

УДК: 631.372:331.44:004.9

## СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА

И. П. Палатинская<sup>1</sup>, Н. Ю. Долганина<sup>2</sup>, Т. Ю. Попцова<sup>3</sup>

palatinskaya@mail.ru<sup>1</sup>, dolganina01@mail.ru<sup>2</sup>, poptsovatanya@mail.ru<sup>3</sup>

ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)

*Поступила в редакцию 04.12.2012*

**Аннотация.** Рассмотрены особенности моделирования динамической биомеханической модели поясничного отдела позвоночника человека для изучения механики распределения вибронегруженности при циклической нагрузке. Представлены результаты суперкомпьютерного моделирования на вычислительном кластере «СКИФ Урал» и суперкомпьютере «СКИФ - Аврора ЮУрГУ».

**Ключевые слова:** вибронегруженность; поясничный отдел позвоночника; человек-оператор; моделирование; вычислительный кластер «СКИФ Урал».

Применение в промышленности различных видов транспортной техники, форсированных по мощностям, нагрузкам и другим рабочим характеристикам приводит к тому, что человек-оператор часто находится под воздействием повышенных уровней вибраций, которые оказывают на него вредное влияние. Длительное воздействие вибрации может привести к ухудшению самочувствия и поражению отдельных систем организма: сердечно-сосудистой, нервной, кровеносной, вестибулярного аппарата и других, изменению мышечных и костных тканей. Результаты биодинамических исследований операторов транспортных устройств, постоянно подвергающихся воздействию интенсивной общей вибрации, демонстрируют возрастающий риск нарушения здоровья [1]. Известно, что наибольшую опасность с точки зрения утомляемости и здоровья человека-оператора представляют вибрационные воздействия в диапазоне 2–14 Гц, так как именно в этом диапазоне расположены резонансные частоты основных органов тела человека. Например, для грудной клетки человека 2–12 Гц; для ног и рук 2–8 Гц; для головы 8–14 Гц; для поясничной части позвоночника 4–14 Гц [2].

Среди обстоятельств, ведущих к возникновению профзаболеваний из-за воздействия вибраций, ведущие места занимают: конструктивные недостатки и несовершенство техники, несовершенство рабочих мест. Поэтому задачи разработки критериев для выбора экономически

обоснованных путей снижения вибронегруженности человека-оператора транспортных устройств являются актуальными.

Одним из современных направлений исследований вибрационного воздействия транспортных машин на человека-оператора является применение компьютерных динамических биомеханических моделей, которые позволяют оценивать распределение сил, напряжений и деформаций в теле человека. Компьютерное моделирование биомеханических процессов, происходящих в организме человека, представляется в настоящее время одним из самых актуальных и перспективных направлений в научных исследованиях как для технических, так и для медицинских задач. Перспективность компьютерного моделирования таких процессов, с одной стороны, в удобстве проводимых исследований, реальная постановка которых зачастую затруднена из-за сложности или невозможности проведения экспериментов на людях, и с другой стороны, в возможностях мощных современных вычислительных средств, позволяющих многократно изучать объект исследования.

Моделирование биомеханических систем является сложным процессом, требующим анализа большого количества параметров и характеристических величин, определяющих вид и назначение создаваемых систем. И, конечно, создание динамических моделей вибрационного нагружения на тело человека-оператора, передающих все биомеханические особенности виб-

ронагруженности систем и органов человека с учетом их биофизических свойств, являются многопараметрическими задачами, решение которых возможно только с применением суперкомпьютерных технологий. Современные программные комплексы позволяют решать такие задачи, что ранее ограничивались из-за трудностей моделирования распределения свойств материалов, сил, напряжений и деформаций в различных сегментах, структурах и тканях тела человека.

Статья посвящена особенностям разработки компьютерной динамической биомеханической модели поясничного отдела позвоночника человека, применительно для изучения механики распределения вибронагруженности в этом секторе позвоночника при циклической нагрузке. Рассмотрены результаты моделирования вибронагруженности поясничного отдела позвоночника человека на суперкомпьютерах «СКИФ Урал» и «СКИФ-Аврора ЮУрГУ».

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведено суперкомпьютерное моделирование вибронагруженности поясничного отдела позвоночника человека (5 позвонков поясничного отдела, 4 межпозвоночных диска, крестец) при действии общей вибрации с постоянным среднеквадратичным значением виброскорости в полосах частот 0,7–100 Гц [3], 0,7–80 Гц [1], 4–14 Гц [2].

Исследование виртуальной «реберной» 3D-модели поясничного отдела позвоночника осу-

ществлялось по следующему алгоритму: формирование информационной модели, определяющей вид и назначение создаваемой модели. Последующее конструирование ее в твердотельной трехмерной модели (пакет программ SolidWorks), импорт в конечный элементный пакет программ ANSYS Mechanical и численное моделирование вибронагруженности. Информационная модель представляет собой описание строения реального поясничного отдела позвоночника, с учетом его особенностей и взаимосвязей между элементами.

Начальным этапом компьютерного моделирования биомеханических процессов является создание графического образа реальной системы, что требует абстрагирования от конкретной системы путем анализа большого количества параметров и характеристических величин.

Выбор данных тела человека, учитываемых в модели тела человека, зависит от целей исследований, которые и определяют антропометрическую точность, биомеханические возможности, геометрическую конструкцию, графическую визуализацию и последующее моделирование [4].

Поясничный отдел позвоночника соединяет малоподвижный грудной отдел и неподвижный крестец, рис. 1 [5]. Основу позвоночника составляют позвонки (пористые костные образования), которые скрепляются между собой межпозвоночными дисками. Поясничный отдел позвоночника состоит из 5 самых крупных позвонков, которые имеют характерную особенность строения, рис. 1, 2.

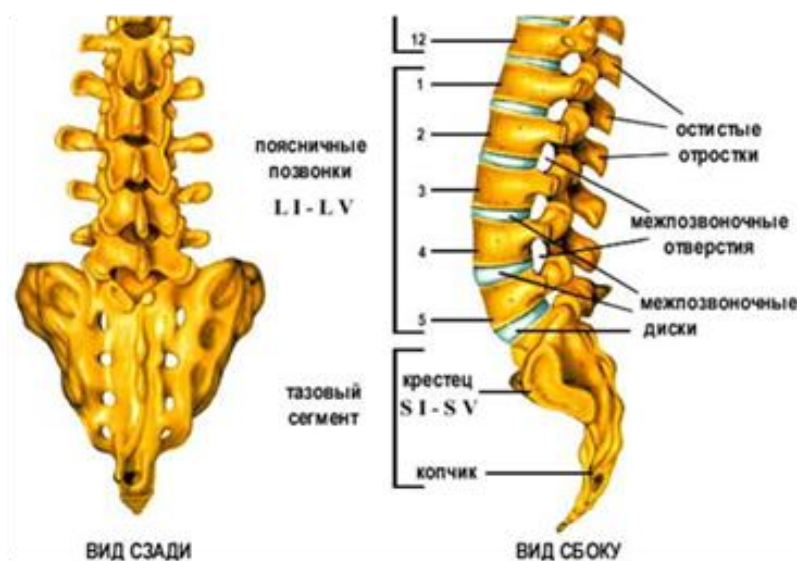
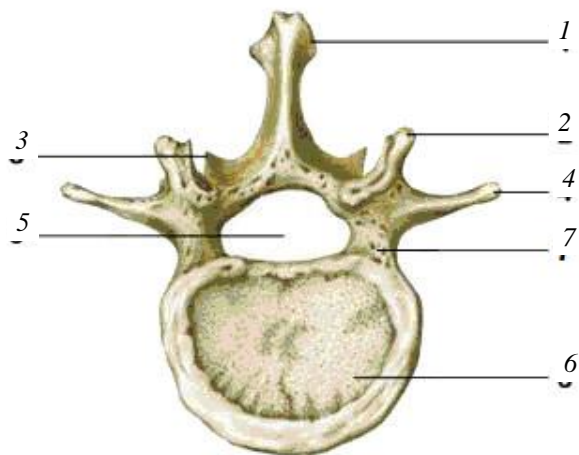


Рис. 1. Поясничный отдел позвоночного столба

Передняя часть позвонка имеет форму, близкую к цилиндрической форме и носит название тела позвонка, рис. 2. Тело позвонка несет основную опорную нагрузку, так как наш вес в основном распределяется на переднюю часть позвоночника.

Сзади от тела позвонка в виде полукольца располагается дужка позвонка с несколькими отростками. Тело и дужка позвонка формируют позвонковое отверстие. В позвоночном столбе соответственно позвонковые отверстия расположены друг над другом, формируя позвоночный канал. В позвоночном канале расположен спинной мозг, кровеносные сосуды, нервные корешки, жировая клетчатка. Дужка позвонка прикрепляется к телу позвонка при помощи ножи позвонка.

Межпозвоночный диск представляет собой плоскую прокладку округлой формы, расположенную между двумя соседними позвонками, рис. 1. Межпозвоночный диск имеет сложное строение. В центре находится пульпозное ядро, имеющее упругие свойства. Вокруг ядра располагается многослойное фиброзное кольцо, которое удерживает ядро в центре и препятствует сдвиганию позвонков в сторону относительно друг друга. В нормальном состоянии фиброзное кольцо образовано очень прочными волокнами. Межпозвоночный диск служит амортизатором вертикальной нагрузки.



**Рис. 2.** Особенности строения поясничного отдела позвоночника: 1 – непарный остистый суставной отросток; 2 – верхние парные суставные отростки; 3 – нижние парные суставные отростки; 4 – парные поперечные суставные отростки; 5 – позвонковое отверстие; 6 – тело позвонка; 7 – ножа позвонка

Если смотреть сбоку на позвоночный столб человека, то в нормальном состоянии он имеет

S-образную форму, что обеспечивает позвоночнику дополнительную амортизирующую функцию. При этом поясничный отдел позвоночника представляет собой легкий плавный изгиб, обращенный выпуклой стороной вперед – лордоз, рис. 1.

Поясничный отдел человека всегда является наиболее напряженно-нагруженным отделом позвоночного столба. Внешнее вибрационное воздействие усиливает это состояние.

Таким образом, внешнюю вертикальную нагрузку в большей степени воспринимают позвонки и межпозвоночные диски. Конечно-элементная модель поясничного отдела должна включать в себя позвонки и межпозвоночные диски. Кроме этого, в ней для заданной цели исследования должны быть учтены лордоз поясничного отдела, пространственные геометрические параметры позвонков и дисков. При этом допускается приблизительное описание фасеточных суставов позвонков.

## 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3D-модель поясничного отдела позвоночника человека была построена с помощью современной системы компьютерной графики создания объемных моделей физических тел в пакете программ SolidWorks.

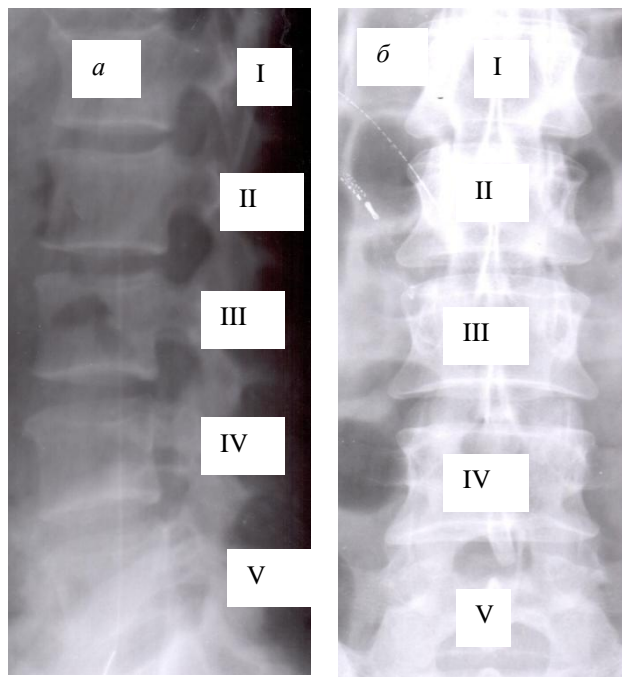
Для того чтобы построить 3D-модель поясничного отдела позвоночника человека, максимально приближенную к ее реальному образу, был проведен анализ рентгеновских снимков и снимков томографии позвоночника нескольких человек мужского пола (среднего возраста 30–40 лет).

Реальные размеры позвонков, межпозвоночных дисков, отростков были определены по рентгеновским снимкам в двух проекциях (рис. 3), так как рентгенограмма представляет собой плоское изображение трехмерного объекта в натуральную величину [6].

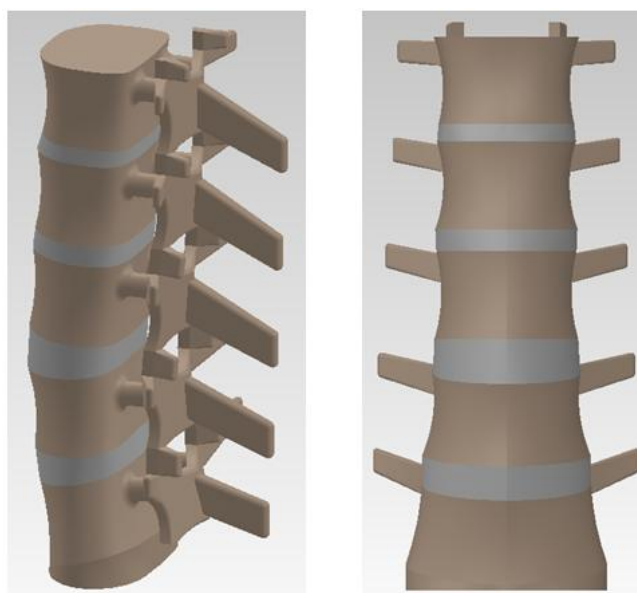
На рис. 4 приведена виртуальная модель поясничного отдела позвоночника, построенная в пакете программ SolidWorks,

Далее твердотельная модель поясничного отдела позвоночника человека была импортирована в пакет программ ANSYS Mechanical и построена сетка конечных элементов. Был выбран тип конечного элемента Solid45. Материал элементов линейный изотропный, свойства которого для позвонков и для межпозвоночных дисков рассчитываемого участка позвоночника определены из [7, 8]. Так, механические свойства межпозвоночных дисков поясничного отдела чело-

века приняты следующие: модуль Юнга 57 МПа ( $E$ ), коэффициент Пуассона 0,4 ( $\mu$ ), плотность 1090,3 килограмм на метр в кубе ( $\rho$ ). Механические свойства позвонков поясничного отдела:  $E=350$  МПа,  $\mu = 0,3$ ,  $\rho = 2020$  килограмм на метр в кубе.



**Рис. 3.** Рентгенограмма поясничного отдела позвоночника (римскими цифрами обозначены номера позвонков): *а* – вид сбоку; *б* – вид спереди



**Рис. 4.** Виртуальная модель поясничного отдела позвоночника

ANSYS Mechanical позволяет проведение исследований вибрационного внешнего воздей-

ствия с использованием разных типов анализа – это расчет форм и частот собственных колебаний (модальный анализ), расчет вынужденных колебаний (гармонический анализ), расчет нециклических нагрузок в переходных процессах (трансиентный анализ), расчет произвольных или сложным образом зависящих от времени нагрузок (спектральный анализ) [9, 10].

Определение собственных частот и форм колебаний поясничного отдела позвоночника был проведен с использованием модального анализа. Исследование циклически нагруженной системы было проведено с использованием гармонического анализа, в котором определение установившейся реакции линейной системы, нагруженной синусоидальными силами, выполняется на выбранном частотном диапазоне. По результатам расчетных исследований строится зависимость амплитудно-частотной характеристики, определяется частота с максимальной реакцией на внешнее воздействие.

Для проведения гармонического анализа были заданы следующие граничные условия:

- на входе возбуждается гармоническая вибрация с постоянным среднеквадратичным значением виброскорости при действии общей вибрации в полосах частот 0,7–100 Гц [3], 0,7–80 Гц [1], 4–14 Гц [2];
- система находится под действием внешней вертикальной гармонической силы, равной 2000 Н [3].
- на позвоночник действует сила тяготения.

Исходные данные по вибрационному воздействию на модель приняты исходя из нормативных документов ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997) [1] и ГОСТ 12.4.094-88 [3]. В качестве оценочных параметров динамического поведения модели были выбраны резонансные частоты поясничного отдела тела человека от 4 Гц до 14 Гц [2].

Задачу гармонического анализа необходимо решать пошагово. Для повышения точности расчета следует задавать более 10 шагов. Увеличение количества шагов ведет к значительному увеличению времени расчета данной задачи.

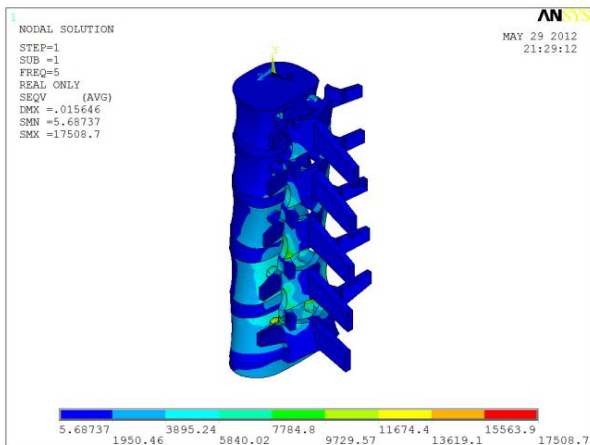
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Подобные задачи решаются на высокопроизводительных вычислительных системах [11].

Расчеты по данной задаче были проведены на высокопроизводительном вычислительном кластере «СКИФ Урал», а также на суперкомпьютере «СКИФ-Аврора ЮУрГУ» [12–13].



На рис. 5 представлены результаты гармонического анализа модели на резонансных частотах 4–14 Гц, рис. 5. Динамика распределения вибронгруженности по частотным диапазонам 0,7–100 Гц и 0,7–80 Гц подобна. Максимальные отклики системы в исследуемых диапазонах частот приведены в табл.



**Рис. 5.** Результаты гармонического анализа по частотам 4–14 Гц; визуализация эквивалентных напряжений по Мизесу

Таблица  
**Сравнение результатов по частотным диапазонам**

Частоты, Гц	Fmax <sup>1</sup> , Гц	SMX <sup>2</sup> , Па	SMX <sup>3</sup> , Па	DMX <sup>4</sup> , м
4 – 14	5	5787	17508,7	0.015
0,7 – 80	16,5	5796	17545,6	0.014
0,7– 100	20,5	5802	17567,7	0.001

<sup>1</sup> частота с максимальным откликом системы,

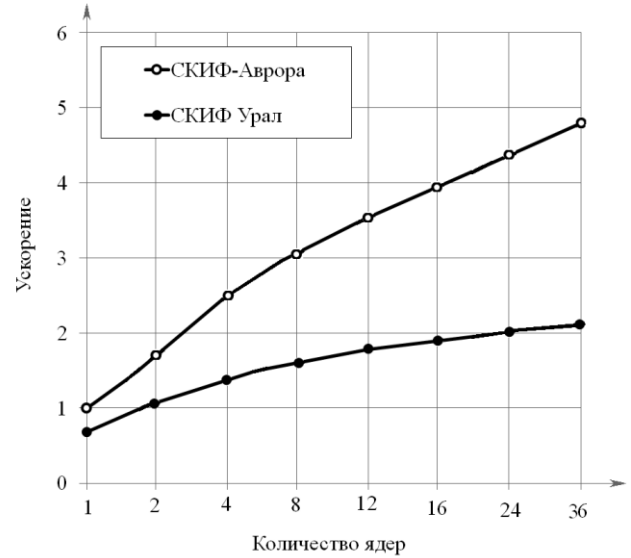
<sup>2</sup> напряжения по оси Y,

<sup>3</sup> эквивалентные напряжения по Мизесу,

<sup>4</sup> вертикальные перемещения

График ускорения для данной задачи, решенной на вычислительном кластере «СКИФ Урал» и суперкомпьютере «СКИФ-Аврора ЮУрГУ», представлен на рис. 6.

Данная задача была распараллелена до 36 ядер, это связано с ограничениями по лицензиям на пакет программ ANSYS Mechanical.



**Рис. 6.** Ускорение

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования внешнего вибрационного воздействия на модель поясничного отдела позвоночника позволяют подтвердить неравномерность распределения вибронгруженного состояния по вертикальной оси данного сегмента позвоночника, рис. 3 и 5. Больше напряжение приходится с V по III позвонки, рис. 5, т. е. исследования подтверждают, что большее негативное вибрационное воздействие приходится на нижнюю часть данного сегмента, что подтверждается высоким уровнем профессиональной заболеваемости операторов транспортных средств по пояснично-кресцовой системе опорно-двигательного аппарата [14].

Сравнение результатов исследований по гармоническому анализу отклика модели на разных исследуемых частотных областях, выявил малое изменение по вибронгруженности модели (табл.). Однако динамические характеристики модели в виде перемещения системы заметно отличаются. Перемещения области воздействия на нормируемом диапазоне частот по ГОСТ 31191.1-2004 на порядок отличаются от значений в диапазоне частот, исследуемого при оценке динамических характеристик тела человека по ГОСТ 12.4.094-88. Это подтверждает наличие резонансного явления на низких частотах и правильность оценки воздействий вибрации в более узком диапазоне частот в соответствие с ГОСТ 31191.1-2004.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997)**. Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Ч. 1 Общие требования. М.: Стандартинформ, 2008. 32 с.
2. **Вибрации в технике**: справочник: в 6 т. М.: Машиностроение, 1981. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К. В. Фролова, 1981. 456 с.
3. **ГОСТ 12.4.094-88 ССБТ**. Метод определения динамических характеристик тела человека при воздействии вибрации. М.: Изд-во стандартов, 2003. 24 с.
4. **ГОСТ Р ИСО 15536-2-2010**. Эргономика. Компьютерные манекены и модели тела. Ч. 1. Общие требования. Дата введения 2011-12-01. М.: Стандартинформ, 2011. 26 с.
5. **Сапин М. Р.** Анатомия человека. В 2 кн. Кн. 1: Опорно-двигательный аппарат. Внутренние органы (пищеварительная и дыхательная системы). М.: Оникс, Альянс-В, 2000. 462 с.
6. **Кишковский А. Н., Тютин Л. А., Есиновская Г. Н.** Атлас укладок при рентгенологических исследованиях. Л.: Медицина, 1987. 520 с.
7. **Бранков Г.** Основы биомеханики. М.: Мир, 1981. 257 с.
8. **Березовский В. А. Колотилов Н. Н.** Биофизические характеристики тканей человека: справочник. Киев: Наук. думка, 1990. 244 с.
9. **Палатинская И. П., Салатун Е. Ю., Долганина Н. Ю.** Особенности 3D-моделирования позвоночника человека для исследований воздействий производственной вибрации // Достижения науки – агропромышленному производству: сб. матер. I Междунар. науч.-техн. конф. Челябинск: Изд-во ФГОУ ВПО ЧГАА, 2012. Ч. VI. С. 142–146.
10. **Палатинская И. П., Долганина Н. Ю.** Исследование вибронгруженности оператора сельскохозяйственной техники // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2012. № 5. С. 36–37.
11. **Клинов М. С., Лапшина С. Ю., Телегин П. Н., Шабанов Б. М.** Особенности использования многоядерных процессоров в научных вычислениях // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2012. Т. 16, № 6 (51). С. 25–32.
12. **Высокопроизводительный** вычислительный кластер «СКИФ Урал». URL: [http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif\\_ural/](http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif_ural/) (дата обращения 04.06.2012).
13. **Суперкомпьютер «СКИФ-Аврора ЮУрГУ»**. URL: [http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif\\_avrora/](http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif_avrora/) (дата обращения 04.06.2012).
14. **Салатун Е. Ю., Палатинская И. П.** Аналитический обзор о производственной вибрации в РФ // Достижения науки – агропромышленному производству: сб. матер. I Междунар. науч.-техн. конф. Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2011. Ч. VI. С. 122–127.

## ОБ АВТОРАХ

**Палатинская Ирина Петровна**, доц. каф. безопасности жизнедеятельности. Дипл. инж.-мех. по двигателям ЛА (ЧПИ, 1985). Канд. техн. наук (Челябинск, НИИОГР, 1997). Иссл. в обл. эргономической биомеханики.

**Долганина Наталья Юрьевна**, доц. каф. сист. программирования, нач. отдела Лаборатории суперкомпьютерного моделирования. Иссл. в обл. суперкомп. моделирования задач биомеханики. Канд. техн. наук (Челябинск, ЮУрГУ, 2010)

**Попцова Татьяна Юрьевна**, ст. преп. каф. графики. Дипл. инж.-мех. по автоматич. установкам (ЧПИ, 1985). Иссл. в обл. граф. построений нелинейных кривых.

## METADATA

**Title:** Supercomputer simulation of the dynamic loads of the lumbar spine

**Authors:** I. P. Palatinskaya, N. Yu. Dolganina, T. Yu. Poptsova

**Affiliation:** South Ural State University (YuUrGU), Russia.

**Email:** palatinskaya@mail.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, No. 5 (58), pp. 230-236, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The paper discusses the details of modeling the dynamic biomechanical model of the lumbar spine person to study the mechanics of distribution vibronagruzhennosti under cyclic loading. The results of supercomputer simulations to compute cluster "SKIF Ural" and supercomputer "SKIF-Aurora SUSU."

**Key words:** vibration loading; lumbar spine; human operator modeling; computational cluster "SKIF Ural"

## References (English Transliteration):

1. GOST 31191.1-2004 (ISO 2631-1:1997). *Vibracija i udar. Izmerenie obshhej vibracii i ocenka ee vozdejstvija na cheloveka*, (in Russian). Part 1: General requirements. Moscow: Standartinform, 2008.
2. *Vibracii v tehnike: spravochnik*, vol. 6: *Zashhita ot vibracii i udarov*, (in Russian), K. V. Frolov Ed. Moscow: Mashinostroenie, 1981.
3. GOST 12.4.094-88 SSBT. *Metod opredelenija dinamičeskikh harakteristik tela cheloveka pri vozdeystvii vibracii*, (in Russian). Moscow: Izdatelstvovo standartov, 2003.
4. GOST R ISO 15536-2-2010. *Ergonomika. Kompyuternye manekeny i modeli tela*, (in Russian), Part 1: General requirements. Moscow: Standartinform, 2011.
5. M. R. Sapin, *Anatomija cheloveka*, vol. 1: *Oporno-dvigatel'nyj apparat. Vnutrennie organy (pishhevaritel'naja i dyhatel'naja sistemy)*. Moscow: Oniks, Al'yans-V, 2000.
6. A. N. Kishkovskij, L. A. Tyutin, and G. N. Esinovskaja, *Atlas ukkladok pri rentgenologičeskikh issledovanijah*, (in Russian). Leningrad: Medicina, 1987.
7. G. Brankov, *Osnovy biomehaniki*. Moscow: Mir, 1981.
8. V. A. Berezovskij and N. N. Kolotilov, *Biofizicheskie harakteristiki tkanej cheloveka*, (in Russian). Kiev: Naukova dumka, 1990.
9. I. P. Palatinskaja, E. Ju. Salatun, and N. Ju. Dolganina, "Osobennosti 3D-modelirovanija pozvonocznika cheloveka dlja issledovanij vozdeystvij proizvodstvennoj vibracii," (in Russian), in *Dostizhenija nauki – agropromyshlennomu proizvodstvu: Sbornik materialov I*

- Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*, part. VI, pp. 142-146, Cheljabinsk: Izdatelstvo ChGAA, 2012.
10. I. P. Palatinskaja and N. Ju. Dolganina, "Issledovanie vibronagruzhennosti operatora sel'skoho zjajstvennoj tehniki," (in Russian), *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*, no. 5, pp. 36-37, 2012.
  11. M. S. Klinov, S. Ju. Lapshina, P. N. Telegin, and B. M. Shabanov, "Osobennosti ispol'zovanija mnogojadernyh processorov v nauchnyh vychislenijah," (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 16, no. 6 (51), pp. 25-32, 2012.
  12. (2012, June 04). *Vysokoproizvoditel'nyj vychislitel'nyj klaster «SKIF Ural»*, (in Russian), Available: [http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif\\_ural/](http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif_ural/)
  13. (2012, June 04). *Superkomp'juter «SKIF-Avrora JuUrGU»*, (in Russian). Available: [http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif\\_avrora/](http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif_avrora/)
  14. E. Ju. Salatun and I. P. Palatinskaja, "Analiticheskij obzor o proizvodstvennoj vibracii v RF," (in Russian), in *Dostizhenija nauki – agropromyshlennomu proizvodstvu: Sbornik materialov L Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*, Cheljabinsk, 2011, part.VI, pp. 122-127.

**About authors:**

**Palatinskaya, Irina Petrovna**, PhD, Associate Professor of Security of Life Activity Dept. Dipl. Mechanical Engineer for aircraft engines (SIP, 1985). Cand. Tech. Sci. (YuUrGU, 1997).

**Dolganina, Natalia Yurievna**, PhD, Head of Support and Training Dept. of Supercomputer Simulation Laboratory, Associate Professor of System Programming Dept., Cand. Tech. Sci. (YuUrGU, 2007).

**Poptsova, Tatiana Yurievna**, Lecturer, Graphics Dept. Dipl. Mechanical Engineer (SIP, 1985).