

**Заключение диссертационного совета МГУ.011.6
по диссертации на соискание ученой степени доктора наук**

Решение диссертационного совета от 16.12.2022 г. №30.

О присуждении Соляеву Юрию Олеговичу, гражданину России, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Неклассические масштабные эффекты в прикладных моделях градиентной теории упругости и электроупругости» по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела» принята к защите диссертационным советом 10.10.2022, протокол №29.

Соискатель Соляев Юрий Олегович, 1986 года рождения, в 2009 году окончил Аэрокосмический факультет МАИ по специальности «Динамика и прочность машин». В 2011 году окончил очную аспирантуру на кафедре «Динамика и прочность машин» Аэрокосмического факультета МАИ. В 2011 году защитил в совете Д212.125.05 при МАИ диссертацию на тему «Моделирование механических свойств наноструктурированных сред на основе континуальной модели адгезионных взаимодействий» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. В 2018 году окончил вечернее отделение механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности «Математика».

Соискатель в настоящее время работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт прикладной механики Российской академии наук (ИПРИМ РАН) в должности старшего научного сотрудника и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) в должности доцента (по совместительству).

Диссертация выполнена в лаборатории Неклассические модели механики композиционных материалов и конструкций в ИПРИМ РАН.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор Лурье Сергей Альбертович, главный научный сотрудник Института прикладной механики Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Гуткин Михаил Юрьевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории Механики наноматериалов и теории дефектов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук,

2. Ерофеев Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института проблем машиностроения Российской академии наук – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

3. Никабадзе Михаил Ушангиевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры Механика композитов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова дали положительные отзывы на диссертацию.

Соискатель имеет 22 опубликованных работы по теме диссертации, из них 21 статья опубликована в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности, и одна статья опубликована в сборнике трудов конференции, индексируемом в Scopus:

1. Y. Solyaev, S. Lurie. Numerical predictions for the effective size-dependent properties of piezoelectric composites with spherical inclusions // *Composite Structures*. – 2018. – Т. 202. – С. 1099-1108. (Импакт фактор по Web of science 6.603)
2. Е.В. Ломакин, С.А. Лурье, Л.Н. Рабинский, Ю.О. Соляев. Полуобратное решение задачи чистого изгиба балки в градиентной теории упругости: отсутствие масштабных эффектов // *Доклады Академии наук. Физика, технические науки*. – 2018. – Т. 479. – V. 4. – С. 390-394. (Импакт фактор по Web of science 0.474)
3. S. Lurie, Y. Solyaev, K. Shramko. Comparison between the Mori-Tanaka and generalized self-consistent methods in the framework of anti-plane strain inclusion problem in strain gradient elasticity // *Mechanics of Materials*. – 2018. – Т. 122. – С. 133-144. (Импакт фактор по Web of science 3.266)
4. S. Lurie, Y. Solyaev. Revisiting bending theories of elastic gradient beams // *International Journal of Engineering Science*. – 2018. – Т. 126. – С. 1-21. (Импакт фактор по Web of science 7.155)
5. S. Lurie, Y. Solyaev, A. Volkov, D. Volkov-Bogorodskiy. Bending problems in the theory of elastic materials with voids and surface effects // *Mathematics and Mechanics of Solids*. – 2018. – Т. 23. – V. 5. – С. 787-804. (Импакт фактор по Web of science 2.719)
6. S. Lurie, Y. Solyaev. Anti-plane inclusion problem in the second gradient electro-elasticity theory // *International Journal of Engineering Science*. – 2019. – Т. 144. – С. 103129. (Импакт фактор по Web of science 7.155)
7. Е.В. Ломакин, С.А. Лурье, Л.Н. Рабинский, Ю.О. Соляев. Об уточнении напряжённого состояния в прикладных задачах упругости за счёт градиентных эффектов // *Доклады Академии наук. Физика, технические науки*. – 2019. – Т. 489. – V. 6. – С. 585-591. (Импакт фактор по Web of science 0.474)
8. Y. Solyaev, S. Lurie, V. Korolenko. Three-phase model of particulate composites in second gradient elasticity // *European Journal of Mechanics-A/Solids*. – 2019. – Т. 78. – С. 103853. (Импакт фактор по Web of science 4.873)
9. S. Lurie, Y. Solyaev. On the formulation of elastic and electroelastic gradient beam theories // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. – 2019. – Т. 31. – V. 6. – С. 1601-1613. (Импакт фактор по Web of science 3.285)
10. Y. Solyaev, S. Lurie. Pure bending of a piezoelectric layer in second gradient electroelasticity theory // *Acta Mechanica*. – 2019. – Т. 230. – V. 12. – С. 4197-4211. (Импакт фактор по Web of science 2.645).

11. Y. Solyaev, A. Ustenko, E. Lykosova. Refined analysis of piezoelectric micro-cantilevers in gradient electroelasticity theory // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2020. – Т. 41. – V. 10. – С. 2076-2082. (Импакт фактор по Scopus 1.4)
12. Y. Solyaev, S. Lurie, E. Barchiesi, L. Placidi. On the dependence of standard and gradient elastic material constants on a field of defects // *Mathematics and Mechanics of Solids*. – 2020. – Т. 25. – V. 1. – С. 35-45. (Импакт фактор по Web of science 2.719)
13. Y. Solyaev, S. Lurie, N. Semenov. Generalized Einstein's and Brinkman's solutions for the effective viscosity of nanofluids // *Journal of Applied Physics*. – 2020. – Т. 128. – V. 3. – С. 035102. (Импакт фактор по Web of science 2.546)
14. Y.O. Solyaev, S.A. Lurie. Eshelby integral formulas in second gradient elasticity // *Nanoscience and Technology: An International Journal*. – 2020. – Т. 11. – V. 2. – С. 99-107. (Импакт фактор по Scopus 5.1)
15. Y.Solyaev, S.Lurie. Trefftz collocation method for two-dimensional strain gradient elasticity // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 2021. – Т. 122. – V. 3. – С. 823-839. (Импакт фактор по Web of science 3.021)
16. Е.В. Ломакин, С.А. Лурье, Л.Н. Рабинский, Ю.О. Соляев. Концентрация напряжений вблизи жестких цилиндрических включений в условиях анти-плоского сдвига // *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. – 2020. – Т. 495. – V. 1. – С. 50-56. (Импакт фактор по Web of science 0.474)
17. V. Vasiliev, S. Lurie, Y. Solyaev. New approach to failure of pre-cracked brittle materials based on regularized solutions of strain gradient elasticity // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2021. – Т. 258. – С. 108080. (Импакт фактор по Web of science 4.898)
18. Y. Solyaev, Lurie S. Electric field, strain and inertia gradient effects on the anti-plane waves propagation in piezoelectric materials // *Journal of Sound and Vibration*. – 2021. – Т. 494. – С. 115898. (Импакт фактор по Web of science 4.761)
19. Y. Solyaev, A. Ustenko. On the dispersion relations for the anti-plane surface wave in the second gradient electroelasticity // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2021. – Т. 42. – V. 8. – С. 1935-1943. (Импакт фактор по Scopus 1.4)
20. S. Lurie, A. Kalamkarov, Y. Solyaev, A. Volkov. Dilatation gradient elasticity theory // *European Journal of Mechanics-A/Solids*. – 2021. – Т. 88. – С. 104258.. (Импакт фактор по Web of science 4.873)
21. Y. Solyaev, S. Lurie, H. Altenbach, F. Dell'Isola. On the elastic wedge problem within simplified and incomplete strain gradient elasticity theories // *International Journal of Solids and Structures*. – 2022. – Т. 239. – С. 111433. (Импакт фактор по Web of science 3.667)

На диссертацию и автореферат поступило 3 дополнительных отзывов, все положительные.

Выбор официальных оппонентов обоснован компетентностью данных ученых в изучении задач механики деформируемого твердого тела, а также имеющимися у них научными публикациями по теме диссертации и способностью определить научную и практическую значимость исследования.

Диссертационный совет МГУ.011.6 отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является законченной, самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, связанной с развитием методов описания неклассических масштабных эффектов в механике деформируемого твердого тела, в которой решены важные научно-технические задачи, направленные на разработку методов построения аналитических и численных решений в градиентной теории упругости и электроупругости, развитием масштабозависимых балочных моделей, разработкой методов микромеханики, учитывающих влияние размера включений, описанием масштабного эффекта прочности для квази-хрупких материалов, а также развитием методов идентификации дополнительных масштабных параметров в градиентных теориях.

Тема диссертации Соляева Ю.О. актуальна, имеет теоретическое и прикладное значение. Теоретическая значимость работы определяется предложенным новым упрощенным представлением общего решения уравнений равновесия градиентной теории упругости, а также построенными новыми аналитическими решениями, которые могут быть использованы для тестирования прикладных моделей и для обработки экспериментальных данных. Практическая значимость работы определяется развитием методов численного моделирования в рамках градиентных теорий, которые могут быть использованы для построения решений, не зависящих от размера сетки, в задачах с линейно упругими телами с негладкой геометрией или с разрывными граничными условиями. Практическая значимость также определяется развитием и реализацией методов идентификации масштабных параметров градиентных теорий.

Достоверность полученных результатов определяется применяемыми строгими методами механики деформируемого твердого тела, привлечением вариационных принципов для формулировки моделей, использованием апробированных методов микромеханики композиционных материалов, методов теории дифференциальных уравнений, векторного и тензорного анализа; проводится сопоставление решений, получаемых на основе различных аналитических и численных методов, для оценки корректности последних; проводится сопоставление результатов моделирования с известными экспериментальными данными, для подтверждения результатов расчетов и идентификации дополнительных параметров моделей.

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку:

- 1) Показано, что общее решение в перемещениях для уравнений равновесия градиентной теории упругости (ГТУ) может быть представлено в виде аддитивного разложения на классическую часть, представляемую в стандартной форме Папковича-Нейбера, и градиентную часть, для которого используется модифицированное разложение Гельмгольца. Предлагаемое представление позволяет свести решение задачи ГТУ к отысканию скалярных потенциалов, которые удовлетворяют уравнению Лапласа и модифицированному уравнению Гельмгольца.
- 2) Построенные аналитические и численные решения для задач о включениях и реализованные методы осреднения в ГТУ и в градиентной теории электроупругости (ГТЭ) позволяют описывать повышение эффективных механических и электромеханических характеристик композиционных материалов при уменьшении размера включений и при отсутствии их агломерации. Причиной возникающего масштабного эффекта является дополнительное условие непрерывности нормальных градиентов перемещений (и потенциала поля) на границе контакта фаз.
- 3) Показано, что прямые и энергетические подходы к определению эффективных свойств неоднородных сред в ГТУ и ГТЭ эквивалентны, что позволяет использовать численное моделирование и замкнутые решения прямых методов для достоверного прогноза эффективных свойств композитов с учетом размера включений. Отличие в прогнозах прямых методов возникает при осреднении тензоров концентрации по объему включений, что приводит к погрешностям при больших объемных содержаниях малоразмерных включений.
- 4) Предложенный полуобратный метод для решения задач изгиба в градиентных теориях позволяет построить замкнутые трехмерные решения и проверить корректность одномерных градиентных балочных теорий. Построенные полуобратные решения и предложенный модифицированный вариационный подход позволили сформулировать новую градиентную теорию пьезоэлектрических балок.
- 5) Реализованный смешанный метод конечных элементов позволяет получать достоверные сходящиеся решения для задач ГТУ и ГТЭ, содержащих области с угловыми точками, трещинами и сосредоточенными нагрузками.
- 6) На основе численного моделирования в ГТУ показана возможность описания размерных эффектов в отношении зависимости номинальной прочности хрупких и квази-хрупких материалов от длины и ориентации трещин. Обработка данных по испытаниям образцов с различными типами трещин позволяет идентифицировать дополнительные масштабные параметры ГТУ. Для прогноза разрушающих нагрузок в условиях смешанной I/II моды в рамках ГТУ необходимо привлекать обобщенный критерий, учитывающий триаксиальность напряженного состояния.
- 7) На основе построенных асимптотических решений для обобщенной задачи Фламана установлен класс градиентных теорий, которые обеспечивают регуляризацию поля перемещений, деформаций и напряжений, и, как следствие, отсутствие сеточной зависимости решений в задачах для тел с нагруженными острыми кромками.
- 8) Предложенная формулировка динамической ГТЭ, учитывающая градиентные инерционные эффекты, позволяет корректно описывать нормальную пространственную дисперсию высокочастотных объемных и поверхностных электроакустических волн.

На заседании 16.12.2022 года диссертационный совет принял решение присудить Соляеву Юрию Олеговичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них докторов наук по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела» – 11 человек, участвовавших в заседании, из 16 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» – 12, «против» – 0, «недействительных бюллетеней» – 0.

Председатель совета,
д.ф.-м.н., проф., академик РАН

Горячева И. Г.

Ученый секретарь совета,
к.ф.-м.н.

Чистяков П. В.