

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

Известно, что в состоянии предразрушения любая среда становится микронеоднородной. В связи с этим представляет интерес зависимость характера разрушения от структуры порового пространства, в частности, его удельной поверхности. Также представляет интерес зависимость характера предразрушения от давления флюида в порах.

Кроме линейно-упругих свойств, характеризующихся упругими модулями, микронеоднородные среды обладают ещё и повышенными значениями эффективного коэффициента нелинейности, даже для слабых деформаций.

Кроме того, с точки зрения механики разрушения представляет интерес влияние структуры порового пространства на локализацию деформаций в то время, когда в среднем теле находится ещё в упругом состоянии.

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

Диссертационная работа Сибирякова Егора Борисовича 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. Обоснована достоверность результатов, 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. Выяснилось, что этот закон не имеет сейсмологической специфики и описывает гораздо более широкий класс явлений, связанных с появлением неустойчивостей в средах со структурой. 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. Эти новые 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 порождаться 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. Также предложен критерий трещинообразования, учитывающий роль силы тяжести в процессе трещинообразования, а также то, что сжимающие нормальные деформации препятствуют образованию трещин. Этот критерий был использован 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 заключении приведены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

Автореферат полностью соответствует тексту диссертации и содержит всё необходимое для понимания работы.

И диссертация, 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.

Важную роль в решении, в частности, контактных задач сыграл модифицированный МГЭ. 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.

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 потребовавших для обращения использования регуляризационных процедур.

Полученные в работе результаты были 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 усовершенствован автором. Это заключалось в изменении ядер и позволило решать упругие задачи смешанного типа без процедур регуляризации. Показано, что этот 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 упругостатической 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.

Возможные пути использования результатов работы, собственно, определяют её значимость для науки и практики. Во-первых, используя предложенный критерий трещинообразования, возможно 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 представляется перспективным разработка алгоритма решения задач на подвижной границе, учитывающего предложенный критерий ориентации трещин для задачи об изменении поверхности трещины под действием давления флюида.

Полнота изложения материалов диссертации достаточно высока.

По материалам диссертации Е. Б. Сибиряковым 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 учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (из них 1 статья в зарубежном научном журнале, входящем в Scopus; 4 статьи в российских научных журналах, переводные версии которых входят в Web of Science и / или Scopus; 6 статей в российских научных журналах, входящих в Web of Science и / или Scopus), 2 статьи в сборниках материалов конференций, входящих в 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 достаточно полно изложены материалы диссертации.

Вместе с тем работа не свободна от недостатков. В качестве замечаний можно указать на следующие обстоятельства.

1. Автор говорит об интегральной геометрии пор и трещин, но помимо пористости, фактически используется только удельная поверхность и связанный с ней характерный линейный размер структуры. Возникает вопрос какую роль играет средняя и гауссова кривизна пор и трещин в процессах динамического деформирования.
2. Остаётся недостаточно ясной причина высокой обусловленности линейных систем с новыми ядрами, предложенными автором, хотя численные примеры достаточно убедительны.
3. Не ясно, по какой причине уменьшение площади контактов зернистых сред под действием порового давления является необратимым. Что можно сказать о скорости этого процесса? Как он проявляется в макроскопических свойствах среды?

Оценивая работу в целом, следует сказать, что диссертационная работа Е. Б. Сибирякова представляет собой завершённое научное исследование, выполненное автором самостоятельно и на достаточно высоком уровне. Методы исследования и полученные автором результаты свидетельствуют о высокой квалификации соискателя.

Автореферат полностью соответствует тексту диссертации и содержит всё необходимое для понимания работы.

И диссертация, и автореферат написаны грамотным и логичным языком, обеспечивающим связность изложения и непротиворечивость структуры работы.

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).

Диссертация Е. Б. Сибирякова 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 научное достижение в области механики деформируемого твёрдого тела.

Считаю, что диссертация «Статическое и динамическое деформирование сред с внутренней структурой» соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям п. 9 «Положения о присуждении учёных 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

Директор Института кадастра, экономики и инженерных систем в строительстве
федерального государственного

бюджетного образовательного учреждения
высшего образования

«Томский государственный

архитектурно-строительный университет»,

доктор физико-математических наук

(01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела),

профессор

Радченко Андрей Васильевич

Дата: 15.01.2020

Подпись А. В. Радченко удостоверяю.

Проректор по научной работе ТГАСУ

Почтовый адрес: 634003, г. Томск, пл. Соляная, д.2

Телефон: (3822) 47-28-91

Адрес электронной почты: rector@tsuab.ru

Адрес официального сайта организации: <http://www.tsuab.ru>



Влугачев П.А.