

Результаты публичной защиты

Дата защиты: 10 декабря 2020 г.

Соискатель: **Савенков Евгений Борисович.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук на тему: «Математическое моделирование развития флюидонаполненных трещин в пороупругой среде».

Специальность: 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Председатель: академик РАН, д.ф.-м.н., профессор Б.Н. ЧЕТВЕРУШКИН.

Секретарь: к.ф.-м.н. М.А. КОРНИЛИНА.

Из 24 человек, входящих в состав диссертационного совета, в заседании участвовали 19 человек, в том числе 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации. При этом 11 членов совета присутствовали очно, а 8 – в дистанционном режиме.

Очно:

1. ЧЕТВЕРУШКИН Б.Н.	д.ф.-м.н.	05.13.18
2. ВАСИЛЕВСКИЙ Ю.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
3. ГАСИЛОВ В.А.	д.ф.-м.н.	01.02.05
4. КОВАЛЕВ В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.13.18
5. КАЛИТКИН Н.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
6. КОРНИЛИНА М.А.	к.ф.-м.н.	05.13.18
7. КУЛЕШОВ А.А.	д.ф.-м.н.	05.13.18
8. ЛУЦКИЙ А.Е.	д.ф.-м.н.	01.02.05
9. МАЖУКИН В.И.	д.ф.-м.н.	05.13.18
10. ТИШКИН В.Ф.	д.ф.-м.н.	01.01.07
11. ЯКОВОВСКИЙ М.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18

Дистанционно в zoom-конференции:

1. ГОЛОВИЗНИН В.М.	д.ф.-м.н.	01.02.05
2. ДОЛГОЛЕВА Г.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
3. ЕЛИЗАРОВА Т.Г.	д.ф.-м.н.	01.01.07
4. ЗМИТРЕНКО Н.В.	д.ф.-м.н.	01.02.05
5. КОЗЛОВ А.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
6. КОЛЕСНИЧЕНКО А.В.	д.ф.-м.н.	01.02.05
7. ПЕТРОВ И.Б.	д.ф.-м.н.	01.02.05
8. ШПАТАКОВСКАЯ Г.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18

В открытом голосовании по вопросу присуждения ученой степени доктора физико-математических наук Савенкову Е.Б. приняли участие 19 членов совета. Проголосовали: за – 19, против – нет, воздержавшихся – нет.

По результатам голосования диссертационный совет принял решение присудить Савенкову Е.Б. ученую степень доктора физико-математических наук.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 10 декабря 2020 г. № 8

О присуждении **Савенкову Евгению Борисовичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Математическое моделирование развития флюидонаполненных трещин в пороупругой среде» по специальности по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ») принята к защите 10 сентября 2020 г. (протокол № 6/п) диссертационным советом Д 002.024.03 на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4, приказ №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель Савенков Евгений Борисович 1979 года рождения. В 2002 г. году соискатель окончил факультет «Фундаментальные науки» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Разработка и применение метода конечных суперэлементов для решения задач математической физики в неоднородных областях» по специальности 05.13.18 -«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» защитил в 2004 году, в диссертационном совете Д 002.024.02, созданном на базе ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Работает в должности ведущего научного сотрудника в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в отделе №11 «Вычислительные методы и математическое моделирование» Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

1. **Сушинов Александр Иванович**, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Донской государственный технический университет, факультет информатики и вычислительной техники, заведующий кафедрой «Математика и информатика».

2. **Лаевский Юрий Миронович**, доктор физико-математических, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория математических задач химии, главный научный сотрудник.

3. **Мухин Сергей Иванович**, доктор физико-математических наук, доцент (уч.зв.), Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет Вычислительной математики и кибернетики, профессор.

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации проектирования Российской академии наук** в своем **положительном** заключении, подписанном главным научным сотрудником, доктором физико-математических наук Бабаковым Александром Владимировичем и главным научным сотрудником, доктором физико-математических наук, Бураго Николаем Георгиевичем, утвержденном директором института доктором физико-математических наук Никитиным Ильей Степановичем указала, что диссертационная работа Е.Б. Савенкова является научно-квалификационной работой, в которой изложен комплекс результатов, дающих решение крупной научно-технической проблемы анализа эволюции состояния естественных и техногенных трещиноватых упругих пористых насыщенных сред. Работа выполнена на высоком научном уровне, ее результаты обладают новизной и научно-технической значимостью. Диссертационная работа полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 01.10.2018) «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, **Савенков Евгений Борисович**, безусловно, заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Соискатель имеет 21 работу по теме диссертации, все они опубликованы в рецензируемых научных изданиях (удовлетворяющих требованиям ВАК), в том числе 10 работ индексируемых в базе данных Scopus, 4 работы индексируемые в базе

данных WoS, 15 работ индексируемых в РИНЦ. Получено 2 свидетельства о регистрации программ. Общий объем научных публикаций по диссертационной работе составляет 29,25 п.л., объем авторского вклада - 21,20 п.л. Вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации научные работы заключается в непосредственной постановке задач, в разработке математических моделей, разработке численных методов решения уравнений для всех моделей, постановке вычислительных задач и анализе результатов расчетов. Вклад соавторов связан с разработкой технических вопросов, программной реализацией ряда алгоритмов, участием в проведении расчетов. Все выносимые на защиту результаты принадлежат соискателю лично, либо получены при его определяющем участии. Публикации в полном объеме отражают содержание диссертации. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

К числу наиболее значительных публикаций соискателя можно отнести следующие:

1. Иванов А.В., Савенков Е.Б. Моделирование и визуальное представление динамики поверхности с подвижным краем на стационарной неструктурированной сетке // Научная визуализация, Т. 9, № 2, 2017. С.~64-81.[ВАК, РИНЦ, Scopus]
2. Borisov, V., Ivanov, A., Kritsky, B., Menshov, I., Ramazanov, M., Savenkov E. Fully coupled numerical simulation techniques for 3D hydraulic fracturing // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1141 (2018) 012085.[ВАК, Scopus]
3. Borisov V.E., Ivanov A.I., Ramazanov M.M., Savenkov E.B. Poroelastic Hydraulic Fracture Simulation Using X-FEM/ CPP Approach // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. pp.~323-333. 2018.[WoS]
4. Савенков Е.Б., Борисов В.Е. Математическая модель развития трещины гидроразрыва пласта в трехмерной пороупругой среде // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2018. № 1. С. 5–17.[ВАК, РИНЦ, Scopus]
5. Рамазанов М.М., Критский Б.В., Савенков Е.Б. Формулировка J-интеграла для модели пороупругой среды Био // Инженерно-физический журнал. – 2018. Т. 91, № 6. с. 1677-1684. [ВАК, РИНЦ, Scopus]
6. Борисов В.Е., Критский Б.В., Савенков Е.Б. Представление поверхности с помощью проекции ближайшей точки в методе X-FEM // Математическое моделирование, т.~31, № 6, с. 18–42. 2019.[ВАК, РИНЦ, Scopus]
7. Рамазанов М.М., Савенков Е.Б. Критерий развития трещин в пороупругой среде // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. Естественные науки, № 5(80). с. 65-82. 2018.[ВАК, РИНЦ, Scopus].

8. E. Zipunova, A. Ivanov, E. Savenkov Application of the closest point projection method to solution of Reynold's lubrication equations on evolving surfaces // *Mathematica Montisnigri*, Vol.~XLVII (2020). [BAK, WoS]

9. Борисов В.Е., Зипунова Е.В., Иванов А.В., Критский Б.В., Савенков Е.Б. Программный комплекс HFrac3D++ для решения задач геомеханики с учетом крупномасштабных флюидонаполненных трещин // *Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша*. 2020. № 46. 20 с.

10. Савенков Е.Б. Конечноэлементный вариант метода проекции ближайшей точки для решения уравнений на поверхностях с краем // *Препринты ИПМ им. М.В.~Келдыша*. 2020. № 8. 36~с.[BAK, РИНЦ]

Авторский вклад соискателя в приведенные выше публикации является ключевым и заключается в следующем:

В работе [1] соискателем разработаны и описаны основные вычислительные алгоритмы. Вклад соавторов заключается в уточнении технических деталей алгоритмов, их программной реализации, проведении расчетов.

В работе [2] соискателю принадлежит разработка математической модели, схемы общего алгоритма и его основных частных компонентов. Вклад соавторов связан с решением частных алгоритмических вопросов и программной реализацией части алгоритмов.

В работе [3] вклад соискателя состоит в постановке и уточнении задачи, а также анализе результатов расчетов. Вклад соавторов заключается в проведении натурального эксперимента, расчетов и визуализации результатов.

В работе [4] вклад соискателя заключается в разработке математической модели и вычислительных алгоритмов. Вклад соавтора заключается в анализе частных моделей.

В работах [5] и [7] соискателю принадлежит анализ проблематики и постановка задачи, разработка математических моделей, разработка части теоретических результатов. Вклад соавторов заключается в разработке частных теоретических вопросов.

В работе [6] соискателю принадлежит постановка задачи, разработка вычислительного алгоритма метода X-FEM/CP, анализ результатов расчетов. Вклад соавторов связан с программной реализацией части вычислительных алгоритмов и проведением расчетов.

В работе [8] соискателю принадлежит постановка задачи, разработка алгоритма, постановка частных расчетных задач, разработка прототипа программы. Вклад соавтора связан с финальной программной реализацией метода и проведением расчетов.

В работе [9] вклад соискателя заключается в разработке определяющих элементов математической модели и всех основных алгоритмов. Вклад соавторов связан с

уточнением технических деталей моделей, алгоритмов и программной реализацией ряда алгоритмов.

Работа [10] подготовлена и опубликована лично автором.

Основные результаты работы представлены на следующих конференциях и научных семинарах:

- Всероссийская научно-практическая конференция «Математическое моделирование, информационные системы и базы данных в гидрогеологии», 25-27 сентября 2013 г., г. Москва.
- 6-я китайско-российская конференция по вычислительной алгебре и приложениям (The Sixth China-Russia Conference on Numerical Algebra with Applications (CRCNAA 2017), ВШЭ, 28-30 августа 2017 г., г. Москва.
- Международная конференция «Современные проблемы механики сплошной среды», посвященная памяти академика Л.И. Седова в связи со столетием со дня его рождения (13–15 ноября 2017 г., МИАН, г. Москва)
- 7th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences IC-MSQUARE 2018, August 27-31, 2018, Moscow, Russia.
- Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций>>, 1-5 октября 2018 г., г. Томск, Россия.
- 4-я Международная научная школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах», Москва, Институт проблем механики им. А.Ю.~Ишлинского РАН, 24-26 октября, 2018 г.
- 47th International Summer School - Conference «Advanced Problems in Mechanics - 2019», June 24-29, 2019, St. Petersburg, Russia.
- Семинар «Вычислительные методы и математическое моделирование» им. Ю.П.~Попова, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, 2015, 2018.
- Семинар «Математическое моделирование» ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 2020.

На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы:

Отзыв официального оппонента Сухинова А.И.

В отзыве указаны следующие замечания:

1. Одним из основных возможных приложений результатов работы является комплекс вычислительных алгоритмов для анализа развития трещин гидроразрыва пласта. Хорошо известно, что жидкостью разрыва в этом случае является так называемый «сшитый гель», который имеет неньютоновскую реологию. Вместе с тем, в предложенной автором математической модели при описании течения как в

пласте, так и в трещине, используется ньютоновская реология флюида. Было бы уместно рассмотреть в рамках предложенной модели в том числе, неньютоновскую модель, а также указать ограничения на применение ньютоновской реологии для задач данного класса.

2. Для численной реализации дискретной модели (конечномерной задачи) пороупругости автор применяет итерационные алгоритмы, основанные на последовательном решении групп уравнений теории упругости и фильтрации. Недостатком такого подхода является, в ряде случаев, медленная сходимость дискретного решения. Для оптимизации итерационного процесса в целом, целесообразно было бы рассмотреть методы линеаризации и численного решения конечномерной задачи - объединенной системы уравнений пороупругости и фильтрации.

3. Рассматриваемый в диссертации класс задач обладает высокой вычислительной сложностью и требует производительностей и объемов оперативной памяти, не достижимой для машин с последовательной архитектурой. В связи со сказанным, актуальным является построение параллельных аналогов алгоритмов и программ, разработанных в диссертации.

Отзыв официального оппонента Лаевского Ю.М.

В отзыве указаны следующие замечания:

1. В главе 4 работы рассматривается пример расчета задачи с несколькими трещинами. Однако соответствующая модификация предложенного автором алгоритма описана очень кратко. Более детальное его описание сделало бы изложение работы более полным и законченным.

2. В работе предлагается как ряд алгоритмов для решения частных задач (пороупругости, течения в трещине и др.), - так и метод решения полной связанной задачи. Основные результаты иллюстрируются примерами тестовых расчетов. Однако набор вычислительных экспериментов, демонстрирующих различные аспекты предложенных алгоритмов мог бы быть более полным и содержательным.

3. При изложении основных аспектов метода конечных элементов используется пример 8-ми узлового конечного элемента в форме шестигранника. Однако фактически в расчетах используются только сетки из тетраэдров. Изложение основных идей метода на основе этих конечных элементов сделало бы изложение более согласованным.

4. Текст работы содержит подробные обзоры современных результатов, касающихся как «модельной», так и «вычислительной» ее части. Эти материалы распределены по тексту работы и приведены в соответствующих ее главах. С точки

зрения последовательности изложения было бы лучше привести их в одном, специально предназначенном для этого, разделе или главе работы.

Отзыв официального оппонента Мухина С.И.

В отзыве указаны следующие замечания:

1. Отдельный интерес представляют собой условия согласования на фронте флюида (п.1.6). Предложенные подходы представляются удачными, тем более хотелось бы видеть подробное исследование соответствующих численных расчетов. Это замечание следует рассматривать, скорее, как пожелание.
2. В предложенной автором математической модели явно предполагается, что раскрытие трещины может являться переменным по ее срединной поверхности, но тем не менее строго положительно во всех ее точках, за исключением фронта трещины. Это накладывает определенные ограничения на характер нагрузок, действующих в среде, они в работе в явном виде не сформулированы. В частности, возникает вопрос об описании течения в трещине и постановке задачи, когда допускается смыкание боковых поверхностей трещины внутри нее (по существу, это приводит к локальному нарушению сплошности среды). Замечание также является, скорее, пожеланием.
3. В работе представлено большое количество результатов расчетов. Некоторые из них достаточно скудно описаны. Например, представленные в п.6.5.2 последовательные распределения полей на рис. 6.11 и 6.12 отличаются крайне незначительно, тогда как их описание (стр.217) состоит из двух коротких предложений, одно из которых говорит, что можно заметить существенное влияние развития трещины на поля давления.
4. В тексте работы присутствует ряд опечаток, см., например, подписи к рисункам 6.33 и 6.34 и некоторые другие.

В отзыве ведущей организации, **ФГБУ ИАП РАН**, содержатся следующие замечания:

1. Математическая модель развития крупномасштабной флюидонаполненной трещины предложена в неизотермической постановке. Вместе с тем описываемые далее вычислительные алгоритмы и результаты моделирования рассматривают только изотермические постановки.
2. В качестве основного вычислительного алгоритма в работе автора используется метод конечных элементов. Для решения задач пороупругости соответствующие конечномерные пространства должны обладать специальными дополнительными свойствами, помимо традиционных свойств аппроксимации - так называемым условиями $\inf\text{-sup}$ - устойчивости. В работе автора этот вопрос обсуждается.

Однако из текста диссертации непонятно, использует ли автор такие пары пространств (например, конечные элементы Тэйлора-Худа).

3. В диссертации приведено достаточное количество численных расчетов, которые демонстрируют возможности предложенных автором алгоритмов. Однако расчеты приведены для сравнительно скромных, с современной точки зрения, сеточных размерностей без конкретизации используемой вычислительной техники. Было бы целесообразно привести расчеты с более мелкими сетками, что более полно демонстрировало бы возможности как предложенных алгоритмов, так и их программной реализации. Также в дальнейшем целесообразно проработать вопросы параллельной реализации предложенных вычислительных алгоритмов.

4. Было бы уместно более детально осветить вопросы, связанные с тем, как определяется расстояние, на которое «продвигаются» точки фронта трещины на шаге по времени и, при необходимости, сформулировать соответствующие критерии и ограничения на разработанные автором алгоритмы.

На автореферат диссертации поступило 5 положительных отзывов.

1. В отзыве **Кувыркина Георгия Николаевича**, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой ФН-2 «Прикладная математика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) содержится следующее замечание «было бы более чем уместно привести во введении к работе или соответствующих главах полноценный обзор способов описания деформируемой среды при наличии трещин и более четко обосновать выбор конкретной модели, используемой автором работы».

2. В отзыве **Турунтаева Сергея Борисовича**, доктора физико-математических наук, директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН) замечаний не содержится.

3. В отзыве **Садовниченко Дмитрия Николаевича**, доктора технических наук, главного конструктора направления, начальника научно-технического отделения Федерального государственного унитарного предприятия «Федеральный центр двойных технологий «Союз» содержится следующее замечание: «из автореферата непонятна обоснованность применения J-интеграла для распространения трещины по границе слоев. Помимо этого, из представленных автором материалов остается неясным, насколько предложенная автором комплексная методика согласуется с расчетами других авторов и соответствует имеющимся экспериментальным данным исследования гидроразрыва пласта. К

сожалению, в автореферате не нашлось места для анализа чувствительности результатов моделирования к ошибкам задания исходных данных по свойствам пороупругих сред и реальных геофизических пород».

4. В отзыве **Вабищевича Петра Николаевича**, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего лабораторией № 76 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН содержатся следующие замечания: «1. Список цитированных работ является достаточно объемным и насчитывает примерно три сотни работ. Однако в тексте диссертации практически отсутствуют ссылки на работы русскоязычных авторов по тематике диссертации. Например, по задачам пороупругости (фильтрационной консолидации). Конечно, их немного, но делать вид, что ничего нет - не совсем правильно. 2. В качестве основного результата автор выделяет созданное программное обеспечение. Но оно практически нигде не описано. В автореферате разработанные комплексы программ HFrac3D и HFrac3D++ упоминаются только в названиях публикаций авторов, а в диссертации - очень кратко обсуждаются только во введении».

5. В отзыве **Якуша Сергея Евгеньевича**, доктора физико-математических наук, директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук замечаний не содержится.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью и высоким уровнем компетентности по всем основным вопросам, рассмотренным в диссертации, включая разработку новых математических моделей механики сплошной среды, разработкой и анализом новых вычислительных алгоритмов, применением методов и средств математического моделирования для решения сложных научно-практических задач, включая задачи гидродинамики и математической и прикладной геофизики. Это подтверждается списком публикаций официальных оппонентов и сотрудников ведущей организации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований получены следующие основные результаты:

- Разработана новая трехмерная математическая модель развития флюидонаполненной трещины в пороупругой среде, включающая в себя группы уравнений пороупругости и течения в трещине с самосогласованным учетом потоков консервативных величин между трещиной и средой.

- Для расчета динамики развития срединной поверхности трещины предложен эффективный алгоритм на основе метода проекции ближайшей точки. Эволюция поверхности описывается непосредственно в терминах определенного в пространстве

оператора проекции без использования явной аппроксимации поверхности. Предложенные подходы позволили построить новые эффективные алгоритмы решения полной связанной задачи.

- Разработан оригинальный вариант алгоритма «расширенного» метода конечных элементов - X-FEM/CP, использующий, в отличие от ранее известных вариантов метода, метод проекции ближайшей точки для описания геометрии срединной поверхности трещины и ее эволюции.

- Предложены новые слабые постановки и метод решения начально-краевых задач для уравнения смазочного слоя на стационарных и эволюционирующих поверхностях с краем, вложенных в трехмерное пространство. Построенные постановки основаны на продолжении уравнения на поверхности в трехмерное пространство и вариационном способе учета главных граничных условий на границе трещины. Предложенный метод использует эйлерово описание течения в трещине и основан на конечно-элементном варианте метода проекции ближайшей точки с использованием построенных слабых постановок. Это позволяет применять его для решения уравнения на эволюционирующей поверхности с использованием пространственной неструктурированной сетки, которая не согласована с ее геометрией.

- Предложен вычислительный алгоритм решения связанной задачи развития флюидонаполненной трещины в рамках предложенной трехмерной самосогласованной модели. Он использует единое представление поверхности для описания эволюции трещины, решения пороупругой задачи во вмещающей трещину пороупругой среде и течения в трещине. Метод является эйлеровым и использует единую трехмерную расчетную сетку для решения уравнений в среде и в трещине.

- Разработан программный комплекс, реализующий предложенные модели и алгоритмы, который может служить основой для создания пакета прикладных программ для решения актуальных задач нефтегазодобывающей отрасли. Продемонстрирована работоспособность предложенных моделей, вычислительных методов, алгоритмов и их программной реализации на примере решения задач с учетом практически важных особенностей и эффектов, сопровождающих развитие флюидонаполненных трещин.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что в работе диссертанта предложены новые классы слабых (вариационных) постановок начально-краевых задач на стационарных и эволюционирующих поверхностях с краем, предложены способы построения их аппроксимаций методом конечных элементов, предложен новый вариант «расширенного» метода конечных элементов X-FEM/CP. Полученные результаты обладают внутренним единством с точки зрения подходов, использованных автором для построения вычислительных алгоритмов решения задачи в связанной постановки. Часть

результатов, особенно касающихся предложенных автором новых методов решения начально-краевых задач на поверхностях с краем, имеют независимый интерес и могут быть использованы для решения широкого круга задач в плоских и пространственных областях, геометрия которых эволюционирует, оставаясь, в общем случае, несогласованной с расчетной сеткой.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что автором предложено комплексное решение задачи о моделировании динамики развития флюидонаполненной трещины в пороупругой среде. Результаты работы обладают значительной научно-практической значимостью и вносят большой вклад в решение проблемы разработки комплекса средств математического моделирования для анализа динамики развития трещин в пластах месторождений углеводородного сырья. Полученные результаты имеют практическую ценность прежде всего для решения задач прикладной геофизики, в частности, для моделирования развития трещин в рамках актуальной для нефтегазодобывающей промышленности технологии гидравлического разрыва пласта.

Результаты работы могут быть в дальнейшем применены в области создания новых средств моделирования для решения широкого класса задач геомеханики пористых насыщенных сред, в том числе при наличии крупномасштабной трещиноватости. Конкретными потребителями могут являться академические и отраслевые научно-исследовательские и проектные институты и организации геофизической направленности, в том числе предприятия и организации нефтегазового комплекса Российской Федерации.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что все полученные автором результаты являются обоснованными. Достоверность проведенных исследований, результаты которых представлены в работе, обеспечена использованием в работе обоснованных подходов для построения математических моделей трещиноватых сплошных сред, опирающихся на современные представления теории трещин; использование современных методов и подходов для конструирования вычислительных алгоритмов, проведением значительного количества расчетов, в том числе валидационного характера.

Личный вклад соискателя состоит в постановке всех рассмотренных и решенных задач в диссертации, разработке математических моделей трещиноватых сплошных сред, разработке численных методов решения уравнений для всех моделей, постановке вычислительных задач, анализе и интерпретации результатов расчетов. Все положения и выводы, содержащиеся в диссертации и выносимые на защиту, получены лично автором, либо при его определяющем участии.

Диссертационная работа Е.Б. Савенкова является научно-квалификационной работой, в которой изложен комплекс результатов, дающих решение крупной научно-технической проблемы анализа эволюции состояния естественных и техногенных трещиноватых упругих пористых насыщенных сред.

На заседании 10 декабря 2020 г. по результатам открытого голосования диссертационный совет принял решение присудить Савенкову Е.Б. ученую степень доктора физико-математических наук .

Из 24 человек, входящих в состав диссертационного совета, в заседании участвовали 19 человек, в том числе 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации. При этом 8 членов совета участвовали в дистанционном режиме.

Проголосовали: за 19, против – нет, воздержавшихся - нет.

Председатель диссертационного совета

д.ф.-м.н., академик РАН,

Б.Н. Четверушкин

Ученый секретарь диссертационного совета

к.ф.-м.н.

М.А. Корнилина

10 декабря 2020 г.