

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

по диссертационной работе Сибирякова Егора Борисовича  
«Статическое и динамическое деформирование сред с внутренней структурой»  
на соискание учёной степени доктора физико-математических наук  
по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

Микронеоднородные среды, обладающие структурой, включают в себя как конструкционные материалы (композиты), так и твёрдые тела, содержащие флюиды. Наличие флюида в порах приводит к тому, что перепад свойств между матрицей и флюидом по модулю сдвига составляет многие порядки. Такие микронеоднородные среды со столь большими перепадами свойств входящих в них компонентов называют контрастными. Зачастую значительные перепады свойств составляющих среду компонентов хотя бы по одному параметру приводят к тому, что для вычисления эффективных свойств такого материала необходимо учитывать не только объёмные концентрации составляющих, но и подробности строения материала скелета (т.е. структуры порового пространства), в частности, удельной поверхности порового пространства.

Представляет также интерес изучение зависимости эффективных свойств среды от давления флюида, зависимости характера разрушения от свойств порового пространства, также интересен возможный характер выхода за пределы упругости и его зависимость от геометрии порового пространства.

Кроме линейно-упругих свойств, характеризующихся упругими модулями, контрастные микронеоднородные среды обладают ещё и специфическими свойствами, которые не характерны для «классических» сплошных сред. В частности, аномально высокие отношения скоростей поперечных и продольных волн, которые формально соответствуют отрицательным коэффициентам Пуассона, необычно сильная нелинейность (которую иногда называют «аномальной», «неклассической», либо «гигантской» нелинейностью).

Также представляет интерес исследование проблемы отражательных свойств шероховатых границ (ими, в частности, являются эродированные границы), не присущих обычным гладким границам, для возможного определения параметров шероховатости. Так как площадь поверхности шероховатых границ существенно больше, чем плоских, то возможно существование особых отражательных свойств таких границ в некотором диапазоне частот.

Таким образом, тема диссертационной работы является **важной и актуальной как с практической, так и с фундаментальной** точки зрения.

Диссертационная работа состоит из 4 глав, Введения и Заключения. Текст диссертации содержит 156 страниц и 56 рисунков, список использованной литературы включает 100 наименований.

Во **Введении** автор обосновывает актуальность работы, формулирует цель и задачи исследования, научную новизну и практическую значимость работы, излагает основные положения, выносимые на защиту. Достоверность результатов обоснована, отмечены научная и практическая значимость, личный вклад автора и приведены данные об апробации работы. Кратко изложено содержание диссертации по главам.

**В первой главе** проведён обзор подходов к моделированию микронеоднородных сред, отмечены их преимущества, недостатки и границы применимости, а также возможные пути их совершенствования. Рассмотрены преимущества и недостатки метода граничных элементов и перспективы его использования для решения граничных задач. Также приведён обзор литературы по проявлению в сейсмике и сейсмологии нелинейных эффектов. Предложено использовать решения контактных задач для разработки физических основ возникновения зон аномально высоких пластовых давлений.

**Во второй главе** используются два подхода к осреднению уравнений движения микронеоднородных сред.

Первый явно учитывает структуру порового пространства и заключается в вычислении силы, действующей на случайную частицу в зернистой среде путём замены разностных операторов дифференциальными и осреднения по ориентации окружения (являющегося мезоструктурой), а затем по радиусам случайной частицы. При этом для средней силы в случае малых деформаций получаются уравнения линейной упругости эффективные, а эффективные упругие модули являются коэффициентами разложения силы по пространственным производным от поля перемещений. Указано, что эффективные константы взаимодействия, в свою очередь, зависят от решения контактной задачи.

Второй подход заключается в том, что вместо решения граничных задач на поверхностях раздела используются уравнения движения для представительного объёма континуума со структурой. То есть параметры порового пространства присутствуют в уравнении движения объёма среды, но повышают его порядок. Также предложено объяснение закона Гутенберга-Рихтера с точки зрения континуума со структурой, а также причины значительно более сильной нелинейности в средах со структурой по сравнению со сплошными, а также зависимость параметра эффективной нелинейности от удельной поверхности порового пространства. Показано также, что для сред со структурой дисперсия резко увеличивает нелинейные эффекты и делает их практически значимыми.

**Третья глава** посвящена совершенствованию метода граничных элементов как для упругостатических задач, так и для задач упругих стационарных колебаний. Усовершенствование состояло, главным образом, в использовании новых ядер. Данные ядра являются откликами не на объёмную дельта-нагрузку, а на поверхностную, либо её конечный аналог. При этом наилучшую обусловленность дают ядра, порождённые поверхностной дельта-нагрузкой, а наилучшую точность обеспечивают финитные ядра, являющиеся откликом на конечный аналог дельта-нагрузки. Модифицированный метод граничных элементов был использован для решения задач об отражении упругой волны от шероховатой и гладкой границ раздела в достаточно широком диапазоне частот. Показано, что шероховатая граница раздела порождает угловую компоненту вектора перемещений на свободной границе при осесимметричном источнике. В случае, если граница раздела плоская, эта компонента отсутствует. Высказано предположение, что медленные волны в среде могут породиться не объёмными включениями в сплошную среду, а шероховатостью границ раздела.

**В четвёртой главе** модифицированный метод граничных элементов применялся для решения упругостатических краевых задач. В свою очередь, решения этих задач использовались для вычисления эффективных упругих модулей зернистой и кавернозной среды, для вычисления параметров напряжённого состояния, порождённых силой тяжести и конфигурацией границ, а также для нахождения возможных причин разрушения зернистой среды под действием порового давления. В частности, показано, что при действии давления жидкости на зернистую среду, у которой площадки контактов образуют жёсткий каркас, возникают два механизма разрушения. Один из них – появление растяжений на контактах при увеличении давления на границе скелет-флюид. Эти растяжения сравнимы с давлением жидкости и зависят от геометрии контактов. Второй связан с тем, что в окрестности кромки контакта появляются большие касательные нагрузки того же порядка, способствующие деструкции его периферической части. Как показали расчёты, аномально высокие пластовые давления не всегда сопровождаются уменьшением нагрузок на контактах, а, соответственно, и уменьшением скоростей волн. Поэтому для прогноза зон аномально высоких пластовых давлений необходимо учитывать структуру порового пространства, а не только пористость. Предложен критерий трещинообразования, учитывающий роль силы тяжести в процессе трещинообразования, а также то, что сжимающие нормальные деформации препятствуют образованию трещин. Этот критерий был исполь-

зован для вычисления ориентации трещин, порождённых рельефом. Там же показано, что границы с достаточно большими углами наклона могут приводить к образованию зоны пониженных давлений на границе раздела сред не только вблизи максимума структуры, но и на некотором расстоянии от неё, на большей глубине, что является нетривиальным и достаточно неожиданным результатом.

**В Заключение** приведены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

**Целью** выполненной работы являлось установление взаимосвязи между структурой порового пространства, физико-механическими параметрами скелета и флюида и законами деформирования среды на макроуровне, а также параметрами напряжённого состояния среды и его возможной неустойчивости.

**Автореферат полностью соответствует** тексту диссертационной работы и содержит всё необходимое для её понимания.

Диссертационная работа и автореферат написаны грамотным и логичным языком, обеспечивающим связность изложения и непротиворечивость структуры работы.

**Обоснованность и достоверность результатов** и выводов обусловлена следующим:

В работе установлено, что в зернистых коллекторах давление флюида может вызывать растяжение на контактах зёрен. Этот эффект зависит, прежде всего, от площади контакта зерна. При небольшой площади контакта относительно небольшое поровое давление может привести к его разрушению. Если контакты разорваны под действием порового давления и скелет стал сыпучим телом, то возникает гидростатическое напряжённое состояние и сдвиговая энергия скелета исчезает. По закону сохранения энергии она превращается в дополнительную энергию сжатия, так что давление во флюиде резко возрастает (до 50%) и становится равным весу вышележащих пород, что вызывает катастрофы. Тем самым, возникает новый взгляд на проблему аномально высоких пластовых давлений как одного из важнейших параметров состояния среды. Этот вывод подтверждает первое защищаемое положение.

В работе также использовалась модель структурированного континуума для описания контрастных микронеоднородных сред. Показано, что в рамках этой модели, благодаря большому числу степеней свободы микроструктур, среда описывается дифференциальными уравнениями бесконечного порядка. Однако, даже в длинноволновом приближении, когда длина волны много больше размера микроструктур, уравнения движения оказываются уравнениями не второго, а четвёртого порядка. Дисперсионные слагаемые, которые отсутствуют в сплошной среде, резко усиливают нелинейные явления в микронеоднородных средах, по сравнению с классической сплошной средой. Таким образом, комбинационные частоты, обусловленные этими нелинейными явлениями, могут дать важную информацию о структуре микронеоднородных сред. Этот вывод подтверждает второе защищаемое положение.

Важнейшую роль в решении, в частности, контактных задач сыграл модифицированный метод граничных элементов. Показано, что он имеет преимущество при решении смешанных краевых задачи теории упругости в широком диапазоне частот в случае быстрого изменения вектора нормали к границе раздела. Преимущество проявляется в том, что решение краевой задачи сводится к системе линейных уравнений, решение которой находится без использования регуляризационных процедур, по причине хорошей обусловленности матрицы системы. Это подтверждает третье защищаемое положение.

Достоверность результатов, полученных аналитическим путём, определяется соответствием данных расчётов и лабораторного эксперимента, а также многочисленными полевыми наблюдениями, связанными с различием видимых частот продольных и поперечных волн, возбуждаемых одним и тем же импульсным источником.

Достоверность результатов численного моделирования определяется хорошей обусловленностью системы линейных уравнений, не требующих для обращения использования регуляризационных процедур.

Полученные в работе результаты были тщательно проанализированы и там, где это возможно, сопоставлены с имеющимися опытными данными. Таким образом, можно утверждать, что основные выводы и положения диссертации **обоснованы и достоверны**.

#### **Научная новизна диссертационной работы.**

Метод граничных элементов был модифицирован автором. Модификация выразилась в изменении ядер и позволила решать упругие задачи смешанного типа без процедур регуляризации. Было показано, что данный модифицированный метод эффективен в случае быстрого изменения вектора нормали на поверхности границ раздела, как в статике, так и в случае стационарных колебаний.

В результате численного решения контактных задач показаны причины возникновения растягивающих напряжения на контактах при общем сжатии зернистой среды под действием давления флюида. При этом к разрушению контакта могут приводить относительно небольшие давления флюида.

В работе по-новому объяснены необычно сильные нелинейные эффекты в пористых средах, с использованием модели континуума со структурой, а также указана связь нелинейности с параметрами микроструктуры.

Для вычисления зависимости эффективных свойств зернистой среды от параметров контакта и распределения по радиусам использовалось вычисление средней силы, действующей на зерно, в зависимости от вектора перемещений.

Также путём решения упруго-статической краевой задачи установлено, что углы наклона и кривизны геологических структур приводят к появлению зон пониженных давлений, которые могут быть аккумуляторами флюидов. Тем самым впервые показано, что геодинамические параметры структур могут быть информативными поисковыми признаками наличия в них углеводородов

Можно сказать, что **возможные пути использования результатов работы** определяют её значимость для науки и практики. Во-первых, используя предложенный критерий трещинообразования, можно определять не только вероятную ориентацию трещин, но и зоны локализации больших деформаций. Это, в свою очередь, может быть использовано для модификации упруго-пластической модели среды, предполагающую наличие как упругих, так и пластических зон в среде. Также было бы интересно установить критерии трещинообразования на границе упругих изотропных слоёв, а также в анизотропной среде. Кроме того, нахождение слоёв с повышенными нелинейными свойствами по отклику на монохромные сигналы может дать дополнительную информацию о структуре порового пространства, главным образом, удельной поверхности порового пространства. Представляется перспективной разработка алгоритма решения задач на подвижной границе, учитывающего предложенный критерий ориентации трещин для задачи об изменении поверхности трещины под действием давления флюида.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы заключается, с одной стороны, в развитии и совершенствовании существующих методов численного и аналитического моделирования для нахождения эффективных свойств контрастных микронеоднородных сред. С другой стороны, работа позволила объединить не использовавшиеся ранее совместно различные методы моделирования для получения достоверных результатов. Также использовались новые методы интерпретации полученных данных, с одной стороны, для контроля точности и достоверности, с другой стороны, для получения результатов, имеющих практическую значимость.

Практическое значение имеет вывод о характере разрушения зернистой среды под действием порового давления, а это является важным, поскольку при разрушении скелета

давление во флюиде возрастает до 50 процентов, что может привести к катастрофическим последствиям. Вторым важным возможным практическим приложением является рекомендация об использовании узкополосных двухчастотных импульсов для детектирования пор и трещин в среде.

Считаю, что **полнота изложения** материалов диссертации достаточно высока.

По материалам диссертационной работы автором опубликовано 34 работы, в том числе 12 статей в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора наук (из них 1 статья в зарубежном научном журнале, входящем в Scopus; 4 статьи в российских научных журналах, переводные версии которых входят в базу Web of Science и/или Scopus; 6 статей в российских научных журналах, входящих в базу Web of Science и/или Scopus), 2 статьи в сборниках материалов конференций, входящих в базы Web of Science или Scopus; 3 статьи в прочих научных журналах, 2 статьи в сборниках научных трудов, 14 статей в сборниках материалов международных и всероссийских (в том числе с международным участием) научных конгрессов, конференций, семинаров, чтений; 1 учебное пособие. В опубликованных работах дано полное изложение результатов диссертационной работы.

По представленному тексту диссертационной работы имеются следующие **замечания**:

1. Стр. 31 и далее: используется не широко используемое обозначение  $Int$  без четкого объяснения, что оно из себя представляет.

2. Стр. 33, первое предложение последнего абзаца: плохая формулировка – между формулами требуются вставить слова, иначе они сливаются.

3. Стр. 33: Есть ли подтверждение из практики для сделанного в последнем абзаце вывода?

4. Стр.41, формула (2.40): Слишком кратко. Думаю, необходимо пояснение, откуда взялась такая форма представления.

5. Стр.43: Переход от уравнения (2.44) к уравнению (2.45) по сути есть интегрирование уравнения (2.44) по переменной  $z$ , в таком случае, в правой части уравнения (2.45) должна стоять произвольная постоянная. Почему она выбрана нулём?

6. Там же: Делается предположение, что производная  $u_x$  монотонна и положительна. Есть ли физические основания такого предположения и возможно ли это на практике?

7. Стр.48, первый абзац: Было бы не лишним дать ссылки на работы, где на практике и в лабораторных условиях был обнаружен обсуждаемый эффект.

8. Стр. 56, формулы (3.13)-(3.16): Разнобой в обозначениях частных производных функции  $g$ .

9. В тексте диссертационной работы изредка проскальзывают оценочные фразы типа: «Проблема, конечно, не фатальная, но достаточно неприятная», которые, скорее, характерны для устной речи, чем в печатном тексте.

В целом, приведенные замечания не умаляют общего хорошего впечатления от представленной на рассмотрение работы. Можно констатировать, что данная диссертационная работа представляет собой завершённое научное исследование, выполненное автором самостоятельно и на достаточно высоком уровне. Методы исследования и полученные автором результаты свидетельствуют о высокой квалификации соискателя.

Считаю, что содержание диссертационной работы **соответствует** специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела (физико-математические науки) по области исследования «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых» (п. 1 паспорта специальности).

Диссертационная работа является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, направленные на описание деформирования контрастных микронеоднородных сред, а также сред, содержащих границы с быстро изменяющимся вектором нормали, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в области механики деформируемого твёрдого тела.

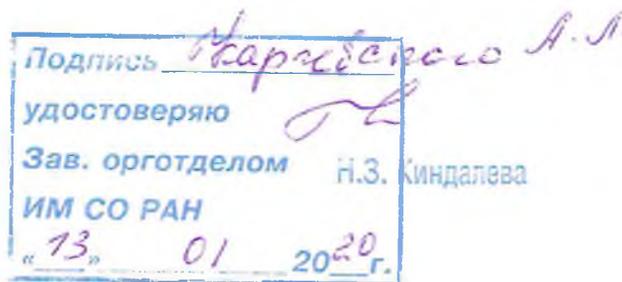
Считаю, что диссертационная работа Сибирякова Егора Борисовича «Статическое и динамическое деформирование сред с внутренней структурой» по содержанию, научной новизне, объёму проведенных исследований, научной и практической значимости результатов полностью **соответствует** требованиям п. 9 действующего Положения о присуждении ученых степеней, а её автор, Сибиряков Егор Борисович, **заслуживает** присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

### Официальный оппонент

главный научный сотрудник лаборатории обратных задач математической физики  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института математики им. С.Л. Соболева  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
доктор физико-математических наук  
(25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых,  
05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ),  
Профессор РАН



Карчевский Андрей Леонидович



«13» января 2020 года  
телефон: +7 383 329 75 48  
e-mail: [karchevs@math.nsc.ru](mailto:karchevs@math.nsc.ru)

Адрес: 630090 Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 4, каб. 208;  
Телефон: (8-383) 333-28-92, факс: (8-383) 333-25-98  
адрес электронной почты: [im@math.nsc.ru](mailto:im@math.nsc.ru); веб-сайт: <http://math.nsc.ru>