

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 519.62/.64
N гос. регистрации 01201356261

УТВЕРЖДЕН
Протоколом заседания
Ученого совета
от 20 января 2016 г. № 1/2016

Председатель Ученого совета
член-корреспондент РАН
_____ В. В. Шайдуров
" ___ " _____ 2016 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

БАЗОВЫЙ ПРОЕКТ IV.36.1.3 "РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
СЛОЖНЫХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ, ИХ АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ И ПРОГРАММНАЯ
РЕАЛИЗАЦИЯ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ВЫСОКОЙ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ" ПРОГРАММЫ СО РАН IV.36.1. "НОВЫЕ РЕШЕНИЯ
ПРОБЛЕМ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ В
ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ".

№ ГОС. РЕГИСТРАЦИИ 01201356261.

(промежуточный)

Руководитель темы
д.ф.-м.н., профессор

_____ В.М. Садовский
" ___ " _____ 2016 г.

Красноярск 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы д.ф.-м.н., профессор	_____	В.М. Садовский
	(подпись, дата)	
Исполнители: зав. отделом, к.ф.-м.н.	_____	Е.Д. Карпова
	(подпись, дата)	
г.н.с., д.ф.-м.н.	_____	Е.А. Новиков
	(подпись, дата)	
в.н.с., д.ф.-м.н.	_____	В.А. Кочнев
	(подпись, дата)	
в.н.с., д.т.н.	_____	К.В. Симонов
	(подпись, дата)	
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____	И.В. Киреев
	(подпись, дата)	
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____	Е.С. Кирик
	(подпись, дата)	
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____	А.А. Лукьянов
	(подпись, дата)	
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____	А.Д. Матвеев
	(подпись, дата)	
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____	А.Н. Рогалев
	(подпись, дата)	
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____	О.В. Садовская
	(подпись, дата)	
с.н.с., д.ф.-м.н.	_____	Л.И. Шкутин
	(подпись, дата)	
н.с., к.ф.-м.н.	_____	М.П. Варыгина
	(подпись, дата)	
Инженер	_____	А.А. Горохов
	(подпись, дата)	
инженер	_____	И.В. Смолехо
	(подпись, дата)	
м.н.с.	_____	Е.П. Ченцов
	(подпись, дата)	

н.с., к.ф.-м.н.

(подпись, дата)

Е.В. Дементьева

Нормоконтролер

(подпись, дата)

А.В. Вяткин

РЕФЕРАТ

Отчёт 26 с., 9 рис., 2 прил.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ, ДЕФОРМИРУЕМАЯ СРЕДА, БЛОЧНАЯ СТРУКТУРА, РЕЗОНАНС, ГЕОМОНИТОРИНГ, ГИДРОДИНАМИКА, ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Цель работы состоит в создании эффективных методов численной реализации сложных математических моделей природных и технологических процессов и систем на высокопроизводительных ЭВМ кластерной архитектуры и на суперкомпьютерах с графическими ускорителями.

В результате проведенных исследований с помощью дискретных и непрерывных математических моделей выполнен анализ резонансных процессов в материалах со слоистой и блочной микроструктурой. Показано, что при предельном переходе от уравнений моноатомной цепочки, учитывающих сопротивление вращению частиц, к уравнениям континуума Коссера выделяется характерная резонансная частота вращательного движения, не зависящая от длины цепочки. Для симметричных неотрицательно определенных матриц с применением метода ортогонализации на подпространствах Крылова построен нелинейный итерационный процесс, сходящийся к собственному вектору для наибольшего собственного значения. Предложена двухшаговая итерационная процедура, существенно улучшающая сходимость степенного метода вычисления резонансных частот дискретных механических систем.

На основе развитой вычислительной методики анализа данных геомониторинга разработана модель поведения форшокового процесса для выделенных очаговых областей подготовки катастрофических чилийских цунамигенных землетрясений 2010, 2014 и 2015 гг. Построены аппроксимационные функции, которые позволили исследовать сейсмический процесс и выделить признаки, имеющие прогностический характер.

Разработан программный комплекс для моделирования двумерных нестационарных течений вязкой несжимаемой жидкости в трубе на основе уравнений Навье–Стокса. В рамках полулагранжева подхода используется дискретизация вдоль траекторий по времени и конечные элементы Тэйлора–Худа по пространственным переменным. На модельных примерах исследован порядок сходимости численных решений.

В дискретно-непрерывной модели движения людей при эвакуации из зданий и сооружений реализованы универсальные алгоритмы распараллеливания вычислений для

МРІ-кластеров путем разнесения поэтажных расчетов по отдельным процессам и организации обмена между процессами. Реализована 64-битная версия расчетного ядра для решения прикладных задач по моделированию больших пешеходных потоков.

Степень внедрения: результаты исследований опубликованы в рецензируемых отечественных и зарубежных научных изданиях, использованы для решения задач организации безопасного движения на объектах Универсиады 2019.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Моделирование резонансного возбуждения структурно неоднородных и многофазных деформируемых сред под действием механических возмущений, включая разработку математической модели, параллельного вычислительного алгоритма и компьютерной программы для многопроцессорных ЭВМ.....	8
2 Построение модели данных геомониторинга известных очаговых сильных подводных землетрясений, проведение вычислительных экспериментов по моделированию распространения цунами в реальных акваториях на гибридных вычислительных системах.....	11
3 Создание и теоретическое обоснование вычислительной технологии для нестационарных уравнений гидродинамики.....	14
4 Разработка и исследование математической модели движения людей для решения задач безопасности для многоэтажных зданий, программная реализация модели на параллельных и гибридных архитектурах.....	17
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	20
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	21
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	25

ВВЕДЕНИЕ

Проблема разработки вычислительных технологий для решения ресурсоемких научно-исследовательских и прикладных задач на суперкомпьютерах высокой производительности имеет очень большое значение. Это связано с постоянным совершенствованием применяемых математических моделей и определяется возрастающими требованиями к точности результатов моделирования. Не случайно математическое моделирование на суперкомпьютерах является в настоящее время одним из масштабных проектов, разрабатываемых в Российской Федерации. Необходимую техническую базу для реализации этого проекта обеспечивает ускоренный темп роста производительности суперкомпьютеров, достигшей в настоящее время десятков петафлопс, с перспективой создания ЭВМ экзафлопсной производительности. В Институте вычислительного моделирования СО РАН имеются все предпосылки (сложившиеся коллективы специалистов в области математического моделирования и разработчиков параллельных вычислительных алгоритмов и программ, а также необходимая техническая база) для выполнения исследований, соответствующих мировому уровню в данном научном направлении.

1 Моделирование резонансного возбуждения структурно неоднородных и многофазных деформируемых сред под действием механических возмущений, включая разработку математической модели, параллельного вычислительного алгоритма и компьютерной программы для многопроцессорных ЭВМ

Исследование колебательных процессов в структурно неоднородных блочных, слоистых, композитных и пористых материалах представляет большой практический интерес для многих технических отраслей. Особое место занимает явление резонанса, способное привести к разрушению материала при определенной частоте и характере колебаний. Известно, что резонансные частоты существенно зависят от характерной микроструктуры материала. В частности, в блочных упругих средах с податливыми прослойками имеется резонансная частота, которая связана с вращательными колебаниями блоков.

В отчетном году на основе дискретных и непрерывных математических моделей выполнен анализ резонансных процессов в структурно неоднородных материалах со слоистой и блочной структурой. Вычислены собственные частоты продольного и вращательно–поперечного движения частиц в линейной моноатомной цепочке, имитирующей слоистую и блочную среды, с различными типами граничных условий. Показано, что при предельном переходе от уравнений моноатомной цепочки с упругими связями, учитывающей сопротивление вращению частиц, к уравнениям моментного континуума (континуума Коссера) выделяется характерная резонансная частота вращательного движения, не зависящая от длины цепочки. На рисунке 1 *а* изображен матричный портрет для дискретной цепочки длины $l = 0.5$ м из 9 элементов. Частоты разбились на две группы. По размеру пятен на этом рисунке можно судить о том, что при приближении к собственной частоте вращательного движения (крайней левой точке в правой группе) амплитуды колебаний нарастают примерно в такой же степени, как и при приближении к остальным резонансным частотам. При увеличении длины цепочки ($l = 1$ м на рисунке 1 *б*) частоты смещаются. Спектральный портрет, представленный на рисунке 1 *б*, указывает на то, что неподвижной является всего одна частота, примерно 1.4 МГц. Именно к ней сошлись остальные частоты группы. При дальнейшем увеличении длины до $l = 1.5$ м частоты перераспределяются (рис. 1 *в*). Однако собственная частота вращательного движения по-прежнему остается неподвижной точкой при схожем относительно других пятен размере пятна.

Таким образом, при поперечных и вращательных колебаниях дискретной цепочки возникает целая система резонансных частот, зависящих от числа элементов и длины

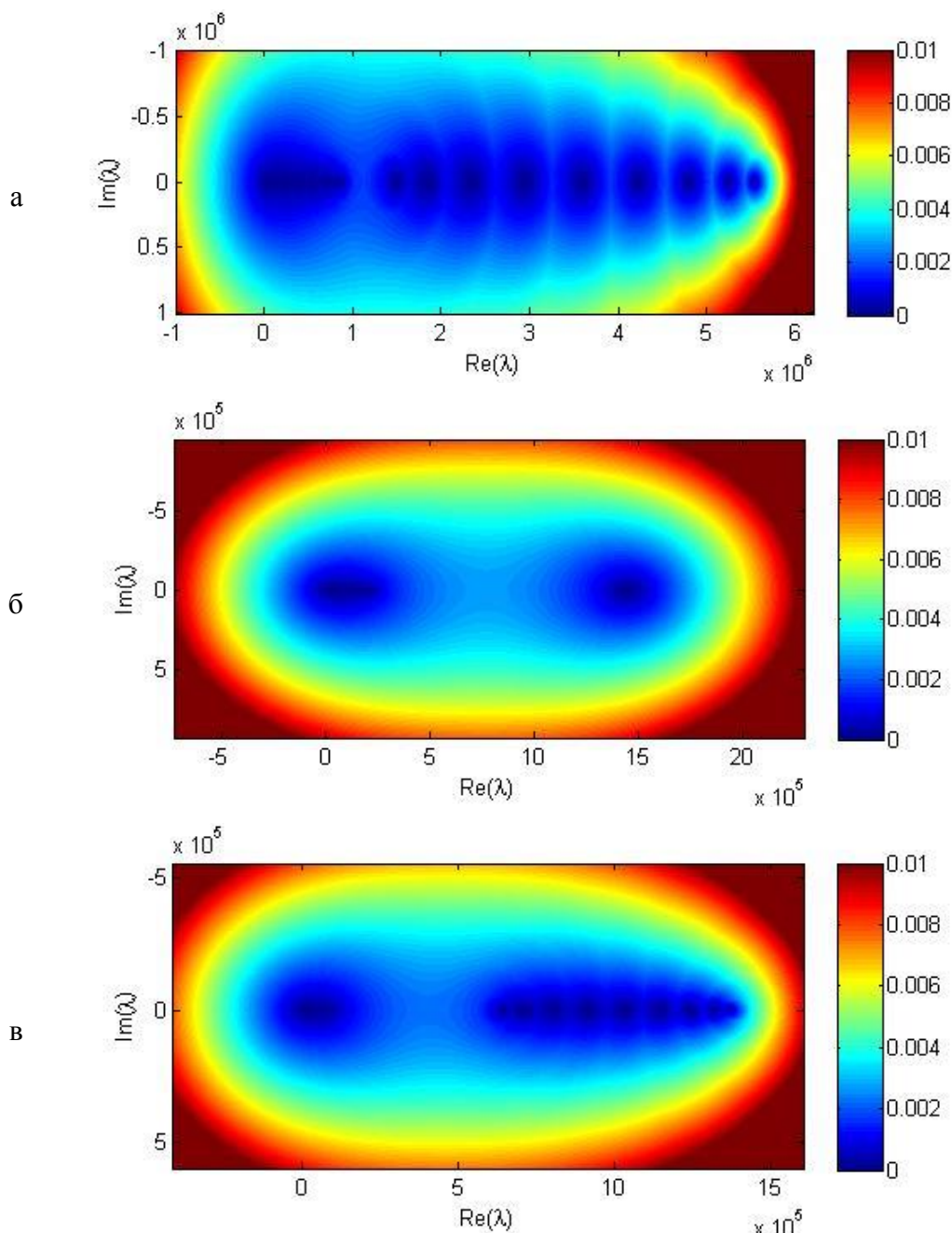


Рисунок 1 – Спектральные портреты матриц дискретных моделей

цепочки. Наряду с ней существует единственная резонансная частота вращательного движения, которая определяется только значениями механических параметров модели, и является, таким образом, феноменологическим параметром моделируемого материала.

Чтобы продемонстрировать этот же результат на модели блочной среды, разработан вычислительный алгоритм для анализа динамики массива из упругих блоков, взаимодействующих через податливые прослойки, на основе уравнений кусочно-однородной динамической теории упругости в приближении плоской деформации. Алгоритм реализован в виде компьютерной программы для многопроцессорных вычислительных систем кластерной архитектуры. Выполнены расчеты резонансного

возбуждения блочной среды за счет локализованного внешнего возмущения на частоте вращательного движения блоков. Подготовлена заявка на регистрацию программы в Роспатенте. Результаты расчетов готовятся к публикации.

Проблема вычисления резонансных частот для дискретной механической системы сводится к вычислению спектра матрицы системы. Часто в приложениях требуется оценить границы спектра. Границы спектра квадратной матрицы можно получить, опираясь на один из базовых алгоритмов вычислительной линейной алгебры – итерационный степенной метод построения наибольшего по модулю собственного значения и отвечающего ему собственного вектора. При всей простоте и надежности этого метода его отличает медленная сходимость. Поскольку выполнение итераций осуществляется последовательно, то наиболее целесообразный подход построения параллельного вычислительного алгоритма состоит в распараллеливании вычислений, реализуемых на каждом шаге процесса. Поэтому имеет смысл модифицировать степенной метод таким образом, чтобы уменьшилось число итерации для достижения заданной точности вычисления собственного вектора, не особо заботясь о вычислительных затратах на каждой итерации. Один из возможных способов реализации такого подхода заключается в применении прямых итераций для некоторой степени исследуемой матрицы, а другой – в привлечении специальных методов ускорения сходимости итерационных процессов на подпространствах Крылова, порожденных анализируемой матрицей. Последний подход слабо изучен и является предметом данного исследования.

За отчетный период для симметричных неотрицательно определенных квадратных матриц удалось построить одношаговый нелинейный итерационный процесс, в котором последующее приближение к собственному вектору (отвечающему наибольшему собственному значению) получалось из предыдущего ортогонализацией к некоторому элементу подпространства Крылова текущего шага процесса. Доказана сходимость по евклидовой норме построенной последовательности векторов к собственному вектору, ассоциированному с наибольшим характеристическим числом матрицы. Более того, используя свойства процесса ортогонализации степенных последовательностей, предложена двухшаговая итерационная процедура, существенно улучшающая сходимость. На рисунках 2, 3 приведены результаты тестовых расчетов для матрицы порядка $m = 100$, являющейся разностным аналогом на равномерной сетке первой краевой задачи для одномерного эллиптического уравнения с постоянным коэффициентом. Здесь n – номер текущей итерации, $\|\delta a\|$ – евклидова норма (рисунок 2) ортогональной составляющей (относительно собственного вектора) единичного вектора, приближающего на данном шаге искомым, $\delta \lambda$ – относительная погрешность (рисунок 3) вычисления

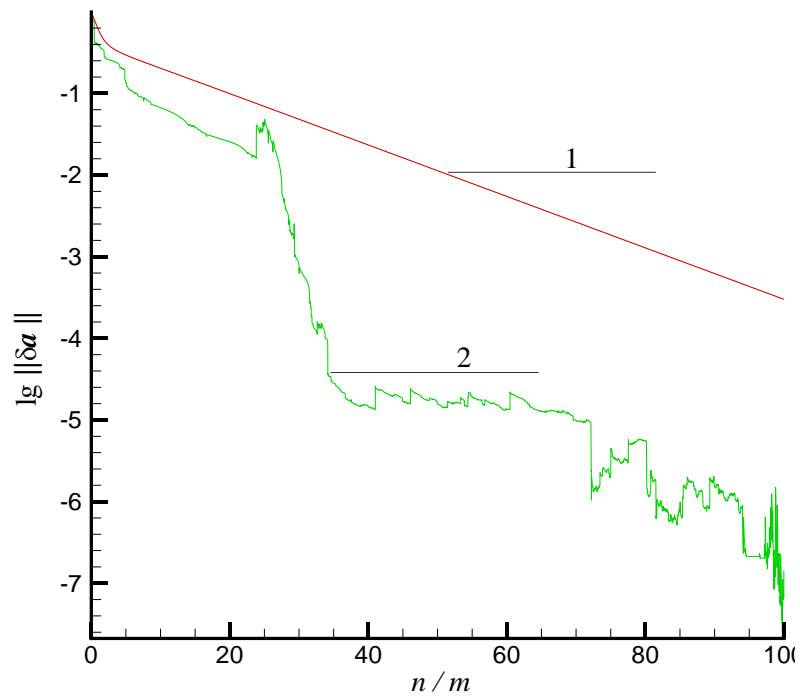


Рисунок 2 – Сходимость степенного (1) и ортогонально-степенного (2) методов вычисления максимального собственного вектора в евклидовой норме

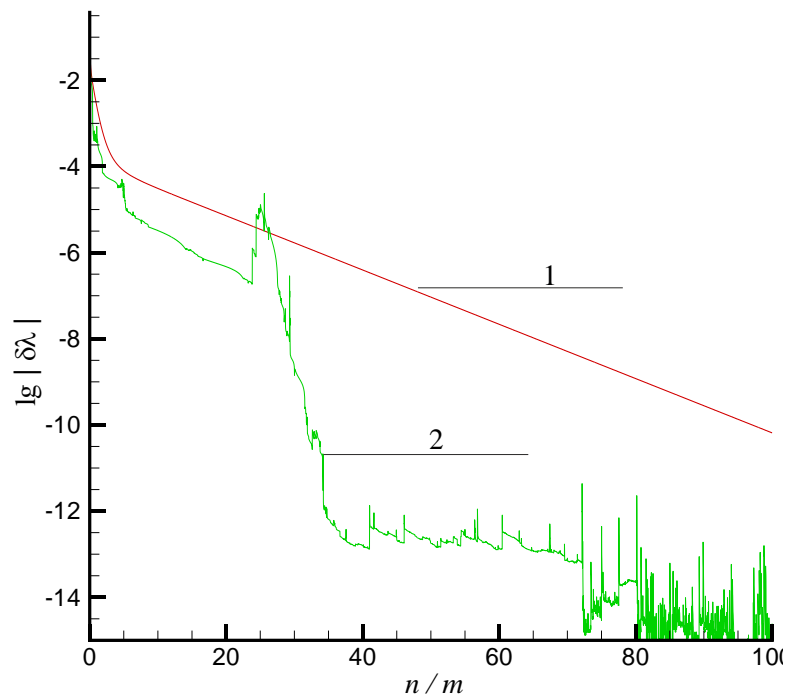


Рисунок 3 – Сходимость степенного (1) и ортогонально-степенного (2) методов вычисления максимального собственного вектора в относительной погрешности

максимального собственного значения. Как результат, при организации параллельных вычислений наибольшего по модулю собственного значения и отвечающего ему собственного вектора могут быть использованы известные методы параллельного

умножения матрицы на вектор, поскольку операции обработки векторов (скалярное произведение, сложение и вычитание, умножение на скаляр) имеют меньший порядок сложности. Однако организация вычислений должна быть согласована с выбранным параллельным способом выполнения операция умножения матрицы на вектор.

2 Построение модели данных геомониторинга известных очаговых сильных подводных землетрясений, проведение вычислительных экспериментов по моделированию распространения цунами в реальных акваториях на гибридных вычислительных системах

На основе развитой вычислительной методики анализа данных геомониторинга разработана модель поведения форшокового процесса для выделенных очаговых областей подготовки катастрофических чилийских цунамигенных землетрясений (2010, 2014, 2015 годов). Построены аппроксимационные функции, которые позволили исследовать

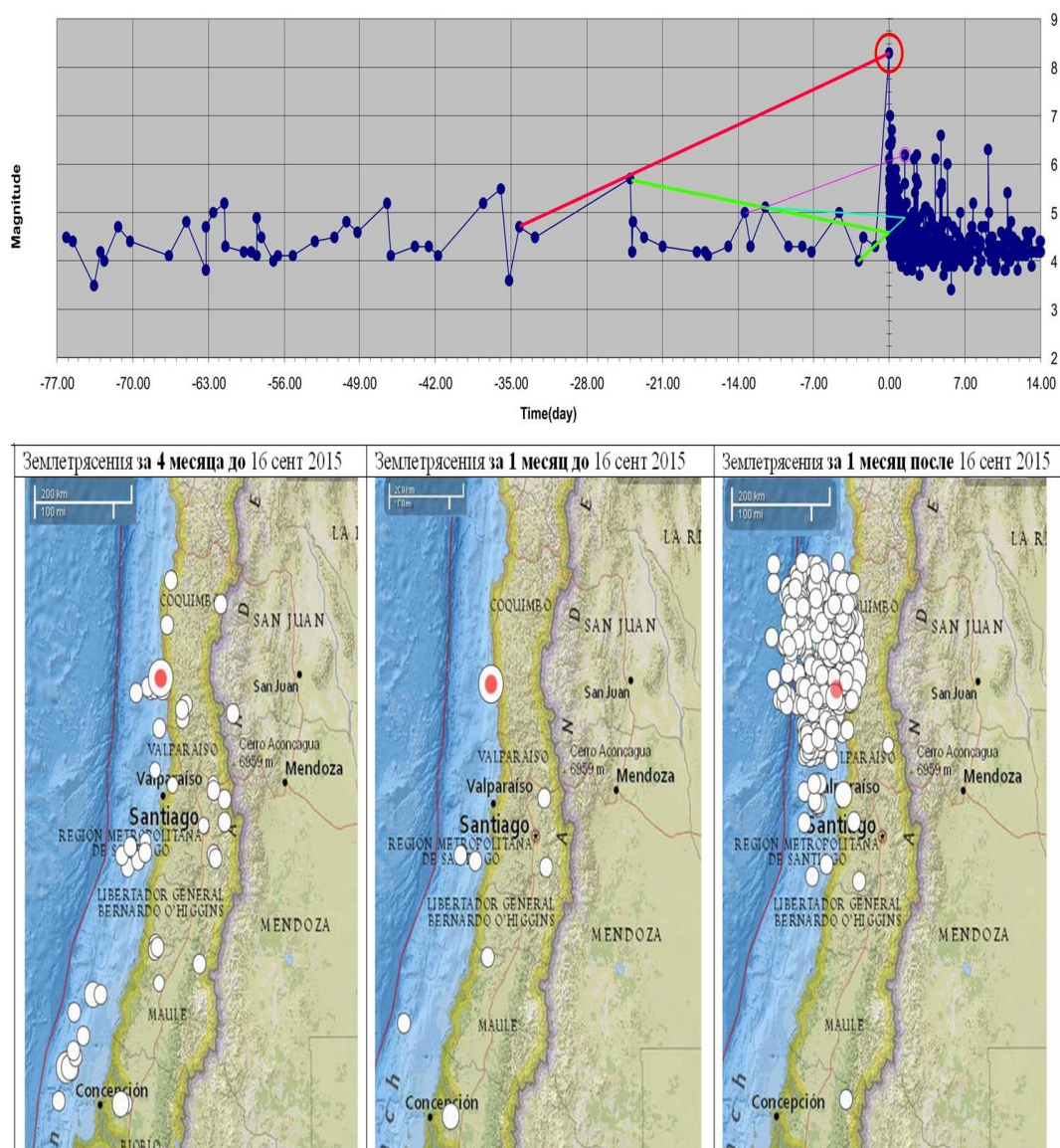


Рисунок 4 – Пример построения модели для землетрясения 16.09.2015

сейсмический процесс и выделить признаки, имеющие прогностический характер. На рисунке 4 представлен пример построения модели процесса подготовки катастрофического цунамигенного землетрясения в районе побережья Чили (2015 года).

Разработанная ранее вычислительная технология использована при проведении расчетов по численному моделированию цунами для катастрофических цунамигенных землетрясений, произошедших в Тихом океане в районе побережья Чили в 2010 – 2015 гг. Расчеты проведены с использованием различных вычислительных архитектур программы MOST. Выполнена оптимизация вычислительной технологии MOST в программной среде CUDA. В рамках гео- и гидрофизического мониторинга проведены численные эксперименты по моделированию распространения волн цунами от катастрофических цунамигенных землетрясений (рисунках 5 и 6). На основе сценарного подхода исследована задача оценки положения очага цунами и численного моделирования цунами, а также задача анализа расчетных и натурных мареограмм. Расчеты производились на видеокартах NVIDIA GeForce GTX 570 и NVIDIA GeForce GT 620M.

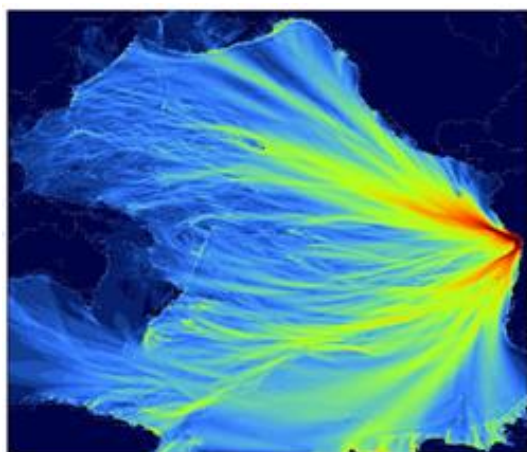


Рисунок 5 – Численное моделирование цунами 01.04.2014

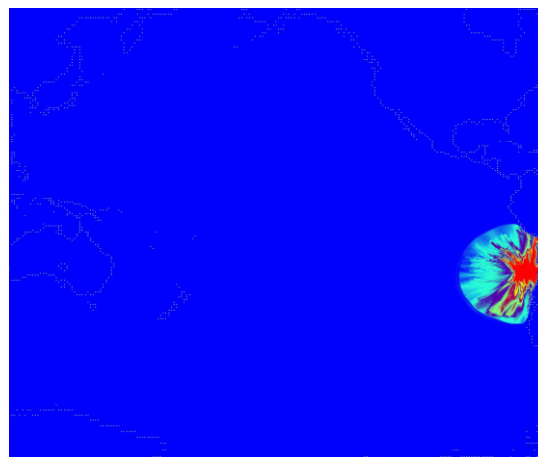


Рисунок 6 – Результаты моделирования распространения волны цунами 16.09.2015

3 Создание и теоретическое обоснование вычислительной технологии для нестационарных уравнений гидродинамики

Разработан подход и создан комплекс программ для моделирования двумерных нестационарных течений вязкой несжимаемой жидкости в трубе на основе численного решения начально-краевой задачи для нестационарных уравнений Навье–Стокса в полной постановке. Численный метод основан на полулагранжевом подходе: дискретизация по времени выполнена вдоль траекторий, для дискретизации по пространству использованы конечные элементы Тэйлора–Худа. На модельных примерах для задачи Стокса показан

порядок сходимости 3.5 для скоростей и порядок 2 – для давления по норме пространства L^2 . На модельных примерах для нестационарных уравнений Навье–Стокса продемонстрирован первый порядок сходимости для достаточно малых шагов по времени.

Пусть $D = (0, T) \times \Omega$ – область в пространстве переменных (t, x, y) , $\Omega = (0, H_1) \times (0, H_2)$, $H_1, H_2 > 0$ прямоугольный канал с границей Γ , состоящей из входной $\Gamma_{in} = \{(x, y) : x = 0, 0 < y < H_2\}$ и выходной $\Gamma_{out} = \{(x, y) : x = H_1, 0 < y < H_2\}$ открытых частей и двух твердых стенок $\Gamma_{rigid} = \{(x, y) : 0 \leq x \leq H_1, y = 0, H_2\}$.

Для моделирования нестационарного течения вязкой несжимаемой жидкости в трубе относительно неизвестных вектора скорости $\mathbf{u}(t, x, y) = (u(t, x, y), v(t, x, y))$ и давления $p = p(t, x, y)$ рассматриваются уравнения Навье–Стокса:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} - \nu \Delta \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{f} \quad \text{в} \quad D \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \text{в} \quad D. \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{f}(t, x, y) = (f_1(t, x, y), f_2(t, x, y))$ – заданный вектор; ν – безразмерный коэффициент, обратно пропорциональный числу Рейнольдса Re ; Δ , ∇ , $\nabla \cdot$ – операторы Лапласа, градиента и дивергенции; $d\mathbf{u}/dt$ – производная по направлению $\mathbf{l} = (1, u, v)$ (лагранжева или субстанциональная производная):

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}. \quad (3)$$

На границе входа Γ_{in} задан входной поток:

$$\mathbf{u}(t, 0, y) = \mathbf{u}_{in}(t, y) \quad \forall (t, y) \in (0, T) \times \Gamma_{in}. \quad (4)$$

На твердых стенках Γ_{rigid} задано условие прилипания:

$$\mathbf{u}(t, x, y) = (0, 0) \quad \forall (t, x, y) \in (0, T) \times \Gamma_{rigid}. \quad (5)$$

Для замыкания вычислительной области на выходной части границы Γ_{out} рассмотрено условие «do nothing»:

$$-\nu \partial_n \mathbf{u} + p \mathbf{n} = p_{ext} \mathbf{n} \quad \forall (t, x, y) \in (0, T) \times \Gamma_{out}, \quad (6)$$

где $\mathbf{n} = (n_x(x, y), n_y(x, y))$ – вектор внешней нормали к Γ , $\partial_n \mathbf{u}$ – производная скорости по нормали \mathbf{n} , $p_{ext}(t, y)$ – внешнее давление среды. Для корректности во всей расчетной области заданы начальные условия:

$$\mathbf{u}(0, x, y) = \mathbf{u}_0(x, y) \quad \forall (x, y) \in \bar{\Omega}. \quad (7)$$

Для построения дискретного аналога использован полулагранжевый подход. На первом этапе, рассматривая в (1) член, соответствующий лагранжевой производной (3), как правую часть, на основе конечных элементов Тейлора–Худа построен устойчивый метод для задачи Стокса. Затем выполнена аппроксимация производной (3) вдоль траектории.

В результате на каждом шаге по времени решалась следующая система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\left(\frac{1}{\tau} I + A_h \right) \mathbf{U}_h^k + B_h^T P_h^k = \mathbf{F}_h^k + \frac{1}{\tau} \hat{\mathbf{U}}_h^{k-1}, \quad (8)$$

$$-B_h \mathbf{U}_h^k = 0, \quad (9)$$

где I – единичная матрица, $A_h \mathbf{U}_h^k$ – дискретизация вязких членов, $B_h \mathbf{U}_h^k$ – дискретизация дивергенции вектора скорости \mathbf{U}_h^k , $B_h^T P_h^k$ – дискретизация градиента давления. Вклад в вектор правой части дает аппроксимация объемных сил и граничного условия (6), а также дискретизация производной по направлению $d\mathbf{u}^k / dt$.

Полученная СЛАУ имеет несимметричную положительную плохо обусловленную матрицу. Для ее решения были реализованы и протестированы следующие известные подходы: метод Эрроу–Гурвица из семейства алгоритмов Удзавы, стабилизированный метод бисопряженных градиентов с преобуславливателем типа SIMPLE и без него. Дополнительно были предложены и исследованы на сходимость две модификации алгоритма Удзавы. Первая модификация предполагает двухшаговую вычислительную схему. На первом шаге на каждой итерации приближенно вычисляются скорости, затем, используя найденные скорости, рассчитывается давление. На втором шаге проводится коррекция ошибки, внесенной приближенным представлением оператора для вектора скорости. Вторая предложенная модификация основана на совмещении методов Удзавы и простой итерации. В отличие от известных итерационных вычислительных схем предложено внутри каждой итерации сначала вычислять давление без явного формирования матрицы Шура, затем по нему рассчитывать скорости. Такой порядок позволяет точнее удовлетворить уравнение неразрывности (2).

Проведен сравнительный анализ рассмотренных итерационных методов. Наилучший результат по скорости сходимости показывает метод бисопряженных градиентов. Однако этот метод не имеет полного теоретического обоснования и на практике сходится не для всех классов задач. Предложенная модификация на основе метода Удзавы и простой итерации является теоретически обоснованной, следовательно, более надежной, а по скорости сходимости лишь немного уступает методу бисопряженных градиентов.

На модельных примерах для задачи Стокса (рисунок 7) показан порядок сходимости 3,5 для скоростей и 2 – для давления по норме пространства L^2 . На модельных примерах для нестационарных уравнений Навье–Стокса (рисунок 8) продемонстрирован первый порядок сходимости для достаточно малых шагов по времени.

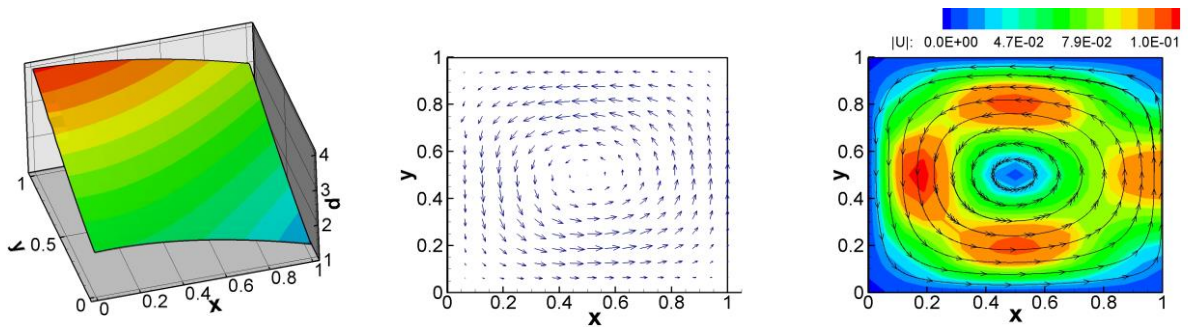


Рисунок 7 – Тестовый расчет для задачи Стокса (слева направо): давление p_h , поле скоростей \mathbf{u}_h , линии тока и магнитуда скорости $|\mathbf{u}_h|$. $\text{Re} = 10^3$

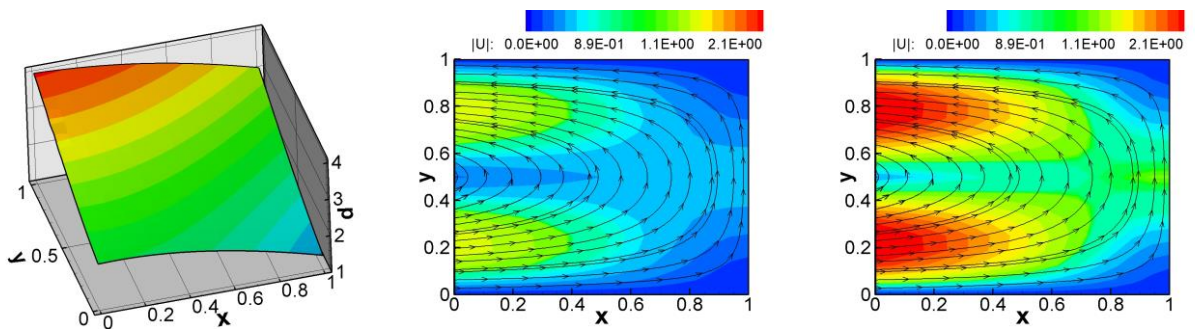


Рисунок 8 – Тестовый расчет для задачи Навье–Стокса (слева направо): давление p_h , линии тока и магнитуда скорости $|\mathbf{u}_h|$ при $t = 0.15$ с и $t = 0.3$ с. $\text{Re} = 10^3$

4 Разработка и исследование математической модели движения людей для решения задач безопасности для многоэтажных зданий, программная реализация модели на параллельных и гибридных архитектурах

Одним из ключевых параметров, отвечающих за скорость человека, двигающегося в потоке людей, является плотность потока. Существуют аналитические зависимости скорости от плотности. В разрабатываемой дискретно-непрерывной модели движения людей индивидуально-поточного типа скорость человека определяется через такую явную связь. Поэтому локальная плотность потока является ключевым параметром при определении скорости человека на каждом расчетном шаге. Ранее была проведена работа по исследованию нескольких численных алгоритмов оценивания локальной плотности потока с учетом специфики задачи. Спецификой задачи в данном случае являются: определение области локализации (которая зависит в общем случае от текущей ситуации), минимизация количества вычислительных операций, универсальность метода, работа с «удобными» единицами измерения плотности. На данном этапе были проведены работы по исследованию качества принятого метода оценивания плотности.

Исследование проводилось на примере с периодическими граничными условиями, для которого имеются экспериментальные данные. Был рассмотрен прямой коридор длиной 50 м и шириной 2 м, в котором равномерно располагались люди с определенной плотностью. В течение эксперимента плотность поддерживалась постоянной. На рисунке 9 приведены кривые удельных потоков, [чел/м/сек], натурального и модельного, в

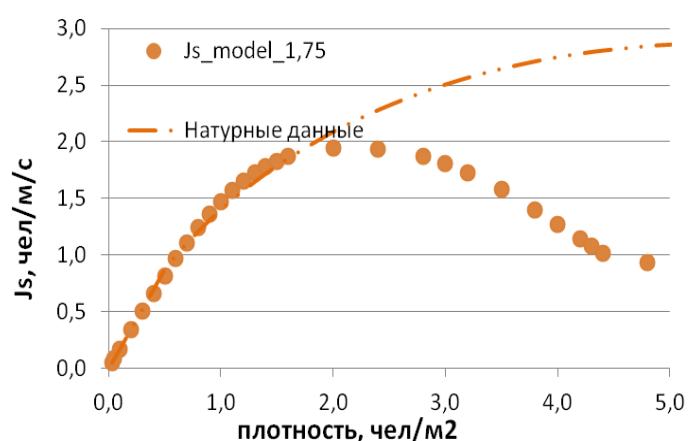


Рисунок 9 – Удельный поток через контрольное сечение в натурном и модельном экспериментах в зависимости от плотности.

зависимости от плотности потока, [чел/м²]. Видно, что примерно до плотности 1,8 чел/м² кривые практически совпадают, затем начинают расходиться, модельный поток

становится существенно медленнее, чем натуральный. Этот эффект был предметом специального исследования. Были вычислены средние значения рассчитанного сдвига и откорректированного за один расчетный шаг, рисунок 10. Рассчитанные значения являются функцией от рассчитанной плотности. Откорректированный сдвиг определяется по фактической ситуации (наличию места). Примерно в том же диапазоне плотностей имеется совпадение этих двух кривых. Далее они расходятся, отклонение рассчитанного шага от фактического увеличивается. Данный факт является следствием того, что с увеличением плотности качество оценки плотности падает, применяемый алгоритм дает в среднем такое значение плотности, что оно не соответствует фактической возможности двигаться в рассматриваемом направлении. В пользу этого говорит и совпадение среднеквадратического отклонения и собственно среднего значения фактического шага,

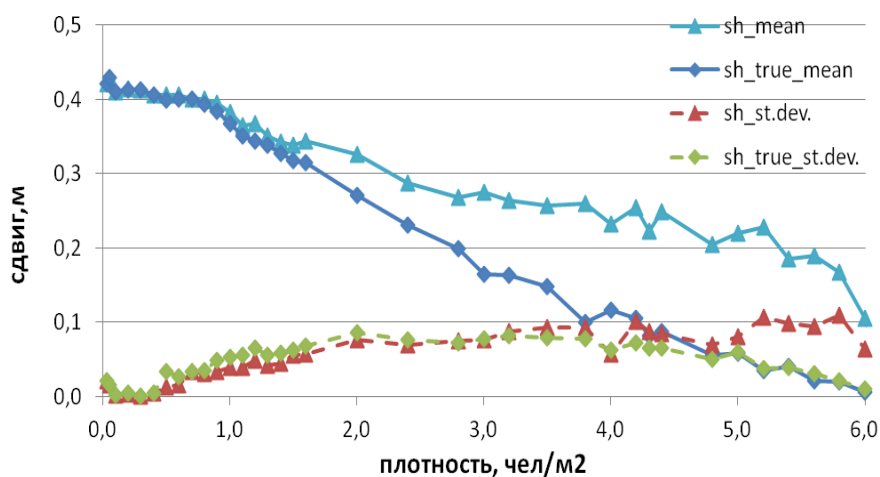


Рисунок 10 – Средний сдвиг, рассчитанный по плотности (sh_mean); сдвиг, откорректированный по фактической ситуации (sh_true_mean) и соответствующие среднеквадратические отклонения (sh_st.dev. и sh_true_st.dev.)

начиная примерно с плотности 4 чел/м². Следствием проведенного исследования является то, что требуется коррекция метода оценки плотности. Плотность должна быть взвешенной, необходимо рассмотреть постановку, когда, начиная с некоторой плотности, имитируется псевдосжатие плоского диска, представляющего собой проекцию человека на плоскость.

Для ускорения расчетов разработаны алгоритмы распараллеливания вычислений для одного многопроцессорного узла и для MPI-кластера путем разнесения поэтажных расчетов по отдельным процессам и организации обмена между процессами согласно стандарту MPI. Реализована 64-битная версия расчетного ядра для решения больших

(длительные процессы, большие линейные размеры расчетной области, большое количество людей) прикладных задач по моделированию пешеходных потоков.

В ходе апробирования разработанной дискретно-непрерывной модели движения людей индивидуально-поточного типа для решения задач безопасности были выполнены работы по моделированию пешеходных потоков для объектов Универсиады 2019. В соответствии с разработанными сценариями было выполнено вариативное компьютерное моделирование потоков людей на расчетном ядре «SigmaEva» в режиме загрузки и выгрузки следующих объектов: проектируемый лыжный стадион «Радуга» и реконструируемый Дворец спорта имени И. Ярыгина, рисунок 11. Индивидуально-поточная модель, реализованная в «SigmaEva», наилучшим образом подходит для данных

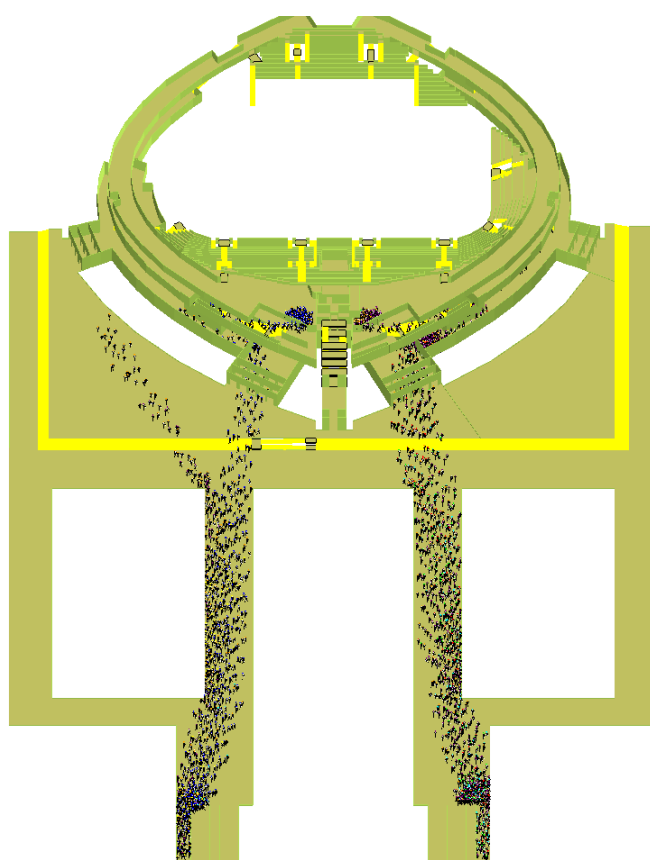


Рисунок 11 – Выгрузка зрителей из Дворца спорта им. И. Ярыгина, скопления перед КПП 2 и КПП 3, 170 сек.

целей, поскольку позволяет задавать индивидуальные характеристики и моделировать движение каждого отдельного человека в сложно структурированных пространствах с учетом окружающей обстановки (препятствия, включая участки пути с заданной интенсивностью, другие люди).

По результатам проведенного моделирования были определены «узкие места» объектов с точки зрения процессов загрузки и выгрузки зрителей, сформированы рекомендации по организации загрузки и выгрузки зрителей на объектах с учетом их планировочных особенностей, наличия контрольно-пропускных пунктов (КПП) по требованиям FISU. Так, наличие КПП является существенным фактором, ограничивающим движение людей на выход за пределы зоны безопасности, окружающей объект. На рисунке 11 представлен процесс выгрузки из Дворца спорта им. И. Ярыгина на 170-й секунде при одновременном начале движения. Продолжительность скопления достигает 8 минут. Была предложена и проверена путем моделирования схема поэтапного начала движения зрителей с разных трибун, тем самым было обеспечено комфортное и безопасное движение людей на объекте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение 2015 года выполнен полный цикл исследований, запланированных по данному проекту. В ходе его выполнения получены результаты, приоритет которых подтверждается рейтинговыми публикациями коллектива исполнителей проекта в ведущих Российских и зарубежных научных журналах.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Основные публикации

1. *Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V.* Modeling of elastic waves in a blocky medium based on equations of the Cosserat continuum // *Wave Motion*. – 2015. – Vol. 52. – P. 138–150.
2. *Ivanov K.L., Sadovsky V.M., Lukzen N.N.* Theoretical description of spin-selective reactions of radical pairs diffusing in spherical 2D and 3D microreactors // *Journal of Chemical Physics*. – 2015. – Vol. 143, № 8. – P. 084110-1–084110-10.
3. *Novikov E.A., Novikov A.E.* Explicit-implicit variable structure algorithm for solving stiff systems // *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. – 2015. – Vol. 9. – P. 62–70.
4. *Kirik E., Malyshev A., Popel E.* On the Validation of a Discrete-Continuous Model with Bottleneck Flow and Computational Artifacts // *Traffic and Granular Flow '13*. – Springer International Publishing, 2015. – P. 121–128.
5. *Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V.* Mathematical Modeling of a Metal Foam as an Elastic-Plastic Continuum with Changing Resistance // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1648. – P. 630005-1–630005-4.
6. *Sadovskaya O.V., Sadovskii V.M.* Numerical Implementation of Mathematical Model of the Dynamics of a Porous Medium on Supercomputers of Cluster Architecture // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1684. – P. 070005-1–070005-9.
7. *Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V.* Mathematical Modeling of Deformation of a Porous Medium, Considering Its Strengthening Due to Pore Collapse // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1684. – P. 070006-1–070006-9.
8. *Dementyeva E., Karepova E., Shaidurov V.* The semi-Lagrangian approximation in the finite element method for the Navier–Stokes equations // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1684. – P. 090009.
9. *Doronin S.V., Rogalev A.N.* Error in Calculating the Extension of a Plate with a Circular Notch // *Russian Engineering Research*. – 2015. – Vol. 35, № 4. – P. 235–238.
10. *Kirik E., Malyshev A., Senashova M.Yu.* On the evacuation module SigmaEva based on a discrete-continuous pedestrian dynamics model // *Lecture Notes in Computer Science, Proceedings of the 11th International Conference “Parallel Processing and Applied Mathematics”* (в печати).
11. *Dementyeva E.V., Karepova E.D., Shaidurov V.V.* The semi-lagrangian FEM to the Navier–Stokes model for viscous incompressible fluid // *Proceedings of Fourth China–Russia*

- Conference Numerical algebra with application. – Rostov-on-Don: Southern Federal University Publishing, 2015. – P. 21–22.
12. *Levykin A.I., Новиков Е.А.* A study of (m,k)-methods for solving differential-algebraic systems of index 1 // 8th International Conference “Computational and Informational Technologies in Science, Engineering and Education”. – Almaty: Al-Farabi Kazakh National University, 2015. – P. 94–107.
 13. *Novikov E.A., Novikov A.E.* Alternating order algorithm based on stages of the Ceschino method // 8th Vienna international conference on mathematical modeling. –Vienna: Vienna University of Technology, 2015. – P. 198–203.
 14. *Садовский В.М., Ченцов Е.П.* Анализ резонансного возбуждения слоистых и блочных сред на основе дискретных моделей // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2015. – Т. 16, № 2. – С. 318–327.
 15. *Новиков Е.А.* Алгоритм переменной структуры с применением (3,2)-схемы и метода Фельберга // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2015. – Т. 16, № 3. – С. 446–455.
 16. *Рогалев А.Н., Доронин С.В., Рогалев А.А.* Контроль точности решения при анализе напряженно-деформированного состояния высокоответственных технических объектов // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 3 (27). – С. 32–38.
 17. *Киреев И.В.* Ортогонально-степенной метод решения частичной проблемы собственных значений и векторов для симметричной неотрицательно определённой матрицы // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии (в печати).
 18. *Садовский В.М.* Инвариантная мера кривизны и термодинамически согласованные уравнения моментной теории упругости // Известия академии наук: Механика твёрдого тела (в печати).
 19. *Новиков Е.А.* Метод типа Розенброка третьего порядка с внутренней L-устойчивостью // Информатика и системы управления. – 2015. – № 1 (43). – С. 54–62.
 20. *Бодякин Е.В., Перетокин С.А., Симонов К.В.* Методика проведения сейсмического микрорайонирования площадок с использованием ГИС технологий // Информатизация и связь. – 2015. – № 2. – С. 80–83.
 21. *Курако М.А., Симонов К.В., Быков А.А.* Восстановление данных гидрофизического мониторинга цунами в рамках информационной системы // Информатизация и связь. – 2015. – № 2. – С. 84–88.

22. *Новиков Е.А.* Численное моделирование кольцевого модулятора методом решения неявных систем // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 17–27.
23. *Новиков Е.А.* Алгоритм переменной структуры с применением трехстадийных методов типа Рунге–Кутты и Розенброка // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Физико-математические науки (в печати).
24. *Новиков Е.А.* Применение метода типа Розенброка третьего порядка для расчета кольцевого модулятора // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 2 (60). – С. 20–23.
25. *Novikov E.A., Novikov A.E.* An Algorithm of Variable Order and Step, Based on Stages of the Dormand–Prince Method // Университетский научный журнал. – 2014. – № 10. – С. 140–147.
26. *Новиков Е.А., Захаров А.А.* Алгоритм переменного шага с применением метода типа Розенброка третьего порядка точности // Вестник Тюменского государственного университета. – 2015. – Т. 1, № 1 (1). – С. 146–154.
27. *Смолехо И.В.* Параллельная реализация алгоритма для описания термоупругих волн в жидких кристаллах // Молодой ученый. – 2015. – Т. 91, № 11, ч. I. – С. 107–113.
28. *Simonov K.V., Kurako M.A.* Computer technology for data processing of complex monitoring of natural geobjects // Совместный выпуск по материалам международной научной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (СITech–2015) (24-27 сентября, 2015); Вычислительные технологии. – Т. 20; Вестник КАЗНУ им. Аль-Фараби. Серия: математика, механика и информатика. – 2015. – № 3 (86), ч. I. – С. 294–299.
29. *Дементьева Е.В., Карпова Е.Д.* Полулагранжевый подход для численного решения уравнений Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости // Решетневские чтения: материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева (10 – 14 ноября 2015, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2015. – Ч. 2. – С. 122–123.
30. *Новиков Е.А.* Алгоритм на основе L-устойчивого (4,2)-метода четвертого порядка // Труды Международной конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики – 2015», посвященной 90-летию со дня рождения акад. Г.И. Марчука. – Новосибирск, 2015. – С. 522–528.
31. *Новиков Е.А., Новиков А.Е.* Алгоритм интегрирования переменного шага с применением L-устойчивого (4,2)-метода // Труды Международной научно-

- технической конференции «Компьютерное моделирование – 2015» (COMOD–2015). – Санкт-Петербург, 2015. – С. 11–16.
32. *Новиков Е.А.* Аддитивный метод второго порядка для расчета электрических цепей // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических систем и электронных схем» (ДАДС – 2015). – Чебоксары, 2015. – С. 52–55.
33. *Новиков Е.А., Новиков А.Е.* Явно-неявный двухстадийный метод решения жестких неавтономных задач // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные задачи математического моделирования и информационных технологий». – Сочи, 2015. – С. 99–102.
34. *Новиков Е.А.* Алгоритмы интегрирования переменного порядка и шага на основе явных методов // Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции «Эффективные механизмы инновационно-технологического развития современного общества». – Сочи: РИЦ НОУ ВПО СИЭИТ, 2015. – С. 79–80.
35. *Новиков Е.А.* А-устойчивый (М,3)-метод пятого порядка для решения жестких задач // Материалы Международной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики». – Воронеж: ВГУ, 2014. – С. 206–210.
36. *Кирик Е.С.* Применение компьютерных симуляторов для обеспечения (пожарной) безопасности людей на объектах массового пребывания (спортивные, транспортные, торгово-развлекательные, объекты культуры) // Труды научно-практического семинара «Особенности организации и осуществления мероприятий по обеспечению безопасности спортивных соревнований с массовым пребыванием людей» (в печати).

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Сведения о созданной и оформленной интеллектуальной собственности

1. *Шорников Ю.В., Новиков Е.А., Насырова М.С.* Свидетельство № 2015617613 о гос. регистрации программы “Модуль распределенных вычислений программного комплекса ИСМА_2015”. Зарегистрировано в Реестре для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности 15.07.2015.
2. *Шорников Ю.В., Новиков Е.А., Насырова М.С.* Свидетельство № 2015617617 о гос. регистрации программы “Вычислительное ядро программного комплекса ИСМА”. Зарегистрировано в Реестре для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности 15.07.2015.