

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Зарецкая М.В.¹, Мухин А.С.², Хрипков Д.А.³, Зарецкий А.Г.⁴

О МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ОЦЕНКИ УРОВНЯ НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

¹д-р физ.-мат. наук, профессор

Кубанский госуниверситет, г. Краснодар

²канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Кубанский госуниверситет, г. Краснодар

³научный сотрудник, Кубанский госуниверситет, г. Краснодар

⁴студент, Кубанский госуниверситет, г. Краснодар

MATHEMATICAL MODELS OF INDUCED SEISMICITY LEVEL ASSESSMENT

Marina V. Zaretskaya

Dr. Phys.-Math. Sci., Professor,

Kuban State University, Krasnodar

Alex S. Mukhin

Cand. Phys.-Math. Sci., Senior Researcher,

Kuban State University, Krasnodar

Dmitry A. Khripkov

Researcher, Kuban State University, Krasnodar

Alexander G. Zaretsky

Student, Kuban State University, Krasnodar

АННОТАЦИЯ

Цель работы – обоснование необходимости развития нового математического аппарата оценки наведенной сейсмичности. Показано, что на современном этапе не существует способа, позволяющего до начала производственного процесса проанализировать техногенные напряжения в земной коре и оценить риск сейсмического события. Предлагается принять модель блочно-структурированной геофизической среды. В блоках различной реологии ставятся граничные задачи, их решение осуществляется факторизационным методом на основе дифференциального метода факторизации. Полученные результаты позволяют создать наукоемкую систему мониторинга и прогноза наведенной сейсмичности.

ABSTRACT

The aim of this paper is to study the need to develop a new mathematical tool for evaluating induced seismicity. It is shown that at present there is no way that allows to analyze the man-made stress in the Earth's crust and assess the risk of seismic events before the start of the production process. It is proposed to adopt the model of block-structured geophysical medium. Boundary value problems, which are solved by factorization method based on differential factorization method, are put in blocks of varying rheology. The results allow to create a knowledge-based system for monitoring and forecasting of induced seismicity.

Ключевые слова: наведенная сейсмичность, блочная структура, моделирование, оценка, прогноз

Keywords: induced seismicity, block structure, modeling, evaluation, forecast

Согласно современным представлениям землетрясения могут проявляться как результат естественных геодинамических процессов или деятельности человека. Среди причин техногенных землетрясений подземные ядерные взрывы, возведение и эксплуатация подземных инженерных сооружений, создание и заполнение водохранилищ. Наиболее существенными являются землетрясения, вызванные длительной добычей полезных ископаемых, нефти и газа, закачкой в пустоты воды и других жидкостей [1]. Они многократно наблюдались на территории РФ и за рубежом, приводя к техногенным авариям и разрушениям. Масштабы техногенных катастроф и чрезвычайных ситуаций зависят от объемов недр и

площадей, на которые оказываются техногенные воздействия при добыче полезных ископаемых.

Активизация сейсмических процессов в областях интенсивной нефте- и газодобычи требует развития системы превентивных мер для снижения риска возникновения техногенного землетрясения, однако, на современном этапе не существует способа, экспериментального или аналитического, позволяющего до начала производственного процесса выполнить анализ техногенных напряжений в земной коре и оценить риск возникновения сейсмического события.

Существует два подхода к оценке наведенной сейсмичности. Первый, широко распространенный на практике, состоит в развитии систем

сейсмомониторинга. Создается сеть высокоточных сейсмоприемников по регистрации интенсивности сейсмических событий и по ее данным производится районирование территории по сейсмической активности. В таких системах мониторинга возможен учет данных о геологическом строении, трещиноватости, глубинном строении и структуре горных пород. Мониторинг в течение длительного времени позволяет выявить возникновение и развитие значительных техногенных изменений в верхней части земной коры в результате добычи углеводородов или иных проявлений антропогенной деятельности, зависимость сейсмической активности от интенсивности процессов. К недостаткам указанного подхода относится то, что полученные данные и закономерности справедливы только для территории наблюдения, они не могут быть перенесены и применены на другом месторождении или объекте, то есть не обладают общностью и прогностической ценностью; для интерпретации данных сейсмо мониторинга необходимо привлекать сложный математический аппарат решения обратных задач, чего, как правило, не делается, применяются упрощенные модели геологии и геофизики, что снижает точность и достоверность полученных результатов.

На практике для принятия управленческих решений более полезным является второй подход, основанный на применении математических методов оценки и прогноза техногенной сейсмичности. Концепция подхода состоит в следующем. В результате деятельности человека происходит изменение фоновой (естественной) напряженности земной коры. Если работы ведутся в районах с высокой естественной напряженностью коры, то даже слабое воздействие может привести к сильной наведенной сейсмичности [1]. Зная значения естественной напряженности коры до техногенного воздействия, можно, применяя методы геомеханики, механики деформируемого твердого тела или механики сплошных сред, установить изменение поля напряженности на различных этапах выработки, оценить закономерности изменения сейсмичности во времени, дать некоторые прогнозные оценки.

Применяемые математические методы могут быть различными. В современной геомеханике для определения характеристик естественного геофизического поля по известным параметрам среды ставится задача динамической теории упругости для неоднородного по одной или двум координатам изотропного полупространства. Решают поставленные краевые задачи, применяя численные или численно-аналитические методы [4]. В ряде случаев рассматривается слоистая модель геофизической среды. Рассчитанная есте-

ственная напряженность коры будет приближенной, так как используются упрощенные модели геофизической среды и приближенные математические методы. Далее прогнозируемые величины техногенных напряжений вычисляют по данным сейсмического отражения.

Для решения поставленной проблемы необходимо применять модель геофизической среды, максимально приближенную к естественной, и модели механики деформируемого твердого тела или механики сплошных сред, адекватно описывающие напряженно-деформированное состояние сред различной реологии.

Анализ известных механических, физических, химических свойств вещества коры Земли показывает, что при описании процессов, протекающих в геофизической среде, нельзя ограничиваться моделями линейно упругого тела. Кора Земли сложена породами, обладающими механическими, физическими, термодинамическими, реологическими, электромагнитными свойствами широкого диапазона. Свойства и структура характеризуются анизотропией, под которой понимаются различия в значении среднего градиента изменчивости параметра, фиксируемого по разным направлениям. Анизотропия пород коры Земли связана, как правило, с тонкой слоистостью, глинистостью или трещиноватостью пород, что в поле естественных напряжений приводит к анизотропии геологических свойств и, следовательно, к анизотропии их упругих свойств, она отражается в сейсмических, электрических и гравитационных параметрах, вызывает изменение скоростей сейсмических волн, обуславливает возникновение сейсмической и электрической анизотропии, а также влияет на гидро-геологические и геохимические показатели.

В общем случае сейсмические процессы в коре Земли должны описываться динамическими связанными задачами, в которых учитываются наличие и взаимодействие в деформируемых средах полей различной природы: механических, электромагнитных тепловых. Это могут быть модели изотропной и анизотропной теории термоупругости, частными случаями которых являются модели для термоупругих анизотропных и изотропных сред.

Для упрощения механической постановки задачи, но, не теряя точности, рассматриваем кору Земли как блочную структуру. При наличии неоднородностей различного типа, например, трещин, пустот, разломов или включений меньших размерностей последние надо рассматривать как границы блоков. Также можно вводить границы блоков искусственно, чтобы разделить среды, обладающие существенным различающимися свойствами [2]. Применение теории блоч-

ных структур позволяет перейти к задачам линейной теории упругости, для исследования которых развиваются специальные методы [3].

Предлагается принять модель геофизической среды, обладающей блочной структурой, которая формируется в горных породах границами неоднородностей. В блоках горных пород ставятся граничные задачи линейной теории упругости. В блоках, моделирующих резервуары нефти, могут быть поставлены граничные задачи для уравнений вязкой жидкости в различных приближениях, для пустот – уравнения идеального газа, для резервуара, заполненного водой – уравнения идеальной жидкости.

Решение граничных задач для блочной структуры с блоками различной реологии осуществляется факторизационным методом на основе дифференциального метода факторизации, который необходимо специально адаптировать для данного класса задач.

Полученные результаты позволяют создать наукоемкую систему мониторинга и прогноза наведенной сейсмической активности до начала производственного процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-08-00191_a).

Список литературы

1. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. – М.: ИДГ РАН, 2015. – 364 с.
2. Бабешко В.А., Бабешко О.М., Евдокимова О.В., Зарецкая М.В., Павлова А.В. Дифференциальный метод факторизации для блочной структуры // Доклады академии наук. – 2009. – Т. 424. – № 1. – С. 36 – 39.
3. Зарецкая М.В. Математические модели деструктивных процессов в структурно-неоднородной геофизической среде // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2014. – № 2. – С. 25–30.
4. Маловичко А.А., Маловичко Д.А. Применение методов численного моделирования сейсмических волновых полей для изучения разномасштабных проявлений техногенной сейсмичности // Современные математические и геологические модели природной среды: Сборник научных трудов. – М.: ОИФЗ РАН, 2002. – С. 120–138.

Петриченко М.Р.,

КВАЗИЛИНЕЙНАЯ ПАРАБОЛИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА И УРАВНЕНИЕ КРОККО

СПбПУ Петра Великого, СПб

QUASILINEAR PARABOLIC PROBLEM AND CROCCO EQUATION

*Petrichenko M.R., Sc. D (tech),
SPbPU Peter the Great, SPb*

Аннотация. Квазилинейная параболическая задача редуцируется на типичную предельную задачу Крокко. Уравнение Крокко совпадает с необходимым условием минимума положительного выпуклого функционала. Решение уравнения Крокко представляет C^2 – диффеоморфизм отрезка $(0,1)$ в себя.

Ключевые слова: предельная задача, диффеоморфизм, предельная задача Крокко, функционал, необходимое условие минимума.

*Annotation. The quasi-linear parabolic problem is reduced to a typical Crocco boundary problem. Crocco equation coincides with the prerequisite minimum positive convex functional. Crocco solution of the equation is a C^2 – segment diffeomorphism $(0,1)$ into itself.
Keywords: boundary problem, diffeomorphism, the Crocco boundary problem, the functionality, necessary minimum condition.*

Известно, что линейные и нелинейные параболические предельные задачи приводятся к предельной задаче для уравнения Крокко. Рассмотрим предельную задачу для квазилинейного

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = u \frac{\partial u}{\partial x}, D(u) = (x, y : x > 0, y > 0), J(u) = (u : 0 < u < 1), \quad (1)$$

$$u(0, y) = u(x, 0) - 1 = u(x, \infty) = 0.$$

Будет доказано, что предельная задача (1) приводится к предельной задаче для уравнения Крокко и выяснены свойства решения предельной задачи Крокко.

уравнения параболического типа (нелинейность в младшем члене, старший член входит линейно):

Лемма 1. Распределение $u(x, y)$ достигает максимального значения ($u = u^0 \geq 1$) на границе $D(u)$. Аналогично для минимального значения $u = u_0 \leq 0$. Иначе, распределение $u: D(u) \rightarrow J(u)$ задает