



**УТВЕРЖДАЮ**

Директор Института физики  
прочности и материаловедения  
Сибирского отделения  
Российской академии наук,  
доктор технических наук

\_\_\_\_\_ Е. А. Колубаев

« 20 » января 2020 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

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

Диссертация посвящена установлению зависимости между законами деформирования среды на макроуровне и структурой порового пространства, а также физико-механическими параметрами скелета и флюида, заполняющего поры.

#### **Актуальность темы диссертации**

Известно, что реальные конструкционные и природные материалы являются неоднородными на определенных пространственных масштабах, а в состоянии предразрушения любая среда становится микронеоднородной. В связи с этим научный и практический интерес представляет зависимость характера разрушения от структуры порового пространства, в частности, его удельной поверхности. Для решения практических задач в нефтегазовой отрасли также важно определение зависимости 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 тело находится ещё в упругом состоянии.

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

### **Общая характеристика диссертации**

Диссертация 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 краевых 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, 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, а именно, входят в слагаемые высокого

порядка этого дифференциального уравнения. 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 средами без структуры, а также зависимость параметра эффективной нелинейности от удельной поверхности порового пространства. Как выяснилось в последнее время, этот закон не имеет только 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 упругих статических задач, так и для задач упругих стационарных колебаний. Усовершенствование состоит, главным образом, в использовании новых ядер, входящих в решение в виде интеграла по поверхности. Эти новые ядра являются откликами не на объёмную нагрузку в виде дельта-функции, а на поверхностную, либо её конечный аналог. При этом наилучшую обусловленность дают ядра, порождённые поверхностной нагрузкой в виде дельта-функцией. А наилучшую точность обеспечивают финитные ядра, являющиеся откликом на конечный аналог дельта-функции. 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 упругих статических краевых задач. Решения этих задач, в свою очередь, 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 показано в расчётах, аномально высокие пластовые давления не всегда сопровождаются уменьшением нагрузок на контактах, а, соответственно, и уменьшением скоростей волн. В связи с этим сделан вывод, что 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 препятствие сжимающих нормальных деформаций образованию трещин. Этот критерий использован для вычисления ориентации трещин, порождённых рельефом. Там же показано, что границы раздела сред с достаточно большими углами наклона могут приводить к образованию зоны пониженных давлений на этой границе не только вблизи максимума, 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.

### **Научная новизна результатов диссертации**

Выполненные исследования содержит элементы новизны, в качестве которых можно выделить следующие:

1. Автор предложил усовершенствованную версию метода граничных элементов, отличающуюся от известных изменением ядер, что позволило решать упругие задачи смешанного типа без процедур регуляризации. В диссертационной работе показано, что усовершенствованный метод эффективен в случае быстрого изменения вектора нормали на поверхности границ раздела, как в статике, так и в случае стационарных колебаний.

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

3. В работе даны новые объяснения сильных нелинейных эффектов в пористых средах в рамках модели континуума со структурой и найденной связи нелинейности с параметрами микроструктуры.

4. 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.

5. В результате решения упругой статической краевой задачи установлено, что углы наклона и кривизны геологических структур приводят к появлению зон пониженных давлений, и, как следствие, возможного скопления флюидов. Тем самым впервые показано, что геодинамические параметры структур могут быть информативными поисковыми признаками наличия в них углеводородов.

### **Достоверность и обоснованность результатов диссертации**

Достоверность результатов, полученных аналитическими методами, определяется их соответствием с данными лабораторного эксперимента, а также многочисленных полевых наблюдений, связанными с различием видимых частот продольных и поперечных волн, возбуждаемых одним и тем же импульсным источником.

Достоверность результатов численного моделирования определяется аргументированным выбором новых модифицированных ядер в методе граничных элементов, позволяющих получить решение заданной точности и хорошей обусловленностью системы линейных уравнений, не потребовавших использования регуляризационных процедур.

Полученные в работе результаты тщательно проанализированы и там, где это возможно, сопоставлены с имеющимися опытными данными.

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 международную базу цитирования Scopus; 4 статьи в российских научных журналах, переводные версии которых входят в международные базы цитирования Web of Science и / или Scopus; 6 статей в российских научных журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и / или Scopus), 2 статьи в сборниках материалов конференций, входящих в международные базы цитирования 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.

Автореферат полностью соответствует тексту диссертации и достаточно полно отражает результаты работы.

### **Теоретическая и практическая значимость диссертации**

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 новых 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.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.** Полученные результаты могут применяться в исследованиях, проводимых в Институте проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Институте физики прочности и материаловедения СО РАН, Институте горного дела имени Н.А. Чинакала СО РАН, Институте механики сплошных сред УрО РАН, Пермском национальном исследовательском политехническом университете, Национальном исследовательском Томском государственном университете, Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Сколковском институте науки и технологий, а также в других организациях РФ и за рубежом.

### **Замечания по диссертации**

1. В главе 3 утверждается эффективность метода граничных элементов в случае быстрого изменения нормали границ. Однако, сам термин «быстрое

изменение нормали» нуждается в уточнении, так же как и степень роста погрешности вычислений при увеличении кривизны поверхности.

2. В главе 2 говорится 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?

3. В главе 4, используя результаты численного решения контактных задач, проведен анализ появления расклинивающего давления, как возможного механизма разрушения зернистой среды. Однако остался неясным вопрос о возможной скорости процесса разрушения в этом случае.

### **Заключение**

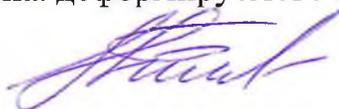
По целям, задачам, содержанию и методам исследований диссертационная работа Е. Б. Сибирякова соответствует специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела (физико-математические науки) по области исследования «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых» (п. 1 паспорта специальности).

Диссертация Сибирякова Егора Борисовича «Статическое и динамическое деформирование сред с внутренней структурой» является самостоятельной, логически завершённой научной работой, в которой 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. Диссертация удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г., № 842, в ред. от 01.10.2018), предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а её автор, Сибиряков Егор Борисович, **заслуживает** присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Результаты диссертационной работы Е. Б. Сибирякова и отзыв на неё обсуждены и одобрены на объединённом научном семинаре лаборатории нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем и лаборатории механики структурно-неоднородных сред Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики

прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (протокол № 10 от 26.12.2019 г.).

Председатель семинара,  
заведующий лабораторией механики структурно-неоднородных сред  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
доктор физико-математических наук  
(01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела)



Балохонов Руслан Ревович

Секретарь семинара,  
заведующий лабораторией нелинейной механики метаматериалов и  
многоуровневых систем Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
доктор физико-математических наук  
(01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела),  
доцент



Смолин Игорь Юрьевич

Подписи Р. Р. Балохонова и И. Ю. Смолина удостоверяю  
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН,  
к.ф.-м.н.



Н. Ю. Матолыгина

### **Сведения об организации**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Почтовый адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4

Телефон: +7 (3822) 49-18-81

Адрес электронной почты: [root@ispms.tomsk.ru](mailto:root@ispms.tomsk.ru)

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