$$

где $v_{\text{ном}_2}$ – номинальная скорость выхода жидкости из второй ступени насоса; v_{A_2} – амплитуда колебания скорости потока.

Математическое описание упругих процессов в указанной постановке включает в себя следующие соотношения:

– геометрические соотношения Коши

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (17)$$

где ε_{ij} – компоненты тензора деформаций; $u_i(x_1, x_2, x_3)$ – перемещение точки (x_1, x_2, x_3) сплошной среды;

– уравнение равновесия

$$\sigma_{ij,j} + X_i = 0, \quad (18)$$

где X_i – составляющие объемной силы; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений;

– определяющий закон деформируемой сплошной среды

$$\sigma_{ij} = K\theta\delta_{ij} + 2G\left(\varepsilon_{ij} - \frac{\theta}{3}\delta_{ij}\right), \quad (19)$$

где K – модуль объемного сжатия; G – модуль упругости.

Инвариант тензора деформаций имеет вид

$$\theta = (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}). \quad (20)$$

Данная математическая модель замыкается следующими граничными условиями:

$$u_i|_{S_1} = u_i^0; \quad \sigma_{ij}^I|_{S_1} = -P_i^{\Pi}|_{S_2}; \quad u_i^I|_{S_3} = u_i^{\Pi}|_{S_3}.$$

где S_1, S_2 – части полной поверхности S , где заданы перемещения u_i^0 и напряжения σ_i^0 ; n_i – составляющие единичного вектора n , перпендикулярного поверхности S_2 ; S_3 – контактирующая поверхность; I, II – контактирующие жидкостная и твердотельная области соответственно.

Генерация расчетной сетки

Расчетная сетка является одним из наиболее важных аспектов любого численного моделирования. Сетка должна иметь достаточно высокое разрешение, чтобы иметь возможность учесть все особенности расчетной области [10]. В основном внимание уделяется областям течения жидкости, например в тех местах, где наблюдаются градиенты

скорости, или в предстеночном пространстве. Чем меньше размер элемента расчетной сетки, тем выше наблюдается точность при решении связанных задач. При увеличении разрешения расчетной сетки точность моделирования увеличивается. Вместе с тем увеличение числа элементов расчетной сетки означает увеличение компьютерных носителей и процессора времени. Достижение компромисса между точностью и эффективностью расчетных сеток является достаточно сложной задачей. В данном исследовании применялась расчетная сетка, ячейки которой имеют равномерную форму, близкую к форме тетраэдра.

Свойства материалов

В качестве рабочей жидкости в расчетах задавалась вода с плотностью $\rho = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и динамической вязкостью $\mu = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$. В качестве материала стенок соединительного канала задавалась сталь, модуль Юнга $E = 2,0 \cdot 10^3 \text{ Па}$ и коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Результаты исследования

По результатам вычислительных экспериментов были определены максимальные напряжения и перемещения при различных толщинах стенок соединительного канала. На рис. 3, *а*, *б* представлены графики зависимости давления от времени в начале и в конце проточной части соединительного канала. На рис. 4, 5 представлены поля перемещений и напряжений для толщины стенок соединительного канала 10 мм.

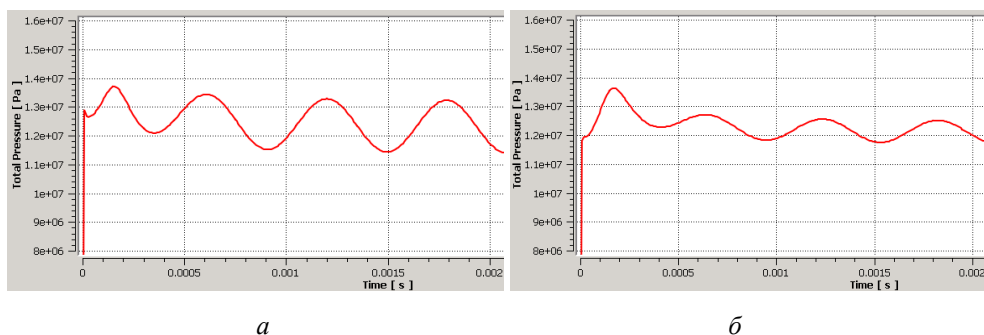


Рис. 3. График зависимости полного давления от времени: *а* – в начале соединительного канала; *б* – в конце соединительного канала

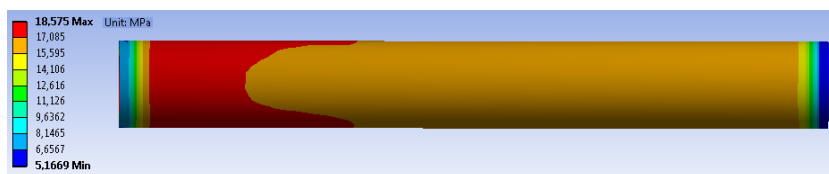


Рис. 4. Распределение поля напряжений по поверхности конструкции соединительного канала

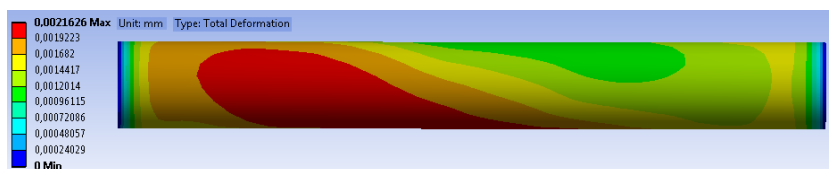


Рис. 5. Распределение поля общих перемещений по поверхности конструкции соединительного канала

Из графиков видно, что наибольшая амплитуда колебаний давления наблюдается в начале соединительного канала (см. рис. 3, *a*), $\Delta p = 0,16$ МПа, наименьшая амплитуда колебаний давления наблюдается в конце соединительного канала: $\Delta p = 0,065$ МПа.

Анализ результатов численных экспериментов показал, что максимальные напряжения, как и максимальные амплитуды колебаний давления, наблюдаются в начале соединительного канала. При сравнении с численным решением в несвязанной постановке выяснилось, что величина максимальных напряжений в несвязанной постановке ниже на 0,32 МПа. Следовательно, для более точного анализа напряженно-деформированного состояния стенок канала требуется совместное решение гидродинамических процессов и НДС конструкции [11, 12].

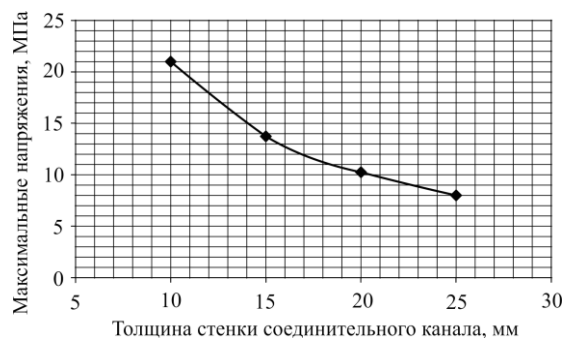


Рис. 6. Зависимость максимальных напряжений от толщины стенки соединительного канала

По результатам численных экспериментов построена зависимость максимальных напряжений от толщины стенок соединительного канала (рис. 6).

Выводы

1. В результате проведенного исследования, разработана методика расчета гидроупругих процессов в соединительном канале двухступенчатого центробежного насоса.

2. Проведено сравнение полученных результатов с результатами расчетов в несвязанной постановке.

3. Выявлено, что максимальные напряжения и перемещения наблюдаются в начале соединительного канала, в области максимальных амплитуд колебаний давления.

4. Построена зависимость максимальных напряжений от толщины стенок соединительного канала.

5. В дальнейшем необходимо исследовать влияние угла сдвига фаз φ на НДС конструкции канала.

Библиографический список

1. Разработка экспериментального комплекса для анализа резонансных процессов в энергетических установках / П.В. Писарев, В.Я. Модорский, Л.Н. Бутымова, Д.В. Зимин, В.Ю. Петров // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 1. – С. 111–115.

2. Писарев П.В., Модорский В.Я., Зимин Д.В. Особенности разработки параллельных приложений по расчету газодинамических характеристик энергетических установок на ВВК ПГТУ // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2009: XII Всерос. науч.-техн. конф. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – С. 226–228.

3. Писарев П.В., Модорский В.Я. Численное моделирование ударно-волнового нагружения соплового аппарата на многопроцессорном вычислительном комплексе // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2009: XII Всерос. науч.-техн. конф. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – С. 357–359.

4. Численное моделирование колебательных процессов в центробежном насосе / П.В. Писарев, В.Я. Модорский, Д.В. Щенятский, И.А. Арбузов, Р.В. Бульбович, Б.Е. Кириевский, А.А. Ташкинов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 3. – С. 44–49.

5. Численное моделирование колебательных процессов в соединительном канале модельного насоса / П.В. Писарев, И.А. Арбузов, А.А. Ташкинов, Д.В. Щенятский, Б.Е. Кириевский, Р.В. Бульбович, В.Я. Модорский // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 6. – С. 100–103.

6. Анализ влияния конструкции входа в соединительный канал на колебательные процессы в первой ступени модельного двухступенчатого насоса / П.В. Писарев, И.А. Арбузов, А.А. Ташкинов, Д.В. Щенятский, Б.Е. Кириевский, Р.В. Бульбович, В.Я. Модорский // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 6. – С. 108–111.

7. Анализ колебательных процессов в первой ступени модельного двухступенчатого насоса / П.В. Писарев, И.А. Арбузов, А.А. Ташкинов, Д.В. Щенятский, Б.Е. Кириевский, Р.В. Бульбович, В.Я. Модорский // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 6. – С. 104–107.

8. Писарев П.В., Модорский В.Я. Численный анализ динамического напряженно-деформированного состояния конечномерного цилиндра, нагруженного гидродинамическим потоком жидкости // Механика микронеоднородных материалов и разрушение: тез. докл. VI Всерос. конф., Екатеринбург, 24–28 мая 2010. – Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2010. – 41 с.

9. Моделирование динамического напряженно-деформированного состояния конечномерного цилиндра, нагруженного гидродинамическим потоком жидкости на многопроцессорном вычислительном комплексе / П.В. Писарев, А.А. Писарева, Д.В. Зимин, Л.Н. Бутымова, Д.Ф. Гайнутдинова, В.Я. Модорский // Экзафлопсное будущее: тр. междунар. суперкомпьютер. конф. (19–24 сентября 2011 г., г. Новороссийск). – М.: Изд-во МГУ, 2011. – С. 643.

10. Туснин А.В., Шаламов С.А., Августинovich В.Г. Методика построения конечно-элементной сеточной модели на примере камеры сгорания газотурбинного двигателя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2013. – № 35. – С. 31–48.

11. Численное моделирование взаимодействия в динамической системе «газ – конструкция» / П.В. Писарев, Д.В. Зимин, В.Я. Модорский, Ю.В. Соколкин // Механика и процессы управления: материалы XXXXI Всерос. симпоз. – М.: Изд-во РАН, 2011. – Т. 1. – 127 с.

12. Писарев П.В., Модорский В.Я., Соколкин Ю.В. Решение междисциплинарных задач на примере взаимодействия струи горячего газа с металлической преградой // *Механика и процессы управления: материалы XXXXI Всерос. симпоз.* – М.: Изд-во РАН, 2011. – Т. 1. – С. 123–126.

References

1. Pisarev P.V., Modorskiy V.Ya., Butymova L.N., Zimin D.V., Petrov V.Yu. Razrabotka eksperimentalnogo kompleksa dlya analiza rezonansnykh protsessov v energeticheskikh ustanovkakh [Development of an experimental complex for analysis of resonance processes in power plants]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya*, 2012, no. 1, pp. 111-115.

2. Pisarev P.V., Modorskiy V.Ya., Zimin D.V. Osobennosti razrabotki parallelnykh prilozheniy po raschetu gazodinamicheskikh kharakteristik energeticheskikh ustanovok na VVK PGTU [Development features of parallel applications for the power plants gas-dynamic characteristics calculation on PNRPU high-performance computing system]. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*, Permskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2009, p. 226-228.

3. Pisarev P.V., Modorskiy V.Ya. Chislennoe modelirovanie udarnovolnovogo nagruzheniya soploвого apparata na mnogoprotsessornom vychislitelnom komplekse [Numerical simulation of shock-wave loading of the nozzle device on a multiprocessor computer system]. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*, Permskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2009, p. 357-359.

4. Pisarev P.V., Modorskiy V.Ya., Shchenyatskiy D.V., Arbuzov I.A., Bulbovich R.V., Kirievskiy B.E., Tashkinov A.A. Chislennoe modelirovanie kolebatelnykh protsessov v tsentrobezhnom nasose [Numerical simulation of oscillation processes in centrifugal pump]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya*, 2012, no. 3, pp. 44-49.

5. Pisarev P.V., Arbuzov I.A., Tashkinov A.A., Shchenyatskiy D.V., Kirievskiy B.E., Bulbovich R.V., Modorskiy V.Ya. Chislennoe modelirovanie kolebatelnykh protsessov v soedinitelnom kanale modelnogo nasosa [Numerical simulation of oscillation processes in the model pump connecting channel]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya*, 2012, no. 6, pp. 100-103.

6. Pisarev P.V., Arbuzov I.A., Tashkinov A.A., Shchenyatskiy D.V., Kirievskiy B.E., Bulbovich R.V., Modorskiy V.Ya. Analiz vliyaniya konstruktсии vkhoda v soedinitelnyy kanal na kolebatelnye protsessy v pervoy stupeni modelnogo dvukhstupenchatogo nasosa [The influence analysis of the connecting channel entrance structure to the first stage vibrational processes of the two stage model pump]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya*, 2012, no. 6, pp. 108-111.

7. Pisarev P.V., Arbuzov I.A., Tashkinov A.A., Shchenyatskiy D.V., Kirievskiy B.E., Bulbovich R.V., Modorskiy V.Ya. Analiz kolebatelnykh protsessov v pervoy stupeni modelnogo dvukhstupenchatogo nasosa [Oscillation processes analysis in the first stage of the two stage model pump]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya*, 2012, no. 6, pp. 104-107.

8. Pisarev P.V., Modorskiy V.Ya. Chislennyy analiz dinamicheskogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konechnomernogo tsilindra, nagruzhennogo gidrodinamicheskim potokom zhidkosti [Dynamic stress-strain state numerical analysis of a finite cylinder loaded with fluid hydrodynamic flow]. *Mekhanika mikroneodnorodnykh materialov i razrushenie*, 2010, p. 41.

9. Pisarev P.V., Pisareva A.A., Zimin D.V., Butymova L.N., Gaynutdinova D.F., Modorskiy V.Ya. Modelirovanie dinamicheskogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konechnomernogo tsilindra, nagruzhennogo gidrodinamicheskim potokom zhidkosti na mnogoprotse-sornom vychislitel'nom komplekse [Dynamic stress-strain state simulation of a finite cylinder loaded with fluid hydrodynamic flow on a multiprocessor computer system]. *Ekzaflopsnoe budushchee*. Moskovskiy gosudarstvennyy universitet, 2011, p. 643.

10. Tusnin A.V., Shalamov S.A., Avgustinovich V.G. Metodika postroeniya konechno-elementnoy setochnoy modeli na primere kamery sgoraniya gazoturbinnogo dvigatelya [The method of constructing a finite element model grid on the example of a gas turbine engine combustor]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2013, no. 35, pp. 31-48.

11. Pisarev P.V., Zimin D.V., Modorskiy V.Ya., Sokolkin Yu.V. Chislennoe modelirovanie vzaimodeystviya v dinamicheskoy sisteme «gaz – konstruktсия» [Numerical simulation of the gas-to-structure dynamic system interaction]. *Mekhanika i protsessy upravleniya*. Moscow: Rossiyskaya akademiya nauk, 2011, vol. 1, p. 127-130.

12. Pisarev P.V., Modorskiy V.Ya., Sokolkin Yu.V. Reshenie mezhdistsiplinarnykh zadach na primere vzaimodeystviya strui goryachego gaza s metallicheskoй pregradoy [Interdisciplinary problems decision on the example of a hot gas jet and a metal barrier interaction]. *Mekhanika i protsessy upravleniya*. Moscow: Rossiyskaya akademiya nauk, 2011, vol. 1, p. 123-126.

Получено 10.03.2014

Сведения об авторах

Писарев Павел Викторович (Пермь, Россия) – программист Центра высокопроизводительных вычислительных систем ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: pisarev85@live.ru).

Модорский Владимир Яковлевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций», директор Центра высокопроизводительных вычислительных систем ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: modorsky@pstu.ru).

About the authors

Pisarev Pavel Viktorovich (Perm, Russian Federation) – Programming Specialist of The Center of High-Performance Computing Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: pisarev85@live.ru).

Modorskiy Vladimir Yakovlevich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Mechanics of Composite Materials and Constructions, Director of the Center of High-Performance Computing Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: modorsky@pstu.ru).