

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.125.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ  
И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ ИМ. С.А. ХРИСТИАНОВИЧА СО РАН,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 21.04.2023 № 9

О присуждении Мишину Алексею Владимировичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Формализм обобщенной производной для анализа гетерогенных материалов» по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы и 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела принята к защите 29 декабря 2022 г. (протокол заседания № 8) диссертационным советом 24.1.125.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки (ФГБУН) Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича (ИТПМ) СО РАН, ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, утвержденным приказом Рособрнадзора от 16.11.2007г. №2249-1603 и продлением срока полномочий приказом Минобрнауки России от 10.09.2009г. (№591925-1734), подтверждением полномочий от 11.04.2012г. (№ 105/нк) и изменениями от 08.06.2016г. (№ 661/нк), от 03.08.2018г. (№ 59/нк) и от 12.09.2022г. (№ 1215/нк).

**Соискатель** Мишин Алексей Владимирович, 1994 года рождения, в 2022 году окончил аспирантуру ИТПМ СО РАН, работает инженером-исследователем в ФГБУН ИТПМ СО РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории физики быстропротекающих процессов ФГБУН ИТПМ СО РАН.

**Научный руководитель** – доктор физико-математических наук Фомин Василий Михайлович, академик, профессор, научный руководитель института, заведующий лабораторией физики быстропротекающих процессов ФГБУН ИТПМ СО РАН.

**Официальные оппоненты:**

Рудяк Валерий Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор, г.н.с., Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет;

Кузькин Виталий Андреевич, доктор физико-математических наук, доцент, ИПМаш РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории “Дискретные модели механики”

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва в своем положительном отзыве, подписанном д.ф.-м.н. Веденевым Василием Владимировичем и д.ф.-м.н. Шамаевым Алексеем Станиславовичем отметили, что диссертация является законченным научным трудом, соответствует паспорту специальностей 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы и 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела и отвечает требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Соискатель имеет 8 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 8 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 6 работ.

В опубликованных работах авторский вклад заключается во введении обобщенной производной для анализа микроструктуры гетерогенных сред (конфигурации внутренних границ), решении задачи многих тел в гетерогенной среде, получении эффективных коэффициентов переноса, отображающих микроструктурные особенности гетерогенной среды в явном

виде и их анализе. Опубликованные работы представляют собой статьи в научных журналах и в полном объеме отражают содержание диссертации.

Наиболее значимые результаты диссертации изложены в публикациях:

Мишин А.В. Обобщенная производная и ее использование для анализа микроструктуры гетерогенной среды // Сибирский журнал индустриальной математики. 2021. Т. 24, № 4. С. 79–96. В статье для учета конфигурации внутренних границ гетерогенной среды введен формализм обобщенной производной.

2. Мишин А.В. Учет обобщенной производной и коллективного влияния фаз на процесс гомогенизации // Сибирский журнал индустриальной математики. 2022. Т. 25, № 4. С. 86–98. На основе формализма обобщенной производной поставлена и решена задача многих тел на функцию Грина, в результате найдены эффективные коэффициенты, отображающие микроструктуру системы в явном виде.

3. Мишин А.В. Проведение гомогенизации в вязкоупругих гетерогенных средах с учетом коллективного влияния границ // Сибирский журнал индустриальной математики. 2023. Т. 26, № 1. С. 1–7. В работе с учетом формализма обобщенной производной получены эффективные коэффициенты вязкоупругости.

4. Мишин А.В., Фомин В.М. Анализ поведения гетерогенных сред с существенно различающимися физическими свойствами с учетом эффективной размерности пространства и формализма обобщенной производной // Прикладная математика и механика. 2022. Т. 86, № 4. С. 551–570. На основе анализа найденных эффективных коэффициентов предсказано наличие несущей фазы и структурного фазового перехода.

5. Мишин А.В., Фомин В.М. Исследование упругих свойств материала, полученного методом холодного газодинамического напыления с лазерной обработкой // Прикладная механика и техническая физика. 2021. Т. 62, № 6. С. 89–96. Разработана математическая модель, учитывающая процесс растворения и протекание химической реакции, демонстрирующая,

что итоговое состояние гетерогенного материала есть следствие подаваемой на исходную систему энергии, что дает возможность контролировать состав и свойства конечной структуры.

**На диссертацию поступили отзывы:**

**Официального оппонента д.ф.-м.н. Рудяка В. Я.** Замечания: 1. Цель работы сформулирована чрезвычайно многословно. О каком поле идет речь? Личный вклад автора должен быть прописан детальнее. В частности, в работе [6] у автора много соавторов, вклад которых не ясен, и не ясен вклад в эту работу диссертанта. 2. Глава 1 носит обзорный характер. Однако она не структурирована. Отсутствуют более современные теории, которые учитывают ряд других эффектов и позволяют продвинуться в сторону значительно больших концентраций. Затем во всех случаях рассматривается лишь так называемый одножидкостный (смесевой) режим, использование которого имеет вполне определенные границы применимости, о которых ничего не говорится. Кроме того, здесь в принципе не рассмотрены возможные микроскопические подходы, которые в определенной мере и являются самыми последовательными для определения коэффициентов переноса гетерогенных сред. 3. Исходным пунктом являются уравнения переноса, характер которых никак не обсуждается. Строго говоря, использование в них обобщенной производной следует доказывать. 4. Нет содержательных примеров применения выведенных выражений при размерности пространства  $n \neq 3$ . С другой стороны, на стр. 96 автор делает странный вывод, который трудно перевести на русский язык: “при концентрации ... происходит перколяция поля упругости по твердой фазе в структуре”. Что такое перколяция поля упругости? Физически также не очень ясно чем вызвано наличие критической точки с существенно различным поведением фаз в ее окрестности. Не ясно, что автор имеет в виду под структурным фазовым переходом от “несвязного распространения поля по системе к макроскопически связному” (стр. 110). 5. Автору не удалось продемонстрировать эффективность развиваемой теории при существенном

параметре  $\gamma \neq 1$ . Другим недостатком является достаточно формальный подход к сложной физической задаче. В частности, не делается даже попытки обсудить возможные механизмы фиксируемого нестандартного поведения гетерогенной среды. Недостатком является отсутствие четкого обсуждения границ применимости и ограничений предлагаемого подхода. Отсутствуют и какие-либо содержательные результаты для дисперсных жидкостей, хотя во введении автор на них “замахивается”.

**Официального оппонента д.ф.-м.н. Кузькина В.А.** Замечания:

1. Используемые в работе обозначения усложняют понимание материала. В частности, для обозначения векторов, тензоров, интегральных и дифференциальных операторов используются одинаковые обозначения – жирные курсивные латинские буквы. 2. Из работы сложно понять, какие предположения делаются о форме включения? Возможно ли применение изложенного формализма для трещиноватого материала? 3. Как обосновывается вычисление интегралов (2.19) при  $e^{-ikr} = 1$  (страницы 59–61)? 4. Из текста диссертации не ясно, какие предположения используются для перехода от суммы в формуле (2.39) к интегралу в формуле (2.41). 5. Согласно (2.46) осредненная функция Грина имеет экспоненциальную асимптотику, в то время как функция Грина однородной среды имеет степенную асимптотику. Как данный факт согласуется с возможностью замены неоднородной среды на эффективную однородную? Почему асимптотики осредненных функций Грина в (2.46) и (3.5) отличаются (в (2.46) затухание экспоненциальное, а в (3.5) – степенное)? 6. В параграфе 3.2 анализ выражений (3.9) для эффективных модулей упругости проводится для частного случая  $\gamma=1$ . При этом в пункте 3.1 говорится о том, что в таком случае формула (3.9) эквивалентна результатам, полученным в литературе в рамках метода самосогласованного поля. Проводился ли в литературе похожий анализ выражения (3.9)? 7. Формула (4.13) для эффективной вязкости суспензии получена ранее в работе Abedian B., Kachanov M. On the effective viscosity of suspensions. International Journal of Engineering Science. –

2010. Т. 48, №. 11. С. 962–965. 8. В работе имеется ряд опечаток, не влияющих на корректность полученных результатов.

**Ведущей организации МГУ имени М.В. Ломоносова.** Замечания: 1. Обзор литературы по теме диссертации крайне скуден и не включает работы известных научных школ по теории осреднения. Так, в МГУ им. М.В. Ломоносова данной темой занимались и продолжают заниматься коллеги и ученики акад. О.А. Олейника и проф. А.С. Шамаева (кафедра дифференциальных уравнений); проф. Б.Е. Победри (кафедра механики композитов); акад. Н.С. Бахвалова (кафедра вычислительной математики). Ни одна работа этих групп, хорошо известных как в России, так и за рубежом, не упомянута в диссертации. 2. По своему содержанию диссертация тесно связана с понятием обобщённой производной, имеющим строгое математическое определение и давно устоявшийся смысл. Связанные с ним утверждения и теоремы должны быть строго доказаны, т.к. любые отклонения от их условий могут приводить к существенно ошибочным результатам, чему есть множество примеров. Основной текст диссертации, на первый взгляд, имеет математический характер и претендует на математическую строгость. Однако при детальном изучении можно заключить, что в нём нет ни одного строго доказанного утверждения или теоремы. Более того, само определение обобщённой производной, как его вводит автор на стр. 40, бессмысленно: обобщённая производная  $\nabla u(x)$  вводится через обычную производную  $du(x)$ , которая для разрывного поля  $u(x)$  попросту не существует! В то же время, диссертацию трудно отнести и к «прикладной»: нигде не сформулирован полный перечень физических гипотез о характере распределении материала в среде, в результате чего неясна область применимости результатов работы. Например, могут ли быть применены результаты к слоистым композитам или к волокнистым средам, и если да, то при каких условиях? 3. Текст диссертации плохо структурирован. В частности, раздел «Постановка задачи», начинающийся со стр. 43, занимает 7 страниц, включающих несколько «утверждений» и

«доказательств»; при этом постановки какой-либо задачи в этом разделе нет. Аналогично, в других главах в разделах «Постановка задачи» (стр. 66, 89) трудно понять, какая задача ставится. В разных разделах диссертации присутствуют многостраничные рассуждения, в которых трудно различить формулировки результатов и их доказательства. Множество ссылок на работы других авторов затрудняет отделение новых результатов автора от известных ранее результатов. 4. В разделе 2.2, также в чисто упругой статической задаче, рассматриваются «уравнения переноса» без объяснения, что куда переносится. Придать какой-либо смысл выражению (2.31), названному «функционалом энергии», и последующим выкладкам, крайне затруднительно. 5. В разделе «Нахождение эффективных коэффициентов вязкоупругости» (стр. 84) рассматриваются чисто упругие (без вязкости) свойства. Последний вывод по главе 2 на стр. 87 не соответствует содержанию главы, т.к. никаких свойств, кроме упругих, в ней не рассматривается. 6. На рис. 3.3 показан график производной эффективного модуля в зависимости от концентрации “слабого” материала, на котором явно имеется излом на 90 градусов. Однако, в тексте диссертации наличие такого излома ничем не обосновано; формулы (3.16), которые представляются как наводящее соображение, описывают асимптотики вблизи и вдали от перколяционного перехода, и не описывают зону склейки асимптотик, в которой находится излом. 7. В конце главы 3 проводится качественное сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными из литературы. Однако, рассмотренные эксперименты относятся к взаимодействию жидкой и твёрдой фаз, в то время как в диссертации рассматриваются две твёрдые фазы. Непонятно, как можно проводить даже качественное сравнение принципиально различных гетерогенных сред — “жидкость-упругая среда” и “упругая среда-упругая среда”. 8. Экспериментально полученный модуль Юнга на рис. 4.3 (обозначен крестом) отличается от теоретического (показан кривой) на ~30%. Вряд ли можно назвать такое соответствие удовлетворительным, как сказано на стр. 122.

9. Насколько можно судить, главной новизной теоретической части работы является получение формул осреднения с параметром  $\gamma \neq 1$ , учитывающим влияние границ раздела фаз. Однако, все сравнения с экспериментами приведены для  $\gamma=1$ , что соответствует известным ранее теориям. В связи с этим непонятно, в каких реальных ситуациях влияние границ раздела фаз может быть существенным.

**На автореферат поступили отзывы:**

Д.ф.-м.н. Наймарка О.Б. (ФГБУН ИМСС УрО РАН). Отзыв положительный. Представляется целесообразным обсуждение формализма обобщенной производной в сопоставлении с подходами нелокальных теорий поведения гетерогенных сред. Имеются замечания по уточнению ряда формулировок по тексту автореферата;

Д.ф.-м.н. Панина А.В. (ФГБУН ИФПМ СО РАН). Отзыв положительный. В качестве замечания можно отметить излишне подробное сравнение полученных в работе математических выражений и формул с существующими экспериментальными данными, приводящее к необоснованному увеличению объема автореферата.

К.ф.-м.н. Семисалова Б.В. (ФГБУН Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН). Отзыв положительный. Имеются некоторые недочеты в оформлении автореферата. 1. Одним из результатов, выносимых на защиту, является “учет влияния внутренних границ гетерогенной среды на распространение поля”. При этом ничего не сказано об ограничениях, накладываемых на геометрию этих границ. Только в первом абзаце стр. 14 сказано “...структурным элементом фазы 2 является шар...”. Применима ли, методика, предложенная в диссертации, в задачах с произвольной геометрией границ? 2. Эффективные коэффициенты получены в стационарной изотропной модели линейной теории упругости. Было бы интересно провести сравнение с нестационарным случаем. Допускает ли предложенная методика обобщение на случай ортотропного и анизотропного поведения материала фаз? Можно ли учесть пластичность материалов?

К.ф.-м.н. Амелюшкина И.А. (ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского). Отзыв положительный. 1. Часть входящих в формулы величин и индексов даны без пояснений, что может потребовать изучения материалов, которые выходят за рамки автореферата. 2. В автореферате всего четыре рисунка, на двух из которых всего по одной кривой, что затрудняет понимание преимуществ разработанного метода моделирования в сравнении с результатами других исследователей. 3. Не вполне ясна чувствительность полученных в работе выражений к погрешности определения входящих в них параметров – например, погрешность определения стоящего в экспоненте параметра  $\Gamma$ , зависящего от концентрации и размеров частиц, вероятно, может привести к большим погрешностям расчета коэффициента вязкости и модуля всестороннего сжатия.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются признанными высокопрофессиональными специалистами в области исследований процессов, происходящих в многофазных средах, а ведущая организация – известна своими достижениями в области исследования гетерогенных сред.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

на основе математического формализма обобщенной производной **разработан** подход, учитывающий влияние внутренних границ гетерогенной среды, разделяющих фазы с разными физическими свойствами, на распространение поля по ней;

на основе концепции обобщенной производной **постановлена и решена** задача многих тел для гетерогенной среды;

**получены** эффективные коэффициенты переноса, учитывающие микроструктуру гетерогенной среды (физические свойства фаз и характерные масштабы) в явном виде. Эффективные коэффициенты обобщены на случай заданной размерности пространства;

**предсказано** наличие несущей фазы и структурного фазового перехода (перколяции), полученное из анализа найденных эффективных коэффициентов, примененного для гетерогенных сред с существенно различающимися свойствами фаз;

**разработана** математическая модель, учитывающая процесс растворения и протекание химической реакции, демонстрирующая, что итоговое состояние гетерогенного материала есть следствие подаваемой на исходную систему энергии, что дает возможность контролировать состав и свойства конечной структуры;

на основе анализа осредненных уравнений (найденных методом условных моментов) **получен** структурный вид коэффициента пропорциональности (для высокопористых сред) в законе Дарси, отражающего микроструктуру среды.

**Теоретическая значимость** работы заключается в том, что на основе введения формализма обобщенной производной учтено коллективное влияние фаз на распространяющееся исследуемое поле по гетерогенной среде, что имеет отношение к задаче многих тел. Задача многих тел для гетерогенной среды связана с описанием влияния на поле конфигурации внутренних границ, разделяющих занятые фазами области с разными физическими свойствами. По итогу построена математическая модель гетерогенной среды с определенными эффективными коэффициентами переноса, отображающими микроструктуру системы (геометрию и физические свойства фаз).

**Практическая значимость работы** заключается в создании нового подхода, позволяющего предсказывать поведение гетерогенных сред.

**Достоверность результатов** обеспечивается сопоставлением полученных результатов с данными существующих подходов и удовлетворительным согласованием с экспериментальными данными.

Личный вклад автора состоит во введении обобщенной производной, учитывающей конфигурацию внутренних границ гетерогенной среды,

решении задачи многих тел в гетерогенной среде на функцию Грина, получении эффективных коэффициентов переноса, отображающих микроструктурные особенности гетерогенной среды в явном виде и их анализе. Автор разработал математическую модель, учитывающую процесс растворения и протекание химической реакции и демонстрирующую, что итоговое состояние гетерогенного материала есть следствие подаваемой на исходную систему энергии, что дает возможность контролировать состав и свойства конечной структуры. Автор получил структурный вид коэффициента пропорциональности (для высокопористых сред) в законе Дарси, отражающего микроструктуру среды.

В отзыве ведущей организации были высказаны замечания критического характера: 1. Об отсутствии ссылки на известные научные школы; 2. О бессмысленности используемого понятия обобщенной производной; 3. О плохом структурировании текста диссертации; 4. Об отсутствии обоснования излома на графике производной эффективного модуля в зависимости от концентрации “слабого” материала; 5. О невозможности выполнения даже качественного сравнения принципиально разных гетерогенных сред. 6. О не продемонстрированной эффективности развиваемой теории при полученном параметре  $\gamma$ , отличным от единицы.

Соискатель Мишин А.В. согласился с замечаниями 1, 3 и 6, а на замечания 2, 4 и 5 привел собственную аргументацию и дал объяснение полученным результатам.

На заседании 21 апреля 2023 г. диссертационный совет принял решение за аналитический учет конфигурации внутренних границ гетерогенной среды на основе формализма обобщенной производной присудить Мишину А.В. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы, 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 13 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены в состав совета 3 человек, проголосовали: за – 21, против – 1, недействительных бюллетеней – 0.

И.о. председателя

диссертационного совета

Лебига Вадим Аксентьевич

Учёный секретарь

диссертационного совета

Гапонов Сергей Александрович

“ ” апреля 2023 г.