

СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОНАГРУЖЕННОСТИ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА

И.П. Палатинская, Н.Ю. Долганина, Т.Ю. Попцова

1. Введение

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 виброн нагруженности 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 средствах, 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 виброн нагруженности 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.

Целью данной работы является разработка компьютерной динамической биомеханической модели поясничного отдела позвоночника человека для изучения механики распределения виброн нагруженности в этом секторе позвоночника при циклической нагрузке.

В настоящей статье мы рассматриваем моделирование виброн нагруженности поясничного отдела позвоночника человека на суперкомпьютерах «СКИФ Урал» и «СКИФ-Аврора ЮУрГУ». Статья организована следующим образом. В разделе 2 приведена постановка задачи. В разделе 3 описываются методы исследования, и приводится описание задачи. В разделе 4 обсуждаются результаты проведенных экспериментов на суперкомпьютерах. В заключении суммируются основные результаты, полученные в данной работе.

2. Постановка задачи

Проведено суперкомпьютерное моделирование виброн нагруженности 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 осуществлялось по следующему алгоритму: формирование информационно-модельной модели, определяющей вид и назначение создаваемой модели. Последующее конструирование ее в твердотельной трехмерной модели (пакет программ SolidWorks), импорт ее в конечно-элементный пакет программ Ansys Mechanical и численное моделирование виброн нагруженности.

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, 6]. 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, рис.2. В норме поясничный отдел имеет легкий плавный изгиб вперед (физиологический лордоз), рис.1, рис.2.

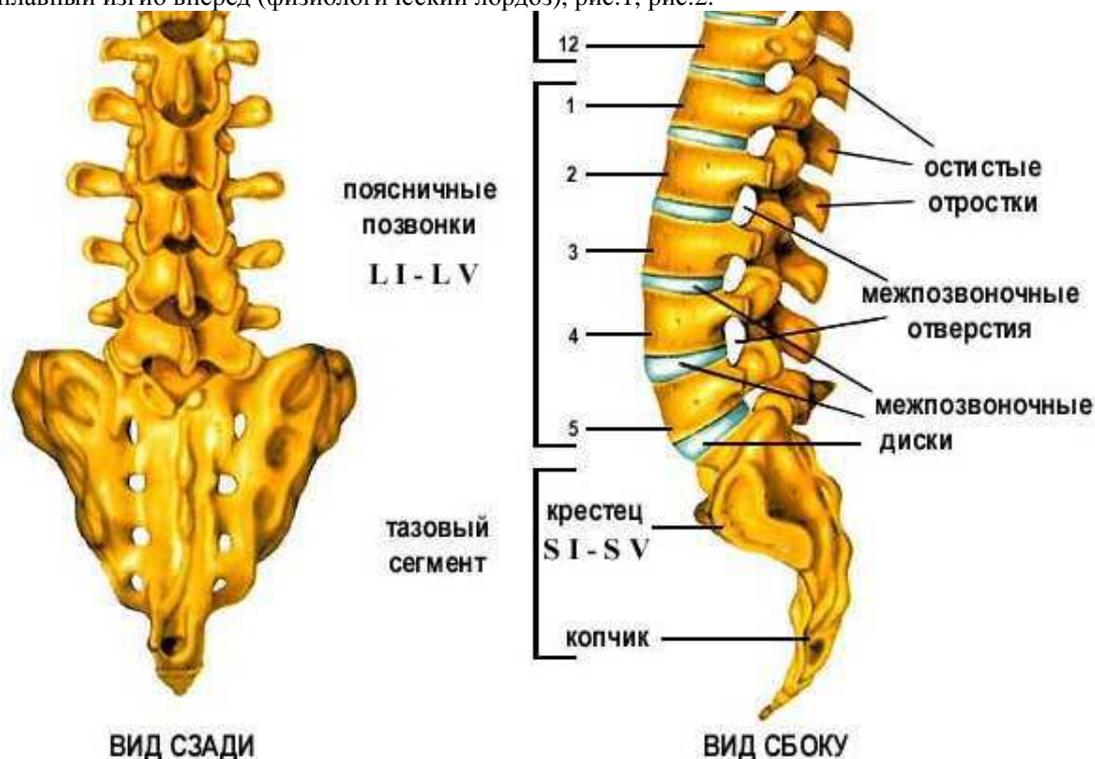


Рис.1 Поясничный отдел позвоночного столба

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.

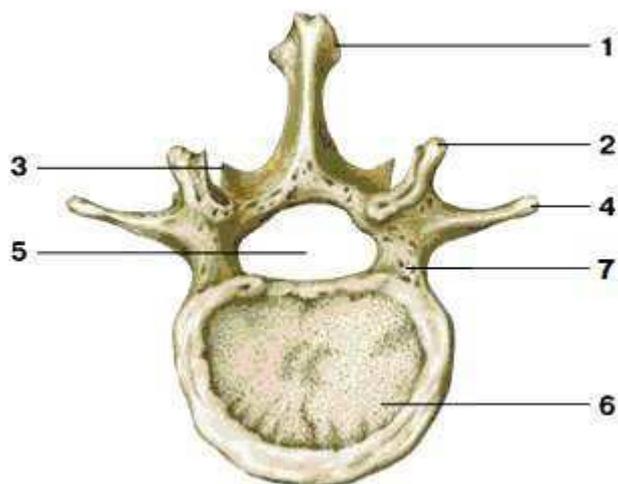


Рис. 2 Особенности строения поясничного отдела позвоночника: 1 – непарный остистый суставной отросток; 2 – верхние парные суставные отростки; 3 – нижние парные суставные отростки; 4 – парные поперечные суставные отростки; 5 – позвонковое отверстие; 6 – тело позвонка; 7 – ножа позвонка

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 ножки позвонка. От дужки позвонка отходят семь отростков: непарный остистый отросток и парные поперечные, верхние и нижние суставные отростки. Остистые и поперечные отростки являются местом прикрепления связок и мышц, суставные отростки участвуют в формировании фасеточных суставов. Суставные отростки отходят от позвоночной пластинки и участвуют в формировании фасеточных суставов. Отростки соседних позвонков направлены друг к другу, а окончания их покрыты суставным хрящом. Два соседних позвонка соединены двумя фасеточными суставами, расположенными с двух сторон дужки симметрично относительно средней линии тела.

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.

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 представляют собой дугу, обращенную выпуклой стороной вперед – лордоз.

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. Конечноэлементная 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.

3. 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), т.к. рентгенограмма представляет собой плоское изображение трёхмерного объекта в натуральную величину [7].

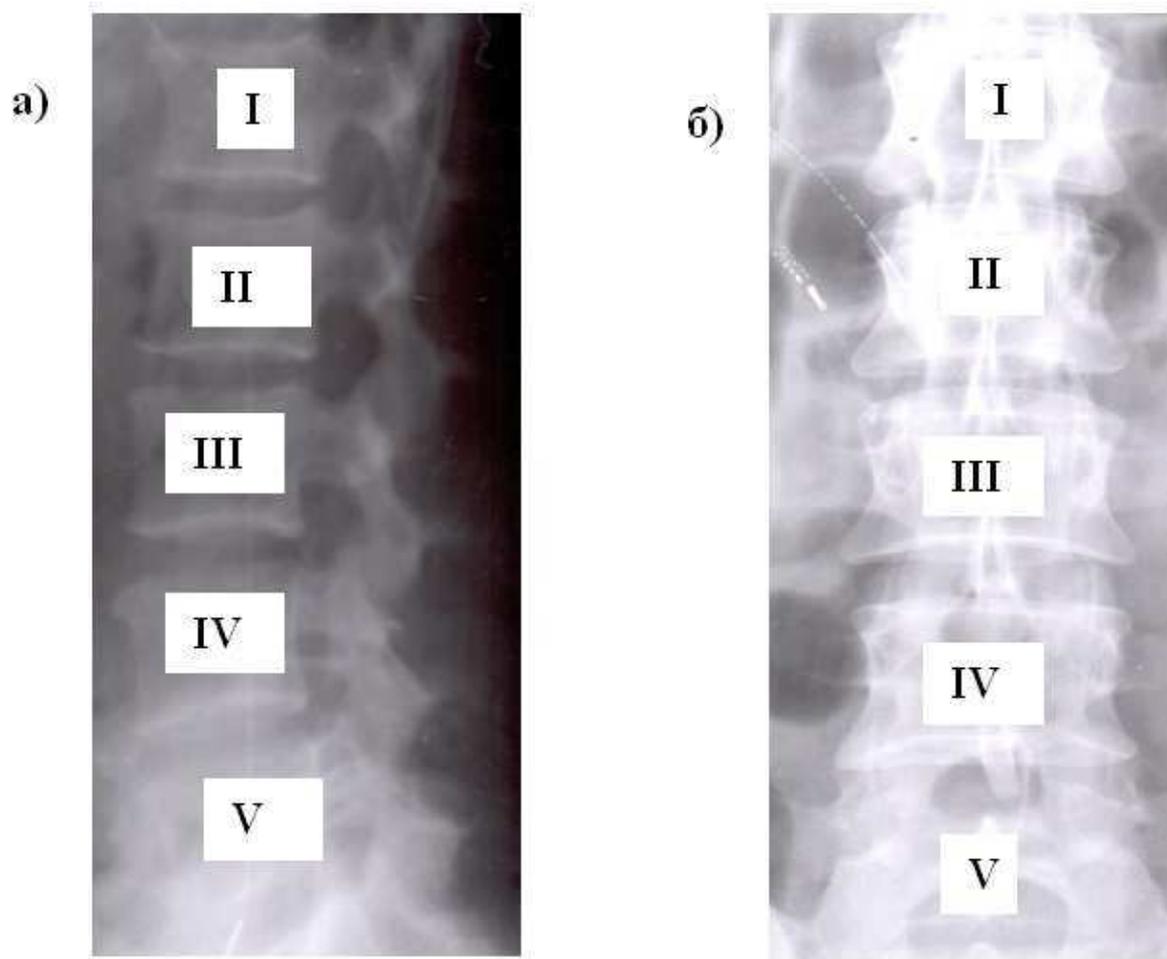


Рис. 3 Рентгенограмма поясничного отдела позвоночника (римскими цифрами обозначены номера позвонков): а) вид сбоку; б) вид спереди

На рис. 4 приведена виртуальная модель поясничного отдела позвоночника, построенная в пакете программ SolidWorks, бежевым цветом представлены позвонки, ножки позвонков и их остистые отростки, а серым – межпозвоночные диски.

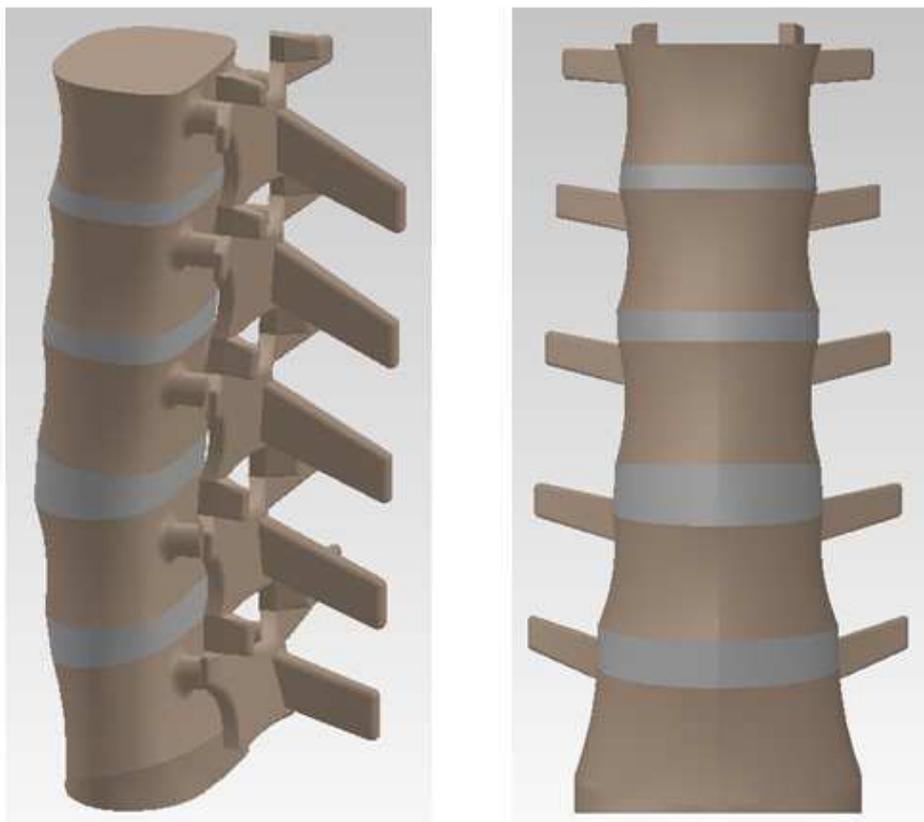


Рис.4 Виртуальная модель поясничного отдела позвоночника

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 [8, 9]. Так, механические свойства межпозвоночных дисков поясничного отдела человека приняты следующие: модуль Юнга 57 МПа, коэффициент Пуассона 0,4, плотность 1090,3 килограмм на метр в кубе. Механические свойства позвонков поясничного отдела: модуль Юнга 350 МПа, коэффициент Пуассона 0,3, плотность 2020 килограмм на метр в кубе.

Ansys Mechanical позволяет проведение исследований вибрационного внешнего воздействия 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) [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:

1. 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];
2. система находится под действием внешней вертикальной гармонической силы, равной 2000 Н [3].
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.

4. Результаты исследований и их анализ

Расчеты были проведены на высокопроизводительном вычислительном кластере «СКИФ Урал» [11], а также на суперкомпьютере «СКИФ - Аврора ЮУрГУ» [12].

На рис. 5 представлены результаты гармонического анализа модели на резонансных частотах 4 – 14 Гц, рис. 5. Динамика распределения вибронагруженности по частотным диапазонам 0,7 – 100 Гц и 0,7 – 80 Гц подобна. Максимальные отклики системы в исследуемых диапазонах частот приведены в таблице 1.

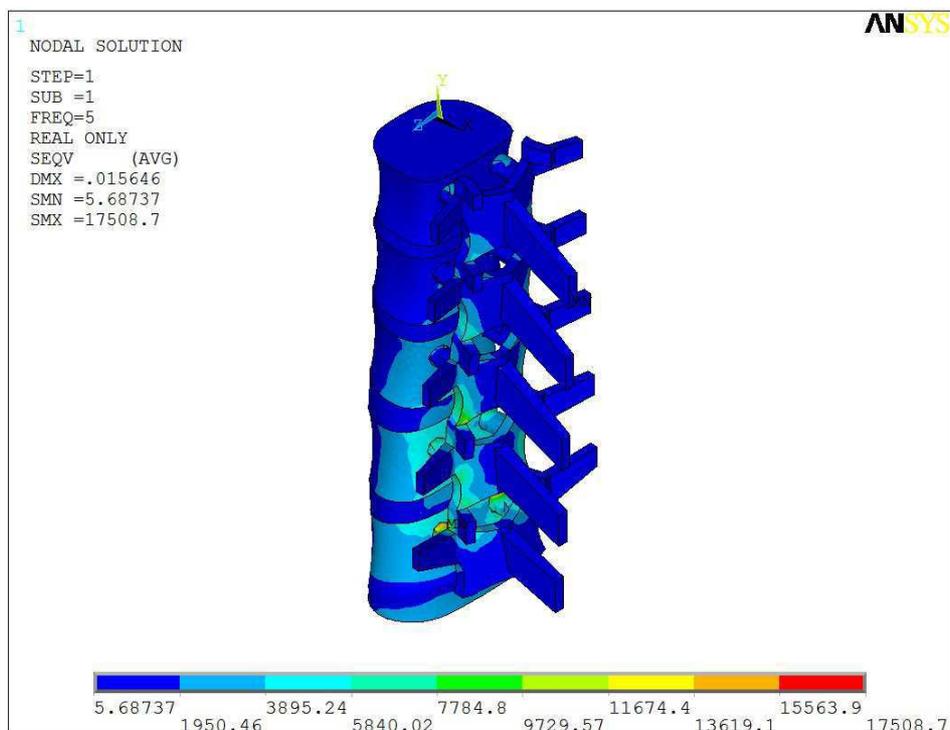


Рис. 5 Результаты гармонического анализа по частотам 4 – 14 Гц: визуализация эквивалентных напряжений по Мизесу

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.

Таблица 1. Сравнение результатов по частотным диапазонам

Диапазон исследуемых частот	Частота с максимальным откликом системы	SMX напряжения по оси Y, МПа	SMX эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа	DMX перемещения, м
4 – 14 Гц	5	5787	17508,7	0.015
0,7 – 80 Гц	16,5	5796	17545,6	0.014
0,7 – 100 Гц	20,5	5802	17567,7	0.001

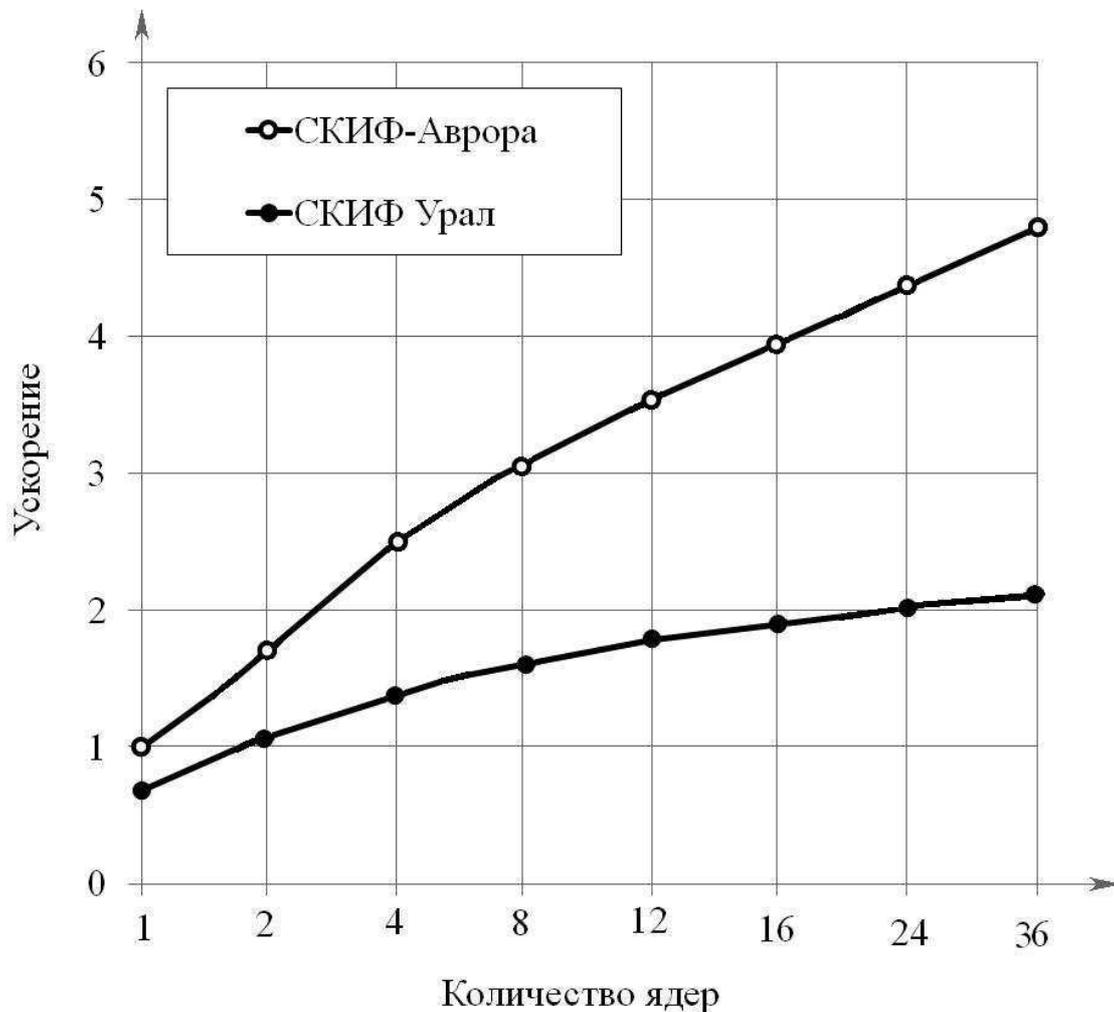


Рис. 6. Ускорение

5. 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 рис.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-крестцовой системе опорно-двигательного аппарата [13].

Сравнение результатов исследований гармонического анализа отклика модели по разным исследуемым частотным областям выявил малое изменение по вибронгруженности модели (таблица 1). Однако динамические характеристики модели в виде перемещения системы заметно отличаются. Перемещения в низкочастотной (резонансной) области воздействия и частотного нормируемого диапазона в ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997) на порядок отличаются от диапазона частот, исследуемого при оценке динамических характеристик тела человека в ГОСТ 12.4.094-88, это подтверждает наличие резонансного явления на низких частотах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-07-96007-р_урал_a).

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997) Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 1 Общие требования – М.: Стандартинформ, 2008. – 32 с.
2. Вибрации в технике: справочник: в 6 т. / Ред. Совет: В.Н. Челомей (пред.).– М.: Машиностроение, 1981. – Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К.В.Фролова, 1981. – 456с.

3. ГОСТ 12.4.094-88 ССБТ Метод определения динамических характеристик тела человека при воздействии вибрации. – М.: Издательство стандартов, 2003. –24 с.
4. ГОСТ Р ИСО 15536-2-2010. Эргономика. Компьютерные манекены и модели тела. Часть 1. Общие требования. Дата введения 2011-12-01. М.: Стандартиформ, 2011. – 26 с.
5. Сапин, М.Р. Анатомия человека. В 2 кн. Кн. 1: Опорно-двигательный аппарат. Внутренние органы (пищеварительная и дыхательная системы) / М.Р. Сапин – М.: Оникс: Альянс-В, 2000. – 462 с.
6. Анатомия позвоночника: [<http://www.mc-profi.ru/pozvonochnik-cheloveka.html>]
7. Кишковский, А.Н. Атлас укладок при рентгенологических исследованиях/ А. Н. Кишковский, Л.А. Тютин, Г.Н. Есиновская. – Ленинград: Медицина, 1987. – 520 с.
8. Бранков, Г. Основы биомеханики: Пер. с болг. В. Джупанова /Бранков. – М.: Мир, 1981. – 257 с.
9. Березовский В.А. Биофизические характеристики тканей человека: справочник / В.А. Березовский, Н.Н. Колотилов; Отв. ред. и авт. предисл. Костюк П.Г. – Киев: Наук. думка, 1990. – 244 с.
10. Палатинская, И.П. Особенности 3D-моделирования позвоночника человека для исследований воздействий производственной вибрации/И.П. Палатинская, Е.Ю. Салатун, Н.Ю. Долганина // «Достижения науки – агропромышленному производству»: Сборник материалов LI-й Международной научно-технической конференции, Ч. VI – Челябинск: Изд-во ФГОУ ВПО ЧГАА, 2012. – С. 142-146.
11. Высокопроизводительный вычислительный кластер «СКИФ Урал»: [http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif_ural/].
12. Суперкомпьютер «СКИФ - Аврора ЮУрГУ»: [http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif_avrora/].
13. Салатун, Е.Ю. Аналитический обзор о производственной вибрации в РФ / Е.Ю. Салатун, И.П. Палатинская // «Достижения науки – агропромышленному производству»: Сборник материалов L-й Международной научно-технической конференции, Ч. VI. – Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2011. — С. 122–127.