

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 26.06.2018 № 16

О присуждении Кузнецовой Юлии Сергеевне, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Метод геометрического погружения на основе вариационного принципа Кастильяно и его численная реализация» по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела» принята к защите 23.04.2018, протокол № 10, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

Соискатель Кузнецова Юлия Сергеевна, 1989 года рождения, в 2012 г. окончила ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по специальности «Динамика и прочность машин», квалификация «Инженер по специальности «Динамика и прочность машин». В 2016 г. окончила аспирантуру очной формы обучения в Пермском национальном исследовательском политехническом университете по научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела. В настоящее время работает ассистентом кафедры вычислительной математики и механики Пермского национального исследовательского политехнического университета. Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Шардаков Игорь Николаевич, профессор кафедры механики сплошных сред и вычислительных технологий (по совместительству – ведущий научный сотрудник Научно-образовательного центра авиационных композитных технологий) ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Официальные оппоненты:

1. Шешенин Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теории пластичности ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова» (г. Москва),

2. Вахрушев Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Институт механики ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН», главный научный сотрудник лаборатории механики наноструктур (г. Ижевск),

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула, в своем положительном заключении, составленном Маркиным Алексеем Александровичем, д.ф.-м.н., профессором кафедры вычислительной механики и математики; и утвержденном проректором ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», профессором Кухарь Владимиром Денисовичем, указала, что диссертация является законченной научно-исследовательской работой, имеющей научное и практическое значение. Представленная диссертационная работа «Метод геометрического погружения на основе вариационного принципа Кастильяно и его численная реализация» удовлетворяет критериям Положения ВАК России «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Кузнецова Юлия Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твёрдого тела».

Соискателем опубликовано 11 научных работ, в том числе 2 статьи в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК, и 1 публикация, входящая в систему цитирования Web of Science:

1. Деревянкина П.О., Кузнецова Ю.С., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Теоретические положения метода геометрического погружения в напряжения // Вычислительная механика сплошных сред — Computational continuum mechanics. – 2014. – Т.7, № 3. – С. 317-330.
2. Кузнецова Ю.С., Труфанов Н.А. МКЭ-реализация метода геометрического погружения в напряжения на примере плоских задач теории упругости // Вычислительная механика сплошных сред — Computational continuum mechanics. – 2014. – Т.7, № 4. – С.460-471.
3. Kuznetsova Y.S., Vorobyev N.A., Trufanov N.A. Application of the geometric immersion method based on the Castigliano variational principle for the axisymmetric problems of elasticity theory // IOP: Materials Science and Engineering. – 2016. – P.726-732. (Web of Science).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Шешенина С.В. В отзыве представлен анализ содержания диссертации, отмечается актуальность темы диссертации; новизна, достоверность результатов, теоретическая и практическая значимость работы. Оппонент отмечает следующие замечания и пожелания:

- В списке литературы следовало бы указать следующие публикации, которые соответствуют рассматриваемой теме и не упомянуты в списке литературы: 1. Коновалов А.Н. Решение задачи теории упругости в напряжениях. Новосибирск, издательство НГУ, 1979, 92 с.; 2. Победря Б.Е., Шешенин С.В., Холматов Е. Задача в напряжениях. Издательство ФАН, 1988, 198 с.; 3. Ostoja-Starzewski, M. (2018). Ignaczak equation of elastodynamics. Mathematics and Mechanics of Solids. DOI: 10.1177/1081286518757284.

- В диссертации написано, что перемещения принадлежат пространству H^3 , напряжения – H^2 . Не являются ли эти требования гладкости ограничительными для рассмотрения задач с разрывными напряжениями?

- На стр. 28 сказано, что вариационное уравнение (2.14) имеет единственное решение согласно теореме Лакса - Мильграма. У рецензента возник вопрос, где в работе проверено выполнение условий этой теоремы.

- Было бы полезным продемонстрировать результативность сочетания метода погружения и постановки в напряжениях на примере трехмерной задачи.

- Относительно задач глав три и четыре хочется отметить, что было бы интересно рассмотреть большие по размеру сетки и указать время решения разными подходами.

2. Положительный отзыв официального оппонента Вахрушева А.В. В отзыве отмечается актуальность исследования, которая следует из высокой сложности и трудоемкости расчетов задач теории упругости в напряжениях, научная новизна, достоверность представленных результатов, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы; проведен анализ структуры и объема диссертации. Оппонент считая, что «приведенные замечания и вопросы не снижают общей высокой оценки работы и могут рассматриваться как рекомендации для дальнейшего развития темы исследований», отмечает следующие замечания:

- Сравнение результатов расчетов полей напряжений МКЭ и МГП (рис.3.3-3.5;4.4-4.6) следовало выполнять по разности соответствующих компонентов тензоров напряжений или инвариантов тензоров. При этом области расхождения результатов расчетов разными методами проявляются более четко.

- Не указаны ограничения на соотношения сторон прямоугольных конечных элементов. Какое их максимальное соотношение допускается?

- Результаты расчетов амортизаторов приведены для условий статического нагружения. Однако эти элементы должны работать и при динамическом нагружении. В каких пределах можно использовать результаты расчетов МГП?

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается, что диссертация является законченной научно-исследовательской работой, имеющей научное и практическое значение; написана литературным языком, грамотно, стиль изложения доказательный. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в ряде академических вузов и институтов, в учебном процессе для студентов, изучающих механику деформируемого твердого тела. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- Подробное изложение на стр. 31-34 процедуры получения из принципа Кастильяно дифференциальной постановки задачи представляется излишним, тем более что указаны источники данных преобразований.

- Следовало указать связь между «основополагающим для метода геометрического погружения» уравнением (2.25) и используемым для решения конкретных задач уравнением (2.32).

- Норма пространства напряжений, определенная в виде (2.12), представляет интеграл по объёму от свертки тензора напряжений с собой. Будет ли сходимость решения в этой

норме приводить к сходимости компонент тензора напряжений?

- На графиках 4.11 - 4.12 отсутствуют числовые значения величин радиуса R , а на рисунке 4.13 отсутствуют размерности всех представленных величин.
- В диссертации не указано какие конечные элементы использовались для сравнения с МГП.

На автореферат поступило 9 отзывов:

1. Положительный отзыв от Бердышева В.И., академика РАН, д.ф.-м.н., профессора Института математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН, г. Екатеринбург (1 замечание);
2. Положительный отзыв от Ватульян А.О., д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой теории упругости ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону (2 замечания);
3. Положительный отзыв от Гордон В.А., д.т.н., профессора, заведующего кафедрой высшей математики ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел (4 замечания);
4. Положительный отзыв от Дементьева В.Б., д.т.н., руководителя института механики Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Ижевск (1 замечание);
5. Положительный отзыв от Ерофеева В.И., д.ф.-м.н., профессора, директора Института проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород (без замечаний).
6. Положительный отзыв от Киреева И.В., к.ф.-м.н., доцента, старшего научного сотрудника отдела Вычислительной механики деформируемых сред ИВМ СО РАН, г. Красноярск (2 замечания).
7. Положительный отзыв от Ковалева А.В., д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой Механики и компьютерного моделирования ФГБОУ Воронежского государственного университета и Минаевой Н.А., д.ф.-м.н., профессора кафедры Механики и компьютерного моделирования ФГБОУ Воронежского государственного университета, г. Воронеж (2 замечания);
8. Положительный отзыв от Ломакина Е.В., члена-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой теории пластичности ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва (1 замечание).
9. Положительный отзыв от Филимонова М.Ю., д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника Института математики и механики им. Н.Н.Красовского Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург (1 замечание).

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- Отмечая возможность двусторонней оценки точного решения посредством решений в перемещениях и в напряжениях, автор мог бы пояснить, что речь идет об оценке лишь энергетических показателей.
- При изложении различных аспектов МГП сформулировано требование липшицевости границы. Из изложения исследований, проведенных в диссертации, неясно, насколько предлагаемый подход дает точные результаты для областей с

границами, где это требование нарушается, т.е. для областей с угловыми точками или ребрами.

- При осуществлении сравнения с результатами, полученными с помощью МКЭ, отсутствует информация о сравнении временных ресурсов.
- Как известно, число итераций сильно зависит от начального приближения, в качестве которого автор всегда берет нулевое поле напряжений. Не лучше ли будет взять решение параметрической задачи (5) при $\square=1$? Тогда исчезает интеграл по области D_Δ , которая может иметь сложную форму, и остается лишь интеграл по канонической области D_0 , имеющей простую форму, и, следовательно, поддающейся тривиальной дискретизации, что упрощает вычисление интеграла и позволяет относительно легко получить это самое начальное приближение.
- На рис. 7 и 8 автор приводит цветные картины поля напряжений, полученные двумя различными методами, и утверждает, что эти результаты «достаточно близки». Между тем, по этим рисункам можно судить скорее о различии, чем о сходстве результатов. Видимо, здесь следовало выполнить визуализацию с помощью традиционных изолиний.
- Остается невыясненным вопрос об универсальности метода, понимаемой как его неизменная целесообразность. Так, если исходная область D имеет сложную криволинейную границу, а ее площадь меньше площади области-дополнения D_Δ , то дискретизация D_Δ потребует больше конечных элементов, чем дискретизация исходной области D , и задача окажется более громоздкой по сравнению с исходной.
- Каковы перспективы приложения метода в более сложных задачах: при больших деформациях, для упругопластических материалов, в задачах с неявными граничными условиями (контактные задачи)?
- Из автореферата не ясно, каким образом был проведен эксперимент и какие значения напряжений получены в его результате.
- В автореферате отсутствуют данные об эффективности рассматриваемой версии МГП по сравнению с традиционным МКЭ.
- Не ясно, какова вычислительная сложность возникающих задач линейной алгебры (числа обусловленности, степень разреженности матриц систем линейных уравнений)
- В граничных условиях для (7) нагрузка указана переменной ($y_{xx}(a, y) = P(y)$), хотя в постановке задачи говорится о равномерном распределении.
- В качестве результатов для сравнения можно было бы воспользоваться результатами, полученными при помощи пакетов инженерного анализа, например, ANSYS.
- В автореферате отсутствует сравнение результатов расчетов с какими-либо экспериментальными данными для рассмотренных практических задач
- Было бы интересным сравнить результаты распределения компонент тензора напряжений по кромке стального элемента, полученные методом геометрического погружения и представленные на рисунке 5, с результатам полученными традиционным подходом с использованием принципа Лагранжа при значениях коэффициента Пуассона приближающемся к значению 0,5.

В отзывах отмечено, что диссертация выполнена на высоком научном уровне, является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области механики, имеют большое число публикаций с результатами теоретических и экспериментальных исследований в механике; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», широко известна своими достижениями в области вычислительной математики и механики, в университете активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования, основанные на достижениях математики, вариационного исчисления, механики и прикладной математики.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана и реализована в конечно-элементной постановке модификация метода геометрического погружения на основе вариационного принципа Кастильяно;

предложены итерационная процедура вариационного метода геометрического погружения (МГП) в напряжениях; алгоритм реализации конечномерного аналога вариационного уравнения МГП на основе метода конечных элементов в напряжениях для решения линейных задач теории упругости;

доказана эффективность использования разработанного подхода для анализа напряженного состояния конструкций сложной конфигурации, в том числе для тел из несжимаемого или слабосжимаемого материала;

введены нормы для оценки сходимости предложенных итерационных алгоритмов в соответствующих Соболевских пространствах.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

созданы теоретические основы нового варианта метода геометрического погружения в напряжениях, позволяющего свести отыскание обобщенного решения задачи в области произвольной конфигурации к итерационной последовательности задач в области канонической формы;

получено вариационное уравнение МГП в напряжениях; установлены дополнительные уравнения в дифференциальной постановке краевой задачи теории упругости, определяющие возможные граничные условия на новых границах канонической области, возникших в результате осуществления процедуры погружения;

доказаны теоремы о сходимости вариационно-итерационной процедуры варианта метода геометрического погружения в напряжения на основе вариационного принципа Кастильяно.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):

использован комплекс аналитических и численных методов исследования напряженно-деформированного состояния для решения двумерных задач линейной теории упругости;

изложены основные положения модификации метода геометрического погружения на основе вариационного принципа Кастильяно;

раскрыты особенности применения разработанного подхода для анализа напряженного состояния тел сложной формы, в том числе для конструкций из несжимаемого и слабосжимаемого материала;

изучены параметры области практической сходимости конечномерного аналога предлагаемого варианта МГП для задач теории упругости задач в напряжениях;

проведена модернизация существующего метода геометрического погружения на основе вариационного принципа Лагранжа для использования ее для принципа Кастильяно.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны теоретические положения вычислительного алгоритма, позволяющего осуществлять конечно-элементную процедуру решения статических задач теории упругости в напряжениях, который может быть предложен для внедрения в коммерческие программы Ansys, Abaqus и т.п.;

определена возможность использования нового варианта метода геометрического погружения на основе вариационного принципа Кастильяно;

создан и реализован комплекс алгоритмов и программ для решения краевых задач линейной теории упругости в напряжениях для тел сложной формы на основе принципа Кастильяно, в том числе для задач из несжимаемого или слабосжимаемого материала;

представлен численный алгоритм, позволяющий свести краевую задачу теории упругости в напряжениях, сформулированную на сложной области, к итерационной последовательности задач на канонической области.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена на основе аппарата классической механики, с использованием основ функционального анализа;

идея базируется на основных положениях метода геометрического погружения;

использованы для сравнения известные аналитические решения рассмотренных классических задач линейной теории упругости; современные апробированные численные методы, для которых в работе исследована сходимость получаемых решений;

установлено удовлетворительное качественное и количественное соответствие полученных в работе численных решений методом геометрического погружения в

