

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Нескородева Романа Николаевича на тему «МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКЛАССИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УПРУГОГО И ВЯЗКОУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСВЯЗНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ГЕОМАССИВОВ», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

**Предметом исследований**, выполненных в диссертационной работе Р.Н. Нескородева, являются разработка, апробация и систематизация результатов применения новых численно-аналитических методов исследования неклассических моделей двумерного деформирования анизотропных вязкоупругих горных массивов и тонкостенных конструкционных элементов с полостями и отверстиями усложненной геометрии.

**Актуальность избранной темы исследований**, с одной стороны, связана с крайне частым применением тонкостенных конструкционных элементов пластинчатого типа со сложной криволинейной, многосвязной геометрией очертаний из обладающих выраженными реологическими свойствами анизотропных материалов в строительной индустрии, в машинах и приборах, а также с широкой распространенностью горных сооружений в виде подземных транспортных туннелей и протяженных горно-шахтных выработок различного назначения, имеющих неканоническую форму сечений и расположенных в толще массивов податливых анизотропных горных пород. При этом, с другой стороны, потребности в эффективных проектных расчетных методиках для определения характеристик напряженно-деформированного состояния таких ответственных объектов, обладающих усложненными физико-механическими и геометрическими свойствами, связаны с анализом неклассических моделей механики деформируемого твердого тела и предполагают дальнейшую разработку соответствующих специализированных математических методов, в том числе методов численно-аналитического исследования с детально контролируемыми процессами получения верифицированных расчетных соотношений и обеспечиваемой точностью вычислений. В частности, недостаточно исследованными до настоящего времени являются специфические особенности вязкоупругого деформирования пластин и геомассивов, связанные с совместным комплексным учетом различных факторов усложнения их геометрической формы и учета времени эксплуатации. Учет анизотропии вязкоупругого деформирования геоматериалов и модифицированный подход к описанию сложной геометрии контуров сечений определяют неклассический характер моделей расчета полей напряжений в окрестностях туннельных выработок, для которых в исследованиях крайне затруднено применение существующих операторных методов учета реологических свойств горных пород и методов параметрического описания усложненной геометрии сечений на базе теории конформных отображений. Таким образом, существует настоятельная необходимость разработки новых эффективных теоретических методов параметрического исследования напряженно-деформированного состояния многосвязных анизотропных сред с

ГОУ ВПО «ДонНУ»  
01.12.2022  
19/23/04-42

учетом реологических эффектов, в том числе анализа влияния фактора ползучести в анизотропных горных массивах с туннельными выработками усложненных сечений.

В равной степени актуальной является и проблемы анализа неклассических уточненных моделей изгибного деформирования для анизотропных вязкоупругих тонкостенных конструкций в виде пластин сложных криволинейных и многосвязных очертаний, которые корректнее классических моделей учитывают эффекты сдвигового деформирования для современных композиционных материалов таких конструкций. Отмечено существование нескольких классов важных и актуальных в теоретическом и прикладном аспектах научных проблем и конкретных классов задач из рассматриваемой тематической области, требующих расширенного и углубленного изучения на новом качественном уровне в рамках уточнённых неклассических моделей.

Таким образом, представленное в работе решение фундаментальных и прикладных заданий по исследованию указанных неклассических моделей связано с актуальной научной проблемой разработки новых эффективных численно-аналитических методов решения задач вязкоупругости для анизотропных деформируемых тел усложненной, в том числе многосвязной геометрии.

Диссертационная работа представляет и обобщает исследования, доминирующая часть которых получена в ходе разработки конкурсных научных проектов МОН ДНР, в том числе проектов «Математическое моделирование прочностных и волноводных свойств деформируемых элементов конструкций и геоструктур с усложненными физико-механическими свойствами» (2017-2019гг.); «Методы исследования линейных и нелинейных моделей статического и динамического деформирования анизотропных функционально-градиентных упругих тел» (2020-2022гг.).

По структуре диссертационная работа состоит из введения, семи предметных разделов, заключения с основными выводами и результатами, списка литературы из 311 источников и приложения.

**Во вводном разделе,** соответственно установленным требованиям, представлены основные общие характеристики выполненного исследования, в том числе приведено обоснование актуальности темы, указана её связь с научными проектами; сформулированы цель и задачи исследования, выносимые на защиту положения работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Представлены используемые в диссертации методы исследования, охарактеризована достоверность и обоснованность основных положений и выводов работы, приведены данные об апробациях и публикациях по её теме.

**Первый раздел** работы содержит весьма детальный аналитический обзор методов и результатов исследований по проблематике диссертационной работы, а также вытекающую из проведенного анализа констатацию наличия малоизученных аспектов рассматриваемых проблем и потребностей в дальнейшей разработке аналитико-числовых методов их исследования применительно к неклассическим моделям двухмерного деформирования анизотропных

вязкоупругих горных массивов с туннельными выработками и тонкостенных конструктивных элементов с полостями и отверстиями усложненной геометрии.

Представлены обосновываемые мотивы построения новых модификаций математических соотношений уточненных теорий изгиба анизотропных упругих и вязкоупругих пластин и исследования в рамках этих теорий новых циклов задач об изгибном деформировании анизотропных плит с отверстиями.

**Во втором разделе** работы описана разработка нового аналитико-числового метода для параметрического исследования вязкоупругого напряженно-деформированного состояния анизотропных сред. Подчеркнуто, что предлагаемый подход не требует построения аналитических представлений для ядер ползучести и релаксации в специальной форме. Разработанный метод основан на численном определении резольвент интегральных уравнений состояния среды. Его элементом является использование обширных массивов экспериментальных данных, применительно к которым автором предложен способ сглаживания и восполнения значений рассматриваемых характеристик. Указанные массивы являются основой для построения матриц уравнений состояния, элементы которых имеют явную зависимость от времени. Данные представления получены в работе на базе алгебры резольвентных операторов Вольтерра, которые не связаны с каким-либо специальным видом ядер. В итоге, определение характеристик линейного вязкоупругого напряженно-деформированного состояния для рассматриваемых объектов в произвольный момент времени реализуется с применением тех же алгоритмов, которые используются при анализе моделей идеально упругих сред.

**В третьем разделе** работы представлены результаты реализации предложенного метода применительно к граничным задачам обобщенного плоского напряженного состояния для содержащих эллиптические отверстия неограниченных тонких изотропных и ортотропных пластин из линейно-вязкоупругих материалов.

Поскольку в случае изотропного материала представления для перемещений и напряжений вблизи локализованного эллиптического отверстия описываются рациональными функциями параметров упругих постоянных, решение данной задачи в модели вязкоупругого деформирования может быть несложно получено при помощи метода Вольтера. Сопоставление такого решения с результатами, полученными путем применения предложенного в диссертационной работе метода, показывает их полное совпадение как для случая свободного, так и для жестко подкрепленного отверстия.

Сопоставительный анализ проведен и для отдельных представленных в научной литературе частных случаев деформирования пластины из вязкоупругого ортотропного материала, для которой применение метода Вольтерра связано со сложностями в расшифровке иррациональных функций от операторов, входящих в решения, и исследования реализуются с применением различных численных схем. Расчетные результаты, получаемые для этих задач с применением вышеуказанных и разработанного в диссертации подхода имеют высокую степень согласованности.

Наряду с данными сопоставительного анализа в разделе представлены систематизированные новые результаты исследований параметрических временных оценок для показателей концентрации напряжений в разных точках свободного и жестко подкрепленного по контуру отверстия в вязкоупругих ортотропных пластинах, свидетельствующие о существенных различиях эффектов учета вязкоупругих свойств материалов в рассмотренных случаях.

**В четвертом разделе** работы предложенные методы применяются для решения новых задач об исследовании эффектов ползучести в массивах анизотропных горных пород с горизонтальными туннельными выработками. Рассматривается апробированная модель массива горных пород, как вязкоупругой трансверсально-изотропной среды, являющаяся интерпретацией слоистого геомассива осадочного происхождения с параллельными слоям плоскостями изотропии, в предположении, что толщины слоев на порядок меньше характерного размера сечения горной выработки. Для свободной и жестко подкрепленной выработок проведен анализ влияния фактора времени на изменения параметров напряженно-деформированного состояния. В результате исследований выявлено, что учет фактора влияния анизотропии вязкоупругого материала для случая свободной выработки приводит к весьма существенному изменению напряженного состояния в ее окрестности во времени, что указывает на несостоятельность гипотезы о том, что эффекты влияния ползучести в анизотропных породах идентичны имеющему место для изотропных пород заключению об отсутствии эффектов временных изменений. Установлено также, что аналогичные эффекты для случая подкрепленной выработки являются менее выраженными.

**В пятом разделе** работы предложен метод анализа эффектов ползучести массивов анизотропных горных пород с выработками усложненной формы сечения, описываемой при помощи методов  $R$ -функций и алгебры логики. В рамках проведенного исследования построены характеристические уравнения для областей сечений выработок, которые могут быть ограничены прямолинейными отрезками и частями эллиптических контуров. Разработанный алгоритм получения характеристических уравнений позволяет автоматизировать построение границ областей сечений выработок сложной формы. Предложенный метод эффективно применим для изучения эффектов ползучести горных пород вблизи горизонтальных протяженных выработок, имеющих сложную форму поперечного сечения. Реализован количественный и качественный анализ некоторых задач рассматриваемого типа.

**Шестой раздел** диссертации посвящен получению систем соотношений для новых, учитывающих деформации поперечного сдвига неклассических уточненных моделей теории изгиба изотропных, трансверсально-изотропных и ортотропных плит, и разработке методов их исследования. Записаны разрешающие системы дифференциальных уравнений шестого порядка, найдены соответствующие представления для перемещений, напряжений, моментов и перерезывающих сил, предложены методики удовлетворения граничным условиям краевых задач, формулируемых в рамках предложенных уточнённых теорий. Для случая ортотропной плиты при помощи метода малого параметра

реализовано сведение дифференциального уравнения шестого порядка к независимым уравнениям четвертого и второго порядков. С применением предложенного варианта модели изгибного деформирования и численно-аналитического метода ее анализа выполнено исследование напряженного состояния анизотропных плит, локализованного вблизи эллиптической полости и осуществлен анализ, описываемых полученными решениями, физико-механических эффектов.

**В седьмом разделе** работы на основе преобразования интегральных уравнений состояния модели линейно-вязкоупругого деформирования к уравнениям закона Гука с параметрическими зависимостями деформативных характеристик материалов от времени впервые получены решения задачи изгиба вязкоупругих изотропных, трансверсально-изотропных и ортотропных плит в уточненной постановке, и применительно к рассмотренным конкретным вариантам задач данного типа дан количественный и качественный анализ полученных результатов.

Анализ содержания работы позволяет констатировать **необходимую и достаточную меру обоснованности** научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы. Вынесенные на защиту положения характеризуют ведущие научные достижения работы в виде:

разработанных новых численно-аналитических методов решения линейных задач вязкоупругого деформирования и методов описания замкнутых граничных кривых для расчетных областей сложных конфигураций в моделях деформирования вязкоупругих тел и элементов конструкций, как совокупностей фрагментов в виде эллиптических или круговых дуг контуров пересечений либо объединений вспомогательных выпуклых областей:

новой версии неклассической уточненной модели изгибного деформирования вязкоупругих изотропных, трансверсально-изотропных и ортотропных плит с отверстиями при учете деформаций поперечного сдвига, основывающейся на алгоритме редукции соотношений деформирования вязкоупругих плит пространственной геометрии применительно к случаю их малой толщины:

установленных и обобщенных по результатам изучения неклассических моделей с применением предложенных аналитико-числовых методов количественных и качественных закономерностей деформационных процессов, а также обеспечиваемый применением данных методов новый уровень возможностей в проектном технологическом моделировании прочности и надежности конструкций и сооружений, в учете влияния особенностей геометрии конструкций и сооружений на результирующие показатели мгновенной и длительной эксплуатационной прочности моделируемых объектов, в получении более адекватных характеристик мгновенной и длительной прочности плоских конструктивных элементов из анизотропных композиционных материалов при действии изгибающих усилий, в получении описаний мгновенных и параметрически изменяющихся во времени распределений полей механических напряжений в вязкоупругих анизотропных многосвязных объектах.

Обоснованными и объективно следующими из описываемых в работе исследований являются сформулированные в заключении выводы и рекомендации диссертации.

**Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций** работы подтверждается строгостью постановок рассматриваемых задач в рамках математически обоснованных апробированных моделей теории линейной вязкоупругости и механики анизотропного деформируемого твердого тела: использованием при теоретическом исследовании рассматриваемых неклассических моделей верифицированных математических методов, включая аппарат теории функций обобщенных комплексных переменных, алгебру дробно-рациональных функций, матричную алгебры, алгебру логики, теорию R-функций; использованием в процессе численных исследований апробированных вычислительных алгоритмов дискретного метода наименьших квадратов, метода малого параметра, теории разложений функций в ряды Лорана с использованием конформных отображений, теории специальных функций; проверкой и согласованностью найденных разработанными методами результатов и данными сопоставления отдельных частных результатов диссертационной работы с опубликованными результатами исследований других авторов, полученными альтернативными методами.

В итоге реализованных исследований соискателем получены следующие **новые научные результаты**.

С применением аппарата алгебры резольвентных операторов и матричной алгебры разработан новый численно-аналитический метод обращения операторов определяющих уравнений деформирования анизотропных линейно-вязкоупругих сред без использования аналитических представлений ядер ползучести и релаксации, позволяющий распространить область возможного применения численно-аналитических подходов на новые классы неклассических моделей деформирования вязкоупругих тел и элементов конструкций.

Разработан новый численно-аналитический метод исследования задач линейной вязкоупругости анизотропных сред, который для произвольных моментов времени сводится к применению алгоритмов, аналогичных используемым при решении задач теории упругости анизотропного деформируемого тела без учета реологических эффектов и позволяет изучить наследственные деформационные процессы в случаях многосвязных конструкций из низкосимметричных по физико-механическим свойствам материалов.

Для исследования эффектов ползучести и релаксации в задачах деформирования анизотропных массивов горных пород предложен новый метод преобразования интегральных уравнений состояния к уравнениям закона Гука с параметрическими зависимостями деформативных характеристик материалов от времени, эффективно применимый в проектных и технологических расчетах характеристик прочности подземных сооружений.

На основе применения разработанных методов и с учетом различных гипотез об упругой сжимаемости либо несжимаемости рассматриваемых конструкционных материалов впервые реализованы исследования обобщенного плоского напряженного состояния бесконечных ортотропных линейно-

вязкоупругих пластин с эллиптическим свободным или жесткозакрепленным отверстием, обеспечивающие получение более адекватных практике оценок мгновенной и длительной прочности тонкостенных конструкций из современных волокнистых композитных материалов.

Предложен новый теоретический аналитико-числовой алгоритм построения замкнутых граничных кривых сложных конфигураций, как совокупностей участков в виде эллиптических или круговых дуг контуров пересечений либо объединений вспомогательных выпуклых областей, позволяющий в исследованиях неклассических моделей двумерного деформирования тел с локализованными неоднородностями гладких очертаний получать верифицированные расчетные результаты повышенной точности.

Применительно к изотропным и трансверсально-изотропным пластинам малой толщины разработан новый теоретический аналитико-числовой алгоритм редукции описывающей их изгибное деформирование системы пространственных соотношений теории упругости с получением комплекса разрешающих соотношений новой уточненной теории изгиба ослабленных отверстиями пластин указанного типа в виде системы двух двумерных дифференциальных уравнений в частных производных второго и четвертого порядка, а также описан соответствующий способ интегрирования уравнений пограничного слоя и удовлетворения краевым условиям на границах отверстий, что позволяет в сравнении с исследованиями в рамках классической теории получать в практике прочностных расчётов более адекватные оценки влияния касательных напряжений в изгибаемых тонких пластинах.

Разработан новый теоретический алгоритм аналитико-числовой редукции системы пространственных соотношений теории упругости, описывающей изгибное деформирование ортотропных пластин, с переходом к новой уточненной неклассической теории изгиба, содержащей разрешающее соотношение в виде двумерного дифференциального уравнения в частных производных шестого порядка, а также разработан соответствующий аналитико-числовой метод его решения и удовлетворения соответствующим краевым условиям на границах отверстий, что, соответственно, позволяет увеличить точность расчетных оценок прочности и надежности волокнистых композитных пластин при изгибном деформировании посредством учета существенных уровней возникающих касательных напряжений.

Осуществлены разработка и применение нового аналитико-числового метода определения в уточненной постановке описываемого неклассическими моделями вязкоупругого напряженно-деформированного состояния изгибаемых многосвязных изотропных, трансверсально-изотропных и ортотропных пластин, что является вкладом в теорию и расчетную практику получения оценок для мгновенной и длительной прочности тонкостенных пластинчатых элементов из различных типов конструкционных материалов.

#### **Замечания по содержанию диссертации и автореферата.**

1. Было бы целесообразным охарактеризовать в работе перспективы использования предложенного подхода для обращения резольвентных операторов

не только в разрабатываемых в диссертации аналитико-числовых методах, но и в методах сеточного и конечно-элементного типов.

2. В работе не указано, каким образом в представленных моделях напряженного состояния податливых горных пород в окрестности туннельных выработок могла бы быть учтена неоднородность геоматериалов в их приконтурной зоне.

3. В шестом разделе диссертационной работы на стр. 188 при расшифровке параметра, входящего в дифференциальное уравнение (6.13), приводится окончательная формула  $k^2 = 3 \cdot (2h^2)$ . При построении же соотношений для трансверсально-изотропных плит в случае выбора функции  $p_1(z) = z$ , после вычисления соответствующего параметра для случая изотропного материала получено  $k^2 = 3/h^2$ . Чем можно объяснить различие в представлениях данных параметров?

4. Во втором разделе в качестве примера применения разработанного алгоритма аппроксимации экспериментальных данных рассматривается композитный материал стеклотекстолит ТС8/3-250. Однако при решении конкретных задач и проведении численных экспериментов данный материал автором не использовался.

5. На стр. 194-197 диссертационной работы подробно описана предложенная в ней методика приближения входящих в граничные условия функций, позволяющая разложить их в степенные ряды. При помощи этой методики автору удалось построить системы алгебраических уравнений для удовлетворения довольно сложным граничным условиям, в которые входят цилиндрические функции. Однако этот усиливающий работу результат, не нашел отражение ни в положениях научной новизны, ни в заключительных выводах работы.

6. В автореферате при обосновании актуальности темы и формулировке основных положений используются слишком длинные предложения, по 9-14 строк. Это усложняет понимание сути работы.

7. На стр. 21 автореферата в формулах для перемещений в нетронутом массиве-полупространстве не введены константы, характеризующие смещение массива как жесткого целого.

Сделанные замечания не влияют на общую позитивную оценку новых научных результатов, полученных автором диссертационного исследования.

Таким образом, в диссертации Нескороева Романа Николаевича решена новая научно-техническая проблема, которая состоит в создании новой численно-аналитической методики исследования вязкоупругого деформирования анизотропных тонкостенных конструкций и геомассивов с выработками усложненной геометрии. Решение этой актуальной проблемы механики деформируемого твердого тела имеет важное теоретическое и прикладное значение.

Представленную диссертацию можно признать самостоятельной и завершенной работой. Тематика представленных в диссертационной работе научных исследований и полученных результатов в полной мере соответствует паспорту научной специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела. Содержание диссертации в достаточной мере освещено в 44



опубликованных работах, из которых 30 опубликованы без соавторов. Количество публикаций по теме работы в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК ДНР, отвечает установленным требованиям. Автореферат диссертации соответствует содержанию работы и адекватно отражает ее основные научные положения. Оформление и содержание диссертации и автореферата также удовлетворяют требованиям ВАК.

Диссертационная работа на тему «Методы исследования неклассических моделей упругого и вязкоупругого деформирования многосвязных тонкостенных конструкций и геомассивов» в целом отвечает всем требованиям п. 2.1 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Нескородев Роман Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент  
доктор физико-математических наук,  
профессор, профессор кафедры  
прикладной математики  
Федерального государственного  
автономного образовательного учреждения  
высшего образования  
«Крымский федеральный университет  
им. В.И. Вернадского»



Чехов Валерий Николаевич

295007, Российская Федерация,  
г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4.  
Тел.: +7(3652) 54-50-36,  
e-mail: cfuv@crimeaedu.ru  
сайт: <http://cfuv.ru/>

Я, Чехов Валерий Николаевич, согласен на автоматизированную обработку моих персональных данных 