

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе

Москалик Анны Давидовны

«Аналитический метод приближённого решения краевых задач

установившейся ползучести с возмущёнными границами»,

представленной на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

1. Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 159 наименований, содержит 166 страницы текста, включая 41 рисунок и 24 таблицы. По объёму и структуре работа соответствует требованиям «Положения» по оформлению диссертации. Изложение диссертационной работы строго подчинено решению поставленных задач.

2. Актуальность темы диссертационного исследования

Москалик А.Д. определяется как чисто прикладными и производственными запросами различных отраслей промышленности, использующих цилиндрические трубы для транспортировки различных жидких и газообразных сред под давлением, так и теоретическим состоянием вопроса в области прочности и надёжности трубопроводного транспорта. Наиболее остро эта проблема стоит для продуктопроводов в условиях высоких температурно-силовых нагрузок, вызывающих деформации ползучести в материале трубы. Даже современные промышленные технологии изготовления толстостенных труб не позволяют получить осесимметричную конструкцию, что приводит к разнотолщинности труб в рамках существующих допусков, регулируемых соответствующими ГОСТами. Эта проблема и ставит перед механикой деформируемого твёрдого тела теоретическую проблему постановки новых краевых задач для цилиндрических тел с возмущёнными границами в условиях реологического деформирования и разработки методов их решений. Несмотря на большое число разработанных численных методов, встроенных в современных вычислительные комплексы и пакеты программ, численные решения не дают полной информации о напряжённо-деформированном состоянии элемента конструкции и не позволяют выполнить параметрический анализ решения в полном объёме. Как известно, этого недостатка лишены аналитические (приближённые аналитические) решения, использование которых можно провести средствами непрерывной математики, в частности, используя весь арсенал математического анализа.

Учитывая вышеизложенное и то, что разрабатываемый в рецензируемой работе подход для построения приближённого аналитического решения на основе метода малого параметра в теории ползучести использовался лишь в единичных работах и построенные решения в основном ограничены первым приближением, актуальность диссертационной работы Москалик А.Д. не вызывает сомнений.

3. Новизна проведения исследований и полученных результатов. В диссертационной работе соискатель выполнил ряд логически связанных исследований, в том числе:

- разработка общего подхода для построения приближённого аналитического решения нелинейной задачи установившейся ползучести для толстостенной трубы с произвольно возмущёнными границами на основе метода малого параметра до третьего порядка приближения;

- иллюстрация применения общего подхода и математического аппарата для построения приближённого аналитического решения двух конкретных задач: эксцентричная толстостенная труба и труба с эллиптически возмущённой внешней границей;

- параметрический анализ напряжённо-деформированного состояния в достаточно широком диапазоне изменения возмущающего параметра и показателя нелинейности в степенной аппроксимации закона установившейся ползучести;

- анализ соответствия построенного аналитического решения с численным решением, полученным средствами дискретной математики;

- исследование границ применимости полученных аналитических решений в соответствии с существующими допусками, заложенными в технологические операции изготовления труб имеющимися нормами;

- разработка методики оценки ресурса толстостенной трубы с возмущёнными границами по деформационному критерию отказа.

И на каждом из этих этапов диссертантом получены результаты, обладающие определённой новизной.

Вообще говоря, область применения метода малого параметра (метода возмущений) достаточно обширна, и число работ по этому направлению просто необозримо. Касаясь конкретно МДГТ, можно отметить, что этот метод хорошо зарекомендовал себя и в задачах упругости (где рассматривались композиционные и слабонеоднородные среды) и в задачах упругопластичности. В этом направлении можно отметить, например, систематические исследования научной школы Дюиса Даниловича Ивлева. Что же касается области ползучести, то здесь круг решённых задач крайне ограничен. Определённые успехи имеются

при решении краевых задач для микронеоднородных сред, когда стохастически (или регулярно) возмущены свойства материала. Для задач с возмущёнными границами имеются лишь частные постановочные краевые задачи ползучести, сформулированные Л.М. Качановым и решённые лишь в первом приближении. В связи с вышеизложенным основной заслугой А.Д. Москалик является разработка общего подхода к решению краевых задач установившейся ползучести для толстостенных труб с возмущённой внешней границей методом малого параметра с учётом приближений до второго и третьего порядков. Это собственно и определяет новизну рецензируемой работы.

Из частных результатов, обладающих определённой новизной, можно отметить следующие.

Впервые (по мнению рецензента) методом малого параметра построены аналитические решения для эксцентричной толстостенной трубы и трубы с эллиптически возмущённой внешней границей до второго и третьего порядка приближения соответственно, при этом приведена схема решения задач, состоящая в получении цепочки краевых задач для каждого приближения. Реализация этого алгоритма существенно усложняется при построении решения для очередного приближения по сравнению с предыдущим. Тем не менее, соискатель продемонстрировала умение применять математический аппарат для преодоления сложностей, связанных с физической нелинейностью уравнений установившейся ползучести и нарушением осесимметричности задачи. Полученные решения в обоих случаях были детально исследованы на предмет сходимости, выполнен анализ вклада каждого приближения в построенное решение в широком диапазоне изменения показателя нелинейности установившейся ползучести и величины малого параметра; установлено, что для эксцентричной трубы до величины малого параметра 0,10 (соответствует 26% уменьшения толщины в минимальном сечении) вклад третьего приближения в решение составляет не более 8% (аналогичные результаты получены и для трубы с эллиптически возмущённой границей), т.е. с позиций практики потребность в построении дальнейших приближений отпадает.

К положительным элементам диссертации следует отнести исследование погрешности приближённого аналитического решения по отношению к численному решению, полученному на основе метода конечных элементов, при этом при величине малого параметра $\delta=0,08$ она составляет не более 6%. Ещё более впечатляющие результаты получены при анализе степени соответствия малого параметра величине

разностности толстостенной трубы, задаваемой соответствующими нормами, согласно которым она не может превышать 12,5% от толщины трубы. Этот максимальный допуск соответствует величине малого параметра $\delta=0,04$, а для этого значения соискатель установил, что, во-первых, использование приближения третьего порядка вносит уточнение ко второму порядку для напряжений в наиболее опасном сечении не более 0,5%, а во-вторых, погрешность приближённого аналитического решения по отношению к численному решению также не превосходит 0,5%. Поскольку рецензент такой подробный анализ в области ползучести встречает впервые, то полученные результаты, несомненно, следует отнести к элементам новизны.

Весьма важны также и усилия диссертанта по применению построенных приближённых решений в расчётной практике. Так, в пятой главе предложена и реализована методика оценки надёжности толстостенной трубы по деформационному критерию отказа, что само по себе представляет определённую научную ценность. С другой стороны, здесь же иллюстрируются преимущества приближённых аналитических решений перед численными. Соискатель убедительно показывает, что при наличии приближённых аналитических решений для компонент тензора напряжений решение краевой задачи для эксцентричной трубы сводится к табулированию функций и алгебраических выражений, а в задачах надёжности добавляются простейшие математические операции осреднения для получения математического ожидания и среднего квадратичного отклонения. При численных же подходах требуется каждый раз решать эту задачу, например, методом конечных элементов при любом изменении параметров. А задачи табулирования функции и численного решения краевой задачи в полной постановке – это совершенно разные задачи по трудоёмкости.

Суммируя вышесказанное следует признать, что основные результаты и выводы диссертационной работы, представленные в заключении автореферата и диссертации, обладают научной новизной.

4. Степень обоснованности и достоверности полученных положений, основных результатов и выводов.

Полученные результаты и общие выводы по работе достоверны, так как базируются на конкретно полученных результатах теоретических исследований, что соответствует требованиям к научным работам. Обоснованность и достоверность результатов, научных положений и выводов, полученных на основе решений краевых задач установившейся ползучести толстостенной трубы, обеспечивается корректным

использованием методов решения уравнений в частных производных, теории ползучести, теории вероятности и математической статистики, а также использованием сертифицированного программного обеспечения, и подтверждается хорошим соответствием расчетных данных в приближённых аналитических решениях с результатами моделирования методом конечных элементов (табл. 3.9-3.12, рис. 3.3-3.16, табл. 4.4-4.5, рис. 4.2-4.9). Расхождение в среднеквадратичной норме между данными численного и аналитического решений не превышает 4-8% при величине малого параметра $\delta < 0,1$, а в рамках допусков на разнотолщинность ($\delta < 0,04$) – 0,5%, при этом детально исследована сходимость полученных решений.

5. Значимость результатов для науки и практики.

В теоретическом плане поставлены и решены новые краевые задачи установившейся ползучести для разностенных толстостенных труб с возмущёнными границами и впервые получены приближённые аналитические решения до второго и третьего порядков малого параметра. Выполнено апостериорное исследование сходимости и погрешности аналитических решений по отношению к численному решению МКЭ в частных случаях.

С прикладной точки зрения разработанный метод решения краевых задач для трубы с возмущёнными граничными условиями под действием внутреннего давления позволяет научно обоснованно получить аналитическое поле для компонент тензоров напряжений и деформаций и использовать полученную информацию для оценки прочности и надёжности рассматриваемого конструктивного элемента.

Особое прикладное значение имеют полученные результаты применимости построенных решений в соответствии с принятыми в нормах технологическими допусками, поскольку в этих ограничениях (малый параметр $\delta < 0,04$) приближённое решение имеет хорошую сходимость (третье приближение вносит «уточнение» ко второму менее 0,5%) и его погрешность по отношению к численному в среднеквадратической норме составляет около 0,5%. Это позволяет рекомендовать его в расчётную инженерную практику. Кроме этого, результаты работы могут быть использованы в учебном процессе.

6. Апробация работы. Основные результаты работы достаточно полно освещены в 10 публикациях, в том числе в 4 публикациях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, докладывались на 6 Международных и Всероссийских конференциях и научных семинарах.

7. **Содержимое автореферата** полностью отражает идеи, результаты и выводы диссертации, а также перечень опубликованных работ. Изложение материала ясное и чёткое, приводятся ссылки на используемые источники. Качество оформления диссертации и автореферата хорошее.

8. **В качестве замечаний можно отметить следующее:**

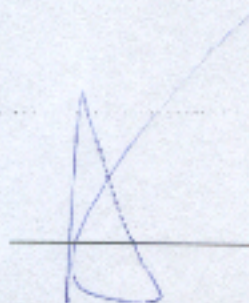
- 1) В главе 5 при разработке методики оценки ресурса по деформационному критерию отказа при стохастически возмущённой границе эксцентричной трубы использован нормальный закон распределения для величины малого параметра, который по физическому смыслу должен быть положительным (это величина смещения центров окружностей). Но нормальный закон может дать и отрицательные значения малого параметра для конкретной реализации, что противоречит физической картине. Поэтому можно было бы использовать законы распределения, которые лишены этого недостатка.
- 2) Скупно описана методика численного решения задачи метода конечных элементов в пакете ANSYS, который позволяет визуализировать результаты решения по всей области интегрирования. В работе приведены графики распределения напряжений лишь вдоль нескольких радиусов. Желательно было бы привести на рисунках сетку конечных элементов для обеих задач.
- 3) В выводах к главе 3 (к сожалению, они не пронумерованы) вторая и седьмая позиция дублируют друг друга, текст один и тот же (см. стр. 98 и 99).
- 4) Непонятно, почему диссертант обошёл вниманием случай, когда показатель нелинейности "установившейся" ползучести $n < 2,42$? В диссертации детально исследован вариант $n > 2,42$.
- 5) Замечание общего характера. Может быть, более корректно было бы использовать название работы не «Аналитический метод приближенного решения...», а «Аналитическая методика приближенного решения...», понимая под методикой сочетание нескольких методов?
- 6) Даже симметричные в начале эксплуатации толстостенные трубопроводы с течением времени, например, под влиянием коррозионного износа, могут приобрести возмущенные границы, тем более что коррозионный износ обычно несимметричен. Может ли методика, предлагаемая автором, быть распространена на эти случаи и какие при этом изменения она может претерпеть?

9. Заключение.

Указанные выше недостатки не уменьшают научную и практическую значимость основных результатов диссертации. В целом работа выполнена на высоком научном уровне. Анализ результатов исследований, изложенных в диссертации, подтверждает обоснованность сформулированных автором научных положений, выводов и рекомендаций. Основные результаты работы в полном объеме освещены в публикациях соискателя. На основании вышеизложенного рассматриваемая диссертационная работа Москалик Анны Давидовны является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной задачи – разработка аналитического метода приближённого решения краевых задач ползучести с возмущёнными границами и его приложение в задачах прочности и надёжности, является законченной научно-исследовательской работой, отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент:

доктор технических наук (05.23.17),
профессор, профессор кафедры
«Транспортное строительство» ФГБОУ
ВО «Саратовский государственный
технический университет имени
Гагарина Ю.А.», г. Саратов



Овчинников
Игорь Георгиевич

410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, корпус 6, каб.35.
Тел. 8(8452)998905, e-mail: bridgesar@mail.ru

Подпись доктора технических наук, профессора, профессора кафедры
«Транспортное строительство» СГТУ Овчинникова Игоря Георгиевича
заверяю.

Ученый секретарь Ученого Совета
СГТУ имени Гагарина Ю.А.

д. т. н., профессор

27 марта 2017 года



Бочкарев П. Ю.