

*На правах рукописи*



**СИДОРОВ МИХАИЛ ИГОРЕВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ  
СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ И  
УПРАВЛЕНИЯ ТРИБОХИМИЧЕСКИМИ  
ПРОЦЕССАМИ ИЗНАШИВАНИЯ**

Специальность 05.02.04 – Трение и износ в машинах

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва 2018

Работа выполнена в Федеральном казенном предприятии «Научно-исследовательский институт «Геодезия» и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «МИРЭА-Российский технологический университет»

- Научный консультант:** Лукашев Евгений Алексеевич - лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты:** Дементьев Вячеслав Борисович - доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН», руководитель института  
Кравченко Игорь Николаевич - доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева», профессор кафедры «Технический сервис машин и оборудования»  
Меделяев Игорь Алексеевич - доктор технических наук, ФГКВОУ ВО «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» Министерства обороны Российской Федерации, профессор кафедры «Материально-технического обеспечения РВСН»
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Защита состоится «29» ноября 2018 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 999.112.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» и Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» по адресу: 119334, Москва, ул. Бардина, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН и на сайте: <http://www.imash.ru/councils/disertacii01/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 года

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



В.А.Хандожко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Для поддержания на высоком уровне конкурентоспособности техники необходимо постоянно обновлять научно-технический задел. Существует значительный задел новых принципов в исследовании баллистики, но по-прежнему остается актуальной эта проблема в области повышения живучести артиллерийских стволов.

Живучесть ствола - параметр ствольной системы, характеризующий сколько выстрелов можно произвести из данного артиллерийского ствола пока начальная (дульная) скорость снаряда не уменьшится на величину 10-15%. Живучесть ствола зависит от интенсивности износа канала артиллерийского ствола, то есть от интенсивности протекающих в системе "пороховой заряд — снаряд — ствол" механических, термодинамических и химических взаимодействий.

В современных условиях конкуренция в разработке и производстве новой техники требует организации максимально быстрого ее проектирования, испытаний и постановки на производство. Это заставляет разработчиков переходить к сокращению объема натурного эксперимента и испытаний, заменяя его вычислительным. Актуальность такой стратегии обусловлена тем, что основные концепции новой техники хорошо известны конкурирующим сторонам. Эта стратегия диктует необходимость постоянной модернизации методического обеспечения полигонных испытаний. Тенденции к увеличению количества огневых задач артиллерии, использование высокоэнергетичных порохов с повышенным эрозивным воздействием, ужесточение режимов стрельбы и условий эксплуатации артиллерийских установок приводят к необходимости совершенствования методов и средств контроля состояния артиллерийских стволов. Требования к росту мощности заряда, скорости боеприпаса, скорострельности и ряда других характеристик заставляют критически относиться к имеющейся методической базе полигонных испытаний.

Испытания стволов на живучесть проводятся с целью определения падения баллистики ствола в зависимости от его настрела и установления числа выстрелов, при котором ствол достигает предела живучести. Для современных артиллерийских орудий признаком достижения стволом предела живучести служит систематическое срезание ведущих поясков снарядов, вызванное изнашиванием и разрушением поверхности ствола. Этим обуславливается резкое ухудшение кучности стрельбы и непрогнозируемый полет снарядов, приводящий к появлению траекторных разрывов и отказам действия снарядов у цели.

Используемые для расчета износа и живучести стволов формулы, являются эмпирическими, суммирующими экспериментальные результаты испытаний образцов вооружения. Это заставляет испытания новых образцов (стволов или снарядов) проводить в более широком масштабе и требует больших материальных и временных затрат. Поэтому в настоящее время остро встала необходимость разработки теоретических основ тех методов, которые ранее базировались на эмпирических зависимостях. Прогресс современной вычислительной техники позволяет решать поставленные задачи, однако для этого требуется определенный

научно-технический задел и, прежде всего, в области моделирования и теории процессов изнашивания материалов артиллерийских стволов.

**Целью работы** является создание научно-технического задела, теоретическое обоснование и практическая апробация методологии решения задач внутренней баллистики артиллерийских систем основанной на повышении износостойкости материалов, работающих в высоких потоках энергии.

Поставленная цель достигалась решением **комплекса задач** в следующих направлениях:

1) Оценка технологических методов повышения износостойкости и живучести артиллерийских стволов (анализ стратегий использования материалов и антифрикционных противоизносных покрытий).

2) Анализ современных методов оценки живучести артиллерийских стволов. Постановка задач исследований.

3) Мониторинг и апробация (валидация по экспериментальным данным) математических моделей трибохимической кинетики внешнего трения и фрикционных автоколебаний.

4) Мониторинг и апробация (валидация по экспериментальным данным) математических моделей механохимической кинетики накопления повреждений и изнашивания.

5) Разработка математической термодинамической модели разрушения материалов, как неравновесного фазового перехода, происходящего в системах с большими запасами избыточной энергии и значений градиентов;

6) Адаптация математической модели разрушения к решению задач оценки энергетического состояния материала ствола (в объеме и поверхностном слое) путем использования программ распознавания образов, позволяющих по сопоставлению экспериментальных и теоретических картин (получаемых в вычислительном эксперименте) давать заключение о структурном состоянии материала ствола и его остаточном ресурсе.

7) Разработка методик и получение экспериментальных данных по накоплению повреждений в материале ствола (в объеме и в поверхностном слое), служащих исходными данными для валидации математических моделей разрушения в форме неравновесного фазового перехода.

8) Разработка комплекса технологических и эксплуатационных мероприятий по управлению процессами, обеспечивающими снижение изнашивания материалов артиллерийских систем.

**Научная новизна.** Созданы научные основы обеспечения живучести артиллерийских систем на основе сопряжения задач повышения износостойкости материалов с использованием:

- разработанных и верифицированных моделей механохимической кинетики накопления повреждений и изнашивания;

- разработанных и верифицированных моделей трибохимической кинетики внешнего трения;

- разработанных и верифицированных моделей теории неравновесных фазовых переходов для оценки энергетического состояния материала ствола и параметров его работоспособности.

**Основные положения работы, выносимые на защиту:**

1) Результаты верификации моделей, валидации результатов испытаний и полученные зависимости трибохимической кинетики, используемые для решения задач повышения износостойкости материалов артиллерийских систем.

2) Результаты верификации моделей, валидации результатов испытаний и полученные зависимости процессов механохимической кинетики накопления повреждений и разрушения конструкционных материалов используемые для оценки живучести (ресурса, остаточного ресурса) артиллерийских стволов.

3) Модели процессов разрушения как неравновесного фазового перехода, используемые для оценки энергетического и структурного состояния конструкционного материала ствола (в поверхностном слое и в объеме).

4) Технологические мероприятия, обеспечивающие повышение износостойкости материалов и живучести артиллерийских систем.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена качественным и количественным согласием теоретических моделей, результатами верификации математических моделей и валидации результатов на большом объеме экспериментальных данных.

**Практическая значимость.** Результаты теоретических исследований в форме математических моделей трибохимической кинетики внешнего трения, механохимической кинетики накопления повреждений и разрушения конструкционных материалов, теории неравновесных фазовых переходов в приложении к задачам о разрушении материала ствола (в поверхностном слое и в объеме) является научно-техническим заделом для развития теоретических основ и моделирования полигонных испытаний артиллерийских стволов.

Разработаны новые принципы защиты поверхности стальных деталей от разрушения, основанные на снижении концентрации диффузионноактивного водорода в поверхностном слое детали.

Разработаны технологии регулирования интенсивности процессов разрушения металла путем формирования на его поверхности защитного барьера при изготовлении детали и в процессе ее эксплуатации.

Разработаны и используются в промышленности составы смазочных, обкаточных и смазочно-охлаждающих жидкостей, формирующих плакирующий защитный слой на поверхности детали.

Разработана и внедрена в промышленности методология регулирования величины износа высоконагруженных узлов технических систем, основанная на контроле содержания в металлах диффузионноактивного водорода и обеспечения эффективной защиты от наводороживания поверхностных слоев деталей технологиями металлоплакирования.

Результаты апробации разработанных технологий представлены в приложении №5 диссертации. Комплекс данных работ Распоряжением Правительства

РФ от 17 марта 2010 г. № 333-р был отмечен премией Правительства РФ в области науки и техники за научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, завершившиеся созданием и широким применением в производстве принципиально новых технологий, техники, оборудования и материалов.

**Личное участие автора** заключается в постановке и решении задач трибохимической кинетики внешнего трения, механохимической кинетики накопления повреждений и разрушения конструкционного материала, теории разрушения материала канала артиллерийского ствола в форме неравновесного фазового перехода в приложении к задачам внутренней баллистики и повышению информационной обеспеченности полигонных испытаний артиллерийских стволов на живучесть.

Автором теоретически обоснован методический подход, позволяющий значительно повысить информативность полигонных испытаний артиллерийских стволов на живучесть, при одновременном сокращении их объема и являющийся научно-техническим заделом баллистических испытаний.

Автором обоснованы, разработаны и внедрены технологии повышения износостойкости тяжело нагруженных узлов трения и повышения живучести технических систем современного вооружения и военной техники.

**Апробация работы.** Основные положения и наиболее важные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались более, чем на 10 международных конференциях, в том числе:

- XXIX Научно-техническая конференция «Проектирование систем» (МВТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 2012г.);
- 40-я и 41-я Научно-технические конференции «Проектирование боеприпасов» (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 2013, 2014 гг.);
- 9-я Международная научно-практическая конференция «Технические средства противодействия террористическим и криминальным взрывам» (г. Санкт-Петербург, 2014г.);
- X Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы утилизации ракет и боеприпасов, безопасность, ресурсосбережение, экология» (г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, 24-26 августа 2015г.);
- Международная научная конференция «Механика и трибология транспортных систем-2016» (г. Ростов-на-Дону, 8-10 ноября 2016г.);
- 6-я Международная научно-практическая конференция «Перспективное развитие науки, техники и технологий» (г. Курск, 20-21 октября 2016г.);
- 6-я и 7-я Международные научно-практические конференции «Инновации, качество и сервис в технике и технологиях» (г. Курск, 2016, 2017 гг.);
- 2-я Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (г. Курск, 16-17 февраля 2017г.);
- 16-я Международная научно-практическая конференция «Управление качеством» (МАИ, г. Москва, 14-15 марта 2017г.);

- IV Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (ИМАШ РАН, г. Москва, 8-9 ноября 2017г.).

- Распоряжением Правительства РФ от 17 марта 2010 г. № 333-р автору в составе коллектива присуждена премия Правительства РФ в области науки и техники за «Комплекс оборудования и технологий с управлением качеством нанесения многофункциональных покрытий для повышения работоспособности высоконагруженных узлов». Работа прошла комплексную экспертизу и всестороннее общественное обсуждение в соответствии с Положением о премиях.

**Публикации результатов исследований.** Основное содержание работы опубликовано в 78 научных работах, из них 17 статей, в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией России, 4 публикации в изданиях, включенных в международную реферативную базу Scopus, 2-е монографии, 14 патентов на изобретение, 4 заявки на выдачу патента.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и 5 приложений. Основное содержание изложено на 321 страницах и включает 288 страницы машинописного текста в т.ч. 113 рисунков, 15 таблиц и список литературы из 340 наименований, и приложения на 147 страницах, включающее 103 рисунка и 30 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, сформулирована цель и направление исследований. Научная новизна и практическая значимость связаны с развитием теоретических основ испытаний артиллерийских стволов на живучесть и созданием научно-технического задела в области математического моделирования в виде разработки математических моделей трибохимической кинетики для корректировки задач внутренней баллистики, механохимической кинетики накопления повреждений в конструкционных материалах, приводящего к износу и разрушению, математических моделей разрушения как неравновесного фазового перехода в приложении к задачам повышения живучести артиллерийских стволов, путем теоретического описания изменения энергетического состояния и структуры материала в ходе роста настрела.

**В первой главе** дана краткая характеристика современных методов испытаний артиллерийских стволов на износ и живучесть; рассмотрены технологические аспекты повышения живучести артиллерийских стволов, а также подходы к моделированию структуры сплавов на разных иерархических уровнях (макроскопическом, мезоскопическом и микроскопическом); рассмотрены трибологические приемы снижения износа стволов. Среди экспериментальных методов исследования стволов на живучесть подробно рассмотрен метод контрастирования фотоснимков поверхности канала ствола; с целью развития этого метода путем компьютерного сопоставления с использованием программ распознавания образов контрастированных фотоснимков и теоретических «картин» формирования структуры материала.

Рассмотрены методы расчетной оценки живучести артиллерийских стволов и критические замечания к ним, высказываемые ранее; рассмотрены современные подходы к расчетному определению износа и живучести, к автоматизации проектирования; современные средства автоматизации внутрибаллистических расчетов и оценки живучести артиллерийских стволов; показано, что расчетные методы базируются в основном на эмпирических зависимостях, полученных при обработке результатов прежних испытаний, что сдерживает отработку новых образцов военной техники.

По результатам анализа сделаны выводы об актуальности модернизации системы полигонных испытаний с целью повышения информационного потенциала получаемых экспериментальных данных, а также сформулирована проблема и поставлена задача исследования, предполагающая разработку теории и математических моделей внешнего трения для корректировки задач внутренней баллистики, кинетических моделей накопления повреждений в конструкционном материале, являющихся основой прогностических методов оценки износа и живучести стволов, моделей разрушения в форме теоретического описания процесса разрушения в виде неравновесного фазового перехода.

**Вторая глава** посвящена математическим моделям трибохимической кинетики внешнего трения, поскольку одной из важных составляющих внутрибаллистических задач является определение характера трения при движении снаряда по стволу. В настоящее время используется исключительно априорное его задание, опирающееся на экспериментальный материал и опыт полигонных испытаний. Переход к проектированию артиллерийских систем большего могущества не подкреплен таким экспериментальным заделом. В связи с этим была поставлена задача разработки и апробации теории трения в форме математических моделей трибохимической кинетики. Эта теория и модели являются научно-техническим заделом, цель которого повышение информативности полигонных испытаний и снижения их объема.

Формулировка модели топохимической кинетики адгезионного схватывания двух трущихся поверхностей сводится к следующему. В зоне пятен контакта образуются зародыши и растущие ядра схватывания (здесь термин пятна контакта относится к движущимся поверхностям, а термин ядра схватывания - к топохимической реакции адгезионного схватывания). На разрушение этих ядер требуется энергия, расходуемая на единицу пути; ее диссипация фиксируется как трение.

Образование ядер схватывания на пятнах контакта представляется как топохимическая реакция, протекающая в двумерном реакторе. В модели фиксируются два процесса и две скорости – скорость перемещения и скорость топохимической реакции, или два характерных времени – время пробегания друг относительно друга двух контактирующих поверхностей и время завершения топохимической реакции (степени покрытия поверхности ядрами схватывания). Соотношения между этими скоростями определяют характерные черты процесса, а задача управления процессом трения сводится к заданию параметров топохимической реакции.



Предполагается, что на поверхности существуют активные центры – зародыши, которые переходят в активно растущие ядра схватывания. Эти ядра по мере их разрастания перекрываются. Для построения кинетической характеристики процесса трения принимается, что при нулевой скорости относительного перемещения контактирующих поверхностей (при  $v=0$ ) реализуется ситуация  $t \rightarrow \infty$ , т.е. на всей поверхности пятен контакта сформировались ядра адгезионного схватывания.

В соответствии с этими представлениями сформулирован ряд задач. Зависимость для степени покрытия пятен контакта ядрами схватывания приобретает вид

$$\alpha = 1 - (1 - \alpha_0) \exp\{-A_0 k_y^2 t^2 (1 - \exp\{-k_x t\})\} \quad (1)$$

здесь кинетическая модель сформулирована относительно скорости топохимической реакции, но решение должно быть получено относительно скорости движения контактирующих поверхностей. Топохимическая реакция адгезионного схватывания может реализоваться в большей или меньшей степени. Это зависит от относительной скорости перемещения поверхностей фрикционного контакта ( $v_h$ ) и от скорости топохимической реакции ( $v_r$ ). Эти зависимости должны иметь следующий характер: 1 - степень реализации топохимической реакции будет тем меньше, чем больше скорость относительного движения поверхностей при постоянном значении скорости топохимической реакции; 2 - степень реализации топохимической реакции будет тем меньше, чем меньше скорость топохимической реакции при постоянном значении скорости относительного перемещения поверхностей. Для представления этих закономерностей вводится характерное время пробегания поверхностей друг относительно друга  $t_h$  и характерное время топохимической реакции  $t_r$ . Предполагается, что разница этих величин есть некоторое характерное время запаздывания топохимической реакции  $\tau$ , представляющее некоторую усредненную величину, которая на данном этапе построения модели кинетики принимается параметром  $\tau = t_h - t_r$ . Величина  $t_h$  может быть представлена как  $t_h = h/v_h$ , где  $h$  - характерный линейный размер пятна контакта

в направлении движения, тогда  $\tau = \frac{h}{v_h} - t_r$ . Введение параметра  $v_0$ :  $v_0 = v_h \frac{\tau}{t_r}$ , имеющего размерность скорости и отражающего соотношение основных величин, характеризующих степень адгезионного схватывания, позволяет  $t_r$  выразить в

$$\text{виде } t_r = \frac{h}{v_h + v_0}.$$

Такое представление  $t$  для времени реализации топохимической реакции соответствует введению автомодельной переменной  $z = h - vt$ . В отличие от классической автомодельной переменной, связанной с распространением единичного фронта реакции, в данном случае эта переменная связана с распространением по пятну контакта всех фронтов роста ядер адгезионного схватывания (фронт является «распределенным»). Параметр  $v_0$  позволяет согласовать результаты эксперимента с теоретическими соотношениями.

Решение этого класса задач позволило заключить, что оно может описать ряд экспериментальных закономерностей и позволяет дать их физико-химическую трактовку. Например, независимость коэффициента трения от скорости скольжения и его уменьшение с ростом этой скорости.

Изучен характер топохимических зависимостей при учете механохимической и тепловой активации поверхностей фрикционного контакта. Под механохимической активацией в этой концепции трения понимается следующее явление. Образование ядер схватывания в последующие моменты времени приводит к их разрушению при скольжении поверхностей друг относительно друга. Это разрушение будет давать другую (в энергетическом отношении) поверхность, т.е. поверхность более богатую активными дефектами – активными центрами. Этот процесс может быть отражен принятием следующей закономерности: снижение энергии активации (зарождения зародышей) пропорционально (в первом приближении) скорости относительного скольжения поверхностей или некоторой функции от скорости ( $k_x = k_x(v)$ ). Аналогичная закономерность предполагается и для константы скорости роста ядра схватывания ( $k_y = k_y(v)$ ), поскольку места разрушения ядер будут обладать повышенной поверхностной энергией, которая должна кинетически реализовываться в большей скорости распространения зоны реакции при росте вновь образовавшегося ядра.

Второй процесс - диссипация механической энергии должна приводить к разогреву места контакта поверхностей за счет необратимости двух процессов: образования и роста ядер схватывания, с одной стороны, и разрушения ядер, с другой. Эта необратимость может быть отражена как локальное повышение температуры в зоне реакции ( $T = T(v)$ ).

Описанные зависимости представлены в форме уравнения Аррениуса

$$k_x = k_{0,x} \exp\left\{-\frac{h^*[E_A^* - \delta^* g(v)]}{E_T^* + \rho^* g(v)}\right\}; k_y = k_{0,y} \exp\left\{-\frac{h[E_A - \delta g(v)]}{E_T + \rho g(v)}\right\} \quad (2)$$

здесь  $E_A^*$  - энергия активации перехода зародыша в активно растущее ядро (для случая первоначальной, т.е. исходной поверхности),  $E_T^*$  - тепловой потенциал (аналог  $RT$  в уравнении состояния идеального газа),  $g(v)$  - функция преобразования энергии:  $\delta^* g(v)$  - преобразование механической энергии в поверхностную энергию дефектов,  $\rho^* g(v)$  - преобразование механической энергии в тепловую энергию. Для целей качественного исследования может быть принято  $\delta^* + \rho^* = 1$ . Коэффициенты  $\delta^*$  и  $\rho^*$  отражают близость условий зоны реакции (контакта поверхностей) к изотермическим или адиабатическим. Условия близкие к изотермическим (хороший теплоотвод и высокая теплопроводность материала) могут быть отражены значениями  $\rho^* \cong 0$  и  $\delta^* \cong 1$ , а условия близкие к адиабатическим (плохой теплоотвод, низкая теплопроводность материала) -  $\rho^* \cong 1$  и  $\delta^* \cong 0$ . Во втором выражении (2) аналогичные величины имеют тот же физико-химический смысл.

На рис. 1 для примера приведена расчетная характеристика трения. На большом объеме экспериментальных данных, включая высокоскоростные, выполнена компьютерная верификация (валидация) математических моделей трибохимической кинетики внешнего трения.

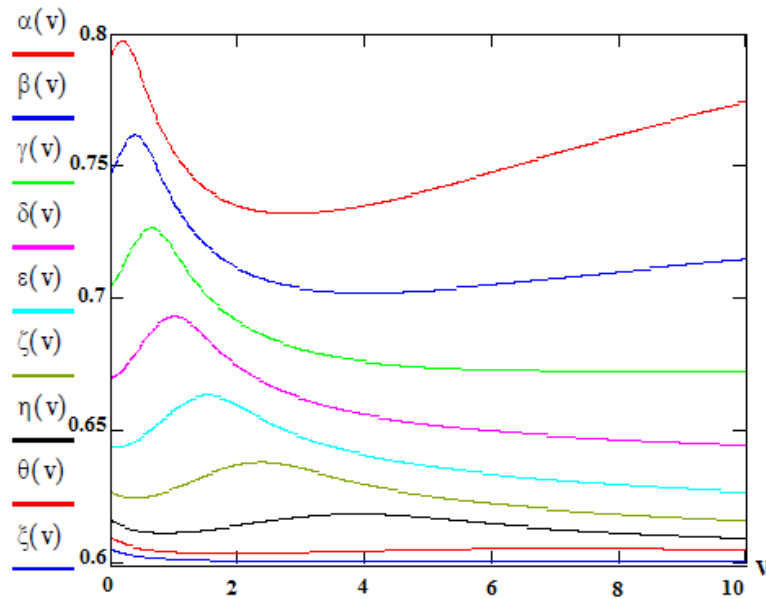


Рис. 1. Кинетические характеристики Герси-Штрибека; расчет по уравнению (1) с учетом изотермичности и адиабатичности в зоне пятен контакта (2). Для девяти кривых (нумерация сверху вниз)  $v_0 = 1$ ;  $\alpha_0 = 0,6$ ;  $A_0 k_y^2 = 1$ ;  $k_x = 2$ ;  $h^* = 5$ ;  $h = 1$ ;  $\rho^* = \rho = 0,1$ ; различия отражены параметрами  $\delta^*$  и  $\delta$ : 1 -  $\delta^* = \delta = 0,9$ ; 2 -  $\delta^* = \delta = 0,8$ ; 3 -  $\delta^* = \delta = 0,7$ ; 4 -  $\delta^* = \delta = 0,6$ ; 5 -  $\delta^* = \delta = 0,5$ ; 6 -  $\delta^* = \delta = 0,4$ ; 7 -  $\delta^* = \delta = 0,3$ ; 8 -  $\delta^* = \delta = 0,2$ ; 9 -  $\delta^* = \delta = 0,1$ .

Пример отработки компьютерной программы для верификации математической модели топахимической кинетики внешнего трения по экспериментальным данным иллюстрируется результатами расчетов, которые представлены в графической форме, а также в форме вектора кинетических констант модели. Кинетические параметры, фигурирующие в уравнении (1) переобозначены в соответствии с таблицей 1. Для предварительного анализа принята линейная зависимость для функции активации  $g(v)$ :  $g(v) = av + b$ .

Таблица 1

$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_4$	$2\eta_5$	$\eta_6$	$\eta_7$	$\eta_8$	$\eta_9$	$\eta_{10}$
$\alpha_0$	$A_0 k_{0,y}^2$	$v_0$	$h$	$2h_y$	$E_{A,y}$	$\delta_y$	$a$	$b$	$E_{T,y}$

Продолжение таблицы 1

$\eta_{11}$	$\eta_{12}$	$\eta_{13}$	$\eta_{14}$	$\eta_{15}$	$\eta_{16}$	$\eta_{17}$	$\eta_{18}$	$\eta_{19}$
$\rho_y$	$k_{0,x} h$	$h_x$	$E_{A,x}$	$\delta_x$	$E_{T,x}$	$\rho_x$	параметр масштаба	параметр сдвига

Уравнение (1) в принятых обозначениях (таблица 1) имеет вид

$$\alpha = [1 - (1 - \eta_1) \exp\{F(\eta_i)(1 - \exp\{G(\eta_i)\})\}] \eta_{18} + \eta_{19}; \quad (3)$$

$$F(\eta_i) = -\eta_2 \left( \frac{\eta_4}{v + \eta_3} \right)^2 \exp \left\{ -\frac{2\eta_5 [\eta_6 - \eta_7 (\eta_8 v + \eta_9)]}{\eta_{10} + \eta_{11} (\eta_8 v + \eta_9)} \right\}; \quad (4)$$

$$G(\eta_i) = -\frac{\eta_{12}}{v + \eta_3} \exp \left\{ -\frac{\eta_{13} [\eta_{14} - \eta_{15} (\eta_8 v + \eta_9)]}{\eta_{16} + \eta_{17} (\eta_8 v + \eta_9)} \right\}. \quad (5)$$

Результаты апробации модели позволили заключить, что исследуемая математическая модель является работоспособной и для сложных случаев, когда на характеристике Герси-Штрибека фиксируются как минимум, так и максимум.

Вибрация орудийных стволов является одной из характеристик, определяющих тактико-технические данные артиллерийских систем. В то же время часто причиной возникновения вибрации являются фрикционные автоколебания. Поскольку движение снаряда по каналу ствола связано с преодолением значительных сил трения, можно предположить, что такие условия способствуют возникновению фрикционных автоколебаний. Они могут проявляться в виде неравномерного (прерывистого) движения снаряда по каналу ствола, особенно ближе к дульному срезу. Такой характер трения приводит к повышенному износу. При достаточно большом износе и отклонениях условий выстрела от штатных (например, при изменении свойств заряда) наличие фрикционных автоколебаний фиксируется в виде периодической картины износа канала ствола вблизи дульного среза.

В связи с этим решение задачи повышения живучести артиллерийских стволов имеет как одну из подзадач задачу изучения фрикционных автоколебаний. Для возникновения фрикционных автоколебаний кинетическая характеристика трения должна иметь определенный: при увеличении скорости скольжения первоначально должно фиксироваться падение коэффициента трения, а затем наблюдаться его рост.

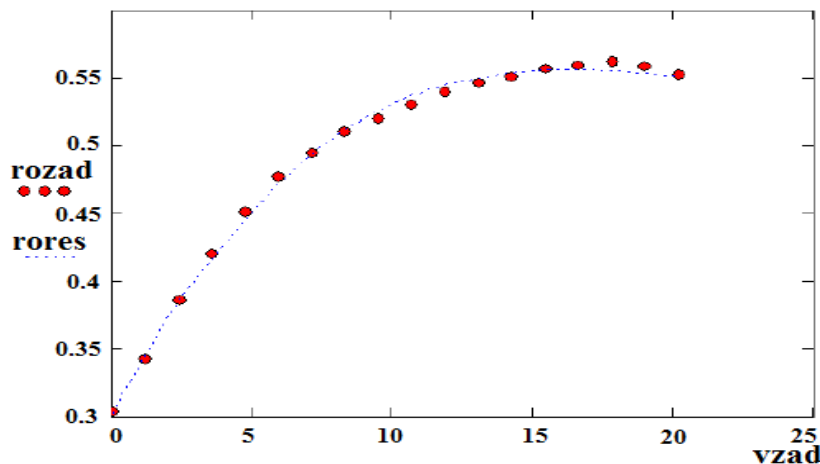


Рис. 2. Пример аппроксимации экспериментальной зависимости коэффициента трения от скорости скольжения для «малого» давления нагружения (Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968, 480 с.)

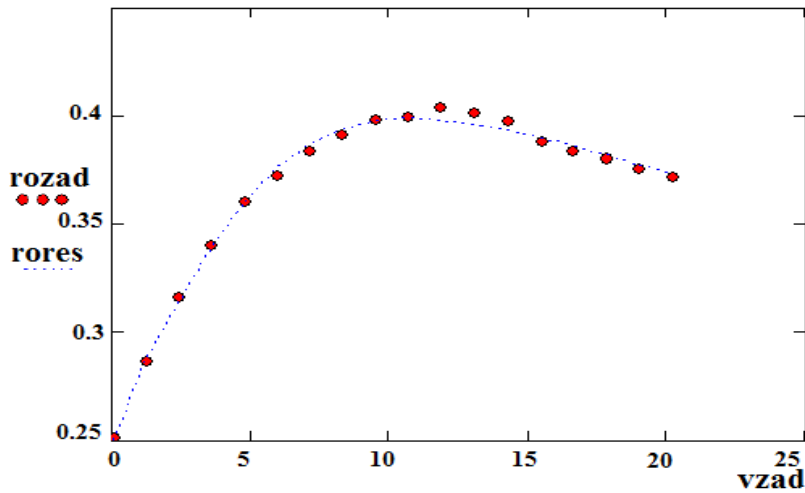


Рис. 3. Пример аппроксимации экспериментальной зависимости коэффициента трения от скорости скольжения для «среднего» давления нагружения (Крагельский И.В. Трение и износ.М.: Машиностроение, 1968, 480 с.)

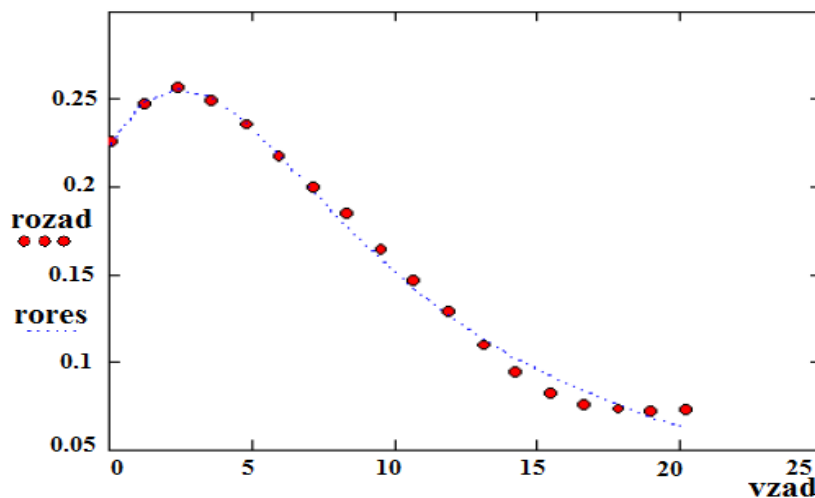


Рис. 4. Пример аппроксимации экспериментальной зависимости коэффициента трения от скорости скольжения для «высокого» давления нагружения (Крагельский И.В. Трение и износ.М.: Машиностроение, 1968, 480 с.)

Для решения поставленной задачи математическая модель фрикционных автоколебаний строилась в соответствии с «примером Ван-дер-Поля». Функция, фиксирующая зависимость силы трения от скорости скольжения, задавалась в форме кинетического уравнения адгезионного схватывания как топохимической кинетики образования и разрушения ядер адгезионного схватывания на пятнах фрикционного контакта. Эта модель имеет вид

$$\dot{x}_1 = x_2; \quad \dot{x}_2 = -cx_1 - q(\varphi(x_2) - \varphi(0)) \quad (6)$$

где  $x_1$  - положение тела на ленте, относительно точки, в которой тело неподвижно относительно ленты;  $x_2$  - скорость движения тела относительно ленты,  $c$  - жесткость пружины,  $q$  - нагрузка, которую тело оказывает на ленту. Трение представлено функцией  $\varphi(x_2)$  в виде  $\alpha = \alpha(v)$  с учетом изменения направления движения при колебаниях ( $\alpha_* = 1 - \alpha_0$ ;  $\varepsilon$  - малый параметр; функция  $th((x_2 - v)/\varepsilon)$  задает разрыв при смене знака скорости относительного движения тела и ленты в «примере Ван-дер-Поля»).

$$\varphi(x_2) = \left( th \left( \frac{x_2 - v}{\varepsilon} \right) \right) \times \left[ 1 - \alpha_* \exp \left\{ \frac{-A_0 k_{0,y}^2 z^2}{\left[ (x_2 - v) \text{sign}(x_2 - v) + u_0 \right]^2} \exp \left\{ \frac{-E_{A,y} + \delta_y (x_2 - v) \text{sign}(x_2 - v)}{E_{T,y} + \rho_y (x_2 - v) \text{sign}(x_2 - v)} \right\} \right\} \right] \times$$

$$\times \left[ 1 - \exp \left\{ \frac{-k_{0,x}z}{[(x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v) + u_0]^2} \exp \left\{ \frac{-E_{A,x} + \delta_x (x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v)}{E_{T,y} + \rho_x (x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v)} \right\} \right\} \right] \quad (7)$$

Выполнены качественные исследования: влияния температуры, вызывающее изменение скорости перехода потенциальных зародышей в активные ядра адгезионного схватывания, на характер фрикционных колебаний; влияния температуры, вызывающее изменение скорости роста ядер адгезионного схватывания, на характер фрикционных автоколебаний; влияния температуры, вызывающее изменение скоростей перехода зародышей в активные ядра адгезионного схватывания и роста этих ядер, на характер фрикционных автоколебаний. Модельная характеристика трения, на которой были выполнены расчетные исследования фрикционных автоколебаний, приведена на рис. 5.

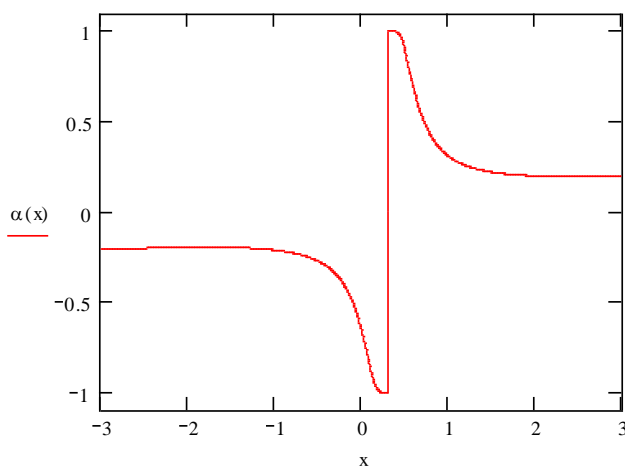


Рис. 5. Модельная кинетическая характеристика трения (здесь координата  $X$  соответствует  $X_2$ )

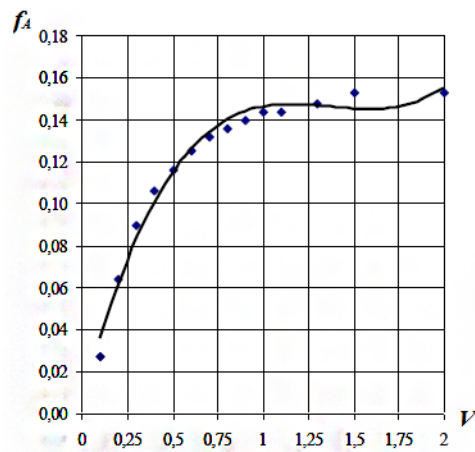


Рис. 6. Изменение частоты автоколебаний  $f_A$  при увеличении скорости скольжения

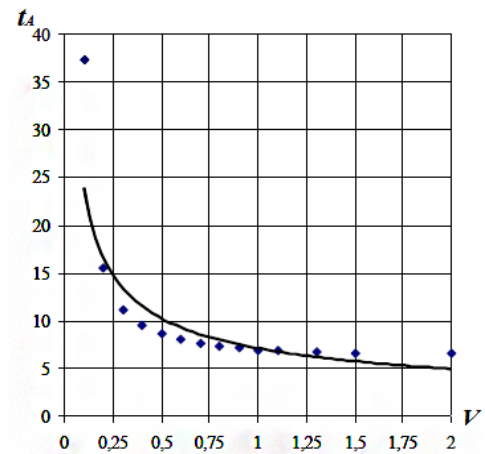


Рис. 7. Изменение периода автоколебаний  $t_A$  при увеличении скорости скольжения

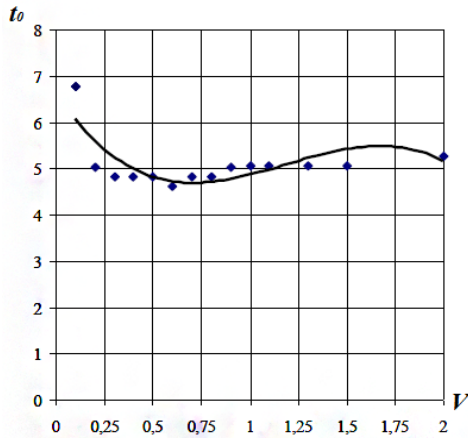


Рис. 8. Изменение времени скачка  $t_0$  при увеличении скорости скольжения

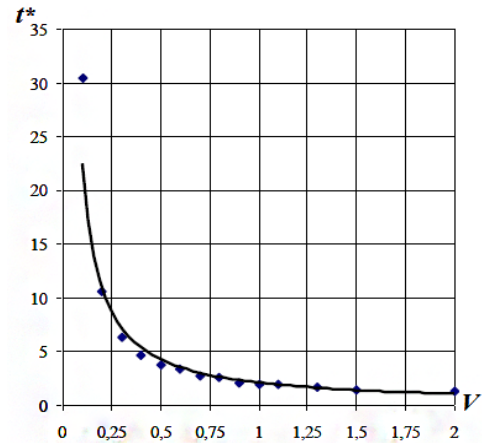


Рис. 9. Изменение времени «ползущей остановки»  $t^*$  при увеличении скорости скольжения

В качестве примера выше приведены результаты исследования изменения характера фрикционных автоколебаний при увеличении скорости скольжения рис.6-9.

**Третья глава** посвящена математическим моделям механохимической кинетики накопления повреждений в конструкционных материалах, приводящее к износу и разрушению. Решение многих проблем живучести артиллерийских стволов может быть достигнуто детальной интерпретацией экспериментальных результатов, касающихся эксплуатационных свойств материала ствола. Цель такой интерпретации заключается в предоставлении разработчикам особенностей поведения материалов под нагрузкой в сложных термических и коррозионных условиях. Определенную помощь в решении этих проблем может предоставить математическое моделирование при постановке обратных задач, предполагающих восстановление по статистике отказов (разрушения образцов) хода процесса накопления повреждений с реконструкцией механизмов с некоторой степенью детальности.

В механике разрушения принято различать два подхода. Один акцентирует внимание на напряженно-деформированном состоянии в окрестности «особых» точек или сечений. Второй основное внимание уделяет различным непрерывным распределениям дефектов и функциям, определяющим степень поврежденности. В рамках второго подхода представлена формулировка обратных задач кинетики накопления повреждений: предполагается, что при достижении высокого уровня поврежденности наступает нарушение сплошности материала, приводящее к его разрушению.

Любой конструкционный материал является дисперсным, например, поликристаллическим или армированным, а в термодинамическом отношении метастабильной системой. Поэтому стремление к равновесию с окружающей средой приводит к его деградации, которая протекает во времени и может быть представлена некоторой кинетикой. С термодинамической и кристаллографической точек зрения в материале можно выделить отдельные точки (атомы) и локальные

области, различающиеся уровнем метастабильности. Наибольшим запасом потенциальной энергии обладают атомы вершин, меньшим атомы ребер, еще меньшим атомы поверхностей и наименьшим атомы внутри кристаллита. Это позволяет предложить схему кинетики накопления повреждений: первыми активируются точечные дефекты - атомы вершин - зародыши повреждений, затем линейные дефекты - атомы ребер, после этого поверхностные или двумерные дефекты и в последнюю очередь - атомы внутри объема кристаллита.

Первоначально ставится задача построения гипотетической кинетики накопления повреждений. Она является прямой задачей. Затем ставится обратная задача: подобрать кинетические константы модели по экспериментальным данным статистики разрушения образцов. Это дает возможность сравнением нескольких вариантов приемлемой аппроксимации экспериментального распределения предложить сценарий развития разрушения.

Постановка обратной задачи предполагает справедливость эргодической гипотезы: большое число последовательных наблюдений над одной системой в форме кинетики накопления повреждений в одном образце, прослеженная до его разрушения, эквивалентно большому числу одновременных наблюдений над ансамблем, т.е. статистическому распределению разрушения некоторой выборки образцов. На практике допущение того, что для оценки вероятности возможного результата испытаний одного образца необходимо провести испытания выборки образцов, считается разумным, а справедливость эргодической гипотезы для данной конкретной системы постулируется. Таким образом, предполагается, что кинетические зависимости, фиксирующие накопление повреждений в образце, дают оценку вероятности разрушения образца в некоторый момент времени испытаний.

На ряде задач рассмотрено построение некоторой гипотетической кинетики накопления повреждений в материале. Далее на конкретном экспериментальном материале решается обратная задача: компьютерный подбор кинетических констант, позволяющих соблюсти качественное и количественное согласие. Известно, что обратные задачи кинетики не имеют однозначного решения, т.е. статистика отказов может быть одна, а сценариев ее реализации несколько. Это означает, что может существовать несколько технологических подходов получения материала с определенными эксплуатационными характеристиками.

Построены статистические распределения накопления повреждений, полученные при решении задачи кинетики линейных перекрывающихся цепей ассоциированных дефектов; для  $i$ -той цепи получена зависимость

$$A_i = C_0 \frac{k_0}{k - k_0} \left( \frac{k}{k - k_0} \right)^{i-1} \left[ \exp\{-k_0 t\} - \left( \sum_{j=1}^{i-1} \frac{((k - k_0)t)^j}{j!} \right) \exp\{-kt\} \right]. \quad (8)$$

Иллюстрация зависимостей вида (8) представлена на рис. 10.



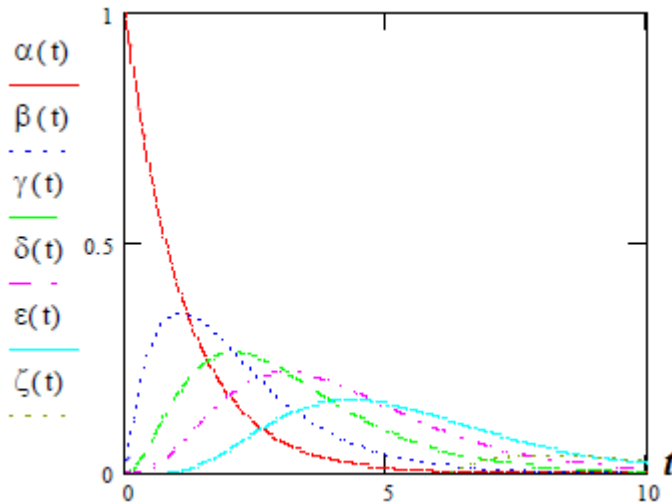


Рис. 10. Изменение концентрации неактивных дефектов ( $A_0(t)$ ), активных дефектов ( $A_1(t)$ ) и цепей ассоциированных дефектов ( $A_i(t)$ ;  $i = 2, 3, 4, \dots$ ); расчет по уравнениям (8) при  $k_0 = 0,9$  и  $k = 1,0$  ( $C_0 = 1$ ).

Рассмотрена процедура конструирования кинетических схем, порождающих статистические распределения. Показано, что кинетический подход может быть распространен на круг задач теории надежности (оценка ресурса, живучести), которые могут быть поставлены в форме задачи построения схемы квазихимических реакций (переходов), дающих то или иное распределение.

При постановке задачи предполагается, что процесс разрушения материала представим кинетической схемой ассоциации точечных дефектов, приводящей к образованию линейных (полимерных) цепей дефектов, которые могут интерпретироваться как линейная дислокация или линейная микротрещина. Последующие стадии должны приводить к объединению растущих линейных цепей, т.е. к их перекрыванию. Этот процесс, когда перекрывание цепей станет пронизывать весь образец (или поверхностный слой) в виде некоторой сетки, нарушающей сплошность, может быть принят в качестве модельного для описания приближения образца к некоторой «критической зоне», где и наступает разрушение (отказ).

Решение данной задачи получено в виде уравнения

$$\beta = 1 - \exp\{-C_0 k \{1 - \exp\{-k_0 t\}\}\} \quad (9)$$

где  $\beta$  - степень превращения – доля заполнения потенциально возможного одномерного объема, т.е. объема возможных микротрещин,  $C_0$  - начальная концентрация потенциальных зародышей цепи,  $k_0$  - константа скорости реакции перехода потенциального зародыша цепи в активный дефект роста цепи (одномерное ядро),  $k$  - константа скорости роста цепи, как одномерного объема линейного ассоциата ( $r = kt$ ). Аналогичная задача может быть сформулирована для случая, когда сплошность материала нарушается по поверхности зерен (кристаллитов) поликристаллического материала.

Таким образом, функция распределения отказов во времени в соответствии с причинами и механизмом реализации отказа, предполагаемыми при построении кинетической модели, определяется уравнением (9) в виде  $F(t) = \beta$ , а надежность - уравнением

$$1 - F(t) = 1 - \beta = \exp\{-C_0 k t (1 - \exp\{-k_0 t\})\}. \quad (10)$$

Для иллюстрации кинетического подхода к описанию процесса накопления повреждений ниже сопоставлены два распределения: «кинетическое» распределение ассоциированных дефектов (микротрещин) и распределение Вейбулла, которое, как известно, наиболее хорошо подходит для статистического описания процессов в механических системах: усталостного разрушения и т.п. Распределение Вейбулла является эмпирическим и характеризуется следующей функцией распределения

$$F_w(t, \alpha, \varepsilon, \mu) = \begin{cases} 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t - \mu}{\varepsilon}\right)^\alpha\right\}; & t > \mu \\ 0; & t \leq \mu \end{cases} \quad (11)$$

где  $\alpha$  - параметр формы кривой распределения,  $\varepsilon$  - параметр масштаба,  $\mu$  - параметр сдвига. К частным случаям распределения Вейбулла относятся экспоненциальное ( $\alpha = 1$ ) и Рэлея ( $\alpha = 2$ ). Представлено сопоставление распределение Вейбулла и «кинетическое» распределение, которое в самом простом виде задается функцией

$$F_k(t, k_0, C_0, k) = 1 - \exp\{-C_0 k t (1 - \exp\{-k_0 t\})\}; \quad t \geq 0 \quad (12)$$

где  $C_0$  - начальная концентрация потенциальных («замороженных») повреждений типа зародышей цепи микротрещины,  $k_0$  - константа скорости (вероятность) перехода потенциального дефекта (повреждения) в активный дефект роста цепи,  $k$  - константа скорости (вероятность) наращивания цепи дефектов как линейного ассоциата. Здесь случайная переменная  $t$  может рассматриваться в случае, например, усталостных испытаний как долговечность, а кинетические константы  $k_0$  и  $k$  как параметры, отражающие ход процесса образования, роста и накопления повреждений и зависящие от режима нагружения. Константа  $C_0$  может рассматриваться как параметр, характеризующий предысторию образца.

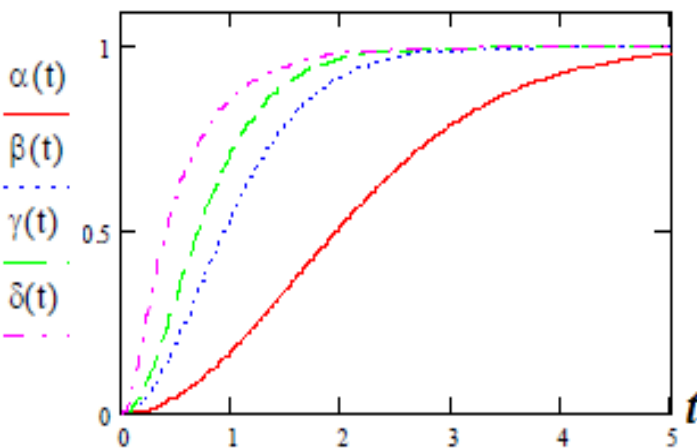


Рис. 11. Функции распределения  $F(t)$ , рассчитанные по уравнению (3.10): кривые (снизу вверх от  $\alpha(t)$  до  $\delta(t)$ ) имеют следующее значение параметра  $k_0$ : 0,1; 0,5; 1,0; 5,0; значение произведения параметров  $C_0 k$  для всех кривых равно 2,0

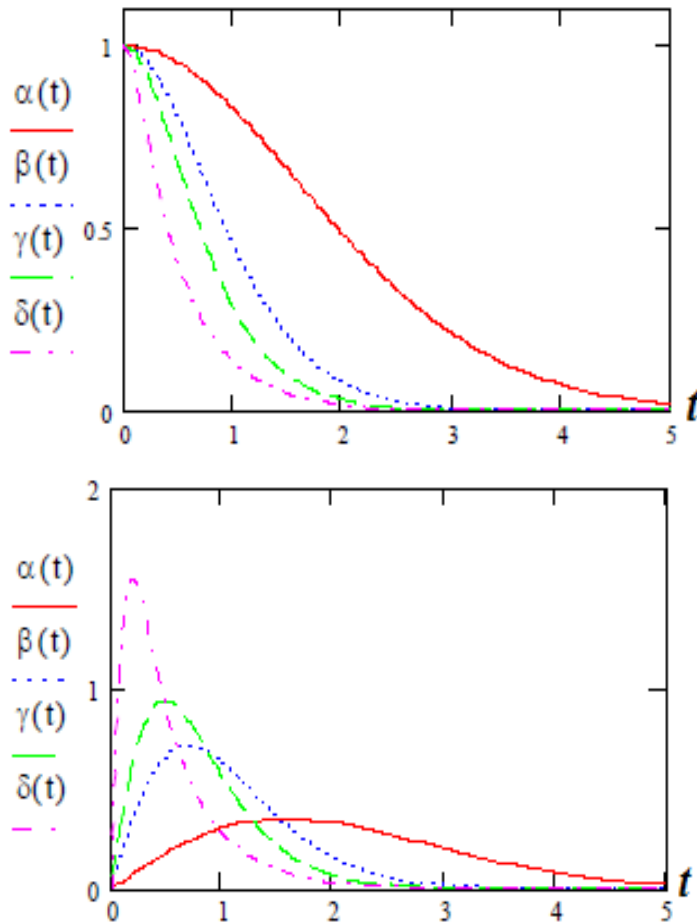


Рис. 12. Функции надежности  $1 - F(t)$ , рассчитанные по уравнению (3.18): кривые (сверху вниз от  $\alpha(t)$  до  $\delta(t)$ ) имеют следующее значение параметра  $k_0$ : 0,1; 0,5; 1,0; 5,0; значение произведения параметров  $C_0 k$  для всех кривых равно 2,0

Рис. 13. Плотности распределения  $f(t)$ , соответствующие функциям распределения  $F(t)$ , представленным на рис. 11

Показано, что кинетическая схема процесса накопления повреждений в форме линейных цепей ассоциированных дефектов качественно подобна распределению Вейбулла только при параметре формы кривой  $\alpha = 1$  (экспоненциальное распределение) и  $\alpha = 2$  (или  $1 < \alpha \leq 2$ ) (распределение Рэлея). При  $\alpha > 2$  (распределение Вейбулла) качественного подобия нет, что особенно хорошо видно из сравнения плотностей  $f(t)$  и интенсивностей элементарных переходов  $\lambda(t)$ . Ниже представлен пример исследования кинетической схемы образования и роста двумерных (поверхностных) и трехмерных (объемных) перекрывающихся микротрещин (рис. 10).

Функция распределения, отражающая заполнение потенциально возможного объема микротрещин, растущих статистически, имеет вид

$$F(t) = 1 - \exp \left\{ -At^3 \left[ 1 - \exp \left\{ -Bt^2 \left( 1 - \exp \left\{ -k^*t \right\} \right) \right\} \right] \cdot \left[ 1 - \exp \left\{ -\tilde{k}t \sum_{i=0}^{p-1} \frac{(\tilde{k}t)^i}{i!} \right\} \right] \right\} \quad (13)$$

где константы  $A$  и  $B$  являются сложными (составными):  $A = \frac{2}{3} \pi \beta \frac{S_0^*}{V_0} \tilde{k}_R^3$ ;

$B = \pi \frac{N_0^*}{S_0^*} k_R^{*3}$ ;  $k^*$  - кинетическая константа для реакции первого порядка перехода

центров из потенциальных в активные, дающие начало росту цепи ассоциирующей

щихся дефектов,  $N_0^*$  – исходная концентрация потенциальных центров в межфазном слое между кристаллитами при  $t=0$ ,  $S_0^*$  – свободная от ассоциированных дефектов межфазная поверхность в начальный момент времени,  $k_r^*$  – константа, отражающая линейную скорость роста двумерного ядра – трещины (удельный поток мономерных дефектов на поверхность растущего ядра),  $\tilde{k}$  – константа скорости роста и разрушения («схлопывания») трехмерного ядра (микропоры), т.е. перехода из класса  $i$  в класс  $i+1$  на начальных временах формирования «гиббсовского» зародыша,  $\tilde{k}_r$  – константа скорости линейного роста трехмерного ядра после стадии формирования «гиббсовского» зародыша,  $p$  – число стадий, необходимое для формирования «гиббсовского» зародыша,  $V_0$  – некоторый исходный характеристический объем, представляющий собою часть объема межфазного слоя между кристаллитами, который потенциально может быть заполнен поровой структурой,  $\beta$  – доля поверхности, занятой двумерными растущими ядрами, на которых могут формироваться трехмерные ядра.

Для верификации (валидации) использовалась компьютерная программа, отработанная на математической модели внешнего трения. Для апробации программы в качестве экспериментальных данных использовались результаты испытаний, приведенные в литературе (Богданов Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений. М.: Мир, 1989, 344 с.; Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. М.: Машиностроение, 1980, 136 с.)

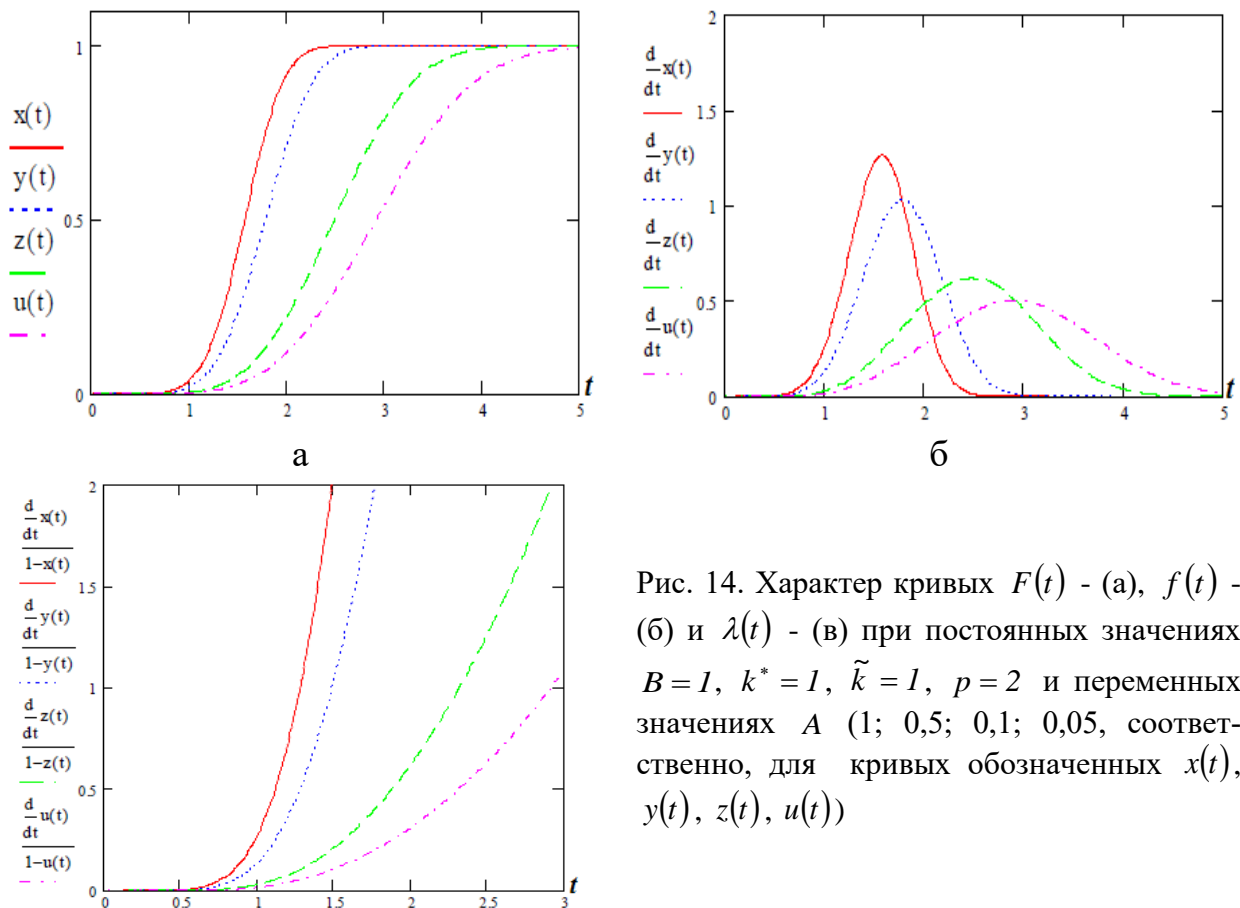


Рис. 14. Характер кривых  $F(t)$  - (а),  $f(t)$  - (б) и  $\lambda(t)$  - (в) при постоянных значениях  $B=1$ ,  $k^*=1$ ,  $\tilde{k}=1$ ,  $p=2$  и переменных значениях  $A$  (1; 0,5; 0,1; 0,05, соответственно, для кривых обозначенных  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$ ,  $u(t)$ )

В

Для упрощения записи кинетические параметры в уравнении (13) переобозначены

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-k_1 t^3 \left[1 - \exp\left\{-k_2 t^2 (1 - \exp\{-k_3 t\})\right\}\right]\right\} \cdot \left[1 - \exp\{-k_4 t\} \sum_{i=0}^{k_5} \frac{(k_4 t)^i}{i!}\right] \quad (14)$$

(таблица 2).

Таблица 2

Соответствие параметров уравнений (13) и (14)

$A = \frac{2}{3} \pi \beta \frac{S_0^*}{V_0} \tilde{k}_R^3$	$B = \pi \frac{N_0^*}{S_0^*} k_R^{*3}$	$k^*$	$\tilde{k}$	$p-1$
$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$

В данном исследовании рассмотрены различные условия разрушения: растяжение, знакопеременный изгиб, рост магистральной макротрещины под статической нагрузкой, изгиб при вращении, перемежающаяся (локально пульсирующая) нагрузка при вращении шариков подшипников. Данные для растяжения, знакопеременного изгиба, роста магистральной макротрещины под статической нагрузкой хорошо аппроксимируются квазивейбулловским распределением, в котором накопление повреждений происходит в виде формирования структуры перекрывающихся двумерных микротрещин, а на заключительной стадии нарушения сплошности материала - микропоровой структуры перекрывающихся микротрещин.

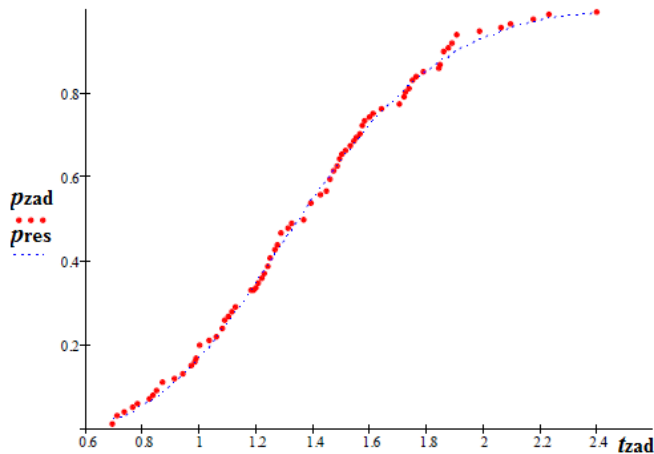


Рис. 15. Аппроксимация экспериментальной функции распределения теоретической (14) для результатов испытаний на изгиб образцов листового алюминия со знакопеременной нагрузкой 144,79 МПа \*

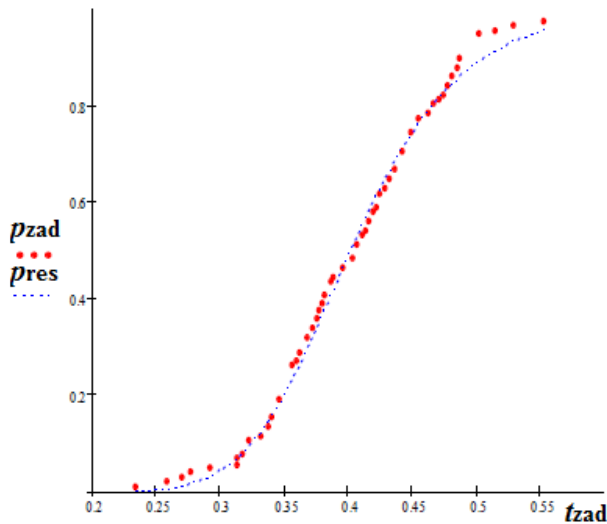


Рис. 16. Аппроксимация экспериментальной функции распределения теоретической (14) для результатов испытаний на изгиб образцов листового алюминия со знакопеременной нагрузкой  $179,26 \text{ МПа}$  \*

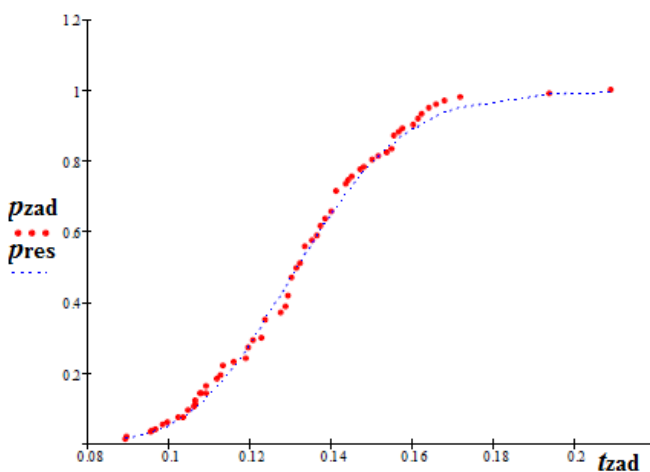


Рис. 17. Аппроксимация экспериментальной функции распределения теоретической (14) для результатов испытаний на изгиб образцов листового алюминия со знакопеременной нагрузкой  $213,74 \text{ МПа}$  \*

\* - по оси абсцисс отложена долговечность – 1 соответствует одному блоку циклов нагружения: 1000 циклов

В случае износа при трении (износ резца) экспериментальные данные также хорошо аппроксимируются квазивейбулловским распределением, но в отличие от предыдущих, здесь основную роль в разрушении играют двумерные перекрывающиеся микротрещины. Это следует признать соответствующим действительному механизму разрушения, поскольку при относительном перемещении поверхностей при трении формируются значительные касательные напряжения. В предыдущих же случаях внутри материала преобладали нормальные напряжения.

Для случаев вращения (вала, шариков), когда материал образца испытывает и значительные нормальные, и значительные касательные напряжения, прикладываемые на отдельные участки материала в режиме пульсаций, характерно разрушение по механизму потери сплошности образцом за счет образования сетки перекрывающихся одномерных микротрещин.

Таким образом, выполненные исследования показали, что использование представления о нарушении сплошности материала в форме перекрывания одномерных, двумерных и трехмерных микротрещин позволяет построить кинетические распределения, которые качественно подобны рэлеевскому и вейбулловскому распределениям.

Результаты верификации математических моделей кинетики накопления повреждений, порождающих статистические распределения для разрушения образцов при различных режимах нагружения, показали, что существует возможность оценивать вклад отдельных механохимических процессов в общий процесс накопления повреждений в форме развития системы перекрывающихся одномерных, двумерных и трехмерных микротрещин.

Установлено, что ряд экспериментальных данных удается аппроксимировать кинетическим квазивейбулловским распределением, но не удается кинетическим квазиэрлеевским, и наоборот, что в рамках математических моделей накопления повреждений связывается с различными механизмами развития микротрещин.

Показано, что одни и те же экспериментальные функции распределения отказов могут быть аппроксимированы уравнениями математической модели кинетики накопления повреждений с различными значениями кинетических параметров, что говорит о возможности различных сценариев развития процесса разрушения.

**Четвертая глава** посвящена математическим моделям динамики разрушения конструкционного материала в форме неравновесного фазового перехода, проходящего на начальных стадиях в режиме спинодального распада, а также иллюстрации экспериментальной части научно-технического задела в форме срезов-шлифов артиллерийского ствола.

За основу математической модели взята описательная картина износа ствола, представленная следующим образом: помимо химического и структурно-фазового воздействия, пороховой газ оказывает механическое и термическое воздействие на поверхностный слой канала ствола. За время выстрела, исчисляемое тысячными долями секунды, поверхность канала ствола подвергается воздействию порохового газа с максимальными величинами давления свыше 300 МПа и температуры свыше 2700°С.

Физическое состояние приповерхностного слоя под воздействием порохового газа изменяется следующим образом: в первый момент в нем возникают напряжения растяжения за счет действия давления порохового газа. Затем приповерхностный слой нагревается за счет теплоотдачи порохового газа до высокой температуры и стремится удлиниться и расшириться. Но окружающие, не нагретые слои металла не дают ему этого сделать, в результате чего в этом слое возникают тангенциальные температурные напряжения сжатия, которые могут значительно превышать тангенциальные напряжения растяжения, создаваемые давлением порохового газа.

За счет линейного расширения нагретого приповерхностного слоя и изменения механических свойств материала в нем возникают напряжения сжатия. Сжатый тонкий слой действует на основную толщину ствола как дополнительное внутреннее давление; кроме того, он является источником теплоты. По окончании теплового импульса приповерхностный слой канала ствола начинает остывать, отдавая теплоту в основном остальному металлу ствола, напряжения

сжатия в приповерхностном слое снимаются и возникают растягивающие напряжения за счет линейного укорочения.

Таким образом, при одиночном выстреле приповерхностный слой канала ствола под действием пороховых газов испытывает циклические нагрузки: растяжение - сжатие - растяжение. В результате с казенной части на поверхности канала ствола образуется сетка трещин, с постепенно уменьшающимися размерами ячеек к дульной части.

Результат совместного термического и механического воздействия пороховых газов на поверхностный слой канала ствола может быть представлен в рамках термодинамического подхода, предполагающего, что разрушение может трактоваться как неравновесный фазовый переход. Начальный момент такого фазового перехода, реализующийся как спинодальный распад, фиксируется визуально как формирование системы ячеек с размытыми межфазными границами. Последующее развитие этого процесса сопровождается уменьшением размытости межфазных границ, в конечном счете приводящее к формированию поровой структуры (или системы трещин), т.е. образованию гетерогенной системы, в которой одна фаза представляет исходный материал, а другая - поры в ней (поры могут быть заполнены не только газовой фазой, но и аморфизованной твердой фазой, а также продуктами нагара). Такая постановка задачи предполагает, что разрушение как неравновесный фазовый переход, протекающий на начальных временах по сценарию спинодального расслоения на фазы, может быть обоснована экспериментальными «спинодальными» структурами.

Согласно термодинамике, упруго деформированного твердого тела нагружение твердого тела приводит к увеличению энтальпии и энтропии слоев: одних за счет растяжения, других за счет сжатия. Но когда «энергоемкость» материала конструкции, обусловленная накоплением «упругой энергии» исчерпывается, происходит переход материала в другое состояние за счет механизмов ползучести, пластичности, вязкого или хрупкого разрушения.

В рамках поставленной задачи выполнено конструирование потенциала Гинзбурга-Ландау в форме свободной энергии Гиббса-Гельмгольца. Глобальная неоднородность системы охарактеризована как неоднородность распределения энтальпии с учетом энергии деформации твердого тела

$$\begin{aligned} \Delta H &= (\gamma - 1)\rho dW - \rho T dS - \rho P dV - \rho \psi dl = \\ &= d((\gamma - 1)\rho W - \rho TS) - \left( (\gamma - 1)W + \frac{P_0}{\rho_0} - \frac{P}{\rho} \right) d\rho - \rho \psi dl + Sd(\rho T) \end{aligned} \quad (15)$$

где  $W$  - внутренняя энергия,  $S$  - энтропия,  $T$  - температура,  $\rho$  - плотность. Уравнение состояния упруго деформированного твердого тела – закон Гука:

$$\psi = E\varepsilon, \quad \varepsilon = \frac{1}{E}\psi, \quad \varepsilon = \frac{l - l_0}{l} \quad (16)$$

Модуль Юнга  $E$  выполняет функцию сопротивления деформированию Экстенсивная переменная: относительное удлинение  $\varepsilon$ ,  $l$  - деформация. Из экспериментов известно, что модуль Юнга слабо зависит от температуры, поэтому  $E = E(T)$



может быть представлено в виде  $E = E_0 + \frac{dE}{dT}(T - T_0)$ , Зависимость  $l = l(T) = l_0(1 + \alpha_l(T - T_0))$ , где  $l_0$  - значение  $l$  при  $T_0$ ,  $\alpha_l$  - коэффициент линейного термического расширения:  $\alpha_l = \frac{1}{l} \left( \frac{\partial l}{\partial T} \right)_p$ . Зависимость между линейным и объемным термическим расширением отражает зависимость  $V_T = V_0(1 + \alpha_l(T - T_0))^3$ . Задача решалась в рамках естественных предположений

$$l = l_0(1 + \alpha_l(T - T_0)); V = V_0(1 + \alpha_l(T - T_0))^3; \psi = E\varepsilon; \varepsilon = \frac{l - l_0}{l} = \frac{\alpha_l(T - T_0)}{1 + \alpha_l(T - T_0)};$$

$$E = E_0 + \beta(T - T_0); \beta = \frac{dE}{dT} \quad (17)$$

Отсюда

$$\rho\psi dl = l_0\alpha_l E_0 d \left( \frac{\frac{1}{3} \left( \frac{\beta}{\alpha_l E_0} \right)}{l(T)^3} \right) - \frac{1}{3} E_0 \left( - \left( \frac{2\beta}{\alpha_l E_0} - 1 \right) + \frac{\beta}{l_0\alpha_l E_0} l(T) \right) l(T) d\rho \quad (18)$$

Таким образом,

$$\Delta H = (\gamma - 1)\rho dW - TdS - \rho PdV - \rho\psi dl = d \left[ (\gamma - 1)\rho W - \rho TS + \frac{l_0\alpha_l E_0}{3} \frac{\left( 1 - \frac{\beta}{\alpha_l E_0} \right)}{l(T)^3} \right] -$$

$$- \left\{ (\gamma - 1)W + \frac{P_0}{\rho_0} - \frac{P}{\rho} - \left( \frac{3S}{l_0\alpha_l} - \frac{1}{3} E_0 \left( \frac{2\beta}{\alpha_l E_0} - 1 \right) + \frac{\beta}{3l_0\alpha_l} l(T) \right) l(T) + ST \right\} d\rho \quad (19)$$

Уравнение состояния, как возмущения адиабатического процесса разрушения конструкционного материала,

$$P = (\gamma - 1)\rho W + TS\rho + \frac{P_0}{\rho_0} \frac{1}{l(T)^3} - \left( \frac{3S}{l_0\alpha_l} - \frac{1}{3} E_0 \left( \frac{2\beta}{\alpha_l E_0} - 1 \right) \right) \frac{1}{l(T)^2} - \frac{\beta}{3l_0\alpha_l} \frac{1}{l(T)} \quad (20)$$

определяет в фазовом пространстве многообразие локальных равновесий, где  $\Delta H$  есть полный дифференциал

$$\Delta H = (\gamma - 1)\rho dW - TdS - \rho PdV - \rho\psi dl = d \left[ (\gamma - 1)\rho W - \rho TS + \frac{l_0\alpha_l E_0}{3} \left( 1 - \frac{\beta}{\alpha_l E_0} \right) \rho \right] \quad (21)$$

При условии  $(\gamma - 1)W - TS > 0$  предполагается

$$\xi^2 = \frac{(\gamma - 1)\rho W - \rho TS}{\rho TS} > 0, \nu_D = \frac{l_0\alpha_l E_0}{3} \left( 1 - \frac{\beta}{\alpha_l E_0} \right) \frac{1}{TS} \quad (22)$$

Параметр  $\xi$  назван «параметром разрушения»; знак  $\nu_D$  зависит от знака постоянной  $1 - \frac{\beta}{\alpha_l E_0}$ ; постоянная  $\nu_D$  названа числом Баренблатта.

Потенциал разрушения для термодинамических систем, в которых реализуется неустойчивость структуры твердого тела, строится следующим образом:

вводятся относительные энтальпия, энтропия и свободная энергия Гиббса-Гельмгольца для конструкционного материала, который был подвергнут тепловому удару

$$h = \xi^2 + \nu_D, \quad s = -(h \ln h + (1-h) \ln(1-h)), \quad g = h - \alpha h s, \quad 0 < \xi^2 < 1 - \nu_D \quad (23)$$

Проанализированы ситуации, когда  $1 - \frac{\beta}{\alpha_1 E_0} > 0$  и  $1 - \frac{\beta}{\alpha_1 E_0} < 0$ , т.е.  $\nu_D > 0$  и  $\nu_D < 0$ , соответственно. Структура потенциала зависит от знака  $\nu_D$ ; например, для случая  $\nu_D > 0$ :

$$\bar{g}(\xi) = \begin{cases} g(\xi, \nu_D), & 0 < \xi < \sqrt{1 - \nu_D} \\ \nu_D + \xi^2 \left[ 1 + \frac{\alpha(1 - h(\xi)^2)}{(1 - \nu)^2} (\nu_D \ln(\nu_D) + (1 - h(\xi)) \ln(1 - h(\xi))) \right], & -\sqrt{1 - \nu_D} < \xi < 0 \end{cases} \quad (24)$$

Характер зависимостей  $\tilde{g}(\xi)$  при фиксированных значениях  $\nu_D = 0,2$  и  $\nu_D = 0,1$  от  $\alpha = 0,05$  до  $\alpha = 2,0$ , проиллюстрирован на рис. 18.а – г.

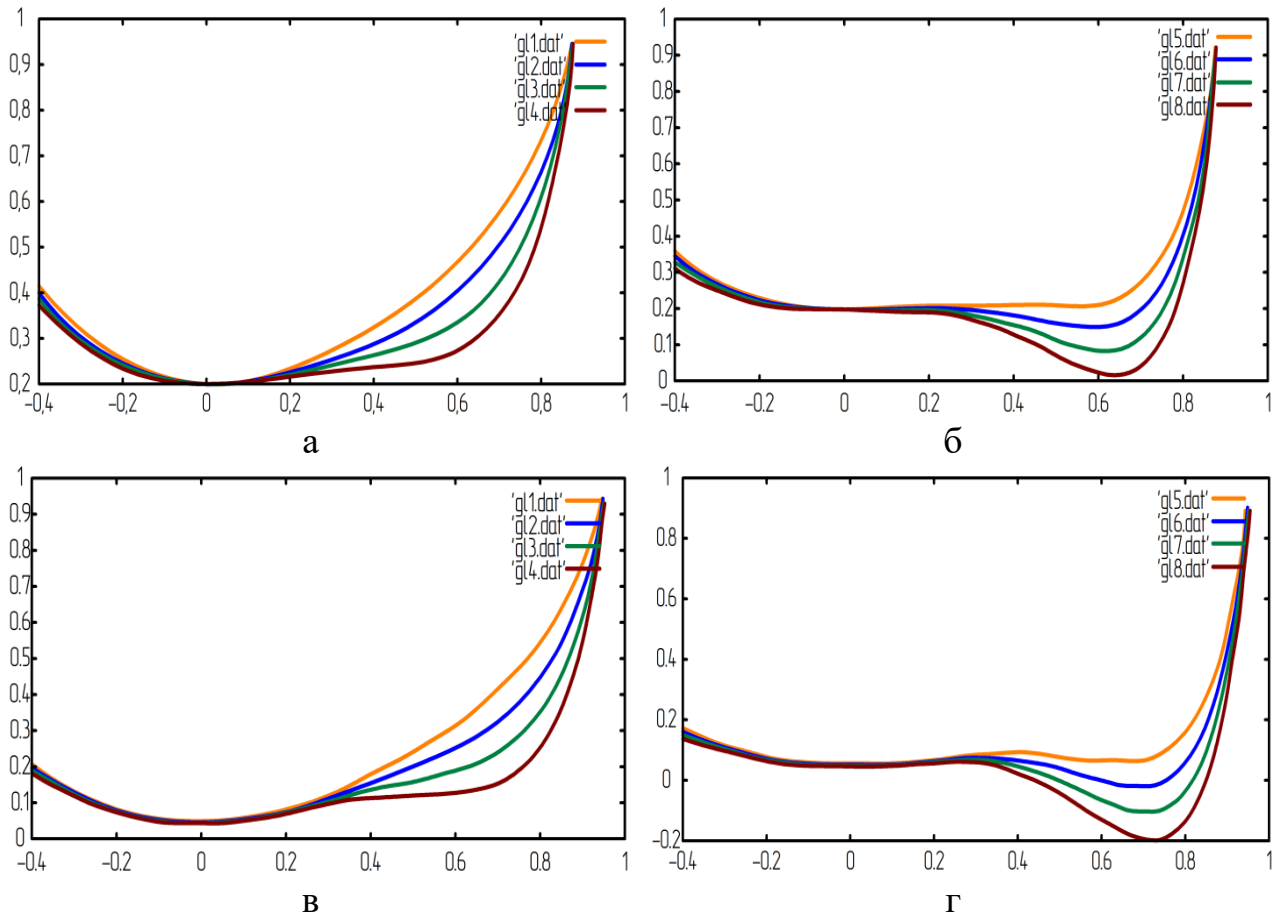


Рис. 18. Потенциал в форме свободной энергии  $\tilde{g}$ ; (а)  $\nu_D = 0,2$ ;  $\alpha = 0,05$ ;  $0,1$ ;  $0,2$ ;  $0,3$ ;  $0,4$ ; (б)  $\nu_D = 0,1$ ;  $\alpha = 0,5$ ;  $0,6$ ;  $0,7$ ;  $0,8$ ; (в)  $\nu_D = 0,01$ ;  $\alpha = 0,05$ ;  $0,1$ ;  $0,2$ ;  $0,3$ ;  $0,4$ ; (г)  $\nu_D = 0,01$ ;  $\alpha = 0,5$ ;  $0,6$ ;  $0,7$ ;  $0,8$

Математическая модель разрушения как неравновесного фазового перехода строится следующим образом: за основу представления перестройки структуры материала при течении под нагрузкой (аналог модели Г.И. Баренблатта) принимается система уравнений Эйлера

$$\frac{d}{dt}\rho + \rho \operatorname{div}U = 0; \quad \rho \frac{d}{dt}U + \nabla P = 0; \quad \rho \frac{d}{dt}W + P \operatorname{div}U = 0; \quad \rho \frac{d}{dt}S + \nu T^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} e^{-\kappa S} \operatorname{div}U = 0 \quad (25)$$

отвечающая адиабатическому процессу с уравнением состояния

$$P = (\gamma - 1)\rho W + TS\rho + P_0 \frac{\rho}{\rho_0} - \left( \frac{3S}{l_0 \alpha_l} - \frac{1}{3} E_0 \left( \frac{2\beta}{\alpha_l E_0} - 1 \right) \right) \frac{1}{l(T)^2} - \frac{\beta}{3l_0 \alpha_l} \frac{1}{l(T)} \quad (26)$$

$$\text{где } \frac{d}{dt}F = \partial_t F + (U \cdot \partial_x) F$$

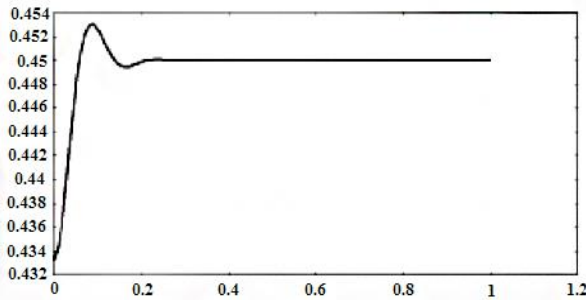
Введение вязкости и накачки внутренней энергии дает в окончательном виде модель начальной стадии разрушения конструкционного материала получим в безразмерных переменных  $(S, T, U, \xi)$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}T - \frac{1}{3l_0 \alpha_l} l(T) \operatorname{div}U = 0; \quad \rho \frac{d}{dt}U + \nabla P = \varepsilon \rho \Delta U; \quad \rho \frac{d}{dt}S + \nu T^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} e^{-\kappa S} \operatorname{div}U = \varepsilon \rho \Delta S; \\ \frac{d}{dt}\xi + \frac{1}{2\rho TS \xi} \left[ \xi^2 \left( 1 - \rho TS + \rho S \frac{1}{3l_0 \alpha_l} l(T) - \nu T^{\frac{2\gamma-1}{\gamma-1}} e^{-\kappa S} \right) + \right. \\ \left. + (\gamma - 1)P + \rho S \frac{1}{3l_0 \alpha_l} l(T) - \nu T^{\frac{2\gamma-1}{\gamma-1}} e^{-\kappa S} \right] \operatorname{div}U = \frac{1}{\rho^2} \operatorname{div} \left( \frac{D}{T} \nabla \mu \right) \quad (27) \end{aligned}$$

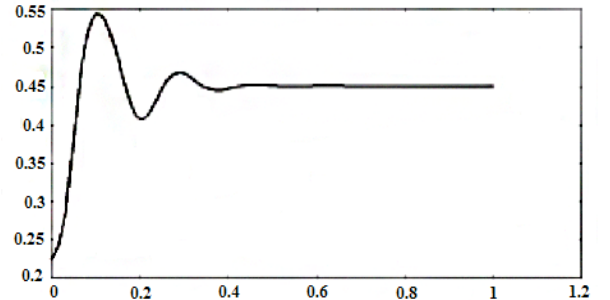
где  $\varepsilon = \frac{1}{\operatorname{Re}_0}$ ,  $\operatorname{Re}_0 = \frac{\rho_0 L_0 U_0}{\nu}$  - аналог числа Рейнольдса однородного потока,  $\nu$  - динамическая вязкость среды (параметр, определяющий внутреннее трение «перестройки» структуры материала),  $D = \frac{D_*}{L_0 U_0}$ ,  $D_*$  - коэффициент подвижности, химический потенциал представлен в виде

$$\mu = \rho^2 TS \partial_\xi (h(\xi) - \alpha(\beta) h(\xi) s(\xi)) - \varepsilon^2 \Delta \xi \quad (28)$$

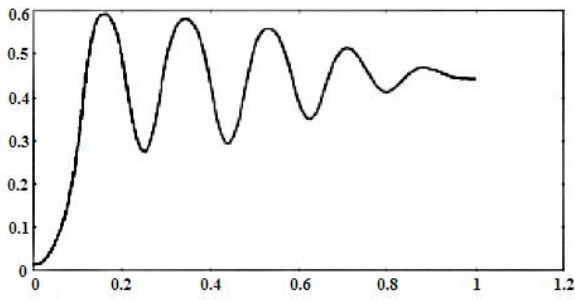
Выполнен численный анализ начальной стадии разрушения конструкционного материала (одномерный случай); пример развития возмущений безразмерных параметров  $\xi$ ,  $T$ ,  $S$ ,  $U$  представлен на рис. 19 – 22.



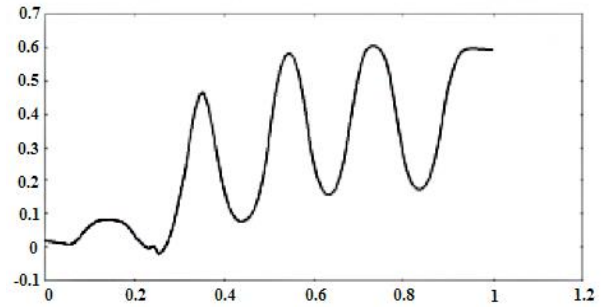
(a)



(б)

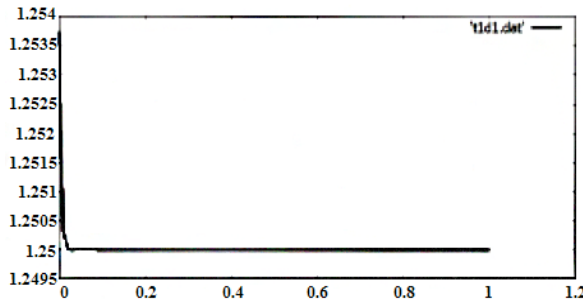


(B)

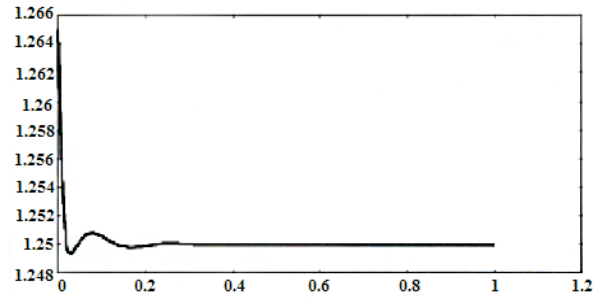


(Gamma)

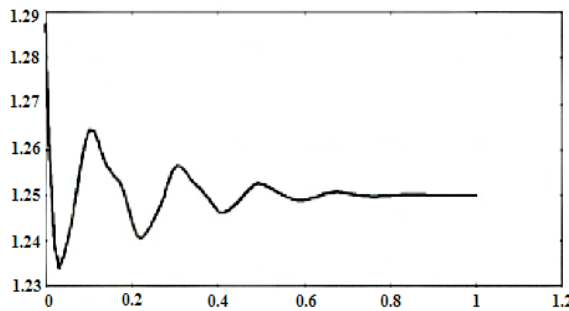
Рис. 19. Графики  $\xi$  для различных значений временных сечений  $t$ : (а)  $t = 0,0015$ ; (б)  $t = 0,006$ ; (в)  $t = 0,015$ ; (г)  $t = 0,035$



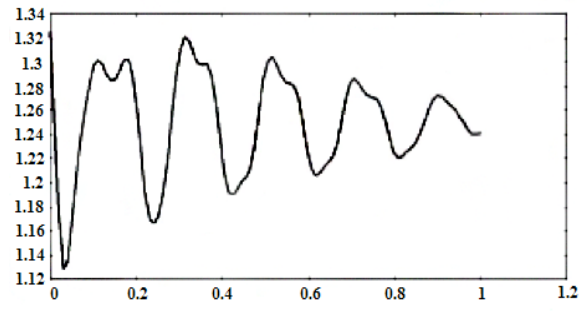
(а)



(б)

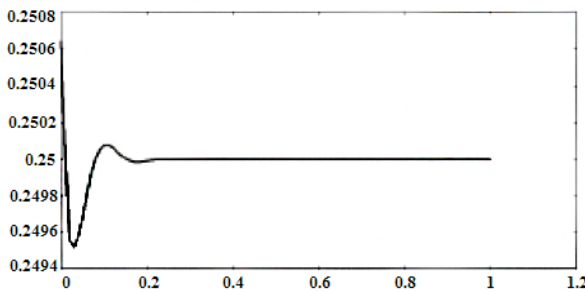


(B)

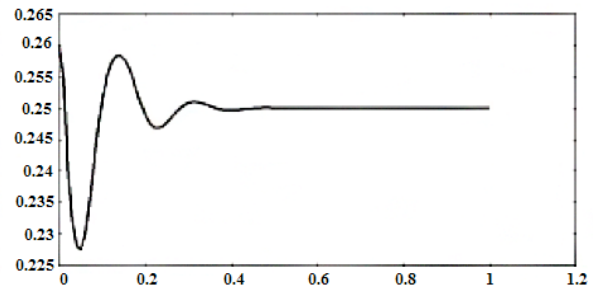


(Gamma)

Рис. 20. Графики  $T$  для различных значений временных сечений  $t$ : (а)  $t = 0,0015$ ; (б)  $t = 0,006$ ; (в)  $t = 0,015$ ; (г)  $t = 0,035$



(а)



(б)

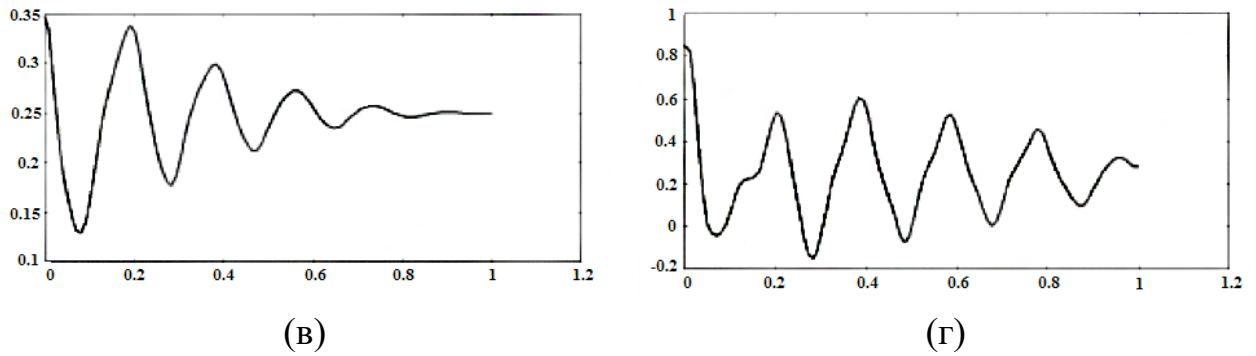


Рис. 21. Графики  $U$  для различных значений временных сечений  $t$ : (а)  $t = 0,0015$ ; (б)  $t = 0,006$ ; (в)  $t = 0,015$ ; (г)  $t = 0,035$

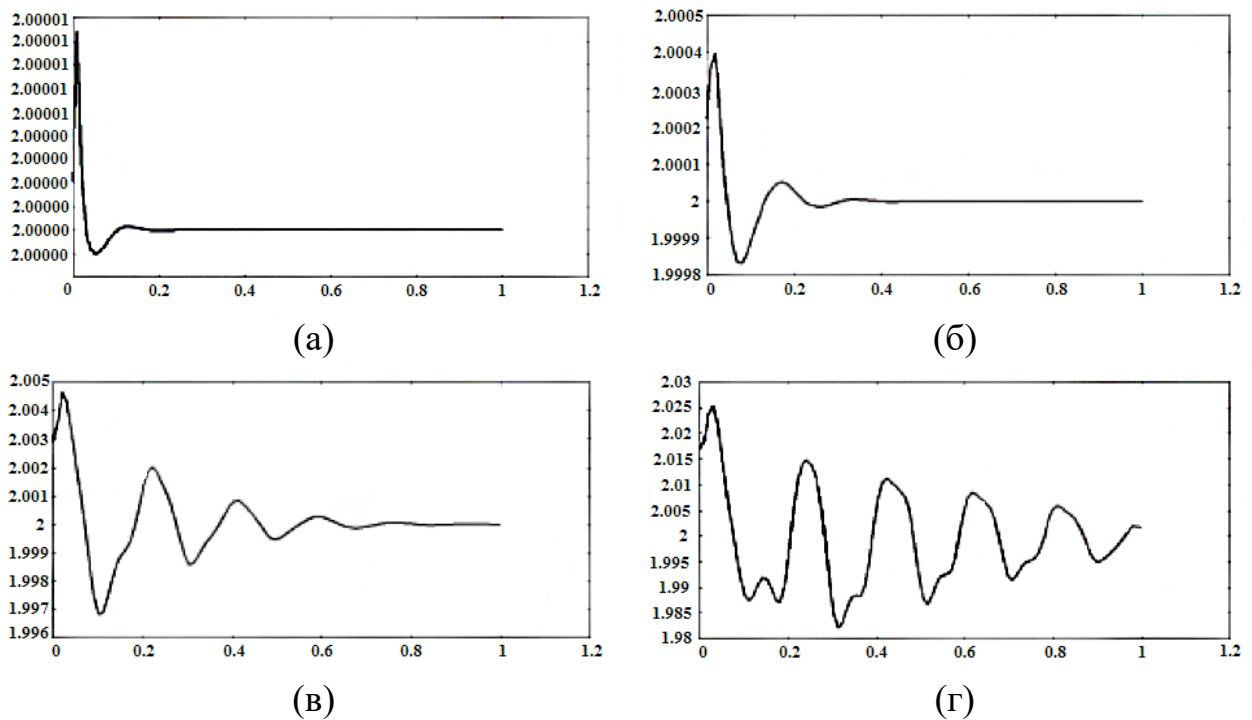


Рис. 22. Графики  $S$  для различных значений временных сечений  $t$ : (а)  $t = 0,0015$ ; (б)  $t = 0,006$ ; (в)  $t = 0,015$ ; (г)  $t = 0,035$

Результаты вычислительного эксперимента показали, что характер развития процесса разрушения, который предваряется зарождением из-за неустойчивости и последующего накопления повреждений в материале, в одномерном случае аналогичен процессу спиnodального расслоения на фазы, наблюдаемому при высокоградиентной кристаллизации. В силу идентичности структуры математических моделей, описывающих эти критические явления, как неравновесные фазовые переходы, эта аналогия позволяет заключить, что подобными будут двумерные и трехмерные «расчетные» структуры.

Для иллюстрации приведен экспериментальный материал в форме структур, формирующихся при накоплении повреждений в ходе настрела в материале канала артиллерийского ствола. Этот материал представляет собой первичную

информацию для процедуры компьютерного сопоставления с расчетными данными (двумерное решение рассмотренных выше задач о разрушении как неравновесном фазовом переходе). Эта процедура заключается в компьютерном распознавании образов с целью оценки энергетического состояния материала путем получения численных значений параметров математической модели разрушения, начальные стадии в которой представляют собою «спинодальный» распад первоначальной квазиоднородной структуры.

Экспериментальный научно-технический задел ниже проиллюстрирован в виде срезов-шлифов артиллерийского ствола (рис. 23 – 25).

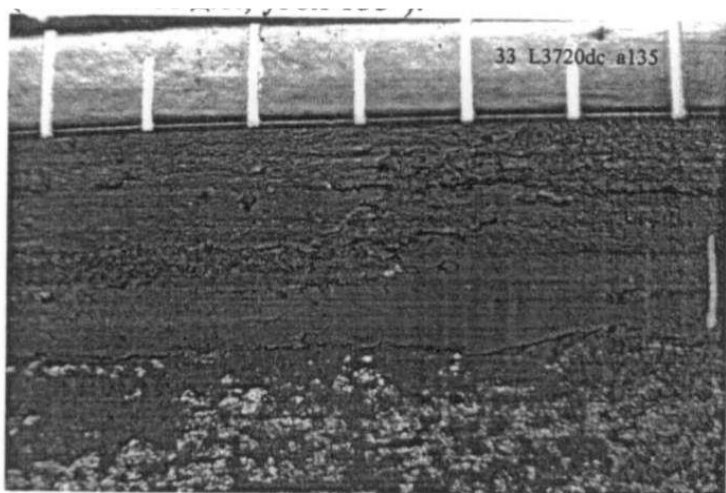


Фото 33. Расстояние 2430 мм от к.с., угол  $225^\circ$   
(3720 мм от д.с., угол  $135^\circ$ ).

Рис. 23. Срез-шлиф ствола  
(Тип 3; фото № 33)

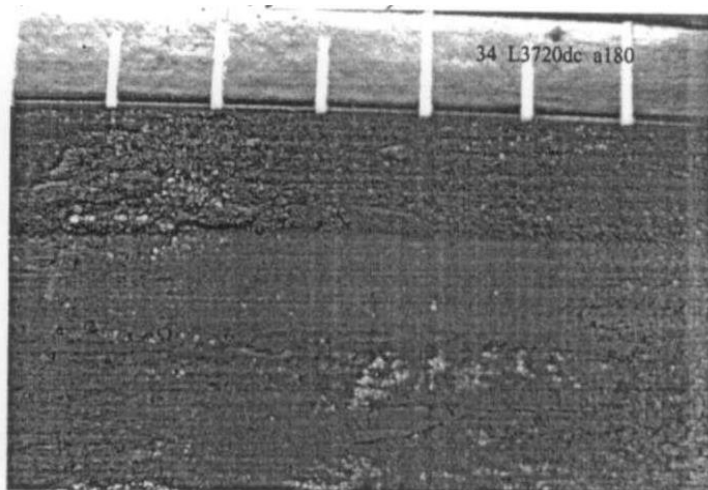


Фото 34. Расстояние 2430 мм от к.с., угол  $180^\circ$   
(3720 мм от д.с., угол  $180^\circ$ ).

Рис. 24. Срез-шлиф ствола  
(Тип 3; фото № 34)

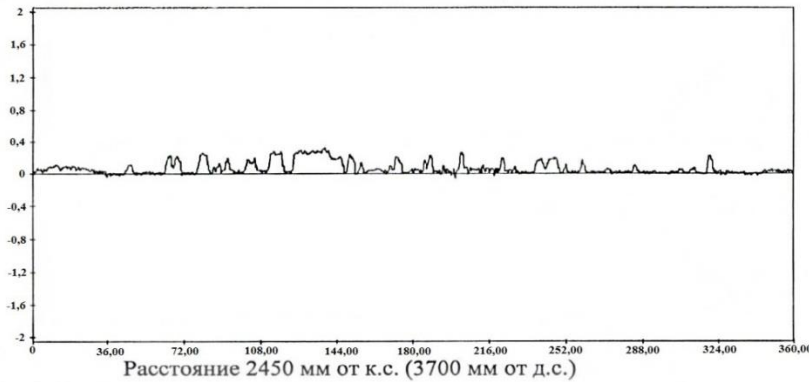


Рис. 25. Экспериментальный аналог развития возмущений при накоплении повреждений в материале канала ствола (к фото № 33 и № 34)

В этом эксперименте: общее количество фотографий (195 шт.) разбито на классы по характерным особенностям; тип 1 (№№ 1 - 20) - срез имеет структуру растянутой вдоль «апельсиновой корки»; тип 2 (№№ 21 - 30) - на срезе фиксируются трещины; тип 3 (№№ 30 - 41) - на срезах появляются белые области коагуляции повреждений; тип 4 (№№ 41 - 51) - большие площади среза поражены коагуляцией повреждений; тип 5 (№№ 51 - 61) - большие площади коагуляции повреждений дополняются поперечными трещинами; тип 6 (№№ 61 - 189) - каверны, представляющие собой объединившиеся трещины (кольцевые трещины по Чернову); фото с № 189 по № 195 дают картину типа 1 (растянутой в одном направлении «апельсиновой корки»).

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

На базе проведенных исследований, в диссертации разработаны концептуально новые научные основы обеспечения живучести артиллерийских систем, теоретически обоснованы и подтверждены практической реализацией комплексные решения сопряженных задач повышения износостойкости контактирующих материалов.

1. Анализ физической модели разрушения поверхностного слоя канала ствола (артиллерийского, стрелкового) показал, что в энергетическом отношении этот слой подвержен механическим и тепловым нагрузкам, характеризующимся высокими значениями энергии и интенсивности воздействия с резкой сменой полярности за один выстрел (смена напряжений растяжения и сжатия, реализующихся в узком поверхностном слое).

2. Выполнена апробация методов трибохимической кинетики для построения кинетической характеристики внешнего трения применительно к артиллерийским системам. Разработанные модели трибохимической кинетики, описывающие зависимости коэффициента трения от скорости скольжения, фиксируемые в эксперименте, позволяют использовать эти характеристики трения для расчетных методов внутриваллистных испытаний и составляют научно-технический задел САПР артиллерийских стволов.

3. Выполнена апробация методов механохимической кинетики для построения кривых распределения накопления повреждений в конструкционных материалах при испытаниях артиллерийских стволов в различных режимах нагружения. Разработанные модели и полученные зависимости с определением остаточного ресурса и показателей износа и разрушения представляют собой научно-

технический задел развития расчетных методов внутрибаллистических испытаний и САПР артиллерийских стволов.

4. Выполнены мониторинг и апробация методов обобщенной теории неравновесных фазовых переходов для решения задач повышения информативности полигонных испытаний артиллерийских стволов. Разработаны теоретические основы экспериментальных методов исследования поверхности канала ствола с целью оценки его энергетического состояния и состояния износа. Разработанные модели являются основой научно-технического задела развития экспериментальных методов внутрибаллистических испытаний артиллерийских стволов.

5. Обосновано результатами верификации разработанных моделей, что методы трибохимической кинетики позволяют описывать сложные режимы трения со схватыванием и заеданием как фрикционные автоколебания. Разработана и верифицирована математическая модель фрикционных автоколебаний, построенная в соответствии с «примером Ван-дер-Поля». Функция, фиксирующая зависимость силы трения от скорости скольжения, задается в форме кинетического уравнения адгезионного схватывания как топохимической кинетики образования и разрушения «мостиков сваривания» на пятнах фрикционного контакта.

6. Подтверждено исследованиями, что кинетический подход, в котором процесс разрушения поверхностного слоя при трении, представляется в виде ассоциации точечных, линейных, поверхностных и объемных дефектов, позволяет строить функции распределения хорошо согласующиеся с эмпирическими распределениями Вейбулла и Рэлея. Апробация показала, что расчетные значения кинетических констант позволяют дать интерпретацию развития процесса разрушения по нескольким сценариям накопления повреждений в материале. Анализ кинетических распределений показал, что полученные зависимости могут быть использованы для расчета основных характеристик теории надежности: функций распределения повреждений, функций надежности, интенсивности потока накопления повреждений, ресурса и остаточного ресурса.

7. Разработана и прошла апробацию в вычислительном эксперименте математическая модель изменения структуры квазиоднородного конструкционного материала вследствие зарождения и накопления повреждений и их «расслоения» на фазы. Апробация показала, что методы термодинамической теории неравновесных фазовых переходов качественно и с высокой достоверностью описывают явление разрушения, относящегося к классу критических.

8. Обосновано исследованиями, что для отображения энергетического состояния поверхностного слоя канала ствола, исходя из физической модели, наиболее адекватной является математическая модель теории неравновесных фазовых переходов, в которой кроме традиционных переменных состояния, используются независимые «градиентные» переменные (термодинамический формализм теории Кана-Хилларда).

9. Разработаны математические модели разрушения конструкционного материала, в которых принято, что начальная стадия процесса разрушения – зарождения и накопления повреждений - реализуется в форме «спинодального» распада с формированием «надмолекулярной» структуры, т.е. процесса, имеющего



аналогию в теории критической опалесценции Дебая. Начальные стадии процесса накопления повреждений и разрушения в форме «спинодального» распада дают структуры с размытыми «межфазными» границами. Классические модели механики разрушения, в качестве исходного состояния предполагающие наличие трещины, не позволяют отобразить информацию на ранних стадиях зарождения и развития процесса разрушения.

10. Экспериментально подтверждено, что структуры повреждений материала канала ствола подобны «спинодальным» структурам, формирующимся при кристаллизации сплавов. Обосновано использование этого подобия в качестве аналогичной характеристики энергетического состояния канала ствола при фиксированном настреле. Разработанная и апробированная математическая модель процесса разрушения конструкционного материала как неравновесного фазового перехода является научно-техническим заделом методики оценки энергетического состояния материала ствола (у поверхности и в объеме).

11. Разработанные математические модели трибохимической кинетики апробированы в качестве составной части программного обеспечения для решения задач внутренней баллистики артиллерийских стволов. Вычислительный эксперимент, проводимый с помощью программного обеспечения существенно снижает объем натурных полигонных испытаний в рамках решения задач проектирования артиллерийских стволов и зарядов с одновременным повышением информативности получаемых результатов.

12. Разработаны технологические методы защиты поверхности материалов деталей от разрушения, основанные на снижении роста и концентрации дефектов в поверхностном слое детали при трении. Разработаны технологии регулирования интенсивности процессов разрушения металла путем формирования на его поверхности защитного барьера при изготовлении детали и в процессе ее эксплуатации. Результаты внедрения и полигонных испытаний технологий повышения износостойкости материалов стволов показали повышение живучести и остаточного ресурса стволов до 2,4 раз. Технологии внедрены на предприятиях различных отраслей промышленности

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и в системе «Skopus»**

1. **Сидоров, М.И.** Обоснование формализованной оценки эффективности технологических и производственных систем / **М. И. Сидоров**, М.Е. Ставровский, В. В. Пирогов, Е. С. Юрцев // Информационно-технологический вестник, 2018. – №1. – С. 169-181.
2. Лукашев, Е.А. Изменение характера фрикционных автоколебаний при повышении скорости скольжения / Е. А. Лукашев, **М. И. Сидоров**, М.Е. Ставровский // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 2. – С. 30-37.

3. Лукашев, Е.А. Исследование процесса разрушения конструкционных материалов методом математической реконструкции в форме неравновесного фазового перехода / Е.А. Лукашев, Е.В. Радкевич, **М.И. Сидоров**, О.А. Васильева // Доклады Академии наук. – 2018. – Т.480, – № 2. – С.145-149.
4. Албагачиев, А.Ю. Топохимическая кинетика внешнего трения при механической и тепловой активации фрикционного контакта / А.Ю. Албагачиев, **М. И. Сидоров**, М.Е. Ставровский // Записки Горного института, Санкт-Петербург.– 2018. – Т.231. – С.312-316.
5. Вагин, А.В. Исследование противоизносных свойств покрытий на поверхностях артиллерийских стволов / А.В. Вагин, А.Ю. Албагачиев, **М.И. Сидоров**, М.Е. Ставровский // Вестник машиностроения. – 2017. – №9. – С.55-61.
6. **Сидоров, М.И.** Теория внешнего трения / А.Ю. Албагачиев, Е.А. Лукашев, **М.И. Сидоров**, М.Е. Ставровский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – №2. – С.53-55.
7. **Сидоров, М.И.** Исследование влияния технологических параметров на зависимость процессов изнашивания и образования водорода / **Сидоров М.И.**, Ставровский М.Е., Албагачиев А.Ю // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 4. – С.72-75.
8. Албагачиев, А.Ю. Сопоставление трибохимической кинетики внешнего трения и основных положений адгезионной и молекулярно-механической теорий трения / А.Ю. Албагачиев, Е. А. Лукашев, **М. И. Сидоров**, М. Е. Ставровский // Вестник машиностроения. – 2017. – №5. – С.47-55.
9. Албагачиев, А.Ю. Исследование микротвердости и трибологических характеристик покрытий / А.Ю. Албагачиев, **М.И. Сидоров** // Вестник машиностроения. – 2017. – №3. – С.63-66.
10. Вагин, А.В. Факторы, определяющие живучесть артиллерийской системы, и технологические методы ее повышения / А.В. Вагин, А.Ю. Албагачиев, **М.И. Сидоров**, М.Е. Ставровский // Вестник машиностроения. – 2016. – №12. – С.60-66.
11. Ставровский, М.Е. Исследование технологических мероприятий по снижению наводороживания материалов / М.Е. Ставровский, **М.И. Сидоров**, С.Г. Емельянов, С.П. Посеренин, И.М. Константинов // Известия Юго-Западного государственного университета «Серия Техника и технологии». – 2016. – № 2(65). – С.20-25.
12. Лукашев Е.А. Модель топохимической кинетики взаимодействия материалов / Е.А. Лукашев, М.Е. Ставровский, **М.И. Сидоров**, С.Г. Емельянов, С.П. Посеренин // Известия Юго-Западного государственного университета «Серия Техника и технологии». – 2016. – № 2(65). – С.9-20.
13. Ставровский, М.Е. Исследование эксплуатационного наводороживания материалов деталей / М.Е. Ставровский, **М.И. Сидоров**, С.Г. Емельянов, С.П. Посеренин // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2016. – № 2(65). – С.59-65.

14. A. V. Vagin. Improving the life of artillery systems / A. V. Vagin, A. Yu. Albagachiev, **M. I. Sidorov**, M. E. Stavrovskii // Russian Engineering Research, March 2017, Volume 37, Issue 3, pp 211–217.
15. Microhardness and tribological characteristics of coatings / A. Yu. Albagachiev, **M. I. Sidorov** // Russian Engineering Research, June 2017, Volume 37, Issue 6, pp 498–501.
16. Tribochemical Kinetics of External Friction / A. Yu. Albagachiev, E. A. Lukashev, **M. I. Sidorov**, M. E. Stavrovskii // Russian Engineering Research, 2017, Vol. 37, No. 8, pp. 686–693.
17. **Sidorov, M.I.** Study of the influence of technological parameters on the dependence between wear processes and hydrogen formation / **M.I. Sidorov**, M.E. Stavrovskii, A.Y. Albagachiev // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. T. 46. № 4. С. 380-384.

#### **Статьи в сборниках научных трудов, тезисы и материалы конференций**

18. **Сидоров, М.И.** Трибохимическая кинетика в методах внутривалистических расчетов / **М.И. Сидоров**, Е.А. Лукашев, Е.В. Радкевич, М.Е. Ставровский // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. Сборник научных трудов 5-ой Международной научно-технической конференции, Москва, 8-9 ноября 2017 г. – С.260-261.
19. **Сидоров, М.И.** Об износе канала артиллерийского ствола как неравновесном фазовом переходе. / **М.И. Сидоров**, Е.А. Лукашев, Е.В. Радкевич // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. Сборник научных трудов 5-ой Международной научно-технической конференции, Москва, 8-9 ноября 2017 г. –С.258-259.
20. Вагин, А.В. Методы повышения инструментальной достоверности контроля / А.В. Вагин, **М. И. Сидоров**, В.В. Пирогов, А.В. Рагуткин // Техника и технологии: пути инновационного развития. Материалы 6-ой Международной научно-технической конференции, Курск, 29-30 июня 2017 г.–С.37-44.
21. Пирогов, В.В. Последовательный оптимизированный мажоритарный алгоритм контроля испытаний / В.В. Пирогов, **М. И. Сидоров**, М.Е. Ставровский, А.В. Рагуткин // Техника и технологии: пути инновационного развития. Материалы 6-ой Международной научно-технической конференции, Курск, 29-30 июня 2017 г.– С.91-96.
22. **Сидоров, М.И.** Критерии отказов и методы оценки надежности одноканальных технологических систем по параметрам производительности / **М. И. Сидоров**, М.Е. Ставровский, В.В. Пирогов, Е.С. Юрцев // Техника и технологии: пути инновационного развития. Материалы 6-ой Международной научно-технической конференции, Курск, 29-30 июня 2017 г.– С.118-127.
23. **Сидоров, М.И.** Регулирование надежности технологических операций введением допусков на настройку / **М. И. Сидоров**, М.Е. Ставровский, В.В. Пирогов, Е.С. Юрцев // Техника и технологии: пути инновационного развития. Материалы 6-ой Международной научно-технической конференции, Курск, 29-30 июня 2017 г. –С.128-132.

24. **Сидоров, М.И.** Функции распределения наработок до отказа технологических систем и методы оценки их параметров / **М.И. Сидоров**, М.Е. Ставровский, Е.С. Юрцев // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: Сборник научных трудов 7-ой Международной научно-технической конференции, Курск, 01-02 июня 2017 г. – С.332-338.
25. Лукашев, Е.А. Описание математической модели кооперативного роста усталостных микротрещин / Е.А. Лукашев, **М.И. Сидоров** // Качество в производственных и социально-экономических системах: Сборник научных трудов 5-ой Международной научно-технической конференции, Курск, 21 апреля 2017 г. – 2017. – С.198-204.
26. **Сидоров, М.И.** Моделирование процессов водородного изнашивания металлов / **М.И. Сидоров**, Е.С. Юрцев // Качество в производственных и социально-экономических системах: Сборник научных трудов 5-ой Международной научно-технической конференции, Курск, 21 апреля 2017. – 2017. – С.294-299.
27. Лукашев, Е.А. Некоторые аспекты электрохимического представления о процессах изнашивания в трибологии / Е.А. Лукашев, **М.И. Сидоров**, Е.С. Юрцев // Современные инновации в науке и технике: Материалы 7-ой Всесоюзной научно-технической конференции, Курск, 13-14 апреля 2017 г. – 2017. – №2(10). – С.90-98.
28. Лукашев, Е.А. Анализ связи процессов водородного изнашивания и образования гидридов / Е.А. Лукашев, **М.И. Сидоров**, Е.С. Юрцев // Современные инновации в науке и технике: Материалы 7-ой Всесоюзной научно-технической конференции, Курск, 13-14 апреля 2017. – 2017. – №2(10). – С.84-90.
29. Ставровский, М.Е. Исследование надежности технологических систем по критериям эффективности / М.Е. Ставровский, **М.И. Сидоров** // Управление качеством: Избранные научные труды 16-ой Международной научно-практической конференции, 14-15 марта 2017. – Москва: МАИ, 2017. – С.340-344.
30. Ставровский, М.Е. Повышение живучести систем газодинамических импульсных систем / М.Е. Ставровский, А.В. Вагин, **М.И. Сидоров**, А.Ю. Албагачиев // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: Сборник научных трудов 6-ой Международной научно-практической конференции, 02-03 июня 2016. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. – С.276-280.
31. Ставровский, М.Е. Моделирование адгезии при контактном взаимодействии металлов / М.Е. Ставровский, А.Ю. Албагачиев, **М.И. Сидоров** // Перспективное развитие науки, техники и технологий: Материалы 6-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 20-21 октября 2016. – 2016. – №4(7). – С.168-173.
32. Албагачиев, А.Ю. Трибохимическая кинетика внешнего трения / А.Ю. Албагачиев, Е.А. Лукашев, **М.И. Сидоров**, М.Е. Ставровский // Механика и трибология транспортных систем-2016: Сборник докладов международной научной конференции, Ростов-на-Дону, 8-10 ноября 2016г.: в 2 т. – Ростов н/Д: ФГБОУ ВО РГУПС. – 2016. – Т.1. – С.136-141.

33. Вагин, А.В. Совершенствование кумулятивных боеприпасов: ретроспектива, состояние, сравнение, прогноз / А.В. Вагин, А.А. Викторов, А.П. Волков, **М.И. Сидоров**, А.П. Яжук // Сборник трудов ФКП «НИИ «Геодезия». Выпуск 2. –2016 г. – С.63-70.
34. Фурсов, Ю.С. Параметры воздушной ударной волны при взрыве быстро движущегося заряда / Ю.С. Фурсов, **М.И. Сидоров** и др. // Сборник трудов ФКП «НИИ «Геодезия». Выпуск 2. –2016 г. – С.97-103.
35. Клименко, В.Ю. Изучение процесса пробития мишенного щита поражающими элементами и предложения по модернизации методики регистрации / В.Ю. Клименко, **М.И. Сидоров**, Ю.С. Фурсов // Сборник трудов ФКП «НИИ «Геодезия». Выпуск 2. –2016 г. – С.130-133.
36. Фурсов, Ю.С. Параметры воздушной ударной волны при взрыве быстро движущегося заряда. / Ю.С. Фурсов, **М.И. Сидоров** и др. / Материалы 41 научно-технической конференции «Проектирование боеприпасов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – Т.1. – С.113-115.
37. Клименко, В.Ю. Изучение процесса пробития мишенного щита поражающими элементами и предложения по модернизации методики регистрации. / В.Ю. Клименко, **М.И. Сидоров**, Ю.С. Фурсов // Материалы 41 научно-технической конференции «Проектирование боеприпасов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – Т.1. –С.189-192.
38. Ватутин, Н.М. Проведение огневых стендовых испытаний твердотопливных ракетных двигателей с соблюдением экологических требований /Н.М. Ватутин, И.А. Емельянов, А.С. Колеров, А.И. Садовский, **М.И. Сидоров**, Т.А. Теплов // Сборник трудов ФКП «НИИ «Геодезия». Выпуск 1. – 2014 г. – С.38-41.
39. **Сидоров, М.И.** К вопросу оценки ТНТ-эквивалента по результатам испытаний фугасных боеприпасов /**М.И. Сидоров**, Ю.С. Фурсов // Сборник трудов ФКП «НИИ «Геодезия». Выпуск 1. – 2014 г. – С.42-50.
40. Белов А.И. Об использовании электретных датчиков для определения параметров осколочного поля /А.И. Белов, В.А. Горелов, О.П. Пизаев, В.А. Сидоров, **М.И. Сидоров**, Ю.С. Фурсов // Сборник трудов ФКП «НИИ «Геодезия». Выпуск 1. –2014 г. – С.51-74.
41. Вагин, А.В. Прогнозирование ответной реакции боеприпасов при полигонных испытаниях на прострел компактными поражающими элементами. / А.В. Вагин, **М.И. Сидоров** и др. // Сборник трудов ФКП «НИИ «Геодезия». Выпуск 1. –2014 г. – С.75-81.
42. Вагин, А.В. Энергетические характеристики и компоновка взрывчатых составов «ВВ-активный металл-окислитель» фугасно-осколочных боеприпасов/ А.В. Вагин, **М.И. Сидоров** и др. // Сборник трудов ФКП «НИИ «Геодезия». Выпуск 1. –2014. – С.82-91.
43. Грязнов, Е.Ф. Изменение ударно-волновых параметров воздушного взрыва на высоте размещения заряда / С.Е.Ф. Грязнов, В.Н. Охитин, И.А. Перевалов,

- А.О. Пизаев, **М.И. Сидоров**, Ю.С. Фурсов // Сборник трудов ФКП «НИИ «Геодезия». Выпуск 1. – 2014. – С.92-95.
44. Вагин, А.В. Разработка экспериментальной базы для испытания средств инженерного вооружения / А.В. Вагин, А.В. Виноградов, А.О. Пизаев, **М.И. Сидоров** // Сборник трудов ФКП «НИИ «Геодезия». Выпуск 1. – 2014. – С.96-99.
45. Пизаев, А.О. Комплексная автоматизация процесса проведения статистических испытаний боевых частей и инженерных боеприпасов / А.О. Пизаев, А.В. Вагин, А.А. Костин, **М.И. Сидоров** // Сборник трудов ФКП «НИИ «Геодезия». Выпуск 1. – 2014. – С.100-103.
46. Вагин, А.В. Методическая и экспериментальная база для испытаний средств обнаружения и обезвреживания взрывоопасных предметов / А.В. Вагин, А.В. Виноградов, А.О. Пизаев, **М.И. Сидоров**, Ю.С. Фурсов // Сборник трудов ФКП «НИИ «Геодезия». Выпуск 1. – 2014. – С.104-106.
47. Журов, А.С. Перспективы повышения информативности испытаний боеприпасов с использованием методов неразрушающего контроля и тепловидения / А.С. Журов, А.В. Вагин, В.А. Пырьев, **М.И. Сидоров** // Сборник трудов ФКП «НИИ Геодезия». Выпуск 1. – 2014. – С.116-118.
48. Баракин, А.А. Безопасность деятельности предприятий промышленности боеприпасов и спецхимии для здоровья населения и окружающей среды на примере боеприпасных испытательных полигонов / А.А. Баракин, А.В. Вагин, Н.М. Ватутин, А.А. Викторов, Н.К. Рогов, **М.И. Сидоров** // Сборник трудов ФКП «НИИ «Геодезия». Выпуск 1. – 2014. – С.148-158.
49. Рогов, Н.К. Энергетические характеристики и компоновка взрывчатых составов «ВВ-активный металл-окислитель» фугасно – осколочных боеприпасов / Н.К. Рогов, **М.И. Сидоров**, Ю.С. Фурсов // Боеприпасы и спецхимия, г. Москва. – 2014. Выпуск 1. – С.91-99.
50. Фурсов, Ю.С. Методическая и экспериментальная база для испытаний средств обнаружения и обезвреживания взрывчатых предметов. / Ю.С. Фурсов. **М.И. Сидоров** и др. / Труды IX международной научно-практической конференции «Технические средства противодействия террористическим и криминальным взрывам», г. Санкт-Петербург. – 2014 г. – С.102-105.
51. Грязнов, Е.Ф. Изменение ударно-волновых параметров воздушного взрыва на высоте размещения заряда / Е.Ф. Грязнов, В.Н. Охитин, И.А. Перевалов, А.О. Пизаев, **М.И. Сидоров**, Ю.С. Фурсов // Материалы XL научно-технической конференции «Проектирование боеприпасов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – Т.1. – С.163-165.
52. Пизаев, А.О. Комплексная автоматизация процесса проведения статистических испытаний боевых частей и инженерных боеприпасов / А.О. Пизаев, А.В. Вагин, А.А. Костин, **М.И. Сидоров** // Вопросы оборонной техники, г. Москва. – 2013. Серия 14. Выпуск 2. – С.106-109.

53. Ватутин, Н.М. Проведение огневых стендовых испытаний твердотопливных ракетных двигателей с соблюдением экологических требований / Н.М. Ватутин, И.А. Емельянов, А.С. Колеров, А.И. Садовский, **М.И. Сидоров**, Т.А. Теплов // Вопросы оборонной техники, г. Москва. – 2013. Серия 14. Выпуск 2. – С.115-118.
54. Журов, А.С. Перспективы повышения информативности испытаний боеприпасов с использованием методов неразрушающего контроля и тепловидения / А.С. Журов, А.В. Вагин, В.А. Пырьев, **М.И. Сидоров** // Вопросы оборонной техники, г. Москва. – 2013. Серия 14. Выпуск 2. – С.143-150.
55. **Сидоров, М.И.** К вопросу оценки ТНТ-эквивалента по результатам испытаний фугасных боеприпасов / **М.И. Сидоров**, Ю.С. Фурсов // Проектирование систем: Труды XXXIX Научно-технической конференции, МВТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва. – 2012. –Т. 1. – С.200-205.
56. Белов, А.И. Об использовании электретных датчиков для определения параметров осколочного поля. / А.И. Белов, В.А. Горелов, О.П. Пизаев, В.М. Сидоров, **М.И. Сидоров**, Ю.С. Фурсов // Научно-технический сборник «Боеприпасы». – 2011 – №4-5. – С.65-87.
57. Вагин, А.В. Прогнозирование ответной реакции боеприпасов при полигонных испытаниях на прострел компактными поражающими элементами. / А.В. Вагин, **М.И. Сидоров** и др. // Научно-технический сборник «Боеприпасы». – 2011. – № 4-5. – С.102-108.
58. Белов, А.И. К вопросу оценки ТНТ-эквивалента по результатам испытаний элементов фугасных боеприпасов, предназначенных непосредственно для поражения целей. / А.И. Белов, В.А. Горелов, О.П. Пизаев, В.М. Сидоров, **М.И. Сидоров**, Ю.С. Фурсов. // Научно-технический сборник «Боеприпасы». – 2011. – № 4-5. – С.150-156.

### Монографии

59. Лукашев, Е.А. Механохимическая кинетика накопления повреждений, разрушения и износа: монография / Лукашев Е.А., **Сидоров М.И.** – М.: «Эко-Пресс», 2017. – 422 с.
60. Лукашев, Е.А. Трибохимическая кинетика внешнего трения: монография / Лукашев Е.А., **Сидоров М.И.** – М.: «Эко-Пресс», 2016. – 344 с. (142 с.).

### Патенты на изобретения

61. Пат. 2638510 РФ, МПК F41J 5/10. Способ формирования атмосферной проекционной мишени для обучения боевой стрельбе и устройство для его осуществления / Ватутин Н.М., Колтунов В.В., **Сидоров М.И.** и др.; заявитель и патентообладатель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия». – № 2016147197; заявл. 01.12.2016; опубл. 13.12.2017, Бюл. №35.
62. Пат. 2632013 РФ, МПК С06С 5/04. Иницирующий волновод / Колтунов В.В., Ватутин Н.М., **Сидоров М.И.** и др.; заявитель и патентообладатель ФКП

«Научно-исследовательский институт «Геодезия». – № 2016127486; заявл. 08.07.2016; опубл. 02.10.2017, Бюл. 28.

63. Пат. 2632089 РФ, МПК F42В 35/00. Способ испытания боеприпасов на способность к дроблению / Колтунов В.В., Вагин А.В., **Сидоров М.И.** и др.; заявитель и патентообладатель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия». – № 2016140645; заявл. 17.10.2016; опубл. 02.10.2017, Бюл. №28.

64. Пат. 2629275 РФ, МПК F42В 33/06. Способ расснаряжения боеприпасов, снаряженных желтым фосфором / Колтунов В.В., Ватутин Н.М., Касаткин А.В., **Сидоров М.И.** и др.; заявитель и патентообладатель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия». – № 2016133989; заявл. 19.08.2016; опубл. 28.08.2017.

65. Пат. 2630860 РФ, МПК G01М 17/007, F41Н 7/00. Способ испытания мобильных боевых робототехнических комплексов и стенд для его осуществления / Вагин А.В., Ватутин Н.М., Колтунов В.В., Сидоров И.М., **Сидоров М.И.** и др.; заявитель и патентообладатель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия». – № 2016118096; заявл. 11.05.2016; опубл. 13.09.2017, Бюл. 26.

66. Пат. 2626474 РФ, МПК F42В 35/00, G01S 13/58. Способ определения глубины проникания бронебойных цельнокорпусных калиберных и подкалиберных снарядов в толстостенную преграду / Вагин А.В., **Сидоров М.И.** и др.; заявитель и патентообладатель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия». – № 2016124191; заявл. 20.06.2016; опубл. 28.07.2017, Бюл.22.

67. Пат. 2620245 РФ, МПК F41J 9/00. Способ управления перемещением подвижной мишени и устройство для его осуществления / **Сидоров М.И.**, Колтунов В.В. и др.; заявитель и патентообладатель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия». – № 2016109653/16, заявл. 18.03.2016; опубл. 23.05.17, Бюл. № 15.

68. Пат. 2616120 РФ, МПК F41F 1/00. Способ управления автоматической стрельбой ракетно-артиллерийского вооружения, установленного на подвижном носителе / Вагин А.В., **Сидоров М.И.**, Ватутин Н.М и др.; заявитель и патентообладатель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия». – № 2016107803/16, заявл. 04.03.2016, опубл. 12.04.17, Бюл. № 11.

69. Пат. 2533882 РФ, МПК F42В 35/00. Способ испытания боеприпасов / Вагин А.В., **Сидоров М.И.**, и др.; заявитель и патентообладатель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия». – № 2012400172/12; заявл. 27.12.12; опубл. 24.09.2014, Бюл. № 26.

70. Пат. 2492603 РФ, МПК F42В 15/00, 30/00. Боевая часть объёмного взрыва / **Сидоров М.И.**, Вагин А.В. и др.; заявитель и патентообладатель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия». – № 2012400056; заявл. 03.05.12; опубл. 23.08.13.

71. Пат. 2493538 РФ, МПК F42В 35/00. Способ испытания осколочного боеприпаса с осесимметричным полем разлета осколков и стенд для его реализации



- / Колтунов В.В., Пизаев А.О., **Сидоров М.И.**, Фурсов Ю.С.; заявитель и патентообладатель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия». – № 2012114230/11; заяв. 12.04.12; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26.
72. Пат. 2493537 РФ, МПК F42В 33/06. Способ расснаряжения боеприпасов / Ватутин Н.М., Выборнов М.Ю., Емельянов И.А., Колтунов В.В., Кочкин А.В., Сидоров И.М., **Сидоров М.И.**; заявитель и патентообладатель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия». – № 2012106470/11; заявл. 24.02.12; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26.
73. Пат. 2466517 РФ, МПК С06В 25/00. Взрывчатая композиция / Вагин А.В., Рогов Н.К., **Сидоров М.И.**, Ухабин О.А. и др.; заявитель и патентообладатель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия». – № 2011400130; заявл. 08.09.11; опубл. 17.10.12.
74. Пат. 2460258 РФ, МПК F42В 15/00, 30/00. Боевая часть объёмного взрыва / Вагин А.В., Рогов Н.К., **Сидоров М.И.**, Пизаев А.О. и др.; заявитель и патентообладатель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия». – № 2011400185; заявл. 29.12.11; опубл. 17.10.12.
75. Заявка на изобретение № 2018105523 от 14.02.2018 г. / Баллистический маятник / Завьялов В.С., Ватутин Н.М., Колтунов В.В., **Сидоров М.И.** и др.; заявитель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия».
76. Заявка на изобретение № 2017145090 от 21.12.2017 г. / Способ измерения давления пороховых газов в канале ствола оружия / Колтунов В.В., Ватутин Н.М., Сидоров И.М., **Сидоров М.И.** и др.; заявитель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия».
77. Заявка на изобретение № 2017143573 от 13.12.2017 г. / Устройство для измерения давления пороховых газов в канале ствола оружия / Ватутин Н.М., Колтунов В.В., Сидоров И.М., **Сидоров М.И.** и др.; заявитель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия».
78. Заявка на изобретение № 2017136043 от 11.10.2017 г. / Устройство для определения импульса взрыва заряда взрывчатого вещества боеприпаса в ближней зоне / **Сидоров М.И.**, Колтунов В.В. и др.; заявитель ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия».

СИДОРОВ МИХАИЛ ИГОРЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ  
СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ И  
УПРАВЛЕНИЯ ТРИБОХИМИЧЕСКИМИ  
ПРОЦЕССАМИ ИЗНАШИВАНИЯ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук  
Специальность 05.02.04 – «Трение и износ в машинах»

Подписано в печать . . . . .2018г. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Офсетная печать. Печ. л. 2,0. Усл. изд. л. 2,0.