

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Мишина Алексея Владимировича

«Формализм обобщенной производной для анализа гетерогенных материалов»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы, 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Актуальность диссертационной работы работа А.В. Мишина обусловлена тем, что большинство существующих в природе и создаваемых человеком материалов на определенном масштабном уровне имеют гетерогенную структуру, существенно влияющую на физико-механические свойства материала. Цель работы состоит в разработке моделей механики деформируемого твердого тела и механики жидкости, позволяющих рассчитать эффективные механические свойства (упругие, вязко-упругие, вязкие) гетерогенных сред, состоящих из нескольких фаз с различными свойствами. При этом акцент делается на использовании формализма обобщенной производной для учета изменения свойств на границе раздела фаз и вывода формул, пригодных в широком диапазоне объемных концентраций включений.

Научная новизна работы заключается в том, что на основе индикаторной функции, входящей в функционал внутренней энергии, и с использованием вариационного исчисления, получена формула для обобщенной производной, позволяющая учесть влияние внутренних границ, разделяющих фазы с разными физическими свойствами, на распространение поля по гетерогенной среде и приводящая к интегро-дифференциальному уравнению переноса. Использование концепции обобщенной производной приводит к формулам пространственной теоремы осреднения в рамках теории смесей. На основе введенного формализма сформулирована задача на функцию Грина для гетерогенной среды и найдено ее решение, отображающее коллективное влияние фаз на распространение поля по гетерогенной среде. Решение интегро-дифференциального уравнения с разрывами на осредненную функцию Грина имеет вид потенциала Юкавы. Из анализа найденных эффективных коэффициентов, примененного для гетерогенных сред с существенно различающимися свойствами фаз, предсказано наличие несущей фазы и перколяции. Представлено нахождение структурного вида коэффициента пропорциональности для высокопористых сред в законе Дарси.

Научная значимость работы заключается в учете методом обобщенной производной влияния конфигурации внутренних границ гетерогенной среды на ее эффективные свойства и распространение в ней исследуемого поля.

Практическая значимость результатов заключается в возможности использования разработанного формализма для предсказания эффективных упругих, вязко-упругих или вязкостных свойств гетерогенных материалов. В роли таких материалов могут выступать, например, композиты, геологические объекты, суспензии, материалы, получаемые при 3D-печати и многие другие. Такие материалы широко используются в различных отраслях промышленности, поэтому практическая значимость полученных результатов не вызывает сомнений. В частности, разработанный формализм может использоваться при разработке новых технологий создания материалов с заданными физико-механическими свойствами, что продемонстрировано в работе на примере материала, получающегося в результате холодного газодинамического напыления.

Достоверность результатов обеспечивается сопоставлением полученных результатов с данными существующих подходов и сравнением с экспериментальными данными. Следует отметить также тот факт, что работа прошла хорошую апробацию, была представлена на международных и всероссийских конференциях, в числе которых XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019).

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 148 страниц машинописного текста. Список литературы содержит 76 источников.

Во **введении** обосновывается актуальность, научная новизна и практическая значимость работы. Обсуждается степень разработанности темы исследования. Формулируются цель, задачи, методы исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** проводится обзор моделей, используемых в литературе для вычисления эффективных физико-механических свойств гетерогенных сред.

В **главе 2** для отображения микроструктуры гетерогенной системы вводится концепция производной в обобщенном смысле. Анализируются результаты и следствия этой концепции. Разбирается корректность постановки задачи для анализируемого уравнения переноса, в котором обычные производные заменены на обобщенные. Для модифицированного обобщенными производными оператора ищется решение на функцию Грина с последующей его интерпретацией. На основе метода условных моментов

находятся эффективные коэффициенты переноса. Проводится сопоставление с существующими подходами.

В главе 3 выводятся и анализируются выражения для эффективных упругих модулей (в рамках линейной теории упругости) при произвольной размерности рассматриваемого пространства с учетом формализма обобщенной производной. Полученные эффективные модули анализируются в широком диапазоне объемных концентраций фаз с существенно различающимися упругими свойствами. Строятся асимптотические решения, на основе которых исследуются свойства несущей фазы и обсуждается возможность структурного фазового перехода. Анализируется переход от несвязного распространения поля по системе к макроскопически связному и существование при этом признаков фазовых переходов.

В главе 4 используются результаты описанной в предыдущих главах теории для сопоставления с экспериментальными данными и обоснования способа создания объемного изделия на основе гетерогенного материала с заданными физико-механическими свойствами и составом. В рамках анализа гетерогенного материала, полученного методом холодного газодинамического напыления с последующей лазерной обработкой, предлагается математическая модель, учитывающая процесс растворения и протекание химической реакции. Проводится сопоставление с экспериментальными данными для композитных материалов, пористых материалов, материалов с фильтрационными свойствами и суспензий.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

Диссертация содержит все необходимые атрибуты научно-квалификационной работы. Структура работы выстроена последовательно и логично. Содержание автореферата полностью соответствует тексту диссертации.

Все основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих российских и международных рецензируемых журналах, в числе которых журналы “Прикладная математика и механика” и “Прикладная механика и техническая физика”. По теме работы опубликовано 8 статей, в том числе 6 статей – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ. Следует отметить, что 6 из 8 статей опубликованы соискателем без соавторов. Выполнение работы было поддержано грантами РНФ и РФФИ.

Замечания к диссертационной работе:

1. Некоторые из используемых в работе обозначений усложняют понимание материала. В частности, в одной из глав для векторов, тензоров, интегральных и дифференциальных операторов используется одинаковое обозначение – жирные курсивные латинские буквы. Не

используются символы скалярного и двойного скалярного произведения (см. например, формулы (1.17), (1.47)). В формуле (1.47), по-видимому, пропущена симметризация в определении тензора малых деформаций.

2. Из работы сложно понять, какие предположения делаются о форме включения (фаз). Возможно ли применение изложенного формализма, например, для вычисления эффективных свойств трещиноватых материалов?
3. Как обосновывается вычисление интегралов (2.19) при $e^{-ikr} = 1$ (страницы 59-61)?
4. Из текста диссертации не вполне 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 $\nu=1$. 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. Например, стр. 5 – “нахождение признаки”, стр. 6 – “удовлетворительно согласовывающегося с экспериментом”, стр. 10 – лишняя точка в заголовке, стр.11 – пропущена запятая после формулы (1.4), стр. 12 – запятая вместо точки после (1.5), стр. 13 логарифм пишется прямым шрифтом, стр. 22 – не хватает знака двойного скалярного произведения в (1.17), “здесь” написано с маленькой буквы после точки, стр. 96 – см. формулу (3.12), стр. 143 – см. источник 26.

Сделанные замечания имеют характер пожеланий и не снижают общее положительное впечатление от работы.

Считаю, что работа А.В. Мишина соответствует уровню кандидатской диссертации и обладает несомненной научной новизной, теоретической и

практической значимостью. Тема и содержание диссертации полностью соответствуют заявленным научным специальностям 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы, 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела.

Заключение. Диссертационная работа Мишина Алексея Владимирович на тему «Формализм обобщенной производной для анализа гетерогенных материалов» выполнена на высоком научном уровне, представляет собой самостоятельную, законченную научно-квалификационную работу, отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертационным исследованиям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Мишин Алексей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы, 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент, доктор
физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
лаборатории “Дискретные
модели механики”

Кузькин Виталий Андреевич

20.03.2023

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН).

Адрес: 199178, Санкт-Петербург, Большой проспект В.О., д. 61

e-mail: ipmash@ipme.ru, тел.: +7-812-321-47-78.

Я, Кузькин Виталий Андреевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и дальнейшую обработку.

Подпись В.А. Кузькина заверяю.

Подп
Нача

яю

ль

Председателю
диссертационного совета
24.1.125.01 (Д 003035.02)
академику В.М. Фомину

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОППОНЕНТА

Я, Кузькин Виталий Андреевич, даю свое согласие выступить в качестве оппонента по диссертации Мишина Алексея Владимировича соискателя на тему: Формализм обобщенной производной для анализа гетерогенных материалов на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы, 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела.

О себе сообщаю:

Ученая степень, отрасли науки	доктор физико-математических наук
Научные специальности, по которым защищена диссертация	1.1.8 - механика деформируемого твердого тела
Ученое звание	-
Академическое звание	-
Тел:	+7 981 707 87 02
E-mail:	kuzkinva@gmail.com
Должность	ведущий научный сотрудник
Подразделение организации	Лаборатория "Дискретные модели механики"
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук
Ведомственная принадлежность орг.	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации (МИНОБРНАУКИ РОССИИ)
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	199178, г. Санкт-Петербург, Большой проспект В.О., д.61
Web-сайт организации.	https://ipme.ru
Телефон организации.	+7-812-321-47-78
E-mail организации.	ipmash@ipme.ru

По теме рассматриваемой диссертации имею 11 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
1	Lapin R.L., Kuzkin V.A., Kachanov M.L.	On the anisotropy of cracked solids // International Journal of Engineering Science, 124, 2018, pp. 16-23
2	Berinskii I.E., Kuzkin V.A.	Equilibration of energies in a two-dimensional harmonic graphene lattice // Philosophical Transactions of the Royal Society A, 378(2162), 20190114 (2019)
3	Lapin R.L., Kuzkin V.A., Kachanov M.L.	Rough contacting surfaces with elevated contact areas // International Journal of Engineering Science, Vol. 145, 103171 (2019)
4	Лапин Р.Л., Кузькин В.А.	Вычисление нормальной и сдвиговой податливостей трехмерной трещины с учетом контакта между берегами // Письма о материалах, 9 (2), с. 228-232 (2019)
5	Kuzkin V.A.	Unsteady ballistic heat transport in harmonic crystals with polyatomic unit cell // Continuum Mechanics and Thermodynamics, 31, pp. 1573–1599 (2019)
6	Kuzkin V.A.	Thermal equilibration in infinite harmonic crystals // Continuum Mechanics and Thermodynamics, 31, pp. 1401–1423 (2019)
7	Kuzkin V.A., Liazhkov S.D.	Equilibration of kinetic temperatures in face-centered cubic lattices // Physical Review E 102, 042219 (2020)
8	Kuzkin V.A., Krivtsov A.M.	Ballistic resonance and thermalization in Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou chain at finite temperature // Physical Review E, 101, 042209 (2020)
9	Kuzkin V.A., Krivtsov A.M.	Unsteady ballistic heat transport: linking lattice dynamics and kinetic theory // Acta Mechanica, 232 (5), 1983-1996 (2021)
10	Panchenko A.Yu., Kuzkin V.A., Berinskii I.E.	Unsteady ballistic heat transport in two-dimensional harmonic graphene lattice // Journal of Physics: Condensed Matter, 34, 165402 (2022)
11	Liazhkov S.D., Kuzkin V.A.,	Unsteady two-temperature heat transport in mass-in-mass chains // Physical Review E, 105, 054145 (2022)

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело соискателя и их дальнейшую обработку.

БКИН
2022

ЯЮ
ЛЬ