

ЕНСЕБАЕВА ГУЛЬЗАТ МУРАТБЕКОВНА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА
НАГРУЖЕНИЯ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ И ПОВРЕЖДЕННОСТЬ
РЕОНОМНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)
по специальности 6D060300- «Механика»

Актуальность темы исследования. Использование реономных материалов в инженерных сооружениях - один из важнейших вопросов определения прочности и долговечности.

При анализе механических свойств материала под действием внешних сил учитывается его деформация. Основной задачей механики деформируемого твердого тела является моделирование процессов деформирования вязкоупругих материалов. При этом модель условно делится на два класса: склерономные и реономные. Определяющие соотношения склерономных моделей относительно преобразования времени инварианты. Реономные модели описываются операторными соотношениями явно зависящими от времени.

В настоящее время имеются достаточно хорошо разработанные теории и методы вязкоупругости, которые позволяют определить и описать вязкоупругие свойства материалов. В них различают линейную и нелинейную вязкоупругость. В линейной и нелинейной теории вязкоупругости такая задача сводится к отысканию ядер ползучести и релаксации. Ядра ползучести и релаксации связаны между собой известным интегральным соотношением, которая устанавливает связь между напряжением, деформацией и времени.

Определяющее соотношение, характеризующее нелинейную деформацию ползучести вязкоупругих материалов, впервые было предложено Ю.Н. Работновым и до сих пор является предметом математических проблем. Это определяющее соотношение широко используется при описании механических свойств реономных материалов.

Исследуемая задача известна, так как ей посвящены многие публикации. Однако в этих публикациях, основаны на увеличении количества основных параметров, чтобы соответствовать экспериментальным значениям ползучести деформации материала. Поэтому, для задач механики ползучести в данный момент актуальным остается использование дробно-экспоненциального ядра Работнова или ядра Абеля, которые необходимо определить из базового эксперимента. Эти ядра позволяют достаточно точно описать кривые ползучести реальных материалов при постоянных напряжениях и успешно используются для решения краевых задач реономной теории ползучести. Таким образом, данная работа предъявляет требования к поиску нового эффективного метода определения параметров нелинейного наследственного

уравнения Ю.Н. Работнова при исследовании физических линейных (нелинейных) реономных процессов.

Если требуется рассчитать поведение конструкции при длительном сроке эксплуатации, необходимо принимать во внимание влияние истории нагружения. Параметрическое уравнение нелинейной деформации ползучести реономных материалов может быть использовано для описания при постоянном напряжении, ступенчатом и циклическом нагружениях, также при нагружении с постоянной скоростью. Применение такого уравнения эффективно при инженерных экспериментальных расчетах материальных конструкций.

В данной работе исследуется один из реономных материалов - асфальтобетон. Мелкозернистый горячий плотный асфальтобетон используется во многих странах, включая Казахстан, для покрытия дорожного покрытия. Асфальтобетонные слои автомобильных дорог в период эксплуатации подвергаются сложным комбинациям механических воздействий колес автомобилей и температуры окружающей среды. Как известно, механические свойства асфальтобетонов сильно зависят от температуры и характеристик нагрузки, таких как величина, длительность и скорость нагружения. Таким образом, практически очень важным является вопрос об изучении деформативности, прочности и долговечности асфальтобетонов при разных скоростях нагружения (при разных величинах и длительностях нагрузок) и разных температурах.

В связи с этим, в Казахстанском дорожном научно-исследовательском институте образцы асфальтобетона испытываются в разных режимах нагружения при прямом растяжении. Исследуется влияние режима нагружения на ползучесть образцов асфальтобетона. Кроме того, при определении прочности асфальтобетонного материала проводится анализ влияния режима нагружения на процесс разрушения образцов асфальтобетона.

Микронапряжения имеются во всех твердых телах и в особенности в поликристаллах. Их первопричиной является микронеоднородность и микроанизотропия структуры твердых тел. Большое влияние на поле микронапряжений оказывает всякая деформация и в особенности - пластическая. Последняя развивается, как известно, преимущественно в полосах скольжения, занимающих относительно малую часть объема тела, большая же его часть и за пределом текучести продолжает работать упруго. Процесс пластического деформирования существенно не равномерен, поэтому в теле возникает случайное поле микродеформаций.

Там, где микронапряжение достигают небольших значений в теле возникают микропоры и микротрещины. При продолжении пластического деформирования их количество постепенно увеличиваются, а размеры растут. Этот процесс, именуемый накоплением повреждений, является первой стадией разрушения. За счет накопления таких повреждений процесс разрушения реономных материалов происходит быстрее. В данной работе, исследуется влияния режима нагружения на прочность реономных материалов.

Цель исследования является моделирование и исследование влияния режима нагружения на ползучесть и поврежденность реономных материалов. Оценка прочности и долговечности материалов.

Задача исследования:

- исследовать уравнения определения свойств на ползучесть реономных материалов;
- разработать новый эффективный метод для определения параметров о нелинейно-наследственном уравнении Ю.Н. Работнова;
- исследовать реономные нелинейные физические процессы применяя разработанный метод;
- исследование и анализ истории нагружения на ползучесть физически линейных и нелинейных реономных материалов;
- исследование истории нагружения на поврежденность физически линейных и нелинейных реономных материалов.

Объект исследования является значения деформации ползучести по результатам экспериментальных испытаний нейлона 6, стеклопластика ТС 8/3-250 ($\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$), арамидного волокна СВМ, смолы EDT-10, поликристаллического графита, эпоксифенольного стеклопластика, полиэфирного полимербетона и асфальтобетонных материалов.

Предметом исследования является моделирование процесса ползучести реономных материалов, режимов их нагружения, исследование влияния режима нагружения на ползучесть и поврежденность асфальтобетона. Исследования проводятся с применением подходов, основанные на наблюдаемых фактах в механике деформируемого твердого тела и сплошной среды.

Методы исследования. Нелинейное наследственное уравнение Ю.Н. Работнова, ядро ползучести материалов функции Ю.Н. Работнова и Абеля, изохронные кривые ползучести Ю.Н. Работнова, метод бисекции для нахождения параметров α , при исследовании асфальтобетонных материалов используются методы по схеме прямого растяжения и методы теории вязкоупругости и упругости.

Положения, выносимые на защиту. По результатам исследования были решены следующие проблемы:

- при оценке прочности и долговечности реономных материалов, на основе метода изохронных кривых ползучести Ю.Н. Работнова предложен эффективный алгоритм описания нелинейного деформирования реономных материалов. Даны улучшенные методы определения параметров ползучести α , ϵ_0 , δ , β и λ . В частности, разработаны новые эффективные методы нахождения параметров ядра Абеля (α , δ). Для нахождения параметра α используется метод бисекции.

- разработаны алгоритмы и соответствующая компьютерная программа для вычисления параметров α и δ . Кривые релаксации напряжения построены на основе кривой ползучести реономных материалов.

- проведены экспериментальные исследования по одноосному при прямом растяжении образцов асфальтобетона. Представлены результаты испытания образцов асфальтобетона по схеме прямого растяжения при постоянном

напряжении, ступенчатом и циклическом нагружениях, а также при нагружении с постоянной скоростью.

Обоснованность и достоверность. Для определения точности предложенных алгоритмов использовались результаты экспериментов с нейлоном 6, ТС 8/3-250 стекловолокном ($\Theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$), арамидным волокном СВМ, смолой EDT-10, при температурах $T=2000, 2200, 2400, 2600, 2800^\circ \text{C}$ поликристаллическим графитом и эпоксифенольным стеклопластиком при температурах $T=20, 30, 40, 50, 60^\circ \text{C}$ и полиэфирными полимербетонными материалами. Показана высокая точность предложенного метода. Качественное и количественное соответствие математического аппарата, теоретических исследований и экспериментальных данных, применение результатов исследования на практике.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Исследование определяющих уравнений, описывающих свойства ползучести реономных материалов. Поиск нового эффективного метода определения параметров нелинейного уравнения Ю.Н. Работнова. Необходимо изучить физически нелинейные (линейные) реономные процессы по разработанной методике. Асфальтобетонный материал исследован экспериментально. Проведено моделирование ползучести асфальтобетонного материала под влиянием режима нагружения и исследовано влияние режима нагружения на поврежденность. Это будет иметь практическое значение при оценке прочности материалов и при длительной прочности асфальтобетона.

Методы и алгоритмы для расчета нелинейной деформации ползучести реономных материалов и правильно разработанная компьютерная программа могут быть хорошим алгоритмом, описывающим деформацию всех других реономных материалов.

Апробация работы.

Основные идеи и результаты диссертации были представлены и обсуждены на следующих научных конференциях и семинарах:

- XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. «Анализ процессов ползучести и релаксаций материалов на основе нелинейной наследственной теории Работнова». (Уфа, Россия, 19-24 августа 2019 г.);

- IV Международная научно-практическая конференция «Наука и образование в современном мире: вызовы XXI века». «Анализ влияния режима нагружения на ползучесть реономных материалов». (Нур-Султан, Казахстан, 29-31 октября, 2019 г.);

- Workshop on “Smart Nanostructured Materials: from Molecular Self-assembly to Advanced Applications”: «Analysis of the influence of loading mode on creep of rheonomic materials». (Rome, 2-4 October 2019);

- Международная научная конференция «Теоретические и прикладные вопросы математики, механики и информатики» приуроченной к 70-летию доктора физико-математических наук, профессора Рамазанова М.И.: «Исследование релаксации напряжений методом Работнова». (Караганда, Казахстан, 12-13 июня 2019 г.);

- V Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Фараби әлемі». «Реономды процестерді изохронды жылжымалылық кысыктарының ұқсастық әдісімен модельдеу». (Алматы, Казахстан, 10-12 апреля 2018 г.);

- Научные семинары кафедры механики КазНУ имени аль-Фараби. (Алматы, Казахстан, 2017-2020 гг.).

Публикации. По теме диссертации автором было опубликовано 10 работ, в том числе 5 публикации в научных журналах, индексируемых базой данных Scopus и Web of Science, из них 3 публикации в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК для публикации основных результатов научной деятельности; 5 публикации в сборниках международных конференций.

Личный вклад автора состоит в следующем:

- относящиеся ко всем этапам процесса разработки методов расчета для моделирования кривой ползучести реономных материалов;

- исследователь принимает непосредственное участие в разработке программы для определения числовых значений;

- участие в апробации результатов исследования ползучести реономных материалов;

- подготовка публикаций о полученных результатах.

- участвовала в экспериментальных исследованиях асфальтобетона в «Казахстанском дорожно-исследовательском институте».

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения и список использованных источников.

Основное содержание диссертации. Введение включает анализ современного состояния исследуемой проблемы с обзором существующих работ, обоснование актуальности темы диссертационного исследования, цель работы, объект, предмет, задачи исследования, научную новизну, теоретическую и практическую значимость, основные положения, выносимые на защиту, сведения об опубликованных работах по теме диссертации и степень ее разработанности.

В первой главе диссертации рассматривается нелинейное интегральное уравнение Ю.Н. Работнова при описании процесса ползучести реономных материалов. С помощью схематической формы кривых ползучести и изохронных кривых ползучести материала наглядно объясняется метод изохронных кривых ползучести Ю.Н. Работнова.

На основе метода изохронных кривых ползучести Ю.Н. Работнова предложен эффективный алгоритм описания нелинейного деформирования наследственных материалов. Из нелинейного интегрального уравнения Ю.Н. Работнова для случаев использования дробно-экспоненциального ядра Работнова или ядра Абеля получены соответствующие уравнения нелинейного деформирования реономных материалов при ползучести. Представлены улучшенные методы определения параметров ползучести α , ϵ_0 , δ , β и λ . В частности, разработаны новые эффективные методы нахождения параметров

ядра Абеля (α , δ). Для нахождения параметра α используется метод бисекции. Разработаны алгоритм расчета значений параметров ползучести α и δ с высокой точностью и соответствующая компьютерная программа.

Разработана подробная методика описания процесса нелинейного деформирования реономных материалов. Введены понятия экспериментального и модельного реологических параметров и коэффициентов подобия изохронных кривых. Показано как можно с их помощью находить условно мгновенные деформации при разных уровнях напряжения для описания нелинейного деформирования реономных материалов при ползучести.

Путем обработки и использования результатов испытания материалов нейлон 6, ТС 8/3-250 стеклопластика ($\Theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$), арамидное волокно СВМ, смола EDT-10, поликристаллический графит при температурах $T=2000, 2200, 2400, 2600, 2800^\circ \text{C}$, эпоксифенольный стеклопластика при температурах $T=20, 30, 40, 50, 60^\circ \text{C}$ и полиэфирный полимербетон показан процесс последовательной реализации с использованием предложенных методов и соответствующего программного обеспечения. Показана высокая точность предложенного метода.

Проведено математическое моделирование значения деформации ползучести полиэфирного полимербетона, испытанного при ступенчатых и при циклических нагружении. Путем математического моделирования рассчитаны значения деформации полиэфирного полимербетона при различных уровнях напряжения. Описано математическое моделирование экспериментальных значений деформации ползучести эпоксифенольного стеклопластика, которое испытанно при постоянной скорости нагружения. Решена задача релаксации напряжений вязкоупругих материалов.

Во второй главе диссертации рассмотрены результаты экспериментального исследования деформирования асфальтобетона при постоянном напряжении, ступенчатом и постоянном скоростях нагружения по схеме прямого растяжения при температуре $22-24^\circ \text{C}$ в «Казахстанском дорожно-исследовательском институте». Нелинейное деформирование асфальтобетона при ползучести адекватно описывается предложенной методикой.

В третьей главе диссертации представлены результаты испытания образцов асфальтобетона по схеме прямого растяжения при постоянном напряжении, с постоянной скоростью и циклическом нагружениях. Механические характеристики результатов испытаний получены до разрушения 148 образцов асфальтобетона при нагрузке от $0,036 \text{ МПа}$ до $0,763 \text{ МПа}$ при постоянном напряжении. На основе этих данных была построена длительная прочность асфальтобетона при температуре $22-24^\circ \text{C}$, которая аппроксимировалось степенной функцией. Зависимости характеристик разрушения асфальтобетона (время разрушения, деформация разрушения, удельная работа разрушения и прочность) от скорости нагружения высокой точностью описываются степенной функцией. Скорость нагружения оказывает сильное влияние на характеристики деформирования и разрушения асфальтобетона: при увеличении скорости нагружения в 1158 (почти 1200) раз

от 0,000563 МПа/с до 0,652 МПа/с время разрушения, удельная работа разрушения и деформация разрушения уменьшаются в 242, 160 и 3 раза соответственно, а прочность увеличивается в 5 раз.

В результате экспериментального исследования деформации асфальтобетона при циклическом нагружении можно заключить, что:

-в каждом цикле максимальная деформация ползучести асфальтобетона имеет место в конце периода нагружения и максимальная обратная деформация имеет место в конце периода отдыха. Обе эти деформации увеличиваются с увеличением числа циклов, но скорость увеличения первой из них больше, чем у последней;

-в рассмотренных условиях испытаний (длительности периодов нагружения и отдыха равны 600 секунд, значения приложенных напряжений от 0,041 МПа до 3,0 МПа, температура $T=22-24$ °С) асфальтобетон является очень пластическим телом: величина пластической деформации составляет 80-87 % от общей деформации, достигнутой в конце периода нагружения.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационного исследования, оценка полного решения поставленных задачи, рекомендации по фактическому использованию результатов.