

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ПОДВОДНЫЙ КОМПОЗИТНЫЙ ТРУБОПРОВОД

© 2019 г. *К.А. Беклемышева^{1,2}, А.В. Васюков^{1,2}, В.И. Голубев²,
И.Б. Петров²*

¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

²Московский физико-технический институт vasyukov@gmail.com

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-11-00100.

DOI: 10.1134/S0234087919010064

Рассматривается задача численного моделирования процесса инициации сейсмической активности на шельфе и её разрушающего воздействия на композитные нефтепроводы, проложенные по морскому дну. Для описания динамического поведения среды используются определяющие системы уравнений теории упругости и акустики с явным выделением всех слоёв. Полимерный композитный материал трубопровода описывается в рамках вязкоупругой ортотропной модели. Предложен алгоритм, позволяющий для заданного уровня сейсмической активности и прочностных характеристик композита оценить объём разрушений нефтепровода. Отличительной особенностью разработанного подхода является разбиение задачи на два этапа: полномасштабный расчёт распространения сейсмических волн от очага землетрясения к дневной поверхности и расчет элемента композитного трубопровода как объекта сложной формы из анизотропного материала. Для численного расчёта используется сеточно-характеристический метод на гексаэдральных и тетраэдральных расчётных сетках.

Ключевые слова: математическое моделирование, непрерывная механика, сеточно-характеристический метод, землетрясение, сейсмостойкость, композитный материал, разрушение композитов, параллельные алгоритмы.

NUMERICAL MODELING OF SEISMIC INFLUENCE ON UNDERWATER COMPOSITE OIL PIPELINE

К.А. Beklemysheva^{1,2}, V.I. Golubev¹, A.V. Vasyukov^{1,2}, I.B. Petrov²

¹Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow

²Moscow Institute of Physics and Technology (state university)

The problem of numerical modeling of the process of seismic activity initiation on an ocean shelf and its destructive effect on composite oil pipelines laid along the seabed is considered. To describe the dynamic behavior of the medium, the determining systems of

equations of the theory of elasticity and acoustics are used, with explicit separation of all layers. The composite is described as an orthotropic material. An algorithm is proposed that allows the estimation of volume and type of oil pipeline destruction for a given level of seismic activity and strength characteristics of a composite. A distinctive feature of the developed approach is the splitting of the problem into two stages that are calculated in different scales: the full wave calculation of the propagation of seismic waves from the source of the earthquake to the day surface and the calculation of a composite pipeline element as an anisotropic material of complex shape. For numerical calculation, a grid-characteristic method is used for hexahedral and tetrahedral computational grids.

Key words: numerical simulation, continuous mechanics, grid-characteristic method, earthquake, seismic resistance, composite, destruction, parallel programming.

Введение

Современное состояние технологий позволяет с высокой точностью проводить математическое моделирование значительного числа физических явлений. Ввиду того что проведение натурных экспериментов зачастую чрезвычайно сложно либо дорого, развитие методов компьютерного моделирования представляется актуальным. Множество групп во всём мире разрабатывают исследовательские программные коды, позволяющие решать задачи акустики, упругости, разрушения, аэродинамики, газодинамики и т.д. Результаты этих работ имеют высокое прикладное значение, поскольку могут быть использованы, например, для совершенствования технологий поиска и разведки месторождений полезных ископаемых (сейсморазведка [1] и электроразведка), для повышения безопасности населения (оценка сейсмостойкости сооружений в сейсмоопасных регионах) и т.д.

В последнее время были открыты нетрадиционные месторождения, разведка и разработка которых традиционными методами не представляется возможной. К ним относятся: сланцевый газ, сверхглубокие залежи, месторождения Арктического шельфа. При этом при разработке шельфовых месторождений оптимальным является организация нефтепровода (его прокладка по морскому дну) для трансфера нефти от места добычи к местам хранения и переработки. Ввиду того что доступ к элементам трубопровода ограничен в период его эксплуатации (наличие навигационного периода, сложность и дороговизна глубоководных работ), к его надёжности предъявляются повышенные требования. Одной из причин аварий трубопровода является естественная и техногенная сейсмическая активность – землетрясения. При этом из очага землетрясения, вблизи которого происходят процессы как хрупкого, так и вязкого разрушения, к дневной поверхности распространяется набор сейсмических упругих волн, разрушающий объекты наземной и подземной инфраструктуры месторождения. Одной из возможно-

стей предотвращения природной катастрофы, связанной с разливом нефти, является использование современных полимерных композиционных материалов для изготовления элементов трубопровода повышенной стойкости.

Изучением процесса разрушения композиционных материалов занимается множество научных коллективов по всему миру. Подробные обзоры экспериментального, аналитического и численного исследования полимерных композитов приведены в [2,3]. Основные результаты серии международных проектов WWFE (World Wide Failure Exercise), целиком посвященных разработке и сравнению критериев объемного разрушения полимерных композиционных материалов (ПКМ) с армированием длинными волокнами, приведены, например, в [4,5]. К настоящему моменту было разработано множество различных критериев разрушения, с той или иной степенью достоверности описывающих натурные эксперименты. Наиболее часто применяемыми являются критерии Хашина, Пака, Цая-Хилла, Цая-Ву и Друкера-Прагера. Подробное описание этих критериев и их сравнение друг с другом и экспериментом приведено в [6]. Эти критерии используются во многих коммерческих расчетных пакетах.

Наиболее опасным типом разрушения является BVID – Barely Visible Impact Damage, слабо видимые повреждения при ударе [2,7]. Обычно они представляют собой трещины в матрице, в том числе протяженные трещины между слоями композита. Такие повреждения могут появиться даже после слабого удара (с энергией порядка 10-100 Дж) и не заметны невооруженным глазом, но существенно снижают остаточную прочность композита, особенно при испытаниях на сжатие [8,9]. Применяемые в данной работе критерии разрушения учитывают возникновение такого типа повреждений.

В настоящей работе рассматривается задача распространения сейсмических волн из очага землетрясения в шельфовом регионе и разрушения композитного нефтепровода под их воздействием. Математическая постановка задачи включает в себя систему уравнений теории акустики и линейной упругости с учётом анизотропии материала [10]. Предложен расчётный алгоритм оценки объёма разрушений нефтепровода, основанный на последовательном решении двух задач (распространение сейсмической волны от очага землетрясения к морскому дну и её динамическое воздействие на элемент трубопровода), позволяющий оценить возможность разрушения композитной трубы при землетрясении заданной интенсивности.

Постановка задачи

Задача о разрушении композитного нефтепровода под действием сейсмического импульса является вычислительно сложной из-за большой раз-

ницы в характерных пространственных размерах интересующих нас объектов. Общий размер расчетной области, в которой распространяется сейсмический импульс, составляет несколько километров, а толщина композитной трубы находится в пределах от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Объединение в одном расчете очага землетрясения и элемента трубопровода потребовало бы существенного локального измельчения сетки, что привело бы к увеличению расчетного времени. При этом трубопровод в силу своих размеров оказывает достаточно слабое воздействие на общую волновую картину, которым можно пренебречь. В этом случае задача разбивается на два отдельных этапа (рис.1).

На первом этапе моделируется распространение сейсмического импульса от очага землетрясения к дневной поверхности на шельфе. Модель среды была плоскостной, включающей верхний слой жидкости, в полной трёхмерной постановке [11]. Она состояла из пяти слоёв с различными параметрами, соответствующими слагающим их породам. Первый слой описывался в рамках теории акустики и имел плотность 1000 кг/м^3 , скорость распространения продольных волн 1500 м/с , толщину 250 м . Все остальные слои считались упругими и описывались уравнениями линейной теории упругости. Второй слой (слой осадков): плотность 1500 кг/м^3 , скорость распространения продольных волн 1600 м/с , скорость распространения поперечных волн 60 м/с , толщина 50 м . Третий слой: плотность 2100 кг/м^3 , скорость распространения продольных волн 2500 м/с , скорость распространения поперечных волн 1000 м/с , толщина 300 м . Четвёртый слой: плотность 2500 кг/м^3 , скорость распространения продольных волн 3500 м/с , скорость распространения поперечных волн 1300 м/с , толщина 400 м . Пятый слой (кристаллический фундамент): плотность 2500 кг/м^3 , скорость распространения продольных волн 4000 м/с , скорость распространения поперечных волн 2500 м/с , толщина 500 м . В качестве источника сейсмического сигнала использовалась модель «подвижки по разлому» [12] с геометрическими размерами источника – $50 \times 150 \times 150 \text{ м}$, углами наклона плоскости разрыва ($\text{rake}=\text{dip}=\text{slip}=45$ градусов) и глубиной залегания – 1150 м . Шаг расчётной сетки составлял 5 м , физическое время моделирования – 1.25 с .

По результатам расчетов на первом этапе снимались данные в точке, где предполагалось залегание элемента трубопровода. Эти данные использовались на втором этапе для моделирования разрушения фрагмента композитной трубы.

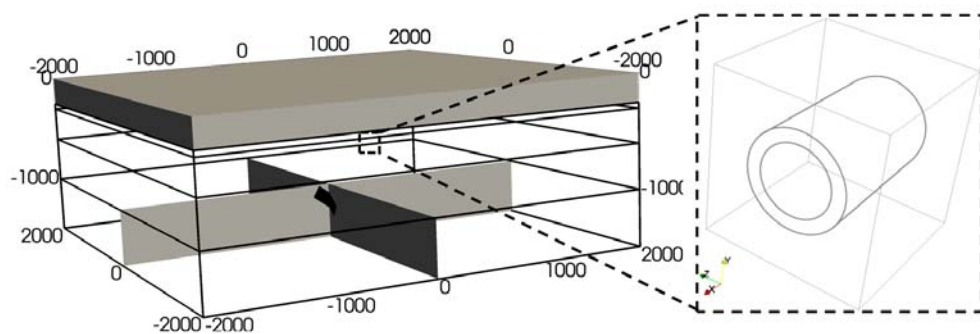


Рис.1. Постановка задачи, общий вид.

Для моделирования разрушения композитной трубы был взят объем грунта вокруг короткого прямого отрезка трубы. Радиус трубы – 25 см, толщина – 6 см, грань куба – 1 м. Ось трубы направлена вдоль оси X, вертикаль – ось Y. Общий вид расчетной области приведен на рис.1 справа. Для моделирования изогнутого анизотропного материала трубы необходимо в каждом расчетном узле хранить либо рассчитывать на каждом шаге реологические матрицы и ряд внутренних параметров метода, что крайне неэффективно либо по времени, либо по используемой оперативной памяти. В связи с этим труба была разбита на 16 сегментов, материал каждого из которых (углепластик, свойства материала приведены в [6]) повернут относительно соседних. Рассматривались два случая: направление волокон вдоль оси X и перпендикулярно ей. Сейсмическое воздействие моделировалось как граничное условие на нижней стороне расчетной области – для его постановки использовались компоненты тензора напряжений, полученные на первом этапе. Остальные границы считались поглощающими и моделировали эффективно вмещающий массив.

Численный метод

Динамическое состояние линейной упругой среды описывается определяющей системой уравнений в частных производных вида

$$\rho \dot{v}_i = \nabla_j \sigma_{ij},$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = q_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl}.$$

Здесь ρ – плотность среды, v_i – компоненты вектора скорости смещения, σ_{ij} и ϵ_{kl} – компоненты тензоров напряжений Коши и деформации, ∇_j – ковариантная производная по j -й координате. Вид компонент тензора 4-го порядка q_{ijkl} определяется реологией среды. Для линейного упругого изотропного случая они имеют вид

$$q_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}).$$

В этом соотношении, которое обобщает закон Гука, λ и μ – параметры Ламе, а δ_{ij} – символ Кронекера.

Определяющая система уравнений в частных производных решалась численно сеточно-характеристическим методом, подробно описанным в работах [13] (математическая формулировка для трехмерного случая) и [14] (подробное описание алгоритма). Расчетные комплексы, основанные на данной методе и применяемые в данной работе, прошли верификацию на большом количестве экспериментальных данных [2,12,14-16].

На первом этапе использовался метод на регулярных гексаэдральных сетках с третьим порядком точности по пространству. Использовался метод явного выделения контактных границ геологических слоёв, что обеспечивает корректный расчёт не только кинематических характеристик сейсмического сигнала, но и динамических характеристик (амплитуд) [17]. Необходимо отметить, что использованное контактное условие между первым слоем (жидкостью) и вторым слоем (слоем осадков) позволяет с высокой точностью воспроизвести наблюдения, осуществляемые при шельфовой сейсморазведке.

На втором этапе использовался гибридный метод 1-2-го порядка на нерегулярных тетраэдральных сетках, которые позволяют быстро и с хорошей точностью приближать сложную геометрию, для линейно упругого анизотропного материала [6]. Применение тетраэдральных сеток позволяет моделировать геометрию любой сложности, что дает возможность быстро и эффективно использовать данный метод для расчета прочности различных участков трубопровода (соединений труб, креплений и т.д.). Используются критерии разрушения композитов на основе определенного набора параметров материала, доступных для непосредственного измерения: критерии Хашина, Пака, Цая-Хилла, Цая-Ву и Другера-Прагера.

Результаты расчетов: землетрясение на шельфе

Для решения первой части задачи была проведена серия расчётов с возрастающей интенсивностью землетрясения. На рис.2 приведены волновые картины, полученные в последовательные моменты времени. Продольные и поперечные волны от источника начинают распространяться к дневной поверхности и проходя дно порождают набор акустических волн разных частот и амплитуд.

В работе была проведена калибровка параметров модели источника на основании серии прямых расчётов с оценкой максимальных смещений по-

верхности дна и использования шкалы Рихтера [18]. На рис.3 представлено распределение максимального за всё время расчёта вертикального смещения дна для двух расчётов. В первом случае скорость среды в области разлома задавалась равной 1 м/с, во втором случае – 100 м/с. На основе шкалы Рихтера данные землетрясения соответствуют 1 баллу и 3 баллам.

Для дальнейшей оценки сейсмостойкости нефтепроводов проводилась запись напряжённо-деформированного состояния среды на удалении 2 км от очага землетрясения на глубине 350 м. Рассчитывался полный тензор напряжений и вектор скорости точек среды. Затем эти данные выступали в качестве граничных значений в процессе моделирования динамического воздействия на элемент нефтепровода.

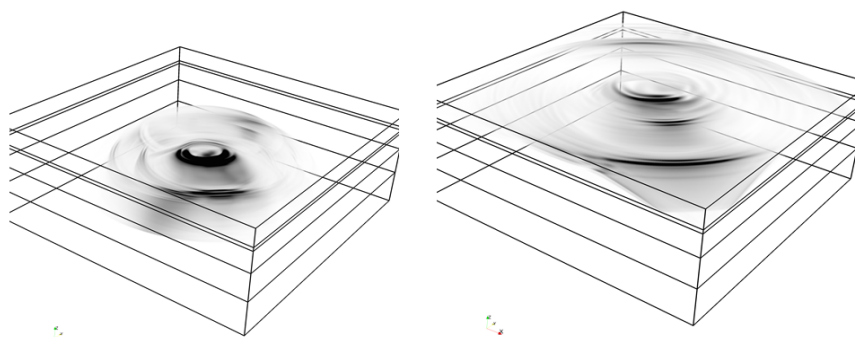


Рис.2. Распределение модуля скорости в шельфовой модели. Слева – 0.375 с (волны в третьем слое); справа – 0.875 с (волны в воде).

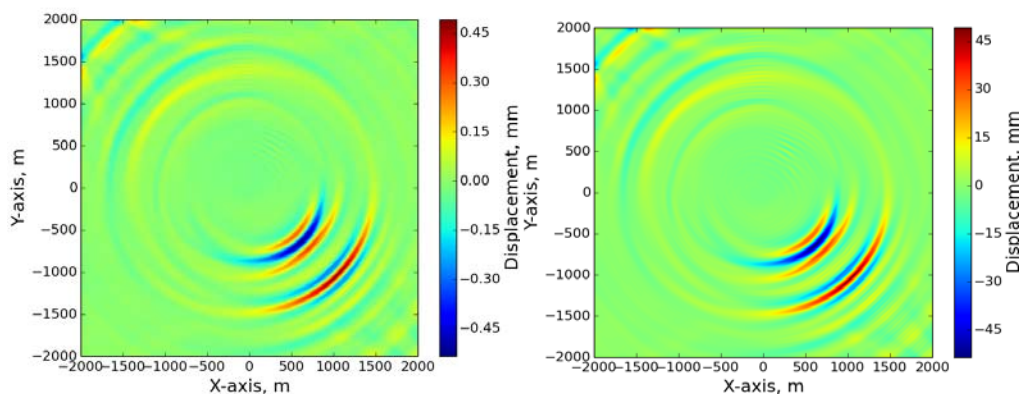


Рис.3. Распределение $\max\{Dz\}$ в слое донных осадков шельфовой модели. Слева – при начальной скорости источника 1 м/с (1 балл), справа – 100 м/с (3 балла).

Результаты расчетов: разрушение композитной трубы

Для решения второй части задачи был проведен ряд расчетов на основе данных, записанных в указанной точке геологического массива, для различной интенсивности землетрясения, различного направления волокон и

различных критериев разрушения. Наиболее интересные результаты демонстрирует критерий Хашина, так как он позволяет анализировать механизмы, по которым произошло разрушение, и не требует дополнительных внутренних параметров модели, значения которых отсутствуют в открытой печати.

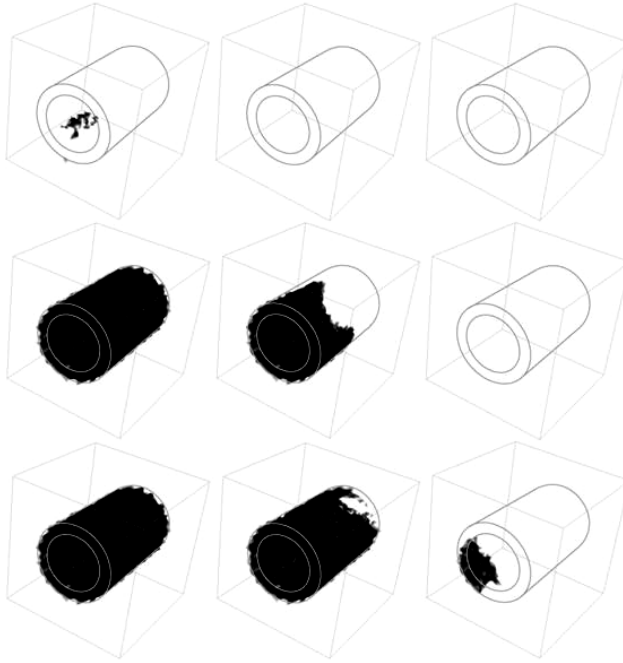


Рис.4. Области разрушения по критерию Хашина. Волокна направлены вдоль оси трубы. Сила землетрясения: слева – 3 балла, в середине – 2.5 балла, справа – 2 балла. Механизмы разрушения: снизу – расслоение, в середине – растрескивание матрицы, сверху – разрывы волокон.

На рис.4 приведены области разрушения для различной силы землетрясения и различных механизмов разрушения в критерии Хашина, волокна направлены параллельно оси трубы. При силе землетрясения в 1 балл разрушений не наблюдалось. При силе землетрясения в 2 балла происходят небольшие расслоения в нижней части трубы. При силе землетрясения в 2.5 балла расслоения происходят по всей стенке трубы, часть матрицы композита растрескивается. При силе землетрясения в 3 балла расслоения и растрескивание матрицы происходят по всему объему, часть волокон в нижней части трубы рвется.

На рис.5 приведены области разрушения для различной силы землетрясения и различных механизмов разрушения в критерии Хашина, волокна направлены перпендикулярно оси трубы. При силе землетрясения в 2 балла происходят существенные расслоения в нижней и верхней частях трубы.

При силе землетрясения в 2.5 балла расслоения происходят по всей стенке трубы, часть матрицы композита в нижней части трубы растрескивается. При силе землетрясения в 3 балла расслоения и растрескивание матрицы происходят по всему объему, разрыва волокон не происходит.

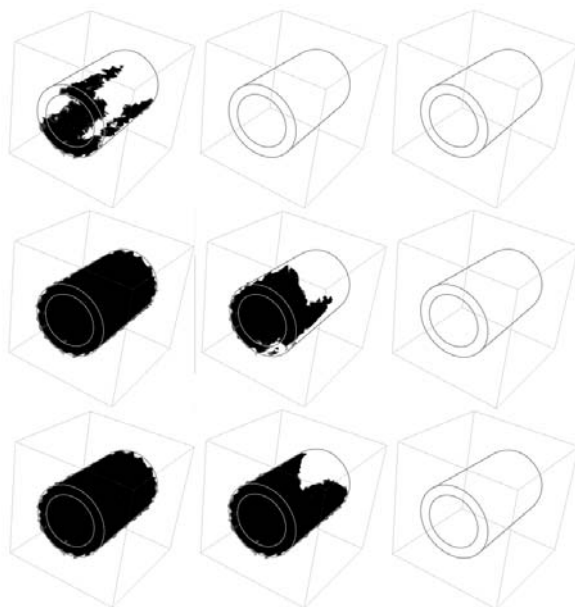


Рис. 5. Области разрушения по критерию Хашина. Волокна направлены перпендикулярно оси трубы. Сила землетрясения: слева – 3 балла, в середине – 2.5 балла, справа – 2 балла. Механизмы разрушения: снизу – расслоение, в середине – растрескивание матрицы, сверху – разрывы волокон.

Заключение

В работе описан новый подход, позволяющий оценить степень разрушающего воздействия землетрясения с заданной магнитудой на композитный нефтепровод. Задача была разбита на две части: полноволновой расчёт распространения сейсмических волн от очага землетрясения к дневной поверхности с учетом подробного описания геологического строения подстилающего массива и расчет разрушения композитной трубы под действием сейсмического импульса, снятого в одной из точек первого расчета.

Решение обеих частей задачи основано на численном решении акустических уравнений и уравнений упругости сеточно-характеристическим численным методом на гексаэдральных и тетраэдральных расчётных сетках.

Проведена серия расчётов, в рамках которой были получены волновые картины при землетрясении различной магнитуды по шкале Рихтера и определены области разрушения элемента нефтепровода, расположенного на дне морского шельфа. Анализ результатов свидетельствует об изменении

картины разрушения при изменении направления укладки волокон в композите. При укладке волокон параллельно оси трубы расслоение при землетрясении магнитудой 2 балла меньше, чем при укладке волокон перпендикулярно оси, но при землетрясении магнитудой 3 балла происходит разрушение волокон, которого нет при укладке волокон перпендикулярно оси. При магнитуде землетрясения менее 2 баллов разрушений в трубе не наблюдалось.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *V.I. Golubev, O.Y. Voinov, Y.I. Zhuravlev.* On seismic imaging of fractured geological media // *Dokl. Math.*, 2017, v.96, I. 2, p.514-516.
2. *S. Abrate.* Impact on Laminated Composite Materials // *Applied Mechanics Reviews*, 1991, v.44, №4, p.155-190.
3. *S. Abrate.* Damage in laminates from low-velocity impacts // *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures*, 2016, p.35-69.
4. *M.J. Hinton, A.S. Kaddour, P.D. Soden.* Failure criteria in fibre reinforced polymer composites: the world-wide failure exercise. – Amsterdam; London, Elsevier, 2004.
5. *M.J. Hinton, A.S. Kaddour.* Maturity of 3D failure criteria for fibre-reinforced composites: Comparison between theories and experiments: Part B of WWFE-II // *Journal of Composite Materials*, 2013, №7, p.925-966.
6. *K.A. Beklemysheva, A.S. Ermakov, I.B. Petrov, A.V. Vasyukov.* Numerical simulation of the failure of composite materials by using the grid-characteristic method // *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2016, v.8, №5, p.557-567.
7. *V. Lopresto, G. Caprino.* Damage Mechanisms and Energy Absorption in Composite Laminates Under Low Velocity Impact Loads // *Abrate S., Castanié B., Rajapakse Y. (eds) Dynamic Failure of Composite and Sandwich Structures. Solid Mechanics and Its Applications*, 2013, v.192, p.209-289.
8. *G. Caprino.* Residual strength prediction of impacted CFRP laminates // *J Compos Mater.*, 1984, v.18, p.508-518.
9. *G.E. Husman, J.M. Whitney, J.C. Halpin.* Residual strength characterisation of laminated composites subjected to impact loading // *ASTM STP*, 1975, v.568, p.92-113.
10. *I.B. Petrov, A.V. Favorskaya, A.V. Vasyukov, A.S. Ermakov, K.A. Beklemysheva, A.O. Kazakov, A.V. Novikov.* Numerical simulation of wave propagation in anisotropic media // *Doklady mathematics*, 2015, v.90, №3, p.778-780.
11. *Ю.М. Заславский, Б.В. Кержаков, В.В. Кулинич.* Вертикальное сейсмическое профилирование на морском шельфе // *Акустический журнал*, 2008, т.54, №3, с.483-490;
U.M. Zaslavskiy, B.V. Kergakov, V.V. Kulinich. Vertikalnoye seismicheskoe profilirovanie na morskoy shelfe // *Akusticheskiy Zhurnal*, 2008, v.54, №3, s.483-490.
12. *V.I. Golubev, I.E. Kvasov, I.B. Petrov.* Influence of natural disasters on ground facilities // *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2012, v.4, №2, p.129-134.
13. *Ф.Б. Челноков.* Явное представление сеточно-характеристических схем для уравнений упругости в двумерном и трехмерном пространствах // *Математическое моделирование*, 2006, т.18, №6, с.96-108;
F.B. Chelnokov. Yavnoye predstavlenie setochno-kharakteristicheskikh skhem dlia uravneniy uprugosti v dvumernom i trekhmernom prostranstvakh // *Matematicheskoye modelirovaniye*, 2006, t.18, №6, s. 96-108.

14. *К.А. Beklemysheva, A.A. Danilov, I.B. Petrov, V.Yu. Salamatova, Yu.V. Vassilevski, A.V. Vasyukov.* Virtual blunt injury of human thorax: Age-dependent response of vascular system // *RJNAMM*, 2015, v.30, №5, p.259-268.
15. *П.И. Агапов, О.М. Белоцерковский, И.Б. Петров.* Численное моделирование последствий механического воздействия на мозг человека при черепно-мозговой травме // *ЖВМиМФ*, 2006, т.46, №9, с.1711-1720;
P.I. Agapov, O.M. Belotserkovskii, I.B. Petrov. Numerical Simulation of the Consequences of a Mechanical Action on a Human Brain under a Skull Injury // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2006, v.46, №9, p.1629-1738.
16. *К.А. Беклемышева, А.В. Васюков, А.С. Ермаков, И.Б. Петров, А.С. Дзюба, В.И. Голован.* Численное моделирование динамических процессов при низкоскоростном ударе по композитной стрингерной панели // *Матем. моделирование*, 2014, т.26, №9, с.96-110;
K.A. Beklemysheva, A.V. Vasyukov, A.S. Ermakov, I.B. Petrov, A.S. Dzyuba, V.I. Golovan. Chislennoe modelirovanie dinamicheskikh protsessov pri nizkoskorostnom udare po kompozitnoi stringernoii paneli // *Matem. modelirovanie*, 2014, v.26, №9, s.96-110.
17. *В.И. Голубев, И.Б. Петров.* Опыт расчета сейсмических откликов от криволинейных геологических границ на основе их явного выделения // *Технологии сейсморазведки*, 2016, №4, с.45-51;
V.I. Golubev, I.B. Petrov. Opyt rascheta seismicheskikh otklikov ot krivolineinykh geologicheskikh granits na osnove ikh iavnogo vydeleniia // *Technologii seismorazvedki*, 2016, v.4, s. 45-51.
18. *C.F. Richter.* An instrumental earthquake magnitude scale // *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1935, v.25, №1, p.1-32.

Поступила в редакцию 11.12.17

После доработки 11.12.17

Принята к публикации 12.02.18