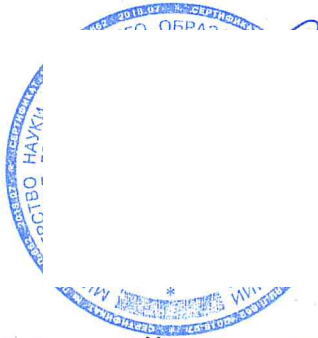


УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
научного учреждения «Федеральный  
исследовательский центр  
«Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской  
академии наук»  
член-корреспондент РАН



 А. А. Шпедт  
2023 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертацию Никифорова Дьулуста́на Яковлевича  
**«Многомасштабный метод на неструктурированных сетках  
для решения задач в неоднородных средах»,**  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.2.2. Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**Актуальность темы исследования.** Многие задачи, описывающие процессы фильтрации в трещиновато-пористых средах, содержат сильно неоднородные анизотропные тензорные коэффициенты в различных масштабах. Кроме того, многие природные месторождения содержат трещины в виде высокопроводящих каналов в различных масштабах. В совокупности со сложной геометрией высокая контрастность физических свойств на мелком масштабе приводит к дорогостоящему моделированию. Поэтому за последние десятилетия были проведены обширные исследования по снижению сложности задачи. В результате были предложены различные подходы к

многомасштабному моделированию, подходящие для разных типов трещин и неоднородностей. В диссертационной работе Никифорова Д. Я. разработаны вычислительные алгоритмы обобщенного многомасштабного метода конечных элементов с использованием неструктурированных сеток на грубом масштабе, а также предложен бессеточный подход многомасштабного моделирования. Поэтому актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений.

**Научная новизна работы** состоит в разработке эффективных вычислительных алгоритмов многомасштабных методов на неструктурированных грубых сетках. Полученные результаты являются новыми, а проведенные численные расчеты имеют практическое значение при моделировании процессов фильтрации в трещиноватых средах и решении задачи теплопереноса с фазовыми переходами.

**Содержание работы.** Диссертационная работа на 141 странице включает введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложение. Список литературы состоит из 145 наименований, среди которых 9 работ автора по теме диссертации и 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Во **введении** обоснована актуальность работы; приводится обзор литературы; сформулированы цели и задачи исследования; представлена научная новизна и практическая значимость работы; изложены основные положения, выносимые на защиту; выделены сведения об апробации работы и об основных публикациях автора по теме диссертации.

В **первой главе** представлено численное решение задачи фильтрации в трещиноватой среде методом конечных элементов с применением модели дискретных трещин (МДТ). При использовании МДТ трещины представлены явным образом объектами размерностью на порядок меньше пространственной размерности коллектора. В данном методе учитывается влияние отдельных трещин на течение жидкости. Приведены результаты численного исследования особенностей решения систем линейных

алгебраических уравнений, возникающих в результате неявной конечно-элементной аппроксимации плохо обусловленной задачи, с использованием итерационных методов декомпозиции областей в подпространствах Крылова.

**Вторая глава** посвящена численному решению задачи однофазной фильтрации в трещиноватой среде обобщенным многомасштабным методом конечных элементов (ОММКЭ). Предлагаются два новых способа неструктурированных сеток на грубом масштабе. Приведены результаты численного сравнения решений, полученных с помощью ОММКЭ при различных видах грубых сеток, с решениями на мелкой (эталонной) сетке.

В **третьей главе** разработан бессеточный ОММКЭ. Он является модификацией исходного метода, где вместо грубой сетки используется «облако точек» с перекрывающимися опорными областями. Отсутствие грубой сетки позволяет проводить многомасштабное моделирование, в котором узлы могут располагаться произвольным образом. Рассмотрены два бессеточных подхода: структурированный и использующий центральные мозаики Вороного (ЦМВ). Проведены сравнения сеточного и бессеточного ОММКЭ. Для каждого подхода исследовано влияние размера грубой сетки и количества многомасштабных базисных функций на точность вычислений.

**Четвертая глава** посвящена приложению бессеточного ОММКЭ к прикладной задаче теплопереноса в системе грунт-труба с фазовыми переходами. Представлена модификация бессеточного ОММКЭ в виде дополнительных упрощенных многомасштабных базисных функций для учета влияния системы труб на температурное состояние грунта. Сгущение грубых элементов с применением ЦМВ проводилось с учетом расположения труб. Проведено исследование точности метода с дополнительными базисными функциями и без них.

**Достоверность и степень обоснованности** полученных результатов подтверждается использованием корректно построенных математических моделей, вычислительными экспериментами, а также сравнением результатов,

полученных с использованием предлагаемых методов, с результатами прямого численного моделирования методом конечных элементов на эталонной сетке.

Основные научные результаты диссертации были доложены на международных и всероссийских научных конференциях, с достаточной полнотой опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. С математической точки зрения формулировка задачи (3.29) не описывает влияние трещин, поскольку изменение ее правой части на множестве меры ноль (суммарная площадь трещин) не влияет на решение задачи.

2. При тщательном изучении влияния количества собственных функций не приведены какие-то оценки (хотя бы известные из литературы) сходимости методов при измельчении сеток.

3. Следовало провести валидацию совокупности применяемых моделей и методов хотя бы на одном примере замораживания грунта.

**Заключение.** Диссертационная работа «Многомасштабный метод на неструктурированных сетках для решения задач в неоднородных средах» является законченной научно-квалифицированной работой, соответствует паспорту научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, соответствует требованиям, предъявляемым Высшей аттестационной комиссией при Минобрнауки России к кандидатским диссертациям, удовлетворяет критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, а её автор – Никифоров Дьулустан Яковлевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по

специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв на диссертацию Никифорова Д. Я. составлен директором Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (далее – Институт вычислительного моделирования СО РАН) доктором физико-математических наук, профессором, членом-корреспондентом РАН Шайдуровым Владимиром Викторовичем.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании семинара «Проблемы математического и численного моделирования» Института вычислительного моделирования СО РАН 14 марта 2023 г., протокол № 2/2023.

Директор Института вычислительного моделирования СО РАН  
доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН  
shidurov@icm.krasn.ru, тел.: 8 (391) 243-2756



Владимир Викторович Шайдуров

«27» марта 2023 г.



**Сведения о ведущей организации:**

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН);  
адрес: 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50;  
тел.: +7 (391) 243-45-12; e-mail: [fic@ksc.krasn.ru](mailto:fic@ksc.krasn.ru); <https://ksc.krasn.ru/>.