

КУТИМОВ КИЯС САБИРОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ
РЕОНОМНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МАЛЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ
(КОНЦЕПЦИЯ ПЕРМАНЕНТНОЙ ПАМЯТИ)**

АННОТАЦИЯ

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

Актуальность темы исследования. Современное материаловедение требует всестороннего изучения поведения материалов при длительном воздействии нагрузок, поскольку процессы ползучести и релаксации напряжений существенно влияют на их долговечность и эксплуатационные характеристики. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью прогнозирования поведения не только асфальтобетона, но и других реономных материалов, которые применяются в строительстве и машиностроении. В этом исследовании проводится комплексный анализ экспериментальных данных, включающий как результаты собственных экспериментов, так и данные, представленные в научных публикациях других авторов. Использование экспериментальных данных различных исследователей позволяет сформировать более точную и обоснованную модель для описания поведения материалов в условиях ползучести и релаксации. Полученные результаты могут быть применены в практике создания более устойчивых материалов, оптимизированных для эксплуатации в условиях длительного воздействия нагрузок, что в конечном итоге улучшит качество и долговечность дорожной и другой инженерной инфраструктуры.

Цель работы. Создание модели, описывающей процессы ползучести и релаксации реономных материалов для предсказания их деформационного поведения при различных температурах и скоростях нагружения.

Задачи исследования:

- Разработку модели для описания стадий ползучести и релаксации напряжений в асфальтобетоне и других материалах.
- Изучение влияния температуры и скорости нагружения на деформационные свойства материалов на различных стадиях ползучести.
- Сравнительный анализ экспериментальных данных, полученных как в рамках собственного исследования, так и из других источников, для обоснования применимости модели к различным материалам.

Объектом исследования являются различные реономные материалы и их поведение в условиях ползучести и релаксации напряжений, включая влияние температуры.

Предметом исследования являются особенности проявления ползучести и релаксации напряжений в различных реономных материалах.

Методы исследования. Исследование выполняется в соответствии с традиционным подходом механики деформируемого твердого тела, основываясь на положениях механики сплошной среды и экспериментально наблюдаемых фактах. Применяются нелинейные интегральные уравнения, гипотеза перманентной памяти, а также методы математической статистики.

Теоретическая и практическая значимость исследования заключается в развитии подходов к описанию процессов ползучести и релаксации напряжений в реономных материалах, таких как асфальтобетон. Применение гипотезы перманентной памяти и нелинейных интегральных уравнений углубляет существующие представления о механике деформируемых тел и позволяет более точно моделировать поведение материалов в условиях длительного воздействия нагрузок. Полученные модели и выводы могут быть использованы для прогнозирования деформационного поведения материалов в реальных условиях эксплуатации, что способствует оптимизации состава материалов и условий их применения в дорожном строительстве и других отраслях. Это исследование предоставляет инструменты для повышения долговечности и надежности конструкций, подвергающихся длительным нагрузкам, что особенно важно для создания устойчивой и безопасной инфраструктуры.

Научная новизна исследования заключается в разработке и обосновании новой модели, описывающей процессы ползучести и релаксации напряжений в реономных материалах с учетом гипотезы перманентной памяти и применения нелинейных интегральных уравнений. Проведен комплексный анализ влияния температурных условий на поведение различных реономных материалов в условиях длительного воздействия, что позволило уточнить механизмы деформации и накопления повреждений. Полученные результаты и предложенные зависимости расширяют существующие представления о поведении материалов под длительной нагрузкой и могут служить основой для дальнейших исследований в механике сплошной среды и реологии.

Постановка задач исследования

Для достижения цели исследования, направленного на создание модели, описывающей процессы ползучести и релаксации реономных материалов при малых деформациях в условиях различных температур и скоростей нагружения, были поставлены следующие задачи:

1. **Разработка математической модели** для описания стадий ползучести и релаксации напряжений в асфальтобетоне и других реономных материалах с учетом гипотезы перманентной памяти и нелинейных интегральных уравнений.
2. **Изучение влияния температуры и скорости нагружения** на деформационные свойства реономных материалов, включая асфальтобетон, полимербетон, металлические сплавы и другие материалы, на различных стадиях ползучести.

3. **Сравнительный анализ экспериментальных данных**, полученных как в рамках собственного исследования, так и из научных публикаций других авторов, для подтверждения универсальности предложенной модели и её применимости к различным типам материалов.
4. **Определение критериев подобия кривых релаксации** реономных материалов, таких как критерий подобия, критерий почти-подобия и отсутствие подобия, с целью систематизации и улучшения прогноза поведения материалов при длительном воздействии нагрузки.

Исследования в области моделирования нелинейных реономных процессов начались в середине XX века, когда появилась потребность в более точном описании сложных материалов, которые демонстрируют нелинейные и вязкоупругие свойства. Первоначально, модели сосредотачивались на линейных реологических процессах, но по мере развития теории упругости и пластичности, учёные начали обращать внимание на поведение материалов при нелинейных деформациях.

Концепция затухающей памяти, или памяти с затуханием, относится к моделям, описывающим поведение материалов, способных запоминать и частично сохранять информацию о прошлых деформациях, но с постепенной потерей этих данных со временем. Это поведение наблюдается в ряде материалов и систем, особенно в вязкоупругих материалах, полимерах и биологических тканях.

Основные аспекты концепции затухающей памяти

1. **Феноменология:** В отличие от перманентной памяти, где материал или система «помнит» предыдущее воздействие на долгий срок или навсегда, затухающая память предполагает, что информация о предшествующих воздействиях постепенно исчезает. Чем дольше материал находится без нагрузки, тем слабее его «воспоминание» о прошлом состоянии.

2. **Математическое моделирование:** Затухающая память описывается уравнениями, в которых присутствуют функции, уменьшающиеся со временем, такие как экспоненциальное затухание. Одним из примеров является использование интегральных операторов с ядром, зависящим от времени, что позволяет моделировать постепенное угасание памяти о деформациях. Классические модели, такие как модель Максвелла, также могут быть адаптированы для учета затухающей памяти путем добавления нелинейных и временных факторов.

3. **Применение в науке и технике:** Модели затухающей памяти важны для анализа материалов, где долговременная память нежелательна (например, в конструкциях, подверженных вибрациям), а также в биомедицинских приложениях, где ткани должны частично "забывать" нагрузки для восстановления своей эластичности.

4. **Физическая природа затухающей памяти:** Это явление связано с релаксационными процессами в материале, при которых внутренние напряжения и деформации разгружаются и возвращаются к исходному состоянию. В полимерных и биологических материалах затухающая память

может возникать из-за перестройки молекулярных цепей и изменения межмолекулярных связей.

Примеры исследований и моделей

Среди исследуемых моделей, которые учитывают затухающую память, можно упомянуть работы по нелинейной вязкоупругости и математические модели, в которых используется принцип суперпозиции с учетом временного затухания. Такие подходы нашли применение в описании полимеров и сплавов, а также в системах с памятью формы, где требуется контролируемое угасание "памяти" деформаций.

При испытании образцов на ползучесть при постоянной нагрузке, как известно, скорость ползучести сначала убывает (первая стадия), потом сохраняет в течение некоторого времени почти постоянное значение (вторая стадия), наконец снова начинает возрастать (третья стадия). Третья стадия ползучести предшествует разрушению.

В настоящее время существует относительно небольшое количество надежных экспериментальных данных, характеризующих ползучесть реономных материалов вплоть до разрушения в широком диапазоне напряжений. Это связано с тем, что испытания при малых напряжениях могут продолжаться десятки и сотни тысяч часов. Поэтому зачастую либо такие испытания не доводятся до разрушения (т.е. длительная прочность не рассматривается), либо они проводятся до разрушения без замера деформаций в процессе ползучести. Ограниченность и разрозненность фактического материала приводит к тому, что вопрос о формулировке механического уравнения состояния и кинетических уравнений, позволяющих учесть процесс разрушения, во многом остается открытым.

В данной главе представлены результаты испытаний на ползучесть при чистом растяжении асфальтобетонных образцов до разрушения, проведенных в КаздорНИИ, а также предлагается модель для описания одноосной ползучести реономного материала вплоть до разрушения.

В данной главе даны и проанализированы результаты экспериментального определения характеристик деформирования и разрушения асфальтобетона при одиннадцати скоростях нагружения от 0,000563 МПа/с до 0,652 МПа/с, различающихся в 1158 раз. Для исследования был выбран традиционно используемый в дорожном строительстве горячий мелкозернистый плотный асфальтобетон типа Б, приготовленный с применением вязкого битума марки БНД 100/130. Испытания были выполнены при температуре 22-24°C в специально изобретенной и собранной установке по схеме прямого растяжения. Образцы асфальтобетона имели форму прямоугольной балочки с размерами 5x5x15 см. Установлено, что с начала нагружения до момента разрушения асфальтобетон деформируется нелинейно. Степень нелинейности увеличивается с повышением нагрузки. 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. Зависимости характеристик разрушения асфальтобетона (время разрушения, деформация разрушения, удельная работа разрушения и прочность) от скорости нагружения высокой точностью описываются степенной функцией.

Основные сведения о ползучести получаются в результате стандартных испытаний на растяжение постоянной нагрузкой. Данные этих испытаний представляются в виде так называемых кривых ползучести. Типичную кривую ползучести как обычно разделяют на три участка. На первом участке (первая стадия) скорость деформирования переменная, она убывает со временем, достигая минимального значения. На втором участке (вторая стадия) скорость ползучести постоянна. На третьем участке (третья стадия) скорость ползучести опять возрастает, пока не наступит разрыв образца. Не всегда процесс ползучести протекает в соответствии с указанной схемой. На кривой может отсутствовать первый либо третий участок, первый может сразу переходить в третий.

Уменьшение скорости деформации на первом участке Работнов объясняет упрочнением материала, деформация образца сопровождается такими структурными изменениями, которые затрудняют ползучесть. Выход на второй участок означает исчерпание способности материала упрочняться. Ускоренная ползучесть на третьем участке согласно Коста де Андраде, связана с изменением площади сечения образца. Следовательно, при постоянном напряжении третья стадия ползучести не должна была бы проявляться. Однако, третья стадия ползучести при постоянном номинальном напряжении существует у многих материалов. Разрушение материала в условиях длительного действия нагрузки происходит вследствие образования трещин. Появление трещин уменьшает эффективную площадь поперечного сечения образца и согласно Работнову увеличивает эффективное напряжение. Эффективное напряжение не равно номинальному напряжению, вот почему на третьей стадии ползучести происходит увеличение скорости ползучести. Когда эффективная площадь поперечного сечения стремится к нулю и образец ломается. Разрыв происходит, когда микроскопические трещины сливаются и образуют макротрещину разрушения.

Вопрос о движении или равновесии макротрещины в такой постановке не представляет существенного значения, основную роль играет кинетика накопления микротрещин. Когда плотность микротрещин достигает критического значения, происходят разрушения.

Под разрушением твердого тела, в прямом смысле, понимается разделение его на части, связанное с образованием новых поверхностей. Процесс образования этих новых поверхностей может быть описан как рост трещины. При этом термин «трещина» по Работнову употребляется здесь в наиболее общем смысле и относится к изменению геометрии.