



**Банникова Ирина Анатольевна**

**АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ СПЛОШНЫХ СРЕД  
ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук в лаборатории Физических основ прочности.

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор  
**Наймарк Олег Борисович**

**Официальные оппоненты:**

**Радченко Андрей Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», институт кадастра, экономики и инженерных систем в строительстве, директор

**Иванова Оксана Владимировна**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Отдел структурной макрокинетики, ученый секретарь

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится 15 сентября 2017 года в 12 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (корпус № 10 (НИИ ПММ), аудитория 239).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru).

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/BannikovaIA15092017.html>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» июля 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

Пикушак  
Елизавета Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы исследования.** Физические механизмы, приводящие к разрушению конденсированных сред, связаны с многомасштабными явлениями структурной релаксации, обусловленными дефектами. Условия ударно-волнового воздействия с характерными временами, близкими к временам структурной релаксации, дают уникальную возможность экспериментального исследования кинетических закономерностей процессов разрушения и деформирования. Мезоскопические дефекты, которые по своей природе являются флуктуациями поля смещений, могут быть связаны с коллективными движениями групп атомов и молекул. Этот механизм движения, известный как пластическое течение в твердых телах, не соответствует традиционно рассматриваемому для жидкостей (по аналогии с газами) диффузионному механизму переноса импульса, но может играть, как впервые было отмечено Я. И. Френкелем, важную роль в механическом поведении жидкостей. Аналогичная попытка была предпринята в работах академика А. Д. Сахарова с сотрудниками при изучении релаксационных явлений на фронте ударных волн, когда впервые была установлена универсальная асимптотика вязкости конденсированных сред при скоростях деформации  $\dot{\epsilon}^* \sim 10^4 \div 10^5$  1/с.

Деформирование и разрушение твердых тел при ударно-волновом нагружении сопровождается выраженными автомодельными закономерностями: степенная зависимость скорости деформации от амплитуды нагружения (данные L. M. Barker, J. W. Swegle-D. E. Grady), асимптотическая зависимость времени разрушения от амплитуды нагружения при разрушении в условиях взаимодействия волн сжатия и разрежения (эффект «динамической ветви», данные Н. А. Златина, Г. С. Пугачева, А. Н. Дремина, А. М. Молодца и др.). Эффекты автомодельности связываются с универсальными взаимодействиями механизмов структурной релаксации и диссипации при пластическом течении твердых тел (степенной закон Свигла-Греди) и «подчинением» динамики напряжений кинетике накопления дефектов, предшествующей формированию очагов разрушения и зарождению макроскопической трещины (Г. И. Канель, С. В. Разоренов, В. Е. Фортов, А. Н. Дремин, А. М. Молодец, Н. А. Златин, Г. С. Пугачев, С. М. Мочалов, Е. Н. Беллендир, А. Синани, О. Б. Наймарк, Z. Rozenberg, N. Bourn, S. Bless и др.).

Современные представления о механизмах деформирования и разрушения, экспериментальные возможности использования техники ударно-волнового эксперимента и систем регистрации высокого временного разрешения могут являться основой разработки универсальных методов исследования реологических свойств и разрушения конденсированных сред, обусловленных многомасштабными структурными эффектами.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование релаксационных свойств конденсированных сред (дистиллированная вода, глицерин, силиконовое и трансформаторное масло, керамики на основе оксида алюминия) при сжатии и растяжении в условиях ударно-волновых воздействий для установления связи автомодельных закономерностей деформирования и разрушения с многомасштабными механизмами структурной релаксации, обусловленными поведением мезоскопических дефектов.

Для достижения поставленных целей были сформулированы и решены следующие основные **задачи**:

1. Развитие подхода по исследованию релаксационных свойств и разрушения конденсированных сред с использованием импульсного (ударно-волнового) нагру-

жения методом электрического взрыва проводника (ЭВП) и методом взрывного генератора (ВГ).

2. Разработка программного обеспечения для анализа сигналов, полученных с использованием интерференционной оптоволоконной системы VISAR, с целью получения профилей скорости свободной поверхности для исследований релаксационных свойств, откольной прочности и механизмов разрушения конденсированных сред (жидкостей, керамики).

3. Реализация экспериментальной программы по исследованию релаксационных свойств и разрушения жидкостей (дистиллированная вода, технический глицерин, силиконовое масло, трансформаторное масло) при различных температурах в интервале скоростей деформации  $10^5 \div 10^7$  1/с методом ЭВП (на базе Института механики сплошных сред УрО РАН) и методом ВГ (на базе Института проблем химической физики РАН).

4. Анализ на основе данных доплеровской интерферометрии (система VISAR) профилей скорости свободной поверхности, релаксационных свойств и разрушения жидкостей при различных амплитудах, энергиях импульсного нагружения и температурах.

5. Исследование автомодельных закономерностей формирования ударно-волновых фронтов и разрушения жидкостей, сопоставление с данными по формированию автомодельных волновых фронтов и разрушения твердых тел при импульсном нагружении.

6. Разработка подхода по исследованию статистических закономерностей фрагментации хрупких (керамических) материалов с использованием метода ЭВП в жидкости для реализации схемы «сохранения фрагментов».

7. Развитие метода исследования статистических закономерностей фрагментации на основе анализа цифровых изображений фрагментов и ансамбля пор («метод фотографии») с целью выявления автомодельных многомасштабных закономерностей разрушения керамик.

**Научная новизна** работы заключается в том, что впервые с использованием оригинальной экспериментальной установки, реализующей ударно-волновое нагружение конденсированных сред методом электровзрыва проводника, на основе анализа данных доплеровской интерферометрии исследованы релаксационные и прочностные свойства жидкостей, выполнены эксперименты по множественной фрагментации керамик в условиях «сохранения фрагментов» и установлены автомодельные закономерности механизмов релаксации и разрушения конденсированных сред при интенсивных нагрузках.

1. Установлены автомодельные закономерности формирования волновых фронтов в жидкостях в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\epsilon}^* \sim 10^5 \div 10^7$  1/с.

2. Обоснован вывод о неньютоновском (псевдопластическом) механизме переноса импульса в исследованных жидкостях в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\epsilon}^* \sim 10^5 \div 10^7$  1/с.

3. Установлена зависимость откольной прочности полярных и неполярных жидкостей от скорости деформации ( $\dot{\epsilon} \sim 10^4 \div 10^5$  1/с).

4. Установлена зависимость откольной прочности глицерина от температуры в интервале скоростей деформации  $\dot{\epsilon} \sim 10^4 \div 10^5$  1/с.

5. Обоснован вывод о многомасштабном характере зарождения и роста дефектов (пор) в керамике  $Al_2O_3$  и жидкостях в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\epsilon} \sim 10^4 \div 10^5$  1/с.

6. Обоснован механизм разрушения керамик в интервале скоростей деформации  $\dot{\varepsilon}^* \sim 10^5 \div 10^7$  1/с в соответствии с установленными типами статистических распределений фрагментов по размерам.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты исследований служат экспериментальной основой верификации широкодиапазонных определяющих соотношений и могут быть использованы для развития теоретических подходов к описанию поведения конденсированных сред, стадийности разрушения, включая статистические закономерности фрагментации.

Разработанные методики исследования механизмов релаксации и разрушения могут быть распространены на различные типы перспективных материалов и использоваться при подготовке высококвалифицированных специалистов в области физики конденсированных сред.

**Методы исследования:** методы импульсного сжатия и растяжения сред при помощи электрического взрыва проводника и взрывного генератора; методы непрерывной регистрации профилей скорости образца с использованием лазерных измерителей скорости движения свободных и контактных поверхностей образца; совместное применение поляризационного датчика измерения давления с методом непрерывной регистрацией профиля массовой скорости для определения скорости ударной волны; статические методы с использованием вискозиметра и видео регистрации всплытия пузырей для определения динамической вязкости жидкостей; ультразвуковой метод измерения скорости звука в образцах; «метод взвешивания» и «метод фотографии» для определения массы; оптическая микроскопия структуры керамических образцов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Автомодельные закономерности формирования волновых фронтов в жидкостях (вода, глицерин, силиконовое и трансформаторное масла), соответствующие степенному закону зависимости скорости деформации от амплитуды импульса сжатия  $\dot{\varepsilon}^* \sim P_0^\beta$  в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\varepsilon}^* \sim 10^5 \div 10^7$  1/с.

2. Вывод о неньютоновском (псевдопластическом) механизме переноса импульса в исследованных жидкостях в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\varepsilon}^* \sim 10^5 \div 10^7$  1/с.

3. Зависимость откольной прочности полярных и неполярных жидкостей от скорости деформации ( $\dot{\varepsilon} \sim 10^4 \div 10^5$  1/с).

4. Зависимость откольной прочности глицерина от температуры вблизи точки фазового перехода и ниже в интервале скоростей деформации  $\dot{\varepsilon} \sim 10^4 \div 10^5$  1/с.

5. Вывод о многомасштабном характере зарождения и роста дефектов (пор) в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\varepsilon} \sim 10^4 \div 10^5$  1/с, основанный на анализе автомодельных закономерностей формирования разрушения в жидкостях и твердых телах.

6. Закономерности статистики фрагментации керамических материалов (на примере  $Al_2O_3$ ) в интервале скоростей деформации  $\dot{\varepsilon}^* \sim 10^5 \div 10^7$  1/с (энергии нагружающего импульса  $4 \div 22$  Дж/г), соответствующие различным видам (степенное и экспоненциальное) распределения фрагментов по размерам.

7. Обоснование механизмов разрушения керамик при интенсивных нагрузках в соответствии с видом статистических распределений.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов** обеспечивается использованием апробированных экспериментальных методик, большой статистической выборкой измерений, высокой степенью воспроизводимости экспериментальных результатов, соответствием экспериментальных результатов известным литературным данным и результатам, полученных в данной работе различными методами.

**Личный вклад автора.** Автором настоящей работы (совместно со с.н.с. ИМСС УрО РАН С. В. Уваровым) модернизирована и усовершенствована установка ЭВП для исследования поведения конденсированных сред в условиях высокоскоростного нагружения. Автором разработана методика по определению скорости ударной волны в жидкости по данным измерений на установке ЭВП с использованием системы доплеровской интерферометрии VISAR. Разработаны алгоритм и программа по определению скорости свободной поверхности в конденсированной среде с пользовательским интерфейсом. На установке ЭВП автором (совместно с С. В. Уваровым) проводились эксперименты в условиях сжатия и растяжения на жидкостях и керамике. Автор принимал непосредственное участие в подготовке и проведении экспериментов (совместно с зав. лаб. Детонации А. В. Уткиным и инженером-исследователем А. Н. Зубаревой, ИПХФ РАН) при исследовании жидкостей в условиях плоского удара методом ВГ, включая подготовку экспериментальныхборок испытываемого образца для получения ударной адиабаты силиконового масла. Проведение эксперимента и расчет по получению ударной адиабаты совместно с А. В. Уткиным и А. Н. Зубаревой. Автором проведена обработка данных с интерферометра VISAR с помощью созданной программы и получены профили скорости свободной поверхности жидкостей, анализ которых проведен совместно с А. В. Уткиным и С. В. Уваровым. Личным вкладом автора является получение и анализ данных для воды, глицерина, силиконового и трансформаторного масел и керамики.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались на российских и международных конференциях, в том числе: XVIII, XIX, XX Всероссийские конференции «Зимняя школа по механике сплошных сред» (Пермь, 2013, 2015, 2017); Всероссийская конференция «Взрыв в физическом эксперименте» (Новосибирск, 2013); Российская конференция «XXI Петербургские чтения по проблемам прочности, к 100-летию со дня рождения Л. М. Качанова и Ю. Н. Работнова» (Санкт-Петербург, 2014); XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015); XXIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2015); Международные конференции XV и XVII «Харитоновские тематические научные чтения» (Саров, 2013, 2015); Международная конференция «Иерархически организованные системы живой и неживой природы» (Томск, 2013); Международная конференция «Физическая мезомеханика многоуровневых систем. Моделирование, эксперимент, приложения» (Томск, 2014); Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2015); XII, XIII Международные конференции «Забабахинские научные чтения» (Снежинск, 2014, 2017); Международная конференция 20<sup>th</sup> European Conference on Fracture «Fracture at all scales» (Norway, Trondheim, 2014); International Workshop «Failure of Heterogeneous Materials under Intensive Loading: Experiment and Multi-scale Modeling» (Perm, 2014); XXIX и XXXI International Conferences on Equations of State for Matter

(Elbrus, Kabardino-Balkaria, 2014, 2016); XXX International Conference on Interaction of Intense Energy «Fluxes with Matter» (Elbrus, Kabardino-Balkaria, 2015); 10<sup>th</sup> Meeting of ESIS-TC2 on Micromechanisms (Leoben, Austria, 2015); III Всероссийская молодежная конференция «Успехи химической физики» (Черноголовка, Россия, 2016); Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, Россия, 2016); 21th European Conference on Fracture. «Fracture and Safety» (Catania, Italy, 2016).

Ключевые результаты получены в рамках исследований по программе фундаментальных исследований Президиума РАН (15-1-1-9, 15-10-1-18, 12-С-1013, 12-П-1-1021), проектов Российского фонда фундаментальных исследований (14-01-00842 А, 14-01-96012 р\_урал\_а, 14-01-96015 р\_урал\_а, 15-08-08921 А, 16-41-590892 р\_а, 16-31-00283 мол\_а) и Российского Научного Фонда (14-19-01173).

**Публикации.** По теме диссертации И.А. Банниковой опубликовано 38 работ, из них 9 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (в том числе 2 статьи в российских научных журналах, переводные версии которых индексируются Springer, 1 статья в российском научном журнале, индексируемом Scopus, 5 статей в зарубежных электронных научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus), 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 28 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских съездов, школ, научных конференций (из них 2 зарубежные конференции).

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из Введения, четырех глав и выводов по результатам исследования. Работа изложена на 168 страницах и содержит 104 рисунка, 7 таблиц. Список литературы включает 249 наименований.

**Благодарности.** Автор диссертационной работы выражает признательность сотрудникам лаборатории Физических основ прочности Института механики сплошных сред УрО РАН (Пермь) (С. В. Уварову за помощь в проведении экспериментов и обсуждение результатов, М. М. Давыдовой за обсуждение результатов), сотрудникам лаборатории Детонации Института проблем химической физики РАН (Черноголовка) (А. В. Уткину и А. Н. Зубаревой за помощь в проведении экспериментов и обсуждение результатов), научному руководителю О. Б. Наймарку за обсуждение и плодотворное время работы, родным и близким за поддержку.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обсуждается актуальность, цели и задачи исследования, положения выносимые на защиту, приводится краткое описание работы и формулируются выводы по основным результатам.

**Первая глава** носит обзорный характер и посвящена современным представлениям о процессах деформирования и разрушения конденсированной среды, исследованию ее физико-механических свойств методами квазистатического, динамического и ударно-волнового нагружения. Механические свойства конденсированных сред в широком диапазоне скоростей деформации обусловлены многомасштабными механизмами структурной релаксации, которые проявляются на макроскопическом уровне в виде соответствующих определяющих соотношений вязкого, упруго-

пластического деформирования, кинетических уравнений накопления поврежденности. Одним из перспективных экспериментальных методов, позволяющим исследовать релаксационные свойства и стадийность накопления поврежденности при разрушении, является техника ударно-волнового нагружения, совмещенная с процессом регистрации массовой скорости методом доплеровской интерферометрии. При этом измерения реализуются на масштабах времен, близких к временам структурной релаксации и отражающим многоуровневую кинетику зарождения и роста дефектов, кинетику фазовых превращений.

В **параграфе 1.1** представлен обзор поведения конденсированной среды в условиях ударно-волнового нагружения. Обсуждаются особенности ударно-волнового нагружения, явление откольного разрушения, основные формулы для вычисления растягивающих напряжений, построение адиабаты Гюгонио по данным экспериментов, построение  $(x-t)$  и  $(p-u)$  диаграмм взаимодействий, влияние динамического импеданса сред на прохождение ударной волны (УВ) в материале и ее взаимодействие с ним. Представлен обзор работ, посвященных исследованию поведения жидкостей в условиях высокоскоростного нагружения, явлению откольного разрушения в жидкостях и твердых телах. **Параграф 1.2** посвящен обсуждению закономерностей зарождения и роста пор при отражении импульса сжатия от границы раздела двух сред, представлениям о влиянии кавитации на процесс разрушения внешних конструкций, моделям откольного разрушения, с учетом зарождения, роста и схлопывания пор в средах с прочностью. Обсуждаются работы по влиянию температуры и давления на зону кавитации. Экспериментальному и теоретическому исследованию прочности жидкостей в условиях импульсного растяжения посвящены работы М. Корнфельда, А. Н. Дремина, Г. И. Канеля и др., G. A. Carlson, А. А. Богача, В. А. Сосикова и А. В. Уткина, О. Н. Игнатовой и др.; в работах S. T. Cui, С. McCabe и др. изучается влияние скорости деформации на вязкость среды. Теоретическая модель разрушения, учитывающая зарождение и рост пор при растяжении (отрицательные давления) и их инерционное расширение при положительных давлениях, и описывающая экспериментально полученные закономерности явления откола в жидкостях, получила развитие в работах А. В. Уткина и О. Н. Игнатовой.

В **параграфе 1.3** представлен обзор работ, посвященных поведению вязкости конденсированных сред в условиях высокоскоростного нагружения. Отмечается, что реологические особенности поведения жидкостей при сдвиговом течении могут быть связаны с неравновесными (вязкоупругими) эффектами сдвиговой и объемной (локальное изменение плотности) дисторсии, обусловленными структурой жидкости, проявляющиеся в существовании длинновременных составляющих релаксационного спектра (работы Т. Yamada, К. Kawasaki, J. D. Gunton, D. J. Evans и др.). Это соответствует данным по измерению сдвиговых модулей и релаксационных спектров при наложении осцилляций на сдвиговое течение жидкостей (В. V. Derjaguin и др.), когда эффекты сдвиговой упругости наблюдались при частотах  $10^5$  Гц. Присутствие длинновременной части спектра с временами  $\tau \sim 10^{-5}$  с связывается в соответствии с идеей Я. И. Френкеля с согласованным перемещением и переориентацией групп молекул, что сопряжено с существенно большими характерными временами релаксации. Это предположение косвенно подтверждается в работах А. Д. Сахарова, В. Н. Минеева с сотрудниками при изучении релаксационных явлений в жидкостях на фронте ударных волн. Установленные близкие асимптотики вязкости  $\sim 10^3 \div 10^4$  Па



с для твердых тел и жидкостей для скоростей деформации  $\dot{\epsilon}^* = 10^5$  1/с указывают на существование длинновременных составляющих спектра. В работе Л. В. Альтшулера приведены результаты измерения вязкости воды при давлениях (3÷8 ГПа) за фронтом ударной волны, и установлены значения вязкости, близкие к данным В. Н. Минеева и Р. М. Зайделя. Работы С. В. Стебновского посвящены исследованию полярных жидкостей (вода, ацетон, этиловый спирт, глицерин и др.), когда в состоянии покоя они имеют упорядоченную структуру, которая разрушается при слабых сдвиговых деформациях.

В **параграфе 1.4** приведен анализ работ, посвященных разрушению металлов и квазихрупких материалов по данным статистики распределения фрагментов в зависимости от интенсивности (энергии) нагружения.

При обсуждении экспериментальных методов (**параграфы 1.5, 1.6**) отмечается, что точность измерений волновых профилей существенным образом зависит от используемых способов генерации и регистрации импульсов ударного сжатия: метод взрывного генератора, газовые баллистические установки (метод плоского удара), электромагнитные ускорители; метод ионного импульсного пучка, совмещенные с различными системами регистрации (метод емкостного датчика, тензометрирование, доплеровская интерферометрия скорости свободной и контактной поверхности). Приведен обзор экспериментальных и методических аспектов инициирования импульсного нагружения в микро и наносекундном временных диапазонах методом электровзрыва проводников (ЭВП).

Во **второй главе** описаны методики, предложенные для определения релаксационных свойств и разрушения конденсированных сред при ударно-волновом нагружения. **Параграф 2.1** посвящен методике работы на установке электровзрыва проводника, приведены внешний вид и принципиальная схема экспериментальной установки. Приведены режимы электровзрывного нагружения, оценка давления и энергии ударно-волнового импульса, инициированного взрывом медного проводника. **Параграф 2.2** посвящен методике измерения массовой скорости (по данным скорости свободной поверхности) с использованием интерференционной системы VISAR Martin Froeschner & Associates Optoelectronics FDVI Mark IV-3000 (США) и цифрового осциллографа Tektronix DPO 7254 Digital Phosphor Oscilloscope (США). Для измерения скорости свободной поверхности жидкости на различных расстояниях от взрываемого проводника был разработан измерительный датчик, совмещенный с оптоволоконной системой измерения. Датчик представлял собой трубку из ПВХ диаметром 10 мм с помещенной внутрь собирающей линзой. На свободном торце трубки закреплялось зеркало-отражатель. Приведена схема и метод измерения профиля скорости свободной поверхности. По данным измерений VISAR зарегистрировано появление двух импульсов. Первый импульс частично повторял профиль изменения электрического тока, протекающего через проводник, и, возможно, связан с воздействием электромагнитного импульса на среду или материалы измерительного зонда на оптоволоконном входе. Время процессов, сопровождавшее взрыв проводника, в среднем оставалось соизмеримым с длительностью затухания первого импульса. Установлено, что время  $\Delta t$ , через которое появлялся второй импульс, линейным образом зависело от заданного расстояния  $X$  от места инициирования взрыва до измерительной поверхности зонда. Наличие двух импульсов позволило измерить скорость ударной волны  $D$ , соответствующей обратной величине тангенса угла наклона прямой  $\Delta t(X)$ . Значение скорости ударной волны в дистиллированной воде

оказалось равным  $D \sim 1470$  м/с (что близко к скорости звука в воде), в глицерине –  $D \sim 1920$  м/с. Второй импульс связан с регистрацией скорости свободной поверхности отражателя. В параграфах 2.2, 2.3 представлены основные соотношения для расчета скорости свободной поверхности конденсированных сред, вычисления скорости деформации на фронте волны сжатия и разгрузки, а также формулы для вычисления откольной прочности материала, амплитуды напряжений на фронте волны сжатия, соотношения для определения сдвиговой вязкости жидкостей в условиях ударно-волнового нагружения.

**Параграф 2.4** посвящен методикам исследования статистических закономерностей разрушения и фрагментации трубчатых образцов под действием импульса, инициированного ЭВП в жидкости. Амплитуда импульсного нагружения образцов в установке ЭВП регулировалась изменением энергии на емкостной батарее. Длительность разряда составляла  $0.3 \div 0.8$  мкс. Приведен обзор методов «взвешивания» для определения массы фрагментов. Обсуждается оригинальный метод определения массы фрагментов («метод фотографии»), основанный на численной обработке изображений фрагментов, что позволило значительно сократить время и повысить качество статистического анализа фрагментации с учетом «фактора формы» для определения массы фрагментов в случае трубчатых образцов. Сопоставление методов «взвешивания» и «фотографии» показало, что разница в оценках массы фрагментов не превышала 5%. Фрагменты разрушенного образца собирались для дальнейшего анализа, масса фрагментов в среднем составляла 98% от массы исходного образца.

В третьей главе представлены экспериментальные и теоретические результаты исследования релаксационных свойств в жидкостях при инициировании ударно-волнового импульса методами электрического взрыва проводника (ЭВП) и взрывного генератора (ВГ). Схемы постановки экспериментов показаны на рисунках 1 и 2. В схеме 1 инициирование импульса сжатия в жидкости электровзрывом проводника (ЭВП). Установка ЭВП включает цилиндрическую взрывную камеру (диаметр 0.24 м и высота 0.085 м) с коаксиальным медным проводником (диаметр  $d_w = 0.1$  мм, длина  $l_w = 15$  мм), систему накопительных конденсаторов ( $C_0 = 0.044 \div 0.44$  мкФ); источник высокого напряжения ИВН ( $U_0 = 5 \div 15$  кВ); разрядник и систему «поджига» разряда на проводник. Внутренняя поверхность экранировалась демпфирующим материалом для предотвращения разрушения стенки кюветы волновым импульсом. В результате разряда (время менее 0.3 мкс) с емкостной батареи, заряженной от ИВН, проводник испарялся, формируя цилиндрическую ударную волну в окружающей жидкости. Плотность тока в проводнике достигала значений  $10^{11} \div 10^{12}$  А/м<sup>2</sup>. Характерные скорости деформации достигали значений  $\dot{\epsilon}^* \sim 10^5 \div 10^7$  1/с и  $\dot{\epsilon} \sim (1 \div 5) \times 10^4$  1/с соответственно на фронте волны сжатия и разрежения. Скорость свободной поверхности жидкости измерялась методом доплеровской интерферометрии (система VISAR). Оптоволоконный датчик представлял собой трубку из ПММА с расположенной внутри нее собирающей линзой и «зеркалом-отражателем» на торце (полимерная пленка ПЭТФ с алюминиевым напылением толщиной 0.01 мм и диаметром 6 мм). Датчик устанавливался на фиксированном расстоянии  $X$  от места инициирования взрыва (рисунок 1) для исследования релаксационных свойств жидкостей при различных амплитудах ударного импульса. Максимальное значение ударного импульса определялось величиной запасенной энергии в емкостной батарее.

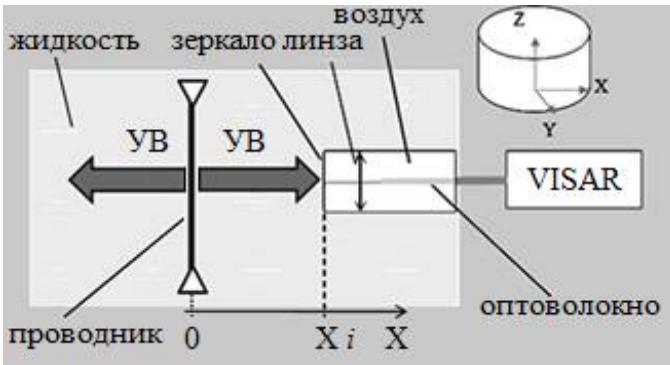


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки по измерению скорости свободной поверхности системой VISAR:УВ – ударная волна; зеркало-отражатель;  $X_i$  – расстояние от места инициирования взрыва до фольги; оптоволокно: видимое пятно лазерного луча – 0.2 мм

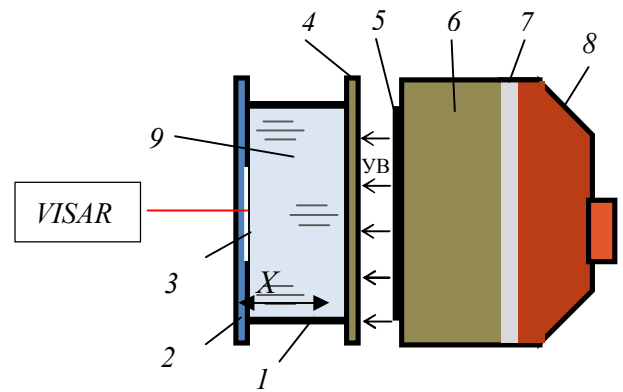


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки по исследованию релаксационных свойств жидкостей методом взрывного генератора

В схеме 2 импульс сжатия в жидкости инициировался методом ВГ. Исследуемая жидкость размещалась в цилиндрической кювете *1* высотой  $X = 2 \div 20$  мм, диаметром 50 мм, ограниченной с одной стороны пластиной *2* (ПММА, толщина 2 мм) с отверстием диаметром 18 мм, закрытым алюминиевой фольгой *3* (отражатель толщиной 7 мкм), с другой – экраном *4* из ПММА (или Al) толщиной 2 мм. Плоская ударная волна в ослабителе *6* (толщина – 20 мм и диаметр – 120 мм), генерировалась конической взрывной линзой<sup>1</sup> (линза из воска *7* и ВВ *8*) и разгоняла тонкий алюминиевый ударник *5* (толщина 0.4 мм и диаметр 50 мм).

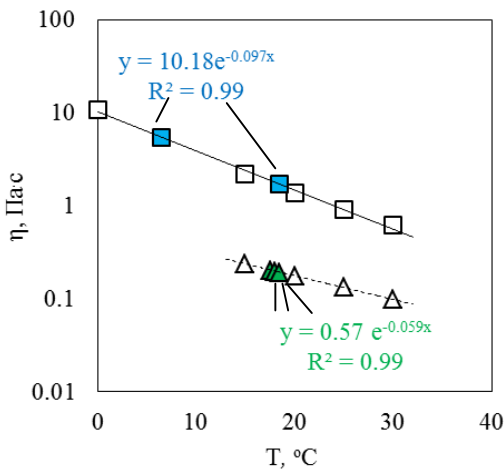


Рисунок 3 – Изменение коэффициента динамической вязкости жидкостей в зависимости от изменения температуры. Треугольники (белые) – данные по «ВМ-1С»; квадраты (белые) – данные по техническому глицерину, полученные с помощью вискозиметра

Таблица 1 – Характеристики жидкостей

	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_0$ , м/с	$\eta$ , Па·с
Вода	1000	1481	0.0010015 (20 °C) <sup>2</sup>
Глицерин	1260	1796	0.905 (25 °C)
			1.37 (20 °C)
			1.69 (18.5 °C)
			5.42 (6.5 °C)
ВМ-1С	863	1392	0.176 (20 °C) 0.194 (18 °C)
ТМ-1	887 <sup>2</sup>	1390 <sup>3</sup>	0.188 (20 °C) <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Экспериментальные профили ударных волн в конденсированных веществах / Г. И. Канель, С. В. Разоренов, А. В. Уткин, В. Е. Фортов. М., 2008. 248 с.

<sup>2</sup> Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. М., 1972. 721 с.

<sup>3</sup> Цветаев С. К. Изоляция электрооборудования. Акустическая регистрация разрядных процессов // Новости электротехники. 2008. № 1(49). С. 50–52.

При соударении тонкого ударника 5 с экраном 4 в жидкости 9 распространялся импульс сжатия. Условия нагружения варьировались изменением толщины слоя жидкости. Скорость свободной поверхности (фольги) регистрировалась доплеровским интерферометром VISAR<sup>1</sup>. Геометрические размеры кюветы обеспечивали формирование плоской волны нагружения и исключали влияние боковой волны разгрузки в течение времени регистрации процесса.

Реологические параметры исследованных жидкостей представлены в таблице 1. На рисунке 3 приведены зависимости динамической вязкости глицерина и силиконового масла от изменения температуры, полученные на вискозиметре Brookfield IV Pro. Скорость звука в жидкостях (глицерин, силиконовое масло) была измерена с помощью ультразвукового датчика Ultrasonic Thickness Gauge A1208.

В параграфах 3.1, 3.2 и 3.3 представлены результаты экспериментального исследования дистиллированной воды и глицерина методом ЭВП; силиконового масла, глицерина и трансформаторного масла методом взрывного генератора (Лаборатория Детонации ИПХФ РАН). Выявлены особенности профилей волновых фронтов масел (силиконовое масло и трансформаторное масло) и жидкостей с водородными связями (вода, глицерин). На рисунках 4-7 приведены скорости свободной поверхности в зависимости от времени для дистиллированной воды, технического глицерина (ГОСТ 6824-96), силиконового масла ВМ-1С и трансформаторного масла ТМ-1. Профили скорости свободной поверхности, полученные методами взрывного генератора и электровзрыва проводника, хорошо воспроизводились для различных опытов. Импульсы сжатия, формирующиеся при методах ЭВП и ВГ, имеют треугольную форму, поэтому во всех экспериментах после резкого увеличения скорости свободной поверхности до  $V_0$  наблюдается ее уменьшение, обусловленное падающей волной разрежения. При отражении волны сжатия от свободной поверхности в объем жидкости распространялась отраженная волна разрежения, которая, взаимодействуя с падающей волной разгрузки, приводила к возникновению отрицательных давлений и внутреннему разрыву – отколу<sup>4</sup>. В процессе разрушения растягивающие напряжения релаксировали к нулю, формируя волну сжатия, которая выходила на свободную поверхность в виде откольного импульса. Последующие колебания скорости обусловлены циркуляцией волн в откольном слое (рисунки 4-6).

Выявлены качественные особенности профилей скорости для разных жидкостей. Амплитуда ударного скачка и последующий спад скорости задается условиями ЭВП и координатой регистрации ударно-волнового фронта. Появление минимума обусловлено нарушением сплошности жидкости при растяжении (откол). Качественный вид профилей скорости в *дистиллированной воде* (рисунок 4) подобен профилям<sup>5</sup>, полученным методом взрывного генератора (ВГ). Превышение максимума в откольном импульсе (рисунок 4, профили 1, 3) над максимумом скорости свободной поверхности в воде объясняется ростом пористости среды при сжатии, вызванным инерционным расширением пузырей при смене знака давления<sup>4,6</sup>.

<sup>4</sup> Уткин А. В. Влияние кинетики разрушения материалов на амплитуду откольного импульса // Прикладная Механика и Техническая Физика. 2011. Т. 52, №1. С. 185–193.

<sup>5</sup> Богач А. А., Уткин А. В. Прочность воды при импульсном растяжении // Прикладная Механика и Техническая Физика. 2000. Т. 41. №4. С. 198–205.

<sup>6</sup> Сосиков В. А., Уткин А. В., Фортон В. Е. Особенности разрушения воды вблизи температуры замерзания при импульсном растяжении // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 2008. Т. 133. №5. С. 1036–1041.

**Технический глицерин** исследовался при разной начальной температуре (таблица 1). При растяжении глицерина (25 °С) на установке ЭВП и методом ВГ (при температурах 18.5 и 6.5 °С в окрестности точки плавления полученные профили скорости свободной поверхности (см. рисунок 5) не отличались от вида профилей, полученных ранее другими авторами<sup>7</sup> (18 °С) методом плоского удара, инициируемого ВГ при более высоких скоростях деформации. На рисунке 5 показано, что снижение температуры привело к заметному снижению минимума скорости  $V_{min}$  (кривые 2'', 3'' и 4''), который достигался перед откольным импульсом, и, соответственно, к увеличению откольной прочности глицерина. В отличие от воды в глицерине на профилях скорости отсутствовало превышение амплитуды откольного импульса над амплитудой импульса сжатия.

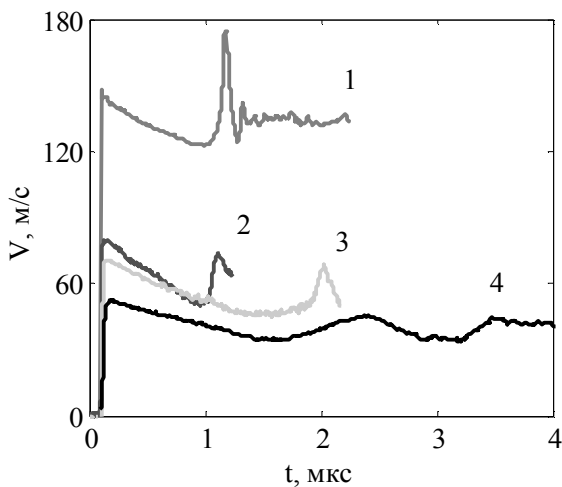


Рисунок 4 – Профили скорости свободной поверхности в дистиллированной воде, полученные на разных расстояниях  $X$  от места инициирования взрыва проводника: 1 – 8 мм, 2 – 11 мм, 3 – 18 мм, 4 – 25 мм (28 Дж)

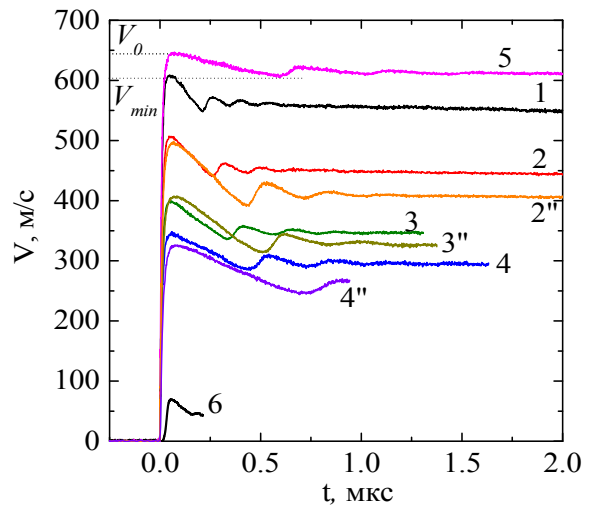


Рисунок 5 – Профили скорости свободной поверхности, полученные в глицерин методом ВГ: 1 –  $X=2$  мм; 2 и 2'' –  $X=4$  мм; 3 и 3'' –  $X=8$  мм; 4 и 4'' –  $X=12$  мм; 5 – толщина слоя жидкости  $X=20$  мм, волна сжатия в этом случае образовалась в результате нагружения движущихся ослабителя, ударника и «экрана» как единого целого. Профили (1-5) – при температуре глицерина 18.5 °С, профили (2'', 3'', 4'') – в глицерине при температуре 6.5 °С.  
6 – методом ЭВП ( $X=22$  мм, 25 °С)

Вид профилей скорости свободной поверхности, полученных в **силиконовом масле марки «ВМ-1С»** (рисунок 6) и **трансформаторном масле марки «ТМ-1»** (рисунок 7), несколько отличались от данных для глицерина и воды. Во-первых, это более крутой фронт откольного импульса. Поскольку крутизна фронта определяется кинетикой роста пор<sup>4, 7, 8</sup>, то можно утверждать, что скорость образования пор в глицерине меньше, чем в масле, но в тоже время крутизна откольного импульса масла сопоставима с соответствующей величиной в воде. Амплитуда откольного импульса

<sup>7</sup> Уткин А. В., Сосиков В. А., Богач А. А. Импульсное растяжение гексана и глицерина при ударно-волновом воздействии // Прикладная Механика и Техническая Физика. 2003. Т. 44, № 2. С. 27–33.

<sup>8</sup> Дремин А. Н., Канель Г. И., Глузман В. Д. Экспериментальное исследование профилей давления при нерегулярном отражении конусообразной ударной волны в плексигласовых цилиндрах // Физика Горения и Взрыва. 1972. №1. С. 104–109.

в масле практически совпадает (см. рисунок 6, кривая 5), а в отдельных случаях даже превышает амплитуду падающего импульса (рисунок 6, кривая 3). Аналогичное поведение амплитуды откольного импульса наблюдалось в экспериментах с водой. Все эти особенности обусловлены, в первую очередь, вязкостью исследуемых сред, что хорошо согласуется со статическими измерениями вязкости глицерина и масла (рисунок 3). Во-вторых, в маслах практически на всех профилях скорости за фронтом откольного импульса наблюдаются колебания скорости, период которых значительно меньше времени циркуляции волн в откольной пластине. Вероятно, это обусловлено разрушением непосредственно в откольной пластине, приводящему к разделению её на более тонкие откольные слои.

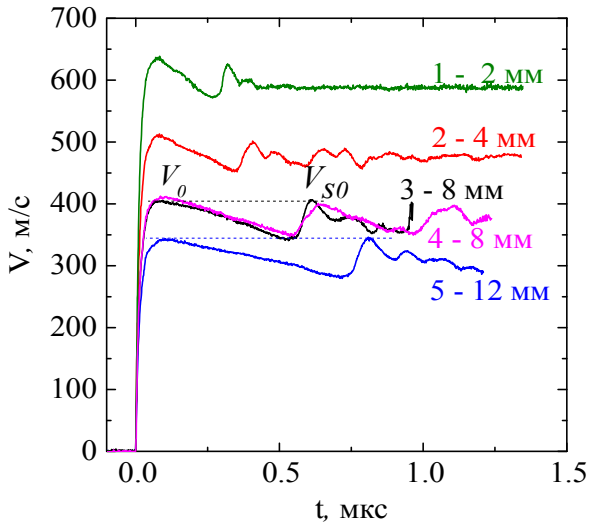


Рисунок 6 – Профили скорости свободной поверхности силиконового масла марки «ВМ-1С», где толщина слоя  $X$  менялась от 2 до 12 мм

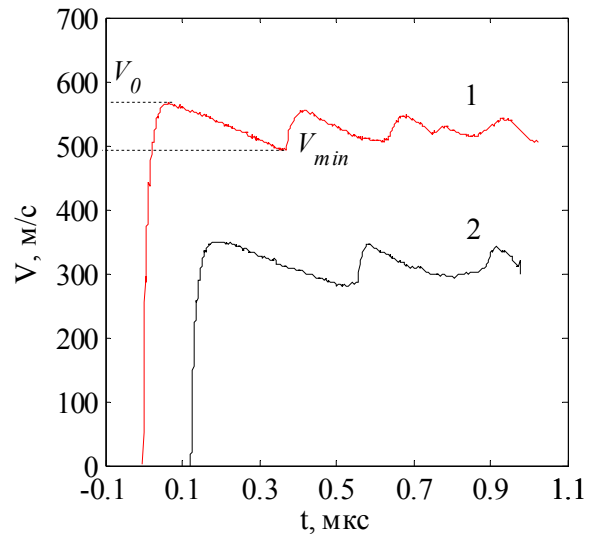


Рисунок 7 – Профили скорости свободной поверхности трансформаторного масла марки «ТМ-1»: 1 – 4 мм; 2 – 5 мм. Толщина ударников разная

Величина отрицательных давлений  $P_S$  определялась по разнице между максимальной скоростью свободной поверхности  $V_0$  и скоростью  $V_{min}$ , которая достигается в момент выхода откольного импульса на свободную поверхность<sup>5</sup>:  $P_S = 0.5\rho_0c_0(V_0 - V_{min})$ , где  $\rho_0$  и  $c_0$  – плотность и скорость звука в жидкости при нормальных условиях. Приведены диаграммы откольной прочности  $P_S$  жидкостей в зависимости от скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  в разгрузочной части импульса (рисунки 8–10). Установлено влияние скорости деформации на откольную прочность жидкостей при различной начальной температуре, и показано, что температура вблизи точки фазового перехода оказывает существенное влияние на откольную прочность воды и глицерина. Данные демонстрируют слабую зависимость откольной прочности масел от скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  и степенную зависимость для воды и глицерина. На диаграмму (рисунок 8) нанесены полученные значения откольной прочности  $P_S$  воды (20 °С,  $\dot{\epsilon} \sim 1 \times 10^4 \div 5 \times 10^4$  1/с), в сопоставлении с результатами экспериментов других авторов<sup>5</sup> при больших скоростях деформации  $2.0 \times 10^4 \div 1.4 \times 10^5$  1/с ( $\sim 20$  °С). Аппроксимация данных  $P_S(\dot{\epsilon})$ , полученная на всем интервале скоростей деформации, соответствует степенному закону с показателем  $\sim 0.3$ . Установленная нелинейная зависимость  $P_S(\dot{\epsilon})$  для воды (при температурах выше температуры плавления) проявляется сильнее при более низкой скорости деформации  $\dot{\epsilon}$ . Такое поведение мож-

но объяснить следующим образом: при высоких скоростях деформации порообразование определяется в основном процессом зародышеобразования<sup>5</sup>, что приводит к слабой зависимости откольной прочности от скорости деформации. При меньших скоростях деформации определяющей является кинетика роста пор, которая зависит от вязкости среды<sup>5, 9</sup>. Установлено, что откольная прочность  $P_s$  глицерина (рисунок 9, 1-3) в условиях УВ нагружения (метод ВГ и метод ЭВП) растет с изменением скорости деформации  $10^4 \div 10^5$  1/с, а именно, с 46 МПа до 80 МПа при температуре 18.5 °С и, соответственно, с 92 МПа до 118 МПа при температуре 6.5 °С. Аналогичная зависимость  $P_s(\dot{\epsilon})$ , установленная ранее для глицерина<sup>7</sup> при температуре 19 °С ( $1.5 \times 10^4 \div 2 \times 10^5$  1/с) и для воды<sup>6</sup> вблизи температуры замерзания (0.7 °С) в интервале  $1.8 \times 10^4 \div 4.2 \times 10^4$  1/с, объясняется в рамках теории гомогенного зародышеобразования<sup>10</sup>, позднее развитой в работах<sup>4, 11</sup>. И подобного вида закономерность  $P_s(T)$ , полученная ранее на глицерине в работе<sup>10</sup> в интервале температур от -53 до +77 °С при скорости деформации  $10^5$  1/с, также объясняется в рамках теории гомогенного зародышеобразования.

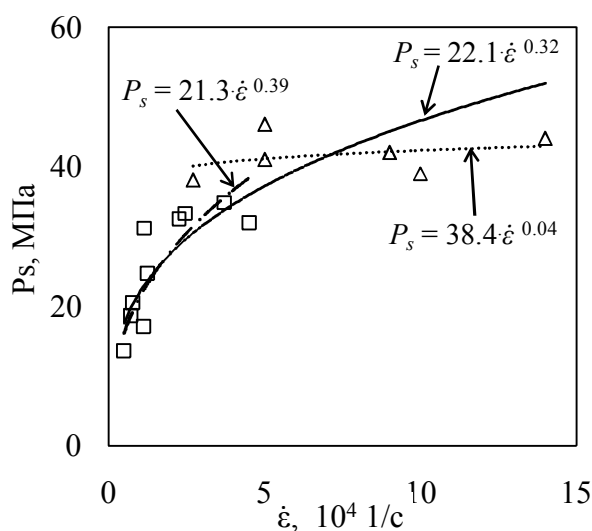


Рисунок 8 – Откольная прочность воды в условиях УВ нагружения методом ЭВП: штрих-пунктирная линия – аппроксимация данных □ (20 °С); пунктирная линия – Δ данные<sup>4</sup> (20 °С); аппроксимация всех данных – сплошная линия

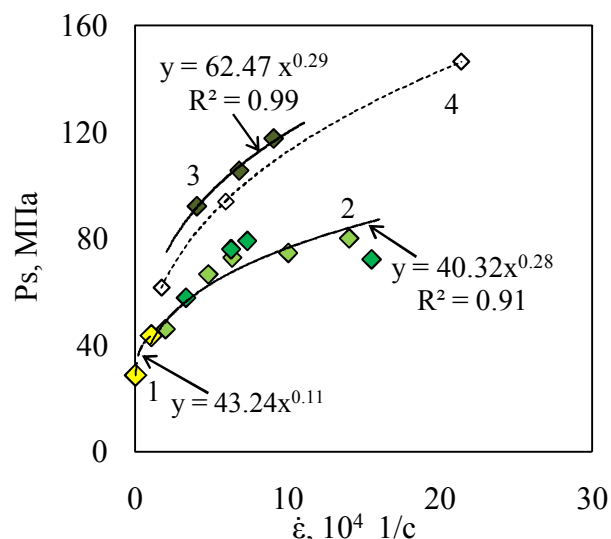


Рисунок 9 – Откольная прочность глицерина в условиях ударно-волнового нагружения: 1 – методом ЭВП (25 °С); методом ВГ: 2 – (18.5 °С), экран из ПММА и экран из Al; 3 – глицерин (6.5 °С) экран из ПММА; 4 – данные других исследователей<sup>7</sup>

В отличие от глицерина и воды откольная прочность  $P_s$  силиконового масла марки «ВМ-1С» (рисунок 10, 1) и трансформаторного масла марки «ТМ-1» (рисунок 10, 2) оставалась постоянной и не зависела от скорости деформации  $\dot{\epsilon}$ . Аналогичный результат наблюдался в экспериментах с гексаном<sup>7</sup> (19 °С, в интервале скоростей деформации  $2 \times 10^4 \div 1.5 \times 10^5$  1/с), и в экспериментах при высоких скоростях

<sup>9</sup> Каган Ю. М. О кинетике вскипания чистой жидкости // Журнал Физической Химии. 1960. Т. 34, № 1. С. 90–93.

<sup>10</sup> Carlson G. A., Levine H. S. Dynamic tensile strength of glycerol // Journal of Applied Physics. 1975. Vol. 46, № 4. С. 1594–1601.

<sup>11</sup> Игнатова О. Н., Раевский В. А., Целиков И. С. Единая динамическая модель роста и схлопывания пор в средах с прочностью // Труды международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 2015. С. 465–469.

деформации с этиловым спиртом<sup>12</sup> ( $4.5 \times 10^4 \div 4.3 \times 10^5$  1/с) и водой<sup>4</sup> при 20 °С ( $2.7 \times 10^4 \div 1.4 \times 10^5$  1/с). Подобная слабая зависимость отрицательных давлений от скорости деформации находит объяснение в рамках модели гомогенного зародышеобразования, если считать, что вязкость жидкости постоянна. Последнее предположение действительно справедливо в окрестности 20 °С (рисунок 3).

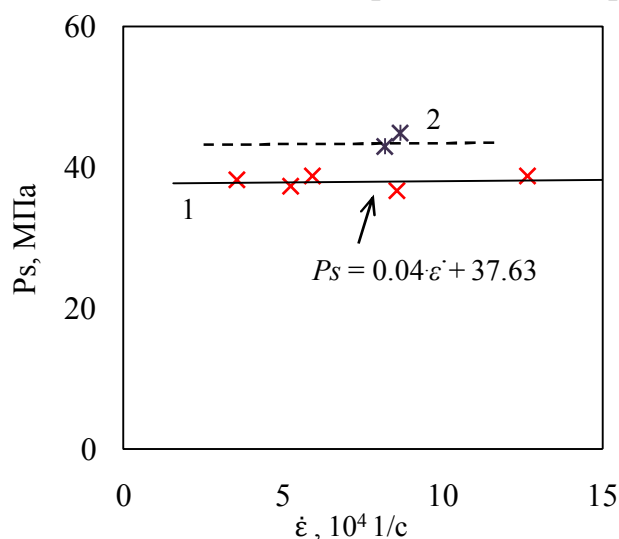


Рисунок 10 – Значение откольной прочности жидкостей в зависимости от скорости деформации: 1 – ВМ-1С, (18 °С); 2 – ТМ-1

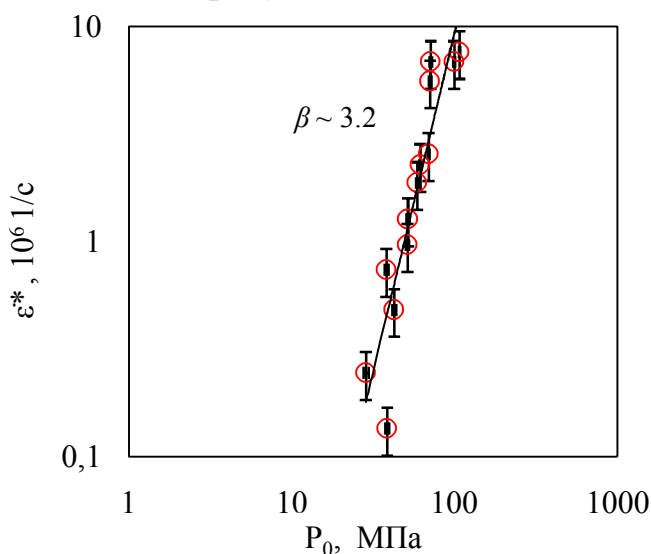


Рисунок 11 – Скорость деформации на пластическом фронте в зависимости от амплитуды импульса сжатия в дистиллированной воде

Анализ профилей скорости позволил определить значения амплитуды импульса сжатия  $P_0$  по известному соотношению  $P_0 = 0.5\rho_0 c_0 (V_0)$ , вычислить скорость деформации на фронте волны сжатия  $\dot{\varepsilon}^*$  и (параграф 3.1). В параграфах 3.1 и 3.2 обсуждается степенной характер зависимостей скорости деформации на волновых фронтах от амплитуды импульсов в жидкостях в сопоставлении с данными об автомобильных пластических волновых фронтах в твердых телах. На рисунках 11, 12 в логарифмических осях приведены зависимости скорости деформации  $\dot{\varepsilon}^*$  от амплитуды импульса сжатия  $P_0$  для воды (рисунок 4), глицерина (рисунок 5), силиконового масла (рисунок 6) и трансформаторного масла (рисунок 7). Установлено, что для воды (20 °С) зависимость  $\dot{\varepsilon}^*(P_0)$  имеет степенной вид с показателем, равным 3.2, что оказалось близким к значениям, установленным для пластических волновых фронтов металлов<sup>13</sup>. Установлено, что в глицерине при снижении температуры с 18.5 до 6.5 °С амплитуда импульса сжатия уменьшилась незначительно, но изменился показатель степени  $\beta$  в зависимости  $\dot{\varepsilon}^* \sim (P_0)^\beta$ . В трансформаторном и силиконовом масле показатель степени, соответственно, имеет значения  $\sim 1.3$  и  $\sim 0.9$ , ( $\sim 18$  °С). В таблице 2 приведены коэффициенты степенных зависимостей для исследуемых жидкостей. Степенные зависимости скорости деформации от амплитуды напряжений при формировании волновых фронтов в жидкостях позволяют высказать предположение о роли конечно-амплитудных возмущений (ассоциируемых с дефектами) в механизмах переноса импульса в исследованном диапазоне скоростей деформации.

<sup>12</sup> Уткин А. В., Сосиков В. А. Импульсное растяжение этилового спирта при ударно-волновом воздействии // Прикладная Механика и Техническая Физика. 2005. Т. 46. №4. С. 29–38.

<sup>13</sup> Swegle J. W., Grady D. E. Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times // Journal of Applied Physics. 1985. Vol. 58, № 2. P. 692–701.



Введением масштабов по времени  $t/t_{\min}^\alpha$  и  $t/t_{\min}^\beta$  ( $t_{\min}$  – время, достигаемое перед откольным импульсом,  $\alpha$  и  $\beta$  – показатели степени в зависимостях  $P_s(\dot{\epsilon})$  и  $\dot{\epsilon}^*(P_0)$ ) безразмерные скорости свободной поверхности  $V/V_0$  совмещались на различных интервалах (рисунок 13), что является признаком автомодельности формирования фронта волны сжатия и разрежения при инициировании откольного разрушения (рисунок 13).

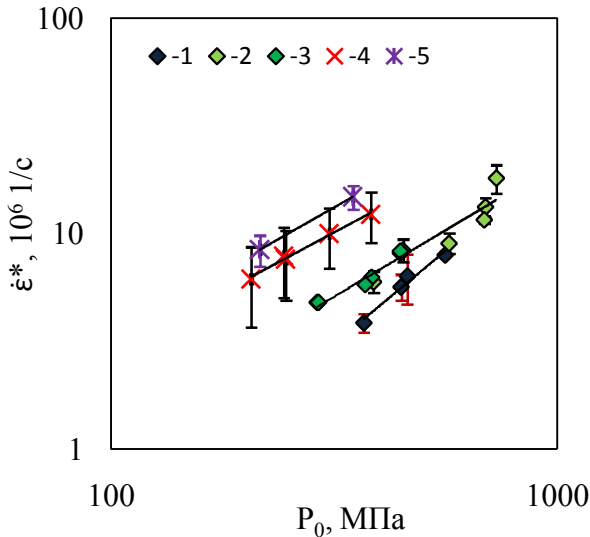
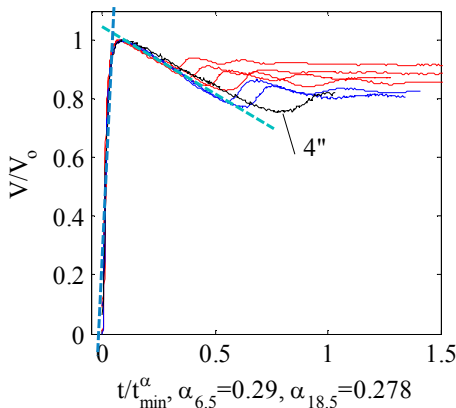


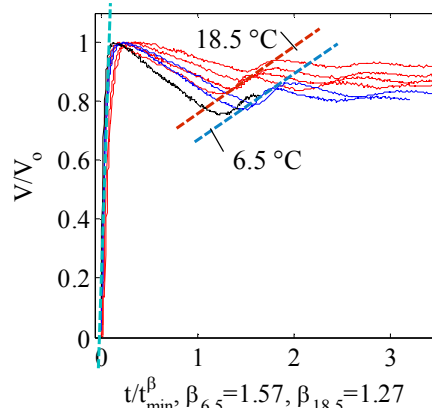
Таблица 2 – Коэффициенты степенных зависимостей

	$\beta$	$A, 1/(\text{Па}^4 \text{ с})$
Глицерин	$1.39 \pm 0.12$ (18.5 °C) $(1.7 \pm 0.2)$ (6.5 °C)	$1.49\text{E-}04$ $(4.96\text{E-}09)$
ВМ-1С	$1.11 \pm 0.17$	$0.0039$
Вода	$\sim 3.15 \pm 0.2$	$5.7\text{E-}19$
ТМ-1	$\sim 1.18 \pm 0.13$	$\sim 0.0013$

Рисунок 12 – Скорость деформации в зависимости от амплитуды импульса сжатия: 1 – глицерин технический (6.5 °C); 2, 3 – глицерин технический (18.5 °C), экран из ПММА и Al; 4 – ВМ-1С, (18 °C); 5 – ТМ-1



(а)



(б)

Рисунок 13 – Профили скорости свободной поверхности (глицерин) в нормированных координатах

Сдвиговая вязкость жидкостей в условиях УВ нагружения определялась, как отношение вязкого напряжения к скорости сдвиговой деформации (**параграф 3.3**). Обе эти величины определялись по измеренным профилям скорости и ударным адиабатам жидкостей. Выражение для вязкости принималось в виде

$$\eta^* \sim \frac{3}{4} \frac{S}{\rho_0 c_0^2} \frac{(P_0)^2}{\dot{\epsilon}^*} \text{ или, с учетом } \dot{\epsilon}^* = A(P_0)^\beta, \eta^* \sim \frac{3}{4} \frac{S}{\rho_0 c_0^2} \frac{(\dot{\epsilon}^*)^{2/\beta - 1}}{(A)^{2/\beta}}, \text{ где } S \text{ – коэффициент}$$

наклона в уравнении ударной адиабаты  $D = c_0 + Su$  для жидкостей;  $\rho_0, c_0$  – начальная плотность и скорость звука в жидкости, соответственно. Из-за отсутствия информации по ударной адиабате для силиконового масла, проведены соответствующие эксперименты, и в первом приближении получено:  $D = 1.392 + 3.56u + \dots$ . Установлено, что сдвиговая вязкость глицерина  $\eta^*$  увеличивается с ростом скорости деформации  $\dot{\epsilon}^*$ , и при снижении температуры (ниже точки предполагаемого фазо-

вого перехода) вязкость заметно растет при фиксированной скорости деформации. Характер зависимости откольной прочности  $P_s$  глицерина от сдвиговой вязкости  $\eta^*$  качественно остается неизменным, как и отмечавшаяся ранее зависимость от скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  в волне разрежения. В случае силиконового масла, сдвиговая вязкость  $\eta^*$  также увеличивалась с ростом скорости деформации  $\dot{\epsilon}^*$ . На откольную прочность  $P_s$  масла вязкость  $\eta^*$  практически не оказывала влияния. Существенно изменяются зависимости для дистиллированной воды, которая проявляет псевдопластические свойства: сдвиговая вязкость уменьшается с ростом скорости деформации. Подобное поведение сдвиговой вязкости отмечалось в работах<sup>14, 15</sup> при исследовании декана, гексадекана, тетракозана и 9-октил гептадекана, и при низких скоростях сдвиговой деформации в глицерине и в воде<sup>16</sup>. Установлено, что откольная прочность воды обнаруживает сильную зависимость от сдвиговой вязкости при низких скоростях деформации и слабо зависит от нее при увеличении таковой. Во всех рассмотренных случаях сдвиговая вязкость жидкостей при ударно-волновом воздействии заметно превышала величину, измеренную в статических условиях, что наблюдалось ранее<sup>17</sup>.

В четвертой главе приведены основные результаты экспериментального исследования разрушения керамических ( $Al_2O_3$ ) трубчатых образцов, погруженных в жидкость (дистиллированная вода), под действием ударно-волнового нагружения, которое инициировалось коаксиальным электрическим взрывом проводника. Исследование разрушения при импульсном нагружении хрупких материалов в жидкости создает уникальные возможности изучения статистических закономерностей множественного разрушения без влияния «вторичных» проявлений фрагментации. Установлено, что механизмы разрушения трубчатых образцов включают стадии зарождения и распространения трещин, что сопровождается образованием крупных (2D) и мелких (3D) фрагментов при выраженных эффектах ветвления трещин, наблюдаемых на внутренней поверхности образца. Вертикальные трещины формировались вдоль высоты образца, как результат растяжения образцов в радиальном направлении. Механизм формирования 2D фрагментов соответствует модели разрушения тонких оболочек (модель Мотта), когда на распределение фрагментов влияет преимущественно интенсивность нагружения (удельная энергия). Одновременно, 2D фрагменты содержали со стороны внутренней поверхности образца множественные микротрещины и признаки их ветвления. В результате разделения 2D фрагментов при ветвлении вертикальных трещин образовывались горизонтальные трещины и

<sup>14</sup> Cui S. T., Gupta S. A., Cummings P. T., Cochran H. D. Molecular dynamics simulations of the rheology of normal decan, hexadecane, and tetracosane // Journal of Chemical Physics. 1996. Vol. 105, № 3. P. 1214–1220.

<sup>15</sup> McCabe C., Manke C. W., Cummings P. T. Predicting the Newtonian viscosity of complex fluids from high strain rate molecular simulations // Journal of Chemical Physics. 2002. Vol. 116, № 8. P. 3339–3342.

<sup>16</sup> Стебновский С. В. Тангенциальные разрывы параметров полярной жидкости при сдвиговом деформировании // Прикладная Механика и Техническая Физика. 2005. Т. 46, №3. С. 41–49.

<sup>17</sup> Минеев В. Н., Зайдель Р. М. Вязкость воды и ртути при ударном нагружении // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 1968. Т. 54, №6. С. 1634–1639.

3D фрагменты. Анализ структуры образца показал, что начальная пористость керамики оказывает непосредственное влияние на формирование 3D фрагментов. Показано, что образец фрагментировался на объекты, которые имели двумерную геометрию (2D) с характерным размером  $d^* \geq d$  и трехмерную геометрию с характерным размером  $d^* < d$ , где  $d$  – это толщина трубки (2.05 мм). Установлены статистические распределения 2D и 3D фрагментов по размерам, соответствующие образованию и распространению (ветвлению) трещин различного типа. Измерение профилей скорости свободной поверхности в жидкости, полученные с помощью системы VISAR, позволило провести оценку скорости звука в керамике ( $\sim 10480$  м/с). Установлены закономерности статистических распределений для размеров (массы) фрагментов: экспоненциальный для 2D и степенной для 3D фрагментов (рисунок 14, 1). Точка излома в распределениях типа кривой 1 (рисунок 14) смещалась в сторону меньших масштабов с увеличением удельной энергии. Показатель степенной зависимости в распределении  $N(m)$  слабо зависел ( $0.47 \pm 0.02$ ) от удельной энергии нагружения ( $w \sim 4 \div 23$  Дж/г). Показано, что развитая начальная дефектная (пористая) структура в условиях высокоскоростного нагружения инициирует многоочаговый сценарий развития поврежденности в керамике. Полученные результаты позволяют установить аналогию с поведением жидкостей при интенсивных нагрузках, когда на разрушение и откольную прочность существенно влияет кавитационная (пористая) структура жидкостей. Рассмотрено влияние энергии нагружения на вид распределений фрагментов трубчатых образцов для различных значений  $k$  – отношение толщины трубки  $d$  к внутреннему радиусу  $r_2$ . Установлено влияние данного параметра на законы распределения фрагментов для умеренных ( $w \sim 4 \div 23$  Дж/г) и высоких ( $\sim 200$  Дж/г) значений удельной энергии нагружения (рисунок 14). Установлен переход распределения фрагментов  $N(m)$  к единому степенному распределению при увеличении энергии разрушения тонкостенных оболочек с характерным параметром  $k < 1$  при электровзрывном растяжении в жидкости (рисунок 14, кривая 2). В случае ударно-волнового нагружения толстостенных оболочек с  $k > 1$  распределение фрагментов по массе описывается одной экспоненциальной функцией (рисунок 14, кривая 3).

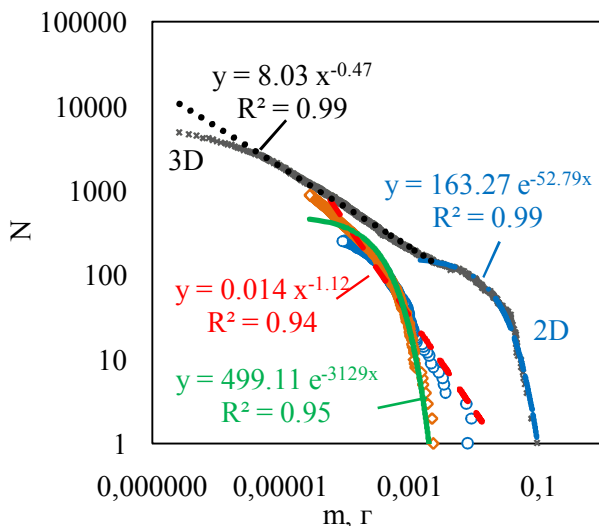


Таблица 3 – Условие эксперимента и параметры трубок

	w, Дж/г	d, мм	$r_2$ мм	$k = d/r_2$
1 – (x)	$\sim 18$	2.05	3.9	$\sim 0.5 < 1$
2 – (o)	$\sim 200$	0.5	1.0	$0.5 < 1$
3 – (o)	$\sim 180$	0.6	0.4	$1.5 > 1$

Рисунок 14 – Распределение фрагментов по массе (см. таблицу 3)

В **заключении** приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Установлены автомодельные закономерности формирования волновых фронтов в жидкостях (вода, глицерин, силиконовое и трансформаторное масла), соответствующие степенному закону зависимости скорости деформации от амплитуды импульса сжатия  $\dot{\varepsilon}^* \sim P_0^\beta$  в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\varepsilon}^* \sim 10^5 \div 10^7$  1/с.

2. Обнаружен неньютоновский (псевдопластический) механизм переноса импульса в жидкостях в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\varepsilon}^* \sim 10^5 \div 10^7$  1/с по результатам сравнительного анализа экспериментальных данных, отражающих автомодельные закономерности формирования волновых фронтов в твердых телах и жидкостях (данные оригинальных экспериментов).

3. Установлено, что откольная прочность полярных жидкостей (вода, глицерин), в отличие от неполярных (силиконовое, трансформаторное масло), обнаруживает в диапазоне  $\dot{\varepsilon} \sim 10^4 \div 10^5$  1/с степенную зависимость разрушающего напряжения от скорости деформации  $P_S \sim \dot{\varepsilon}^\alpha$ .

4. Установлено увеличение откольной прочности  $P_S$  глицерина с понижением температуры  $T$  (в окрестности точки фазового перехода) в интервале скоростей деформации  $\dot{\varepsilon} \sim 10^4 \div 10^5$  1/с.

5. Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных по автомодельным закономерностям формирования откольного разрушения в жидкостях и твердых телах, позволивший обосновать вывод о многомасштабном механизме зарождения и роста дефектов (пор), предшествующему формированию зоны откола в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\varepsilon} \sim 10^4 \div 10^5$  1/с.

6. Показано, что увеличение скорости деформации  $\dot{\varepsilon}^*$  влияет на изменение сдвиговой вязкости  $\eta^*$  жидкостей: в случае глицерина и силиконового масла вязкость  $\eta^*$  увеличивается, в случае воды наблюдается уменьшение сдвиговой вязкости  $\eta^*$ .

7. Установлены статистические закономерности фрагментации керамических материалов (на примере  $Al_2O_3$ ) в интервале скоростей деформации  $\dot{\varepsilon}^* \sim 10^5 \div 10^7$  1/с (энергия нагружающего импульса  $4 \div 22$  Дж/г), соответствующие различным видам распределения фрагментов по массе (размерам): экспоненциальное для 2D фрагментов и степенное для 3D фрагментов.

8. В соответствии с видом статистических распределений обоснованы механизмы разрушения керамик при интенсивных нагрузках: переход от комбинированного экспоненциально-степенного к степенному распределению при увеличении энергии разрушения тонкостенных оболочек.

### **Список трудов по теме диссертационного исследования:**

*Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:*

1. **Банникова И. А.** Экспериментальное исследование неньютоновских свойств воды в условиях электровзрывного нагружения / И. А. Банникова, С. В. Уваров,

Ю. В. Баяндин, О. Б. Наймарк // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40, № 17. – С. 87–93. – 0,61 / 0,47 п.л.

*в переводной версии журнала:*

**Bannikova I. A.** An experimental study of non-Newtonian properties of water under electroexplosive loading / I. A. Bannikova, S. V. Uvarov, Yu. V. Bayandin, O. B. Naimark // Technical Physics Letters. – 2014. – Vol. 40, is. 9. – P. 766–768. – DOI: 10.1134/S1063785014090041

2. **Банникова И. А.** Метастабильные состояния, релаксационные механизмы и разрушения жидкостей при интенсивных воздействиях / И. А. Банникова, А. Н. Зубарева, А. В. Уткин, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 69–77. – 1,4 / 0,88 п.л.

3. Наймарк О. Б. Многомасштабные статистические закономерности динамической фрагментации / О. Б. Наймарк, С. В. Уваров, М. М. Давыдова, **И. А. Банникова** // Физическая мезомеханика. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 94–105. – 1,39 / 1,27 п.л.

*в переводной версии журнала:*

Naimark O. B. Multiscale Statistical laws of dynamic fragmentation / O. B. Naimark, S. V. Uvarov, M. M. Davydova, **I. A. Bannikova** // Physical Mesomechanics. – 2017. – Vol. 20, is. 1. – P. 90–101. – DOI: 10.1134/S1029959917010088

4. **Банникова И. А.** Экспериментальное исследование автомодельных закономерностей разрушения керамик при ударно-волновом нагружении / И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 3. – С. 25–37. – 1,64 / 0,88 п.л.

*Scopus:*

**Bannikova I. A.** Experimental research of the self-regularities of ceramics fracture under shock wave loading / I. A. Bannikova, S. V. Uvarov, O. B. Naimark // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2015. – Is. 3. – P. 25–37. – DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.03

*в том числе статьи в зарубежных электронных научных журналах, индексируемых WebofScience и Scopus:*

5. **Bannikova I. A.** Transition from multi-center fracture to fragmentation statistics under intensive loading [Electronic resource] / I. A. Bannikova, O. B. Naimark, S. V. Uvarov // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 2. – P. 1944–1950. – URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321616302554> (access date: 28.02.2017). – 0,69 / 0,46 п.л.

6. **Bannikova I. A.** Analysis of fragmentation statistics of alumina tubular specimens [Electronic resource] / I. A. Bannikova, S. V. Uvarov, O. B. Naimark // AIP Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 1623. – P. 59–62. – URL: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4898882> (access date: 28.02.2017). – 0,46 / 0,33 п.л.

7. **Bannikova I.** The effect of initial porosity of a sample under electric explosion loading [Electronic resource] / I. Bannikova, S. Uvarov, O. Naimark // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1785. – 040003. – 4 p. – URL: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4967060> (access date: 28.02.2017). – 0,46 / 0,27 п.л.

8. Uvarov S. V. Pulse loading of glycerol by electric explosion of wire [Electronic resource] / S. V. Uvarov, **I. A. Bannikova**, O. B. Naimark // IOP Conference Series, Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 653. – 012034. – 4 p. – URL:

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/653/1/012034/pdf> (access date: 28.02.2017). – 0,46 / 0,23 п.л.

9. **Bannikova I. A.** Experimental study of mechanical properties of liquids under shock wave loading [Electronic resource] / I. A. Bannikova, S. V. Uvarov, A. N. Zubareva, A. V. Utkin, O. B. Naimark // IOP Conference Series, Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 774, is. 1. – 012051. – 7 p. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/774/1/012051> (access date: 28.02.2017). – 0,81 / 0,36 п.л.

*Свидетельство о регистрации электронной программы для ЭВМ:*

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615995. Построение профиля скорости тыльной (свободной) поверхности испытуемых образцов при динамическом и ударно-волновом нагружении по данным VISAR / **Банникова И. А.**, Баяндин Ю. В., Уваров С. В., Изюмов Р. И., правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (RU). Заявка № 2014613541, заявл. 18.04.2014, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 09.06.2014.

*Публикации в других научных изданиях:*

11. **Банникова И. А.** Автомодельность ударно-волновых фронтов конденсированных сред в диапазоне скоростей деформаций  $10^5$ – $10^7$  1/с / И. А. Банникова // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики : сборник докладов. Казань, 20–24 августа 2015 г. – Казань, 2015. – С. 322–325. – 0,46 п.л

12. **Банникова И. А.** Экспериментальное исследование многомасштабных закономерностей зарождения и развития трещин в процессе фрагментации / И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // Математическое моделирование в естественных науках : материалы XXIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов. Пермь, 07–10 октября 2015г. – Пермь, 2015. – С. 39–43. – 0,31 / 0,18 п.л.

13. **Банникова И. А.** Поведение глицерина в условиях электровзрывного нагружения / И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // XIX Зимняя школа по механике сплошных сред : сборник статей. Пермь, 24–27 февраля 2015 г. – Екатеринбург, 2015. – С. 27–31. – 0,29 / 0,22 п.л.

14. **Банникова И. А.** Исследование фрагментации трубчатых керамических образцов с использованием электровзрывной установки / И. А. Банникова, О. Б. Наймарк, С. В. Уваров // Иерархически организованные системы живой и неживой природы : материалы международной конференции. Томск, 09–13 сентября 2013 г. – Томск, 2013. – С. 206–209. – 0,23 / 0,18 п.л.

15. **Банникова И. А.** Разработка методики по исследованию релаксационных свойств жидкостей с использованием электровзрывной установки / И. А. Банникова, О. Б. Наймарк, С. В. Уваров // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны : труды международной конференции XV Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 18–22 Марта 2013 г. – Саров, 2013. – С. 745–755. – 1,16 / 0,62 п.л.

16. **Банникова И. А.** Экспериментальное исследование глицерина и воды под действием импульсного нагружения / И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны : труды междуна-

родной конференции XVII Харитоновские научные чтения. Саров, 24–27 марта 2015 г. – Саров, 2015. – С. 177–187. – 1,16 / 0,61 п.л.

17. **Bannikova I.** Self-similar behavior of water under electroexplosive loading / I. Bannikova, S. Uvarov, O. Naimark // Failure of Heterogeneous Materials under Intensive Loading: Experiment and Multi-scale Modeling : Proceedings of the International Workshop. Perm, Russia, February 10–14, 2014. – Perm, Russia, 2014. – P. 7–8. – 0,12 / 0,1 п.л.

18. **Банникова И. А.** Экспериментальное исследование зависимости скорости деформации на фронте волны сжатия в воде от ее амплитуды / И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // XXI Петербургские чтения по проблемам прочности к 100-летию со дня рождения Л. М Качанова и Ю. Н. Работнова : сборник материалов. Санкт-Петербург, 15–17 апреля 2014 г. – СПб., 2014. – С. 106–109. – 0,23 / 0,12 п.л.

19. **Bannikova I.** Study of ceramic tube fragmentation under shock wave loading [Electronic resource] / I. Bannikova, S. Uvarov, M. Davydova, O. Naimark // Fracture at all scales : procedia materials science 20th European Conference on Fracture (ECF 20). Trondheim, Norway, 30 June – 04 July 2014. – Trondheim, Norway, 2014. – Vol. 3. – P. 592–597. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.098> (access date: 28.02.2017). – DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.098. – 0,69 / 0,32 п.л.

20. **Банникова И. А.** Экспериментальное исследование релаксационных свойств конденсированных сред с использованием электровзрывной установки / И.А. Банникова, О. Б. Наймарк, С. В. Уваров // XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред: тезисы докладов. Пермь, 18–22 февраля 2013 г. – Пермь– Екатеринбург, 2013. – С. 39. – 0,06 / 0,05 п.л.

21. **Банникова И. А.** Поведение глицерина в условиях электровзрывного нагружения / И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // XIX Зимняя школа по механике сплошных сред : тезисы докладов. Пермь, 24–27 февраля 2015 г. – Екатеринбург, 2015. – С. 32. – 0,06 / 0,05 п.л.

22. **Банникова И. А.** Влияние скорости деформирования на сдвиговую вязкость жидкостей в условиях импульсного воздействия / И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк, А. Н. Зубарева, А. В. Уткин // XX Зимняя школа по механике сплошных сред : тезисы докладов. Пермь, 13–16 февраля 2017 г. – Екатеринбург, 2017. – С. 36. – 0,06 / 0,05 п.л.

23. **Банникова И. А.** Разработка методики по исследованию релаксационных свойств жидкостей с использованием электровзрывной установки / И. А. Банникова, О. Б. Наймарк, С. В. Уваров // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: сборник тезисов докладов международной конференции XV Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 18–22 марта 2013 г. – Саров, 2013. – С. 348–349. – 0,18 / 0,13 п.л.

24. **Банникова И. А.** Экспериментальное исследование глицерина и воды под действием импульсного нагружения / И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны : сборник тезисов докладов международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 24–27 марта 2015 г. – Саров, 2015. – С. 138–139. – 0,18 / 0,13 п.л.

25. **Банникова И. А.** Экспериментальное исследование механических свойств дистиллированной воды при электровзрывном нагружении / И. А. Банникова, О. Б. Наймарк, С. В. Уваров // Взрыв в физическом эксперименте : тезисы докладов

всероссийской конференции. Новосибирск, 16–20 сентября 2013 г. – Новосибирск, 2013. – С. 118–119. – 0,23 / 0,11 п.л.

26. **Банникова И. А.** Исследование фрагментации трубчатых керамических образцов с использованием электровзрывной установки / И. А. Банникова, О. Б. Наймарк, С. В. Уваров // Иерархически организованные системы живой и неживой природы : тезисы докладов международной конференции. Томск, 09–13 сентября 2013 г. – Томск, 2013. – С. 211–212. – 0,11 / 0,09 п.л.

27. **Банникова И. А.** Анализ статистических закономерностей распределений фрагментов трубчатых образцов из оксида алюминия / И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // Физическая мезомеханика многоуровневых систем. Моделирование, эксперимент, приложения : сборник тезисов докладов международной конференции. Томск, 03–05 сентября 2014 г. – Томск, 2014. – С. 365–366. – 0,23 / 0,07 п.л.

28. **Банникова И. А.** Многомасштабные закономерности динамического разрушения керамик / И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций: сборник докладов международной конференции. Томск, 21–25 сентября 2015 г. – Томск, 2015. – С. 247–248. – 0,11 / 0,08 п.л.

29. **Bannikova I.** Study of ceramic tube fragmentation under shock wave loading [Electronic resource] / I. Bannikova, S. Uvarov, M. Davydova, O. Naimark // Fracture at all scales : abstract collection online 20th European Conference on Fracture. Trondheim, Norway, 30 June – 04 July, 2014. – Trondheim, Norway, 2014. – 1 p. – URL: [http://ntnuv.no/wp-content/uploads/conference\\_abstracts/5/118Abstract00191.pdf](http://ntnuv.no/wp-content/uploads/conference_abstracts/5/118Abstract00191.pdf) (access date: 28.02.2017). – 0,11 / 0,03 п.л.

30. **Bannikova I.** Self-similarity of the wave profiles in water under dynamic loading / I. Bannikova, S. Uvarov, O. Naimark // Equations of state for matter : book of abstracts XXIX international conference. Elbrus, Russia, March 01–06, 2014. – Moscow–Chernogolovka–Nalchik, 2014. – P. 62–63. – 0,11 / 0,03 п.л.

31. Uvarov S. V. Pulse loading of glycerol by electric explosion of wire / S. V. Uvarov, O. B. Naimark, **I. A. Bannikova** // Interaction of intense energy fluxes with matter: book of abstracts XXX International conference. Elbrus, Russia, March 01–06, 2015. – Elbrus, Russia, 2015. – P. 79–80. – 0,06 / 0,05 п.л.

32. **Bannikova I. A.** Experimental study of mechanical properties of liquids under shock wave loading / I. A. Bannikova, S. V. Uvarov, A. N. Zubareva, A. V. Utkin, O. B. Naimark // Equations of State for Matter : book of abstracts XXXI International Conference. Elbrus, Russia, March 01–06, 2016. – Elbrus, Russia, 2016. – P. 128. – 0,06 / 0,05 п.л.

33. **Банникова И. А.** Статистические закономерности фрагментации керамических трубчатых образцов / И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // Забобахинские научные чтения: сборник материалов XII международной конференции. Снежинск, 02–06 июня 2014 г. – Снежинск, 2014. – С. 183–184. – 0,23 / 0,11 п.л.

34. Наймарк О. Б. Турбулентность, индуцированная дефектами, в конденсированных средах при интенсивных воздействиях / О. Б. Наймарк, С. В. Уваров, **И. А. Банникова**, И. А. Пантелеев // Забобахинские научные чтения : сборник тезисов докладов XII международной конференции. Снежинск, 02–06 июня 2014 г. – Снежинск, 2014. – С. 38–39. – 0,23 / 0,08 п.л.



35. **Банникова И. А.** Экспериментальное исследование жидкостей в условиях ударно-волнового сжатия и растяжения / И. А. Банникова, А. Н. Зубарева, С. В. Уваров, А. В. Уткин, О. Б. Наймарк // Забабахинские научные чтения: сборник материалов XIII международной конференции. Снежинск, 20–24 марта 2017 г. – Снежинск, 2017. – С. 162–163. – 0,21 / 0,11 п.л.

36. **Банникова И. А.** Автомодельность ударно-волновых фронтов конденсированных сред в диапазоне скоростей деформаций  $10^5$ - $10^7$  1/с / И. А. Банникова // IX Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: аннотации докладов. Казань, 20–24 августа 2015 г. – Казань, 2015. – С. 30. – 0,09 п.л.

37. **Банникова И. А.** Влияние пористости керамики на статистику фрагментации в условиях электровзрывного нагружения / И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций : сборник материалов X международной конференции. Екатеринбург, 16–20 мая 2016 г. – Екатеринбург, 2016. – С. 310–311. – 0,11 / 0,10 п.л.

38. **Банникова И. А.** Взаимосвязь реологических параметров и откольной прочности жидкостей / И. А. Банникова, А. Н. Зубарева, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк, А. В. Уткин // Успехи химической физики: сборник тезисов докладов III всероссийской молодежной конференции. Черногоровка, 03–07 июля 2016 г. – М., 2016. – С. 24. – 0,11 / 0,07 п.л.

Подписано в печать 06.07.2017 г.  
Формат А4/2. Ризография  
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 15-07/17  
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»  
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а