

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.237.01,  
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 НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 17.02.2022 г. № 2

О присуждении **Меретину Алексею Сергеевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Разработка термодинамически согласованных математических моделей и методов математического моделирования для анализа тепловых методов увеличения нефтеотдачи», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 16 декабря 2021 года (протокол заседания №10/пз) диссертационным советом 24.1.237.01, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН», 125047, Москва, Миусская пл., д. 4. Диссертационный совет утвержден приказом Минобрнауки России №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель **Меретин Алексей Сергеевич** 1993 года рождения, в 2015 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт

(государственный университет)» по направлению подготовки 03.04.01 «Прикладная математика и физика» с присвоением квалификации магистр.

В 2019 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» по направлению подготовки 01.06.01 «Математика и механика» по специальности 1.2.2 (05.13.18) – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». В настоящее время соискатель работает в должности ведущего инженера в отделе трудноизвлекаемых углеводородов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

**Научный руководитель – Савенков Евгений Борисович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГУ ФИЦ «ИПМ им. М.В. Келдыша РАН».

**Официальные оппоненты:**

**Булгакова Гузель Талгатовна**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»;

**Герке Кирилл Миронович**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук» (ИФЗ РАН);

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского

Российской академии наук» в своем положительном отзыве, подписанном **Устиновым Константином Борисовичем**, доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории геомеханики ИПМех РАН и утвержденном Марченко Михаилом Александровичем, доктором физико-математических наук, профессором РАН, директором ИПМех РАН, указала, что диссертационная работа Меретина А.С. является законченным научным исследованием, содержащим новые результаты в области математического моделирования процессов в пористых проницаемых средах с учетом неизотермических и геомеханических эффектов применительно к задачам нефтяной геофизики. Задачи, решаемые в данной работе, являются актуальными, а полученные результаты обладают как научной значимостью, так и практической ценностью. Практически значимыми результатами работы являются разработанная модель, математические алгоритмы, а также программный комплекс, позволяющий проводить расчеты прикладного характера. Результаты работ могут применяться для решения целого ряда, связанных с анализом и применением тепловых методов воздействия на пласт. Потенциальными потребителями результатов работ могут являться компании-разработчики нефтегазовых месторождений, сервисные компании, отраслевые научно-исследовательские и проектные институты. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям, выполненным по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ и соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Соискатель имеет 6 опубликованных работ в рецензируемых изданиях, в том числе по теме диссертации опубликовано 6 работ, входящих в перечень ВАК, из них 2 — в изданиях, индексируемых Scopus, 1 — Web of Science.

1. Meretin A., Savenkov E. B. Simulation of Coupled Flow and Damage in Porous Medium // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes (2018). – Springer, Cham, 2019. – С. 132-141. [WoS, ВАК, РИНЦ]

2. Меретин А.С., Савенков Е.Б. Математическая модель фильтрационных процессов в термопоороупругой среде с учетом континуального разрушения. — Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша, 2019, № 58, 38 с. [ВАК, РИНЦ]

3. Меретин А.С., Савенков Е.Б. Вычислительный алгоритм для описания эволюции термопоороупругой среды с учетом разрушения — Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. № 82. [ВАК, РИНЦ]

4. Меретин А. С., Савенков Е. Б. Моделирование термопоороупругой среды с учетом разрушения //Математическое моделирование. – 2020. – Т. 32. – №. 7. – С. 59-76. [Scopus, ВАК, РИНЦ]

5. Меретин А. С. Программный комплекс для математического моделирования разрушения термопоороупругой среды //Вычислительные методы и программирование. – 2020. – Т. 21. – С. 138-151. [RSCI, ВАК, РИНЦ]

6. Меретин А. С., Савенков Е. Б. Математическая модель разрушения термоупругой среды // Инженерно-физический журнал. – 2021. – №. 2. – С. 380-392. [Scopus, ВАК, РИНЦ]

Общий объем публикаций соискателя в изданиях из перечня ВАК – 7.38 печ. л., авторский вклад – более 70 %. Одна статья написана соискателем полностью самостоятельно.

В работах [1,2,6] соискателю принадлежит физико-математическая модель эволюции термопоороупругого материала с учетом разрушения. В работах [3, 4] соискателю принадлежит вычислительный алгоритм для решения системы уравнений модели, описывающей разработанную им физико-математическую модель. Работа [5] подготовлена соискателем самостоятельно и посвящена описанию программного комплекса для моделирования разрушения термопоороупругой среды.

На автореферат и диссертацию поступили отзывы ведущей организации, отзывы оппонентов, также поступило 3 положительных отзыва на автореферат. Отзывы содержат ряд замечаний.

*В отзыве ведущей организации ИПМех РАН:*

1. Использование единого скалярного параметра поврежденности для описания и процессов деформирования, и разрушения, в том виде, как это представлено в работе, представляется слишком упрощенным (см., например, Salganik R.L., Gotlib V.A. Continuum versus discontinuum damage mechanics of creep caused by microcracking. International Journal of Fracture. 2000. Т. 101. № 3. С. 181-201) и едва ли может рассматриваться кроме как первое приближение.

2. Представленный обзор, посвященный описанию процессов деформирования и разрушения в терминах теории повреждаемости, способам введения параметра поврежденности и его связи с параметрами, характеризующими пористость и проницаемость хотя и весьма обширен, но мало критичен, выбор зависимости для использования в модели представляется достаточно произвольным.

3. Что касается стилистики и строгости изложения, необходимо отметить, что описания и формулировки не всегда достаточно точны и иногда допускают неоднозначные толкования. Так в автореферате говорится: «Для обеспечения устойчивости конечномерной задачи применялся ряд подходов, в соответствии с которыми преобразовывалась матрица системы (15), такие как метод диагонализации матриц масс, введение обезразмеривающих коэффициентов и перестановка строк и столбцов по алгоритму Катхилла-Макки». Не совсем ясно идет ли речь о технических моментах решения систем уравнений или о проблемах, связанных с возможной плохой обусловленностью матриц. На стр. 10 описывается модель Био, а затем альтернативная модель. Не ясна идея модели и ее отличие от модели Био. Не ясно говорится ли далее о модели Био или об альтернативной модели. В формулах 1.26, записаны соотношения, содержащие частные производные. Для ясности понимания весьма желательно было бы указать, какие величины при взятии данных частных производных

постоянны. По-видимому,  $pT, D$  для первого выражения, и т.д. В литературе по термодинамике для этого существует общепринятая нотация. То же самое можно сказать о формулах 1.27. В последствии при использовании введенных величин остается за кадром постоянство каких величин предполагалось при взятии входящих в них частных производных. Далее, конечно, говорить о наборе параметров, так, что данное замечание относится скорее к стилистике, чем к сути изложения. Заключение названо главой 5. Имеются опечатки. Так на стр 10 «Особенностью данной модели является то, пороупругая среда описывается тремя упругими модулями» - пропущено «что».

*В отзыве официального оппонента Булгаковой Г.Т.:*

1. В модели рассматривается однофазный флюид, однако в реальных средах (например, нефтяном пласте) имеет место быть многофазная фильтрация.

2. При выводе определяющих соотношений автор вводит большое количество вспомогательных коэффициентов, однако далее, при проведении численных расчетов, значительная часть из них зануляется. Это требует дополнительных пояснений.

3. При проведении численных расчетов на примере моделирования теплового воздействия на нефтяной пласт отсутствуют какие-либо сравнения с экспериментальными данными или результатами расчета других программ.

4. Имеется опечатка в описании коэффициентов формулы (4.2) на с.86. Коэффициент  $\alpha$  должен быть безразмерным.

*В отзыве официального оппонента Герке К.М.:*

1. Разработанная физико-математическая модель получена в приближении упругих деформаций. При этом пластические деформации совершенно не учитываются, хотя в рассматриваемых условиях (сильные изменения порового давления и температуры) пластические деформации могут оказать существенное влияние на результаты. Рекомендуется учесть это при дальнейшем развитии работы.

2. Основное внимание при разработке математической модели и алгоритма уделено описанию процессов непосредственно в пористой проницаемой среде. Вместе с тем, для практического применения разработанных методов моделирования, необходима реализация дополнительных инструментов по работе с построением расчетной сетки и распределением свойств на ней, заданием сложных режимов работы скважин, выгрузкой дополнительных данных для анализа.

3. Список литературы состоит в основном из зарубежных работ. Хотелось бы уделить больше внимания трудам российских ученых.

*В отзыве на автореферат д.ф.-м.н. Колдобы Александра Васильевича, МФТИ:*

1. При валидации программного комплекса рассмотрены только задачи, имеющие аналитическое решение. Валидация была бы более полной, если бы были рассмотрены более сложные тесты на основе сравнения с другими программными комплексами, предназначенными для решения аналогичных задач.

2. В работе не проводится формальный и численный анализ сходимости численной схемы.

*В отзыве на автореферат д.т.н. Кувыркина Георгия Николаевича, МГТУ им. Н.Э. Баумана:*

1. В работе предполагается, что флюид и скелет всегда находятся в тепловом равновесии. По всей видимости, это допущение является верным для рассматриваемого автором класса задач, однако сколь-либо явный анализ этого вопроса в работе отсутствует.

2. В обзоре моделей разрушения автор рассматривает модели разрушения как с конечной, так и с мгновенной кинетикой. Вместе с тем, численные эксперименты выполнены только для конкретной модели с мгновенной кинетикой. Было целесообразно выполнить вычислительные эксперименты с моделями с конечной кинетикой, в частности, для анализа развития зон

разрушения в зависимости от соотношения характерных времен действующих в среде процессов.

*В отзыве на автореферат Горева Игоря Васильевича, начальника научно-исследовательской лаборатории ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»:*

1. Автор пишет, что «Можно показать, что если течение флюида подчиняется закону Дарси, а поток тепла описывается законом Фурье», то диссипация флюида и тепловая диссипация больше или равны нулю. Стоило это действительно показать.

2. В диссертационной работе автор проводил валидацию разработанной программы путём сравнения с аналитическими решениями, но в автореферате такое сравнение не приведено.

3. В приведённых результатах моделирования теплового воздействия на нефтяной пласт отсутствуют сравнения с экспериментальными данными или результатами расчета других программ.

В целом в присланных отзывах отмечается, что замечания не являются существенными, а диссертационная работа соискателя направлена на решение актуальной задачи и обладает научной новизной. Работа выполнена на высоком уровне и по практической значимости, а также достоверности научных результатов диссертация удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата наук.

**Выбор официальных оппонентов** и ведущей организации обосновывается широко известной компетенцией оппонентов и сотрудников ведущей организации в вопросах механики сплошных сред, в том числе численного моделирования гидродинамических и геомеханических процессов, что подтверждается их многочисленными научными публикациями в данных областях.



**Диссертационный совет** отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1) **Разработана** термодинамически согласованная физико-математическая модель разрушения термopopoупругой среды, учитывающая деформационные, фильтрационные и неизотермические эффекты, пригодная для анализа эффективности современных и перспективных тепловых методов увеличения нефтеотдачи.

2) **Разработан** неявный численный алгоритм расчета эволюции термopopoупругой среды с учетом разрушения на основе метода конечных элементов с применением неструктурированных тетраэдральных сеток.

3) **Реализован** программный комплекс для моделирования термического воздействия на пороупругую среду с учетом разрушения. Проведены верификационные расчеты, подтверждающие корректность разработанных алгоритмов.

4) **Выполнены** расчеты по оценке влияния разрушения среды при применении термических методов воздействия на пласт, демонстрирующие применимость разработанных моделей и алгоритмов для решения задач в реалистичных постановках.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что** разработана физико-математическая модель эволюции пороупругой среды с учетом разрушения и вычислительные методы для её решения.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что разработанный программный комплекс позволяет проводить анализ процесса термического воздействия на пласт с учетом геомеханических эффектов и разрушения в реалистичных постановках.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила, что** полученные в работе результаты обеспечены применением при выводе уравнений и определяющих соотношений математической модели обоснованной процедуры Колмана-Нолла, строгостью используемого для

разработки вычислительного алгоритма математического аппарата, сопоставлением результатов моделирования с известными решениями.

**Личный вклад соискателя состоит в том,** что соискатель самостоятельно разработал физико-математическую модель разрушения в пороупругой среде, вычислительные алгоритмы и программный комплекс, выполнил валидацию программного комплекса путем сравнения с аналитическими решениями, а также провел численные эксперименты по оценке разрушения флюидонасыщенного пласта в процессе термического воздействия и проанализировал полученные результаты.

Вопросы соискателю задали члены диссертационного совета А.В. Колесниченко, В.Ф.Тишкин, И.С. Меньшов, Ю.В. Василевский, И.С. Меньшов, М.В. Якобовский, И.Б.Петров. Существенных замечаний в ходе защиты диссертации высказано не было. Соискатель ответил на заданные ему вопросы, согласился с большинством замечаний и дал свои комментарии в необходимых случаях.

В дискуссии приняли участие А.Н. Козлов, А.В. Колесниченко, М.В. Якобовский.

Диссертационный совет заключил, что в целом диссертация соискателя Меретина Алексея Сергеевича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую решение актуальной задачи математического моделирования эволюции термopopoупругой среды с учетом разрушения, имеющей большое значение для развития механики сплошных сред и представляющей практический интерес при разработке программного обеспечения для моделирования эволюции пороупругих сред.

На заседании 17 февраля 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Меретину Алексею Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них - 6 докторов наук по специальности

рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 18 , против – нет, недействительных бюллетеней – нет.


Заместитель председателя

диссертационного совета 24.1.237.01

  
М.В. Якобовский

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.237.01

  
М.А. Корнилина



17 февраля 2022 года