

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, доцента кафедры математического моделирования в механике ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет» Степановой Ларисы Валентиновны на диссертационную работу Рязанцевой Елены Анатольевны «Метод граничных состояний в задачах теории упругости с сингулярностями физического и геометрического характера», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Проблема построения точных и приближенных решений плоских задач теории упругости с угловыми точками, трещинами и вырезами является актуальной проблемой современной механики деформируемого твердого тела. Изучению указанной проблемы и посвящена диссертация Рязанцевой Е.А. «Метод граничных состояний в задачах теории упругости с сингулярностями физического и геометрического характера», в которой с помощью метода граничных состояний исследуются плоские задачи теории упругости с нерегулярной границей.

Диссертационная работа Рязанцевой Е.А. «Метод граничных состояний в задачах теории упругости с сингулярностями физического и геометрического характера» состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и одного приложения. Во введении работы приводится обзор научной литературы, посвященной тематике диссертационной работы. Подробному описанию метода граничных состояний и его применению для решения различных классов задач посвящен раздел 1.2. Во второй главе приводится краткая классификация особенностей физического характера, предложена методика формирования базисных функций с учетом специальных решений, «схватывающих» особенность физического характера. На конкретных примерах продемонстрирована эффективность метода. Третья глава посвящена изучению задач теории упругости, содержащих особенности геометрического характера (клин). Также проведено исследование задач теории упругости, содержащих как геометрическую особенность (клин), так и физическую особенность (сосредоточенную силу). Рассмотрена задача о нагружении клиновидной области с круговым отверстием.

1. **Диссертационная работа посвящена актуальным вопросам механики деформируемого твердого тела и содержит новые результаты, которые представляют собой непосредственное развитие и обобщение результатов предшествующих работ, посвященных методу граничных состояний.**

2. Решения плоских задач теории упругости для тел с нерегулярными границами **имеют теоретическую и практическую ценность.** Теоретическую ценность представляет собой методика формирования базиса функций, описывающих внутреннее состояние среды, основанная на развитии метода граничных состояний применительно к плоским задачам теории упругости,

содержащим особенности физического и геометрического характера. Практическую ценность представляет алгоритм численной реализации указанной методики и решения конкретных краевых задач, содержащих сингулярности физического и геометрического характера (к сожалению, сам алгоритм численной реализации методики в работе не приводится).

3. Основные результаты диссертации отражены в 13 печатных работах, из которых 2 опубликованы в журналах, входящих в список журналов, рекомендованных ВАК для публикации результатов работ на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Замечания

1. К сожалению, в тексте диссертационной работы допущено большое количество опечаток и стилистических неточностей. После чтения диссертационной работы сложилось впечатление, что текст работы совсем не вычитывался. Например, в диссертации замечены следующие опечатки.

1. Стр. 8, п.3: предложение «Получено подтверждение актуальности использования методики формирования базиса пространств состояний с учетом специальных решений.» следует читать как «Получено подтверждение актуальности использования методики формирования базиса пространств состояний с учетом специальных решений.».

2. Стр. 9, 5 строка сверху: следует читать: на межрегиональных конференциях, а не на конференции.

3. Стр. 11: в предложении «**Во втором параграфе проводится решение задачи о нагружении каплевидной области, имеющую клиновидную особенность**» следует поправить окончание и читать его как «**Во втором параграфе проводится решение задачи о нагружении каплевидной области, имеющей клиновидную особенность**».

4. Стр. 11. В предложении «**Произведено вычисление суммы Бесселя, показавшая насыщение элементов базиса,...**» следует поправить окончание «**Произведено вычисление суммы Бесселя, показавшей насыщение элементов базиса**».

5. Стр. 11: последнее предложение «**В заключении приведены основные результаты, сформулированы и обоснованы выводы, основанные на проведенных исследованиях.**» необходимо также исправить и читать его как «**В заключении приведены основные результаты, сформулированы и обоснованы выводы, основанные на проведенных исследованиях.**»

6. Стр. 12, 3 строка снизу: пропущена запятая и отсутствует точка в конце предложения.

7. Стр. 13, 10 строка снизу: метод Филоненко – Бородича, который основан, а не основа

8. Стр. 13: фразу «**причём первый отвечает обобщённые кинематические напряжения...**» следует читать как «**причем первый отвечает обобщенным кинематическим напряжениям**».

9. Стр. 13: последнее предложение: «**Метод Купрадзе (невариационный) [30] опирается на матрицы Грина, основанных на интегральных**

представлениях перемещений» следует читать как «Метод Купрадзе (невариационный) [30] опирается на матрицы Грина, основанные на интегральных представлениях перемещений»

10. Стр. 14, 4 строка сверху: Основываясь на методе Купрадзе, а не на метод Купрадзе.

11. Стр. 14, 7 строка снизу: предложение «**Метод граничных состояний (МГС) является прямым численным методом, основанный на разложение в ряд Фурье»** следует читать как «Метод граничных состояний (МГС) является прямым численным методом, основанным на разложении в ряд Фурье».

12. Стр. 15, фраза «**в трудах. Иваницева Д. А. [23, 24, 25, 26]**» содержит лишнюю точку.

13. Стр. 16, фраза «**В рамках данного исследования, была рассмотрены первая, вторая и основная контактная задачи»** должна быть следующей «**В рамках данного исследования были рассмотрены первая, вторая и основная контактная задачи»**.

14. Стр. 16, фразу «**В рамках данного исследования были решены первая и вторая основная задача для упругого шарового сектора, нагруженного объёмными силами и подверженному температурному воздействию вдоль границы»** следует читать как «**В рамках данного исследования были решены первая и вторая основная задача для упругого шарового сектора, нагруженного объёмными силами и подверженного температурному воздействию вдоль границы»**.

15. Стр. 19, 4 строка снизу слово «**ложиться»** следует заменить на «**ложится»**.

16. Стр. 21, предложение «**Получение точных решений для задач механики деформированного твердого тела с границей на которой наблюдается присутствие особенностей, достаточна мала»** следует просто заменить, оно грамматически не верно. По всей видимости, смысл этого предложения таков «**Вероятность получения точных решений задач механики деформируемого твердого тела для тел с границей, на которой присутствуют особенности, достаточна мала»**.

17. Стр. 21, 12 строка сверху: фразу «**требует дополнительное исследование»** следует заменить на «**требует дополнительного исследования.»**

18. Стр. 21, последняя строка: «**работах Панасюка В.В., Саврюка М.П., Дацышина А.П.»** содержит опечатку «**работах Панасюка В.В., Саврука М.П., Дацышина А.П.»**

19. Стр. 22, фразу «**Панасюк В.В, Стадник М.М., Силованюка В.П. Саврюка М.П. [44] посвятили свое исследование изучению распределения напряжений около трещин в двумерных телах»** следует читать как «**Панасюк В.В, Стадник М.М., Силованюк В.П. Саврук М.П. [44] посвятили свое исследование изучению распределения напряжений около трещин в двумерных телах»**.

20. Стр. 22: предложение «**Мазья В.Г., Кондратьев В.А и Пламеневский Б.А. [29, 34]) внесли огромный вклад в исследовании поведения решений задач теории упругости в окрестности сингулярных точек границы.»** содержит неправильное окончание и должно быть изменено на «**Мазья В.Г., Кондратьев В.А и Пламеневский Б.А. [29, 34]) внесли огромный вклад в исследование**

поведения решений задач теории упругости в окрестности сингулярных точек границы.».

21. Стр. 22, последний абзац содержит предложение «Монографии Партона В.З., Перлина И.И. [45, 46] посвящена изучению особых решений краевых задач.», которое следует читать как «Монографии Партона В.З., Перлина И.И. [45, 46] посвящены изучению особых решений краевых задач.»

22. Стр. 23. Предложение «Нахождению точной структуры упругого поля вершины тела, так называемая задача на собственные числа и собственные векторы, были посвящены работы [135], [136].», по всей видимости, следует читать как «Нахождению точной структуры упругого поля вблизи вершины углового выреза или клина, и связанной с этой проблемой задаче на собственные числа и собственные векторы, были посвящены работы [135], [136]».

23. Стр. 23, 12 строка снизу: фразу «а также синтезированным методом, включающий в себя как метод интегрирования по контуру так и метод конечных элементов [154].» следует читать как «а также синтезированным методом, включающим в себя как метод интегрирования по контуру, так и метод конечных элементов [154].».

24. Стр. 23. Предложение «Работы [158], [159], [114], [115], [116], [152] используя метод сингулярных конечных элементов, обосновали способы нахождения неизвестных коэффициентов напряжений в вершине различных видов трещин.» следует читать как «В работах [158], [159], [114], [115], [116], [152] с помощью метода сингулярных конечных элементов обоснованы способы нахождения неизвестных коэффициентов напряжений в вершине различных видов трещин.»

25. Стр. 24, 12 строка сверху фраза «Решения для трещин в изотропном материале получено в работах» должна быть заменена на «Решения для трещин в изотропном материале получены в работах».

26. Стр. 25, в последней строке пропущена запятая.

27. Стр. 28. Предложение «Сомаратиа и Тинг [151] посвятили свое исследование применению метода конечных элементов, разработанный в [91] для определения угловых трещин в анизотропных материалах.» следует понимать как «Сомаратиа и Тинг [151] посвятили свое исследование применению метода конечных элементов, разработанного в [91], для определения показателей сингулярности напряжений в окрестности угловых трещин в анизотропных материалах.» Указанные авторы не определяли угловые трещины, они решали краевую задачу для области с угловыми трещинами.

28. Стр. 28. Предложение «Накамура и Паркс [134], также используя метод конечных элементов, определили, что сингулярность напряжений, возникшей в окрестности пересечения фронта трещины и свободной поверхности, зависит от коэффициента Пуассона» требует изменение окончания: «Накамура и Паркс [134], также используя метод конечных элементов, определили, что сингулярность напряжений, возникшая в окрестности пересечения фронта трещины и свободной поверхности, зависит от коэффициента Пуассона».

29. Стр. 29. Нарушен падеж в предложении «Работа [102] посвящена разработки..» и его следует читать как «Работа [102] посвящена разработке...».
30. Стр. 29, 5 строка снизу: «применение преобразование Меллина к исходным плоским граничным интегральным уравнениям» следует читать как «применение преобразования Меллина к исходным плоским граничным интегральным уравнениям».
31. Стр. 30, 2 строка сверху содержит лишнюю точку.
32. Стр. 32, 12 строка сверху содержит лишнюю точку, а в конце предложения, напротив, точки нет.
33. Стр. 37, 2 строка снизу: в предложении «Напряжения через функции однозначны» пропущено сказуемое и должно быть скорректировано «Напряжения выражаются через функции следующим образом:».
34. Стр. 40: в предложении, содержащем формулу (2.21), не хватает точки.
35. Стр. 40: фамилия Вейерштрасс приводится с опечаткой.
36. Стр. 42: слово «длина» пишется с одной буквой «н».
37. Стр. 44. Не понятен смысл предложения: «В силу необозримости полученных аналитических форм, решения представим в виде механических полей соответствующих компонент вектора перемещения, тензора деформаций и тензора напряжений.». О каких аналитических формах идет речь? Что значит представить решение в виде механических полей? По всей видимости, речь идет о громоздких формулах (а не формах), которые не приводятся, а решение иллюстрируется графиками распределения компонент тензора напряжений и вектора перемещений.
38. Стр. 50, 13 строка сверху: фразу «увеличение напряжение» следует заменить на «увеличение напряжения».
39. Стр. 51: предложение «На рисунке 2.15 представлены восстановленная в ходе решения компонента усилия на границе при 21 удержанном коэффициенте ряда Фурье» следует читать как «На рисунке 2.15 представлена восстановленная в ходе решения компонента усилия на границе при 21 удержанном коэффициенте ряда Фурье».
40. Стр. 55, параграф 2.4. Параграф носит название «Учет специального решения в задаче о растяжении диска воздействиями, распределенными по полуокружности». Не совсем понятно, почему сразу при формулировке физической постановки задачи говорится, что «приложена к границе полуплоскости нагрузка, заданная по закону». О какой полуплоскости идет речь, если нагрузка прикладывается к полуокружности.
41. Стр. 64, первая строка сверху: Рассматриваются уравнения Ламе, а не рассматривается уравнения.
42. Стр. 64, 6 строка сверху: нарушена нумерация формул: подставим (3.13) в (3.12).
43. Стр. 66, последнее предложение: нарушена нумерация формул, поскольку мы не можем воспользоваться решениями (3.12) так как (3.12) это дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях.
44. Стр. 66. Название параграфа «Учет специального решения в задаче о нагружении каплевидной области, имеющую клиновидную особенность»

следует читать как «Учет специального решения в задаче о нагружении каплевидной области, имеющей клиновидную особенность».

45. Стр. 67. Некоторые фразы в диссертационной работе просто не понятны: «Ввиду необозримости полученных значений компонент тензоров деформаций и напряжений, они представлены в виде механических полей.» Напряжения и деформации сами являются механическими полями.

46. Стр. 85. 11 ссылка: первым автором является Бреббия К.

47. Стр. 85 19 ссылка содержит опечатку.

48. Стр. 88. Инициалы одного из авторов ссылки 41 указаны неверно.

49. Стр. 102, 2 строка снизу: «обезразмеривается уравнения» следует заменить на «обезразмериваются уравнения». В целом, на мой взгляд, необходимо избегать термина «обезразмеривается», а применять словосочетание «приводится к безразмерному виду».

50. В целом, в диссертационной работе много опечаток в словах: стр. 19: согласованных; стр. 25 обобщение; стр. 84 Съезд по теоретической и прикладной механике; стр. 95 название статьи «Stress singularities in anisotropic multi-material wedges and junctions » и другие.

Такое большое количество опечаток существенно затрудняет чтение и понимание диссертационной работы.

2. Считаю, что работа недостаточно апробирована. Результаты диссертационной работы изложены в двух журналах (Вести высших учебных заведений Черноземья. Научно-технический и производственный журнал (раздел Математическое моделирование) и Наука и бизнес: пути развития. Научно-практический журнал), включенных в список журналов, рекомендованных ВАК для публикации результатов работ на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Однако в журналах отсутствует раздел Механика. Опубликованные статьи имеют объем, равный 5 страницам, и содержат очень краткое изложение результатов.

3. Раздел механики, которому посвящается настоящая диссертационная работа, носит название «Механика деформируемого твердого тела», а никак не «механика деформированного твердого тела» (диссертация, стр. 14, 4 строка снизу; стр. 21, 3 строка сверху; стр. 21, 2 строка снизу).

4. Библиографический список мог быть значительным образом расширен за счет литературы, опубликованной в последнее время. В приведенном списке литературы ссылки на работы 2005 -2015 гг. принадлежат только своей научной школе (подавляющее большинство). Например, можно было бы сослаться на диссертационную работу Накаряковой Т.О. «Исследование сингулярности напряжений в вершине круговых и некруговых конусов», 2009, где приведен обзор литературы по решениям для тел с нерегулярной границей. Можно было бы показать актуальность рассматриваемой проблемы, приведя ссылки на самые последние публикации по материалам международных конференций и публикаций в ведущих научных журналах, например, вопросам изучения полей

напряжений в окрестности угловой точки посвящен доклад Koguchi H., Hirasawa Y. Singular stress analysis near edge of a bump on substrate using molecular dynamics// 11 th. World Congress on Computational Mechanics. July 20-25, 2014, Barcelona, Spain. Список работ, посвященных данной тематике и опубликованных в самое последнее время, может быть продолжен: Chen Y.C., Hwu C. Boundary element method for vibration analysis of two-dimensional anisotropic elastic solids containing holes, cracks or interfaces// Engineering analysis with boundary elements. 2014. V. 40. P. 22-35. Поэтому в литературном обзоре хотелось бы видеть более подробный и детальный анализ результатов, полученных Пеньковым В.Б., Пеньковым В.В., Харитоненко А.А., Иванычевым Д.А., а также анализ последних публикаций по данной тематике в мировой научной периодической литературе.

5. К сожалению, в диссертационной работе не приводится ни для одной из анализируемых задач полученное решение, его окончательный вид и структура. Все краевые задачи, сформулированные в работе, не содержат строгой математической постановки. (Например, на каком участке приложена нагрузка в задаче нагружении каплевидной области, имеющей клиновидную особенность? Как этот характерный размер влияет на решение? Угол α указан как угол раствора клина, но по постановке задачи это - угол полураствора клина.) Приводится физическая постановка задачи (описательная часть проблемы), метод решения – метод граничных состояний, а далее сразу приводятся графики распределения полей напряжений и перемещений. По всей видимости, результаты вычислений правильные, однако восстановить решения задач по тому изложению, которое имеется в диссертационной работе, не представляется возможным.

Следующие замечания тесно связаны с предыдущим замечанием.

6. При построении решения задач с помощью метода граничных состояний соискатель предлагает использовать специальное решение, позволяющее отразить особенность физического или геометрического характера, имеющуюся в задаче. Остается не вполне ясным, общее решение задачи строится посредством суперпозиции решений: т.е., специальное решение просто прибавляется или прибавляется с масштабным (амплитудным множителем)? Данный вопрос естественным образом возникает из классических решений линейной механики разрушения для двугранного угла или трещины, полученных с помощью метода разложения по собственным функциям (это решение – решение Вильямса приводится в диссертационной работе). Асимптотическое решение строится с точностью до масштабного множителя, отражающего геометрию образца с угловым вырезом или трещиной. Как учитывается этот множитель в данной диссертационной работе (множители C (стр. 65, формула (3.21) и D стр. 65, формула (3.22))? Эти множители каким либо образом учитывались (определялись) в специальном решении в задаче о нагружении каплевидной области, имеющей клиновидную особенность?

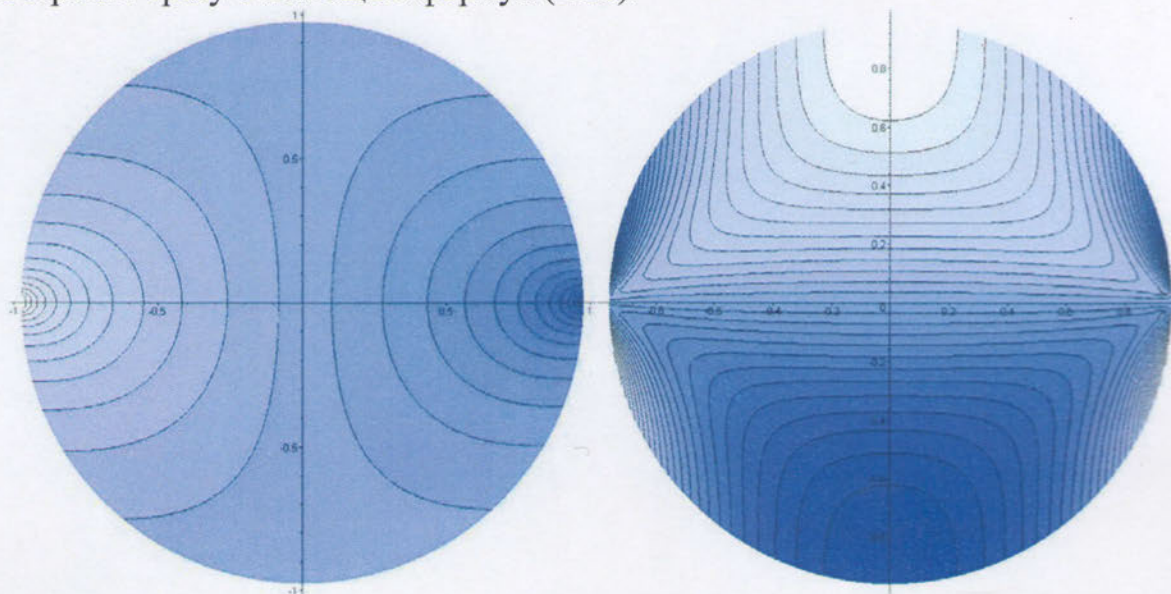
7. На странице 67 приводится специальное решение для задачи о нагружении каплевидной области, имеющей клиновидную особенность. Из изложения,

приведенного в диссертационной работе, не ясно, корнем какого характеристического уравнения (из приведенных в работе) является значение $\lambda = 0.795785$. Если рассмотреть уравнение (3.19), то собственное значение $\lambda = 0.795785$ отвечает двугранному углу с раствором $156,783^\circ$.

Хорошо известно решение Карозерса и Инглиса о клине, согласно которому до достижения угла раствора клина значения 0.715π показатель степени в асимптотическом разложении функции напряжений Эри равен 0. Следовательно, напряжения вне зависимости от угла раствора клина имеют особенность вида $1/r^2$. После достижения угла раствора клина значения 0.715π решение начинает зависеть от радиальной координаты. Таким образом, возникает вопрос, корнем какого характеристического уравнения является собственное значение, используемое в специальном решении (3.26), и как Ваше решение соотносится с другими решениями задач о клине?

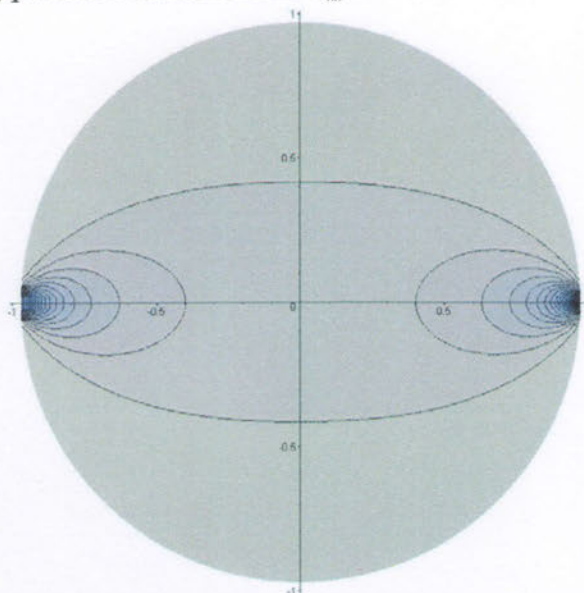
8. В задаче об учете специального решения в задаче о сжатии тела прямоугольными отрезками встречных равномерно-распределенных усилий не приведена форма специального решения. Какую структуру имеет специальное решение и хотелось бы видеть построенное решение. Оно полностью отсутствует. (Исследовательская составляющая диссертации занимает всего 45 страниц. Считаю, что объем диссертации позволяет привести аналитическую форму решений, полученных с помощью метода граничных состояний, для всех задач).

9. Задача о сжатии кругового диска осевыми сосредоточенными силами имеет аналитическое решение (формулы (2.26) на стр.47). Зачем ее решать методом граничных состояний, если она уже решена? Допускаю, что это делается с целью верификации результатов метода граничных состояний. Тогда, где сравнения? Из текста следует, что в качестве специального решения используется точное аналитическое решение задачи для кругового диска, находящегося под действием сосредоточенных сил, приложенных к контуру (рис. 2.1), но, именно это решение и разыскивается с помощью метода граничных состояний? Линии уровня компонент вектора перемещений можно построить сразу с помощью формул (2.26):

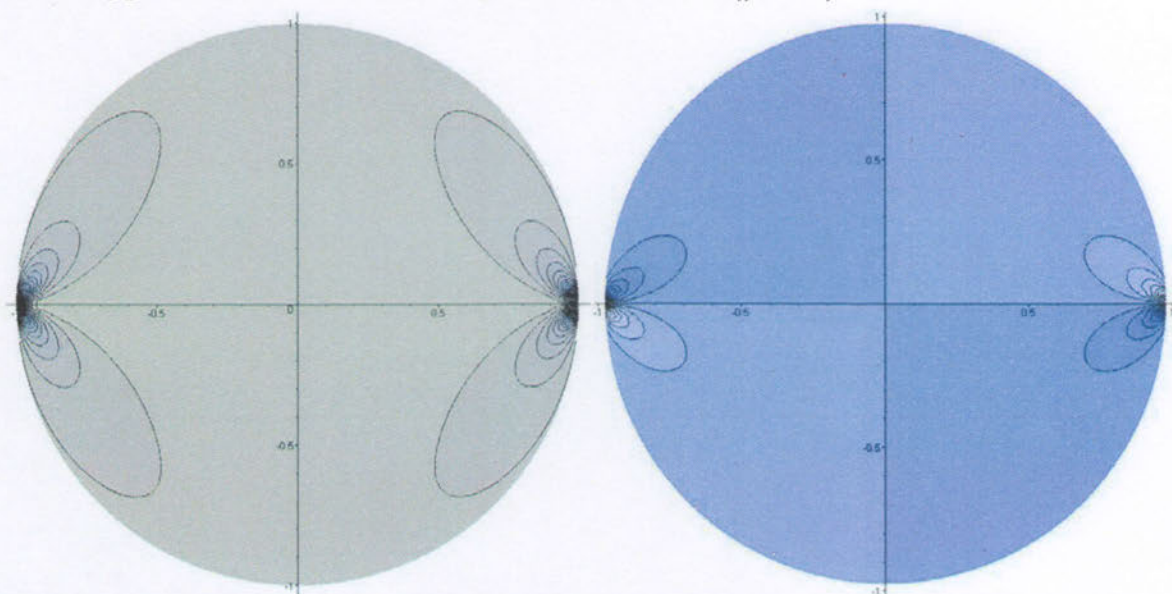


Чем они отличаются от полученных в диссертации линий уровня компонент вектора перемещений, найденных с помощью метода граничных состояний и приведенных на странице 49 в работе?

Используя формулы (2.26), можно построить линии уровня компонент тензора напряжений: линии уровня компоненты σ_{xx} :



и линии уровня компонент тензора напряжений σ_{yy} и σ_{xy} :



Чем приведенные графики отличаются от графиков, полученных с помощью метода граничных состояний (стр. 50, рисунок 2.14)?

10. В параграфе 2.3.2 диссертационной работы рассмотрена задача о деформировании диска внецентренными сосредоточенными воздействиями. Данная задача имеет точное аналитическое решение, приведенное в классической монографии Н.И. Мусхелишвили «Некоторые основные задачи математической теории упругости». Как и в случае задачи о деформировании кругового диска двумя сосредоточенными силами, возникает замечание: с какой целью следует рассматривать данную краевую задачу, если линии уровня компонент вектора перемещений и компонент тензора напряжений,

получаемые с помощью точного аналитического решения и метода граничных состояний, совпадают?

11. В диссертации при указании вклада автора в разработку проблемы отмечается (стр. 8), что в диссертации разработаны вычислительные алгоритмы, использующие системы компьютерной алгебры. На странице 5 указывается, что методами исследования в диссертационной работе являются методы компьютерной алгебры. Однако, после восьмой страницы ни одного описания вычислительного алгоритма не приводится. Какие системы компьютерной алгебры были использованы (Maple, Wolfram Mathematica, МАХІМА или какие-то другие)? Какие методы компьютерной алгебры были применены? Какие преимущества, помимо простого построения графиков, систем компьютерной алгебры были использованы? Хотелось бы видеть листинг программы или листинги программ, реализующих расчеты. В чем суть разработанных вычислительных алгоритмов, использующих компьютерную алгебру?

12. Чем доказать количественные результаты, полученные в диссертационной работе? В диссертационной работе нет никаких сравнений результатов полученных решений с результатами, найденными с помощью других подходов и методов (эксперимент, конечно-элементное решение, метод граничных элементов).

13. На странице 46 диссертационной работы отмечается, что **«данное исследование показало практическую значимость учета специального решения в задачах теории упругости с физическими особенностями, проявившуюся не только в точности и численной устойчивости данного решения, но и в значительном сокращении вычислительных ресурсов»**. Возникает вопрос, насколько значительным было сокращение вычислительных ресурсов? Как долго работает программа, реализующая метод граничных состояний, без включения специального решения и с включением специального решения? К сожалению, численных оценок эффективности работы алгоритма и эффективности работы программ в диссертационной работе не приведено.

14. В литературном обзоре, приведенном в диссертационной работе, большое внимание уделяется анализу 1) полученных результатов для тел с трещинами; 2) пространственным задачам теории упругости для тел с концентраторами напряжений (конус). Даже указывается (стр. 62), что **«В плоских задачах теории упругости особенность геометрического характера представляется как клин, конус, угловая точка»**. Однако в самой диссертационной работе не рассматриваются тела с трещинами и не рассматриваются пространственные задачи теории упругости. Возникает следующее замечание: почему не рассмотрены более сложные задачи о телах с трещинами; есть ли принципиальные отличия применения метода граничных состояний к пространственным задачам теории упругости в сравнении с плоской задачей теории упругости? Возможно ли применение метода граничных состояний к средам с более сложной реологией? В диссертационной работе хотелось бы

увидеть границы области применения метода граничных состояний. Какие имеются ограничения и возможности? Как автор видит направления дальнейших исследований?


Заключение. Диссертация Рязанцевой Е.А. представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой разработан алгоритм численной реализации метода граничных состояний и построены решения ряда новых задач с помощью метода граничных состояний, в основу которого легла методика включения специального решения в формировании базисных функций для описания внутреннего состояния среды. **Диссертация** полностью удовлетворяет требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, включая п.9 «Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней», а автору - Рязанцевой Елене Анатольевне может быть присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент,
доктор физ.-мат. наук, доцент
проф. кафедры математического моделирования в механике
Самарского государственного университета

443011, г. Самара, ул. Ак. Павлова, д. 1

Тел.: (846) 334-54-02, (846) 337-99-17 rector@samsu.ru

Подпись Л.В. Степановой заверяю

 Л.В. Степанова

Ученый секретарь


Е.А. Стенькина

