

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ
ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК –
ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ

УДК 519.688
№ 0361-2015-0023

УТВЕРЖДЕН
Протоколом заседания
Ученого совета
от _____ г. № _____

Председатель Ученого совета
академик РАН
_____ В.Ф. Шабанов
" ____ " _____ 20____ г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ПО ПРОЕКТУ П.2П/IV.36-2 «РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИОННЫХ
ПРОЦЕССОВ В СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ В ПРИЛОЖЕНИИ К
ЗАДАЧАМ ГЕОМЕХАНИКИ И ГЕОДИНАМИКИ» КОМПЛЕКСНОЙ ПРОГРАММЫ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
№ П.2П «ИНТЕГРАЦИЯ И РАЗВИТИЕ» НА 2016 Г.

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

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

Красноярск 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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

(подпись, дата)

В.М. Садовский

Исполнители:
с.н.с., к.ф.-м.н.

(подпись, дата)

И.В. Киреев

с.н.с., к.ф.-м.н.

(подпись, дата)

А.А. Лукьянов

с.н.с., к.ф.-м.н.

(подпись, дата)

А.Д. Матвеев

с.н.с., к.ф.-м.н.

(подпись, дата)

О.В. Садовская

н.с., к.ф.-м.н.

(подпись, дата)

М.П. Варыгина

инженер

(подпись, дата)

И.В. Смолехо

м.н.с.

(подпись, дата)

Е.П. Ченцов

Нормоконтролер

(подпись, дата)

А.В. Вяткин

РЕФЕРАТ

Отчет 14 с., 2 прил.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, УПРУГОСТЬ, ПЛАСТИЧНОСТЬ, БЛОЧНАЯ СРЕДА, ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ, ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Проект направлен на алгоритмическую и программную реализацию новых математических моделей для анализа волновых процессов в блочных средах, имитирующих кусковатые горные породы, на многопроцессорных вычислительных системах. При выполнении проекта разработано и зарегистрировано в Роспатенте прикладное программное обеспечение для численного решения краевых задач, описывающих динамику блочных сред с учетом нелинейных эффектов взаимодействия блоков через упругие, вязкоупругие и пористые прослойки. В пористом материале прослоек учитываются эффекты схлопывания пор с пороговым повышением жесткости по мере схлопывания. Алгоритмы реализованы на суперкомпьютерах кластерной архитектуры с использованием библиотеки обмена сообщениями MPI, а также на вычислительных системах с графическими ускорителями по технологии CUDA.

В результате выполнения НИР получены следующие результаты.

1. Создан программный комплекс для численного моделирования динамических процессов в многоблочных средах на кластерных системах (2Dyn_Blocks_MPI).
2. Создан программный комплекс для расчета двумерных задач динамики блочных сред с тонкими упругими и вязкоупругими прослойками на графических ускорителях (2Dyn_Blocks_CUDA).
3. Разработаны оригинальные математические модели, описывающие процесс распространения веерных волн разрушения в горных породах на больших глубинах.
4. Проведены расчеты равновесного и движущегося веера на основе дискретной имитационной модели.
5. С помощью сингулярного решения плоской задачи теории упругости о краевой дислокации Вольтерра выполнен расчет напряженно-деформированного состояния вокруг равновесного веера в тектоническом разломе между двумя упругими блоками – плитами горной породы в зоне сейсмической активности.

ВВЕДЕНИЕ

Основная задача проекта состоит в разработке новых математических моделей, вычислительных алгоритмов и компьютерных программ, ориентированных на современные системы высокопроизводительных вычислений, для решения задач динамики структурно неоднородных блочных сред. Проект направлен на выработку эффективных методов решения с помощью технологий MPI и CUDA. Целью проекта является создание алгоритмов и программ для научных и опытно–конструкторских работ при исследовании геодинамических процессов. В области приложений работы по проекту ведутся совместно с Центром шельфовых инженерных систем университета Западной Австралии: Center for Offshore Foundation Systems of the University of Western Australia (COFS UWA).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. Программный комплекс для численного моделирования динамических процессов в многоблочных средах на кластерных системах 2Dyn_Blocks_MPI

Зарегистрированный в Роспатенте программный комплекс 2Dyn_Blocks_MPI предназначен для численного моделирования в плоской постановке процессов распространения волн в блочной структуре, состоящей из большого числа упругих блоков, взаимодействующих через податливые прослойки с усложненными механическими свойствами. Численный алгоритм основан на методе двуциклического расщепления в сочетании с явной монотонной схемой типа распада разрыва Годунова. При реализации уравнений деформирования прослоек, играющих роль внутренних граничных условий для уравнений динамики блоков, применяется неявная бездиссипативная схема Иванова. Распараллеливание вычислений выполнено по принципу 1D декомпозиции расчетной области с равномерным распределением вычислительной нагрузки между процессорами. Используется библиотека передачи сообщений MPI и технология SPMD. Функционирует на кластерных системах MBC типа.

Рис. 1 демонстрирует результаты методических расчетов локализованного импульсного воздействия на границе блочного массива из 200×200 блоков с параметрами, близкими к параметрам кирпичной кладки. К центральному блоку левой границы массива в течение малого промежутка времени приложена пара сосредоточенных сил, эквивалентная действию вращательного момента. Плечо между силами равно половине толщины блока. Остальная часть границы свободна от напряжений.

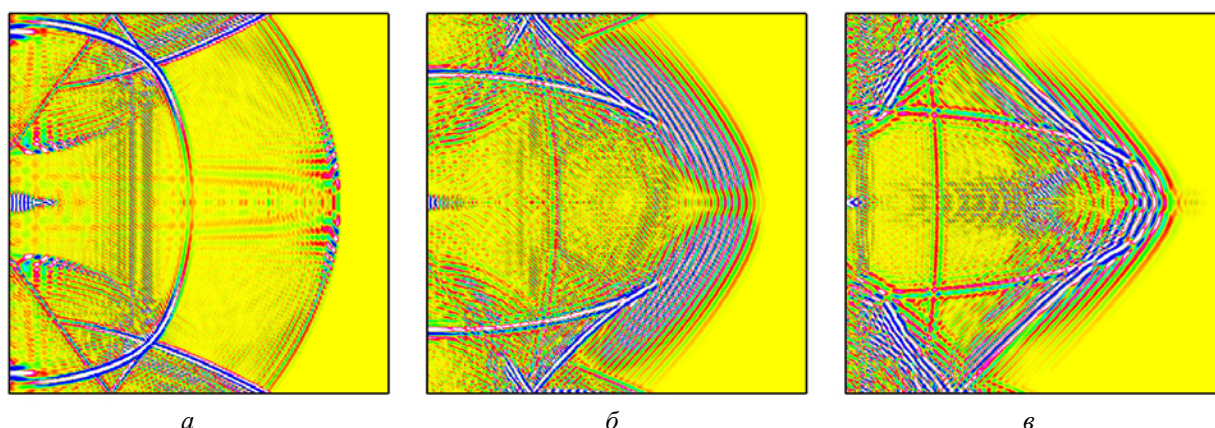


Рис. 1. Действие сосредоточенного вращательного момента на левой границе массива горных пород. Линии уровня угловой скорости в зависимости от толщины прослойки: а) 0.1 мм, б) 1 мм, в) 5 мм.

Волновые картины для разных толщин относятся к близким моментам времени. По линиям уровня угловой скорости видны близкие к круговым фронты волн в случае тонких

прослоек и эллиптические фронты, вытянутые вдоль координатных направлений, в случае более толстых прослоек. С утолщением прослоек более заметной становится система волн, вызванных колебательным вращением блоков. Расчеты выполнены на разностной сетке из 2000×2000 узлов на 200 процессорах кластера MBC–100k Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН (г. Москва).

2. Программный комплекс для расчета двумерных задач динамики блочных сред с тонкими упругими и вязкоупругими прослойками на графических ускорителях 2Dyn_Blocks_CUDA

Зарегистрированный в Роспатенте программный комплекс 2Dyn_Blocks_CUDA предназначен для численного исследования процессов распространения волн напряжений и деформаций в блочных средах, составленных из упругих блоков, взаимодействующих через тонкие упругие или вязкоупругие прослойки. Комплекс позволяет численно решать двумерные динамические краевые задачи с заданными начальными данными и граничными условиями, моделирующими внешнее механическое воздействие на блочную среду. Алгоритм численной реализации модели основан на методе двуциклического расщепления в сочетании с явной монотонной схемой типа распада разрыва. Распараллеливание вычислений выполнено для компьютеров с графическими ускорителями NVIDIA по технологии CUDA для устройств с Compute capability ≥ 2.0 .

Примеры расчетов с помощью программного комплекса 2Dyn_Blocks_CUDA:

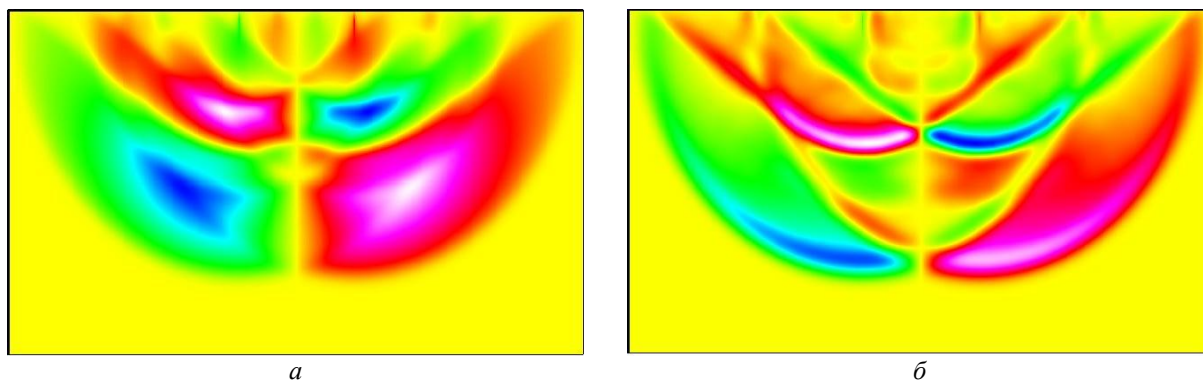


Рис. 2. Линии уровня нормального напряжения за фронтом падающей волны, вызванной в блочной среде воздействием распределенной П-образной импульсной нагрузки касательного напряжения. 800 шагов по времени. Размеры области: а) 8×4 блока; б) 32×16 блоков.

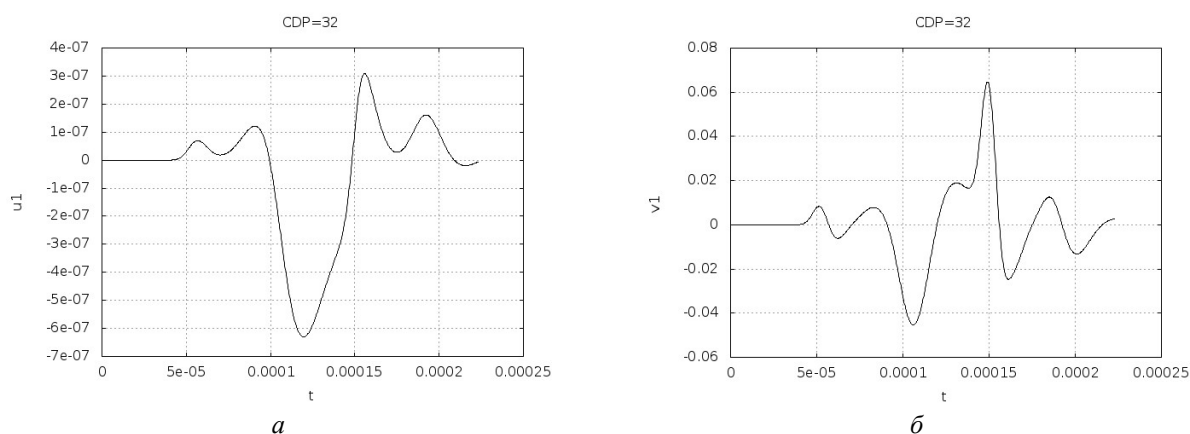


Рис. 3. Сейсмограммы перемещения u_1 (а) и скорости v_1 (б).

3. Математическое моделирование веерных волн в лабораторной модели Тарасова, имитирующей рост трещин сдвига в глубинных тектонических разломах

Согласно общепринятым представлениям, при сжатии горных пород под высоким боковым давлением макроскопические трещины сдвига продвигаются за счет формирования системы наклонных микротрещин отрыва, образуя фундаментальную структуру, включающую эшелон тонких пластин, так называемую “домино–структуру”. Экспериментально установлено, что при вращении домино–пластины разрушаются, создавая трение в голове трещины. Считается, что данный механизм реализуется также в прочных горных породах, запредельные свойства которых до сих пор не изучены из-за высокой динамики разрушения. Недавние исследования профессора Тарасова из университета Западной Австралии выявили принципиально иной механизм, в котором домино–пластины сохраняют целостность при вращении и образуют веер, движущийся как волна с высокой скоростью благодаря кардинальному снижению трения в голове бегущей трещины.

В отчетном году выполнен анализ веерного механизма передачи вращательного движения в системе упруго связанных пластин, имитирующего распространение сдвиговых трещин в горных породах аномально высокой хрупкости в земной коре на глубинах сейсмической активности. Создана лабораторная физическая модель, в которой наглядно демонстрируется процесс распространения веерных волн, представляющая собой точную копию лабораторной модели Тарасова. На основе уравнений Лагранжа построена дискретная математическая модель вращательного движения системы пластин на плоском основании, соединенных упругими связями, как механической системы с конечным числом степеней свободы. Предложен алгоритм численной реализации модели, учитывающий контактное взаимодействие пластин. С помощью разработанной

программы в системе Matlab выполнены расчеты процесса формирования и последующего движения веера за счет принудительного поворота первой пластины. На рис. 4 приведены результаты расчетов веерной волны, обусловленной вращательным движением системы связанных домино–пластин.

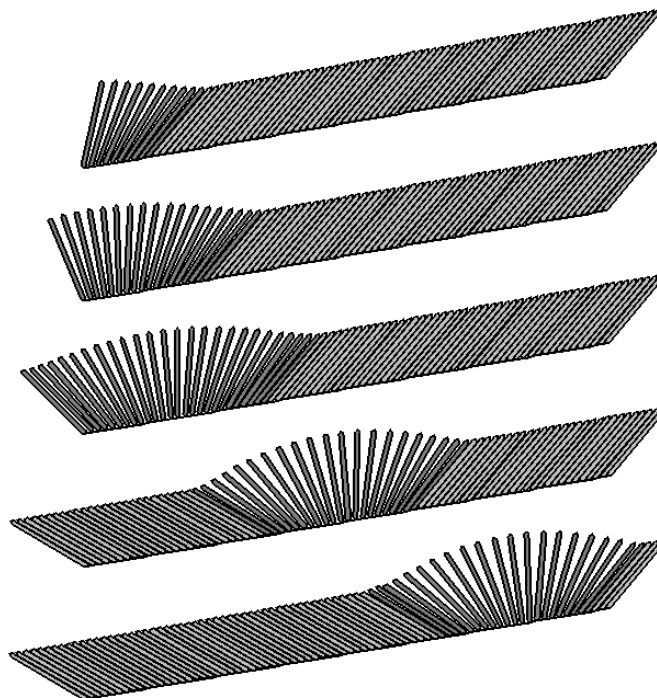


Рис. 4. Последовательные стадии формирования и движения веера.

Получено уравнение, описывающее равновесное состояние системы в приближении длинного веера, с помощью которого вычислена длина веера в зависимости от веса пластин и от коэффициента упругости связи. Показано, что при отсутствии трения стационарный веер может двигаться с любой скоростью, не превышающей критического значения, зависящего от размера, момента инерции пластин, начального угла и коэффициента упругости связи, и что длина веера сокращается с увеличением скорости. При отсутствии касательных усилий, когда система пластин находится в горизонтальном положении, веер останавливается за счет трения. Действие касательных усилий приводит к неполному раскрытию веера, причем угол раскрытия уменьшается с ростом трения. В системе с трением скорость бегущего веера однозначно определяется через угол раскрытия, а при пренебрежении трением она может принимать любое значение из допустимого диапазона.

В рамках дискретной модели выполнены расчеты, демонстрирующие неполное раскрытие веера с различными углами раскрытия за счет быстрого или медленного изменения скорости поворота первой пластины. Сравнение результатов вычисления

длины и скорости веера по дискретной модели с расчетами на основе аналитических формул и с лабораторными наблюдениями показало хорошее соответствие результатов. Разработанная модель используется при изучении процессов формирования динамических трещин сдвига в горных породах в условиях глубин сейсмической активности.

4. Анализ напряженно-деформированного состояния в упругих блоках вокруг равновесного веера

В приближении плоской деформации построена математическая модель равновесного веера в прослойке между двумя упругими полуплоскостями, имитирующей растущую трещину сдвига в прочной горной породе в условиях сильного гидростатического сжатия. Напряженно-деформированное состояние вдали от веера изучено с помощью решения задачи о краевой дислокации. В полной постановке задача решена на основе оригинального метода суперпозиции дислокаций, приводящего к двум нелинейным интегральным уравнениям в зоне веера, для численного исследования которых применяется метод последовательных приближений.

Рис. 5 служит для пояснения постановки задачи о равновесном веере. Две упругие полуплоскости в состоянии гидростатического сжатия контактируют между собой через тонкую прослойку с домино-структурой, которая сформировалась под действием случайных природных процессов в результате поворота блоков (пластин), изначально расположенных под одним и тем же углом наклона к горизонту. Вращение пластин создало в блоках статическое напряженно-деформированное состояние, которое требуется определить.



Рис. 5. Конфигурация равновесного веера в вершине глубинной трещины сдвига.

С помощью классического решения задачи о краевой дислокации Вольтерра, играющего роль функции Грина в рассматриваемой модели, получены сингулярные интегральные уравнения для определения относительного сдвига полуплоскостей в зоне веера и распределения нормального давления в этой зоне. На рис. 6 приведены эпюры напряжений и перемещений в полуплоскостях-блоках, полученные в результате численного решения интегральных уравнений методом последовательных приближений.

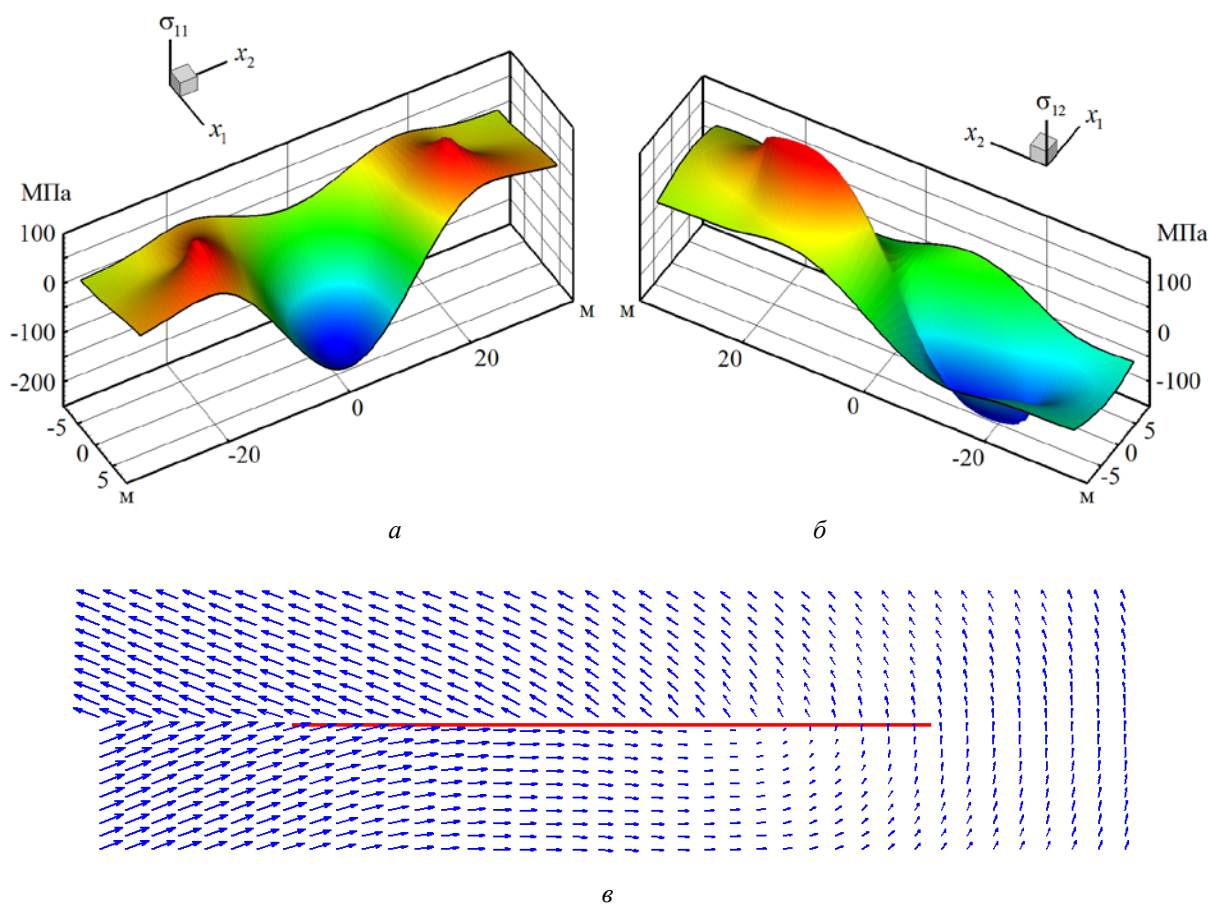


Рис. 6. Поверхности уровня нормального и касательного напряжений (*а, б*); поле перемещений (*в*) вокруг равновесного веера. Положение веера изображено красной линией.

Полученное решение планируется использовать в дальнейшем при постановке начальных данных в разрабатываемой нестационарной модели движения веера под действием касательных напряжений, обусловленных случайными возмущениями, связанными с прохождением сейсмических процессов в блоках. Создание такой модели для описания веерного механизма Тарасова является задачей следующего этапа проекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчетном году были разработаны и зарегистрированы в Роспатенте программные комплексы для численного моделирования процессов распространения волн в блочных средах из упругих блоков, взаимодействующих между собой через тонкие податливые прослойки. Разработаны вычислительные технологии для моделирования процесса формирования и распространения веерных волн разрушения в горных породах на больших глубинах. Полученные результаты могут служить для анализа волновых процессов, протекающих в глубинных тектонических разломах земной коры под действием сейсмических возмущений.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1: Публикации

1. Тарасов Б.Г., Садовский В.М., Садовская О.В. Анализ веерных волн в лабораторной модели, имитирующей распространение сдвиговых трещин в горных породах // Вычислительная механика сплошных сред. 2016. Т. 9, № 1. С. 38–51. DOI: 10.7242/1999-6691/2016.9.1.4.
2. Тарасов Б.Г., Садовский В.М., Садовская О.В. Моделирование веерообразования в вершине глубинной трещины сдвига на основе уравнений плоской теории упругости // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19, № 4. С. 28–37.
3. Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V. Method of superposition of dislocations for finding stress-strain state around fan-shaped structure in a brittle rock // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1773. P. 080004-1–080004-7. DOI: 10.1063/1.4964988.
4. Tarasov B.G., Sadovskii V.M. Modeling of fan formation in a shear rupture head on the basis of singular solutions of plane elasticity // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1773. P. 080006-1–080006-7. DOI: 10.1063/1.4964990.
5. Tarasov B.G., Sadovskii V.M. Mathematical modeling of fan-structure shear ruptures generated in hard rocks. In: Numerical Analysis and Its Applications. Ser.: Lecture Notes in Computer Science. Berlin – Heidelberg: Springer, 2017. P. 1–8. (в печати)
6. Tarasov B.G., Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V. On the numerical analysis of fan-shaped waves. In: Numerical Analysis and Its Applications. Ser.: Lecture Notes in Computer Science. Berlin – Heidelberg: Springer, 2017. P. 1–8. (в печати)
7. Sadovskii V.M., Chentsov E.P. Discrete modeling of oscillatory processes in a blocky medium. In: Numerical Analysis and Its Applications. Ser.: Lecture Notes in Computer Science. Berlin – Heidelberg: Springer, 2017. P. 1–8. (в печати)
8. Smolekho I., Sadovskaya O., Sadovskii V. Numerical analysis of acoustic waves in a liquid crystal taking into account couple-stress interaction. In: Mathematical and Informational Technologies. Ser.: Communications in Computer and Information Science. Berlin – Heidelberg, Springer, 2017. P. 1–14. (в печати)

9. Sadovskii V.M. On thermodynamically consistent form of nonlinear equations of the Cosserat theory // 40th Solid Mechanics Conference (SolMech 2016), Abstracts. Warsaw, Poland, 2016. 2 p.
10. Smolekho I.V., Sadovskaya O.V., Sadovskii V.M. Numerical analysis of acoustic waves in a liquid crystal taking into account couple-stress interaction // Mathematical and Informational Technologies (MIT–2016), Conference Information. Belgrade, Serbia, 2016. P. 92–93.
11. Tarasov B.G., Sadovskii V.M. Mathematical modeling of fan-structure shear ruptures generated in hard rocks // 6th Conf. on Numerical Analysis and Applications (NAA'16), Abstracts. University of Rousse, Bulgaria, 2016. P. 54.
12. Tarasov B.G., Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V. On the numerical analysis of fan-shaped waves // 6th Conf. on Numerical Analysis and Applications (NAA'16), Abstracts. University of Rousse, Bulgaria, 2016. P. 54.
13. Sadovskii V.M., Chentsov E.P. Analysis of oscillation processes in a blocky medium by means of discrete and continuous models // 8th Intern. Conf. on Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (AMiTaNS'16), Book of Abstracts. Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, Bulgaria, 2016. P. 14–15.
14. Sadovskaya O.V., Sadovskii V.M. Method of superposition of dislocations for finding stress-strain state around fan-shaped structure in a brittle rock // 8th Intern. Conf. on Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (AMiTaNS'16), Book of Abstracts. Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, Bulgaria, 2016. P. 57–58.
15. Sadovskii V.M., Tarasov B.G. Modeling of fan formation in a shear rupture head on the basis of singular solutions of plane elasticity // 8th Intern. Conf. on Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (AMiTaNS'16), Book of Abstracts. Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, Bulgaria, 2016. P. 58.
16. Смолехо И.В. Численное моделирование акустических волн в жидком кристалле с использованием технологии CUDA // Материалы XVII Всеросс. конф. молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Новосибирск: ИБТ СО РАН, 2016. С. 68.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2: Сведения о созданной и оформленной
интеллектуальной собственности

1. Садовский В.М., Садовская О.В., Ченцов Е.П. Программный комплекс для численного моделирования динамических процессов в многоблочных средах на кластерных системах (2Dyn_Blocks_MPI). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016615178 от 17.05.2016 // Программы, зарегистрированные в реестре программ для ЭВМ Российской Федерации. Электронный бюллетень – Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем (RU ОБПБТ № 6(116) от 20.06.2016). М: ФИПС, 2016.
2. Садовский В.М., Варыгина М.П. Программный комплекс для расчета двумерных динамических задач в блочных средах с тонкими упругими и вязкоупругими прослойками на графических ускорителях (2Dyn_Blocks_CUDA). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016615361 от 23.05.2016 // Программы, зарегистрированные в реестре программ для ЭВМ Российской Федерации. Электронный бюллетень – Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем (RU ОБПБТ № 6(116) от 20.06.2016). М: ФИПС, 2016.