

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу
Куранакова Дмитрия Сергеевича
на тему: «**Методы граничных элементов и критерии разрушения в трехмерных задачах зарождения и распространения трещин**», представленную
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ.

Диссертационная работа Д.С. Куранакова посвящена развитию методов математического моделирования для описания процесса зарождения и дальнейшего развития трещин в упругой среде. Основным объектом исследования в работе является трещина гидравлического разрыва пласта (ГРП). В настоящее время технология ГРП является одним из распространенных методов увеличения нефтеотдачи и широко применяется в нефтегазодобывающей отрасли.

Несмотря на то, что задача развития трещин является классической задачей механики деформированного твердого тела, ее решение, в том числе с точки зрения развития методов математического моделирования и вычислительного эксперимента, далеко от завершения. Вместе с тем, развитие и широкое применение ГРП как прикладной технологии требует эффективных инструментов предсказательного анализа зарождения и развития трещин. Эффективность указанных методов моделирования во многом определяет потенциал применимости технологии ГРП и ее практическую эффективность. По этой причине разработка эффективных методов моделирования, пригодных для анализа процесса гидроразрыва пласта, является важной и актуальной задачей.

Развитию этой тематики посвящена работа автора. Круг рассмотренных в работе вопросов включает в себя построение математической модели процесса, разработку новых вычислительных алгоритмов и их программную

реализацию. С точки зрения построения математической модели основное внимание уделено новым, предложенным автором, постановок задачи в терминах граничных интегральных уравнений. Одним из наиболее важных результатов являются новые критерии возникновения и развития трещин, учитывающие новые для геофизических приложений эффекты. Для решения уравнений модели автором предложены новые вычислительные алгоритмы, существенно повышающие точность решения задачи. Разработанный комплекс моделей и алгоритмов реализован программно. Выполнена тщательная валидация и верификация предложенных подходов, приводятся примеры решения содержательных задач в реалистичных постановках.

Таким образом, как рассматриваемая в работе тематика, так и непосредственно сама работа являются актуальными.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения, изложена на 146 страницах. Список цитируемой литературы содержит 142 наименования.

В Введении обоснована актуальность выбранной темы исследований, сформулированы цель работы и задачи, которые необходимо решить для достижения цели. Приводятся основные результаты и положения, выносимые на защиту, дается оценка научной и практической значимости.

Глава 1 посвящена анализу трехмерной внешней задачи упругого равновесия, возникающей при моделировании трещины гидроразрыва пласта и численным методам ее решения. Приведен обзор основных методов решения такой задачи: метода конечных элементов (МКЭ) и метода граничных элементов (МГЭ). Обосновываются в дальнейшем используемые автором постановки в терминах граничных интегральных уравнений. Описываются предложенные автором две трехмерные модификации МГЭ для решения внешних задач с полостями и трещинами, устраняющие недостатки традиционных подходов. Рассматривается алгоритм вычисления главного значения интеграла в смысле Адамара. Разработанные методы верифицированы

на ряде тестовых задач. Представлен обзор существующих методов вычисления КИНОв: метод экстраполяции разрыва смещений, экстраполяции напряжений в окрестности фронта трещины и методы на основе J-интеграла. Предлагается модификация базисных функций граничных элементов в окрестности фронта трещины, обеспечивающих высокое качество решения и позволяющих учитывать произвольную заданную асимптотику решения в окрестности фронта. Разработанные методы были использованы для вычисления напряженно-деформированного состояния (НДС) среды в окрестности скважины и трещины и коэффициентов интенсивности напряжений (КИНОв) на ее фронте в трехмерной модели распространения трещины гидоразрыва под действием невязкой жидкости.

В главе 2 рассмотрена трехмерная задача зарождения трещины от поверхности упругого тела, которая заключается в определении местоположения и ориентации зародышевой трещины, а также нагрузки, которую необходимо приложить к упругому телу для его разрушения согласно выбранному критерию. Задача зарождения включает в себя подзадачу вычисления напряженно-деформированного состояния тела и критерий трещинообразования. Формулируются два критерия разрушения, пригодные для учета эффекта размера, в том числе в рамках трехмерных задач с заранее неизвестным местоположением зародышевой трещины. Предложенные критерии валидируются на задачах о разрушении трехмерных тел при варьировании их размера. Выполнено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Представлены результаты валидации предложенных критериев на экспериментах по разрушению блоков с цилиндрической скважиной и поперечными пропилами под воздействием закачиваемой в скважину жидкости гидоразрыва.

В главе 3 представлены результаты исследования сценариев зарождения трещин для скважины с перфорацией с использованием реалистичных граничных условий. Для ускорения расчетов для всевозможных конфигура-

ций ориентации скважины предложена оригинальная методика проведения серийных расчетов. С помощью трех рассматриваемых автором критериев проведено моделирование зарождения трещины от горизонтальной скважины, направленной вдоль направления минимальных сжимающих напряжений при различных углах ориентации перфорации. Проведено моделирование зарождения трещины при реальных геофизических параметрах, соответствующих месторождению Амин в Омане, выполнен анализ чувствительности давления зарождения трещин и положения зародышевой трещины в зависимости от ориентации скважины.

В заключении работы сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Таким образом, в работе получен комплекс результатов, связанных с построением математических моделей и вычислительных алгоритмов для решения задачи о развитии крупномасштабной трещины в упругой среде. Основными результатами работы являются:

- Трехмерная математическая модель зарождения трещин от поверхности упругого тела, учитывающая эффект размера - влияние размера тела на величину нагрузки, необходимую для его разрушения. В основу модели положены адаптированные с вычислительной точки зрения два критерия зарождения трещин: (а) осредненное по перпендикулярному к поверхности тела отрезку растягивающее напряжение сравнивается с прочностью материала на разрыв; (б) максимальное растягивающее напряжение сравнивается с локальной прочностью материала, которая зависит от минимального радиуса кривизны поверхности тела.

- Две модификации метода граничных элементов (МГЭ) решения трехмерных задач упругости с полостями и трещинами: (а) МГЭ, в котором трещины представляются пропилами малой, но конечной ширины; (б) дуальный МГЭ, в котором на поверхности полости решается граничное интегральное уравнение смещений, а на трещине - граничное интегральное урав-

нение напряжений, записанное относительно разрыва смещений на берегах трещины. Интерполяционный метод вычисления коэффициентов интенсивности напряжений (КИНов) с использованием в МГЭ аппроксимации разрыва смещений как корень из расстояния до фронта трещины.

- Программный комплекс для решения задач зарождения трещин от полости в упругой среде и для вычисления НДС и КИНов в задачах с полостями и трещинами.

- Результаты решения задачи зарождения трещины на поверхности обсаженной скважины с перфорацией под действием давления закачиваемой в скважину жидкости гидроразрыва: зависимости давления зарождения трещины, местоположения и ориентации зародышевой трещины от ориентации скважины и перфорации относительно напряжений залегания.

Полученные в работе результаты являются новыми. В частности, критерий зарождения трещины, в котором локальная прочность на разрыв зависит от локальной кривизны поверхности тела, применяется впервые, как в двумерных, так и в трехмерных постановках. Предложены новые оригинальные алгоритмы для вычисления главного значения Адамара интеграла путем разложения подынтегральной функции в ряд в точке коллокации. Новым также является способ модификации базисных функций метода граничных элементов в окрестности фронта трещины, увеличивающий точность вычисления КИНов. Предложенный способ построения базисных функций позволяет учитывать произвольные асимптотики поведения разрыва смещений в окрестности фронта трещины. Впервые для всевозможных ориентаций скважины и перфорации относительно главных напряжений залегания получены зависимости давления зарождения трещины и ее местоположения. Определены основные факторы, влияющие на решение задачи: напряжения залегания и ориентация скважины и перфорации относительно них. Найдены

ориентации скважины и перфорации, оптимальные по давлению зарождения.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием фундаментальных законов механики твердого тела, механики разрушения и выбором теоретически обоснованных численных методов, а также подтверждается согласованием результатов проведенных расчетов с известными аналитическими решениями и экспериментальными данными. Результаты работы опубликованы в 19 печатных работах, в том числе входящих в перечень ВАК, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, докладывались на ряде конференций, в том числе, международных.

Практическая ценность результатов диссертационной работы (математических моделей, алгоритмов, их программной реализации и результатов расчетов) заключается в возможности их применения при решении ряда содержательных задач разработки нефтегазовых месторождений. Потенциальными потребителями результатов работы могут являться отраслевые научно-исследовательские и проектные институты нефтегазовой отрасли, компании разработчики месторождений и сервисные компании.

Представленная работа не свободна от недостатков. Так,

1. В пунктах 1.6.2 и 1.6.3 проведена верификация разработанных методов на задаче о растяжении плоской круглой трещины, в то время как предложенные методы способны решать задачи как с трещинами, так и с регулярными границами. Поэтому верификацию неплохо бы провести на более сложной задаче, в которой одновременно представлены оба вида границ. То же касается задач с несколькими трещинами - разработанные автором алгоритмы позволяют решать такие задачи, однако в работе они не рассматриваются.
2. В разделе 2.4.2 указано, что для использования R-критерия необходима информация о кривизне поверхности тела. Это предполагает наличие определенных ограничений на геометрию срединной поверхности трещины, - в

частности, она должна быть ограниченной. Помимо этого, сформулированный в терминах кривизны критерий, по всей видимости, не является универсальным. Так, например, эффект размера присутствует при развитии трещин в балках, для которых параметр кривизны равен нулю. Эти вопросы в работе не анализируются.

3. В пункте 3.1.2 предложена методика учёта наличия стальной обсадной колонны в скважине путём задания в граничных условиях на стенках скважины напряжений, ослабленных стальной колонной и вычисленных из простой задачи о вложенных трубах. Неочевидно, насколько такой подход справедлив для сложной трехмерной геометрии при наличии, помимо скважины, еще и перфорированной стальной обсадной колонны?

Отмеченные замечания не являются существенными и не снижают общей ценности диссертационной работы. Диссертационная работа обладает научной новизной в областях механики и математического моделирования, связанных с исследованием сложных задач механики сплошных сред, имеющих важной прикладное значение. Практическая ценность работы также не вызывает сомнений, поскольку её результаты могут быть использованы при решении реальных практических задач, что и было продемонстрировано автором.

Таким образом, диссертация Куранакова Дмитрия Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи моделирования развития крупномасштабной трещины гидравлического разрыва пласта. Полученные результаты имеют существенное значение как для механики трещиноватых сплошных сред в целом, так и для приложений в области нефтяной геофизики. Диссертационная работа удовлетворяет паспорту специальности 1.2.2 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а также всем критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней ВАК для кандидатских диссертаций, а её автор Куранаков Дмитрий Сергеевич заслуживает при-

суждения ученой степени кандидата физико-математических наук по искомой специальности.

Официальный оппонент: Савенков Евгений Борисович, д.ф.-м.н. по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», ведущий научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федерального исследовательского центра Института прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», 125047, г. Москва, Миусская пл. 4, тел. +7(499)220-79-24, e-mail e.savenkov@gmail.com
отдел № 11 „Вычислительные методы и математическое моделирование“ Савенков Е.Б.

Дата «7» июня 2022 г.

Подпись Е.Б. Савенкова удостоверяю.

Ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
к.ф.-м.н.

А.А. Давыдов

