

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Банниковой Ирины Анатольевны  
«Автомодельные закономерности деформирования и разрушения сплошных сред  
при интенсивных воздействиях», представленную на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

### **Актуальность темы исследования**

Условия ударно-волнового воздействия с характерными временами, близкими к временам структурной релаксации, дают уникальную возможность экспериментального исследования кинетических закономерностей процессов разрушения и деформирования. Так, в работах Андрея Дмитриевича Сахарова с сотрудниками при изучении релаксационных явлений на фронте ударных волн в постановке эксперимента по ударно-волновому нагружению среды, а позже в работах Бориса Владимировича Дерягина при оценке сдвигового модуля упругости установлена универсальная асимптотика вязкости конденсированных сред. Позднее с использованием доплеровской интерференционной системы VISAR L.M. Barker, J.W. Swegle-D.E. Grady установлена автомодельность пластических волновых фронтов в металлах и неметаллах, которые выражаются в степенных зависимостях скорости деформации от амплитуды импульса сжатия, которые типичны для механизмов переноса импульса пластичностью среды. Современные представления о механизмах деформирования и разрушения, экспериментальные возможности использования техники ударных волн и систем регистрации высокого временного разрешения могут являться основой для разработки универсальных методов исследования реологических свойств и разрушения конденсированных сред, обусловленных многомасштабными структурными эффектами. Целью данной работы стало 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. Полученные автомодельные закономерности позволят в дальнейшем построить широкодиапазонные

определяющие соотношения и описать механизмы разрушения конденсированной среды в условиях ударно-волновой нагрузки, что, несомненно, является актуальной задачей механики деформируемого твердого тела.

### **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.

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

**Первая глава** носит обзорный характер, в ней представлено описание поведения конденсированной среды в условиях ударно-волнового нагружения, обсуждение закономерностей зарождения и роста пор при отражении импульса сжатия от границы раздела двух сред, влияние кавитации на процесс разрушения конструкций. Проведен широкий 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 Их присутствие связывается в соответствии с идеей Я. И. Френкеля с согласованным перемещением и переориентацией групп молекул, что сопряжено с существенно большими характерными временами релаксации. Приведен обзор экспериментальных и методических аспектов инициирования импульсного нагружения в микро и наносекундном временных диапазонах методом электровзрыва проводников (ЭВП).

**Во второй главе** приводятся методики, выбранные диссертантом для определения релаксационных свойств и разрушения конденсированных сред при ударно-волновом нагружения. Подробно описана методика работы на установке электровзрыва проводника, процедура получения и обработки экспериментальных профилей скорости свободной поверхности жидкости, приведены внешний вид и принципиальная схема экспериментальной установки. Приведены режимы электровзрывного нагружения, оценка давления и энергии ударно-волнового импульса, инициированного взрывом медного проводника. Для измерения скорости свободной поверхности жидкости на различных расстояниях от

взрываемого проводника диссертантом разработан измерительный датчик, совмещенный с оптоволоконной системой измерения. Также автор работы предлагает оригинальный метод определения массы фрагментов («метод фотографии»), основанный на численной обработке изображений фрагментов, который позволил значительно сократить время и повысить качество статистического анализа фрагментации с учетом «фактора формы» для определения массы фрагментов в случае трубчатых образцов. При сопоставлении данного метода с классическим методом «взвешивания» было обнаружено, что разница в оценках массы фрагментов не превышала 5 %.

**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). Приведены две схемы постановки экспериментов. Получены значения откольной прочности жидкостей в зависимости от скорости деформации на фронте волны разрежения. Вычислена амплитуда импульса сжатия. Проведена оценка скорости деформации на фронте волны разрежения. Обсуждается степенной характер зависимостей скорости деформации на волновых фронтах от амплитуды импульсов в жидкостях в сопоставлении с данными об автомодельных пластических волновых фронтах в твердых телах. Установлено влияние скорости деформации на откольную прочность жидкостей (глицерин) при различной начальной температуре. Полученные зависимости  $\varepsilon^*(P_0)$ ,  $P_S(\varepsilon)$  и  $P_S(T)$  объяснены в рамках теории гомогенного зародышеобразования и связаны с реологическими параметрами жидкостей (вязкостью и поверхностным натяжением).

**Четвертая глава** включает в себя 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 позволяет рассматривать статистические закономерности множественного разрушения без влияния «вторичных» проявлений фрагментации. Показано, что образцы разрушаются на два характерных вида фрагментов: крупных (2D) и мелких 3D фрагментов. Установлены статистические распределения 2D и 3D фрагментов по размерам, соответствующие образованию и распространению (ветвлению) трещин различного типа.

Установлены закономерности статистических распределений для размеров (массы) фрагментов. Показано, что развитая начальная дефектная (пористая) структура в условиях высокоскоростного нагружения инициирует многоочаговый сценарий развития поврежденности в керамике. Автором проведена аналогия 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 к внутреннему радиусу.

**В заключении** диссертационной работы сформулированы основные выводы по проведенному исследованию и отмечены теоретическая и практическая значимость работы.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации** 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.

**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.

И.А. Банниковой получены следующие результаты:

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 неьютоновском (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  $\dot{\varepsilon} \sim 10^4 \div 10^5$  1/с.

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

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

**Значимость результатов диссертационного исследования** для фундаментальной науки заключается в том, что они послужат 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.

Содержание **автореферата** полностью отражает содержание диссертации, а сам автореферат отвечает всем предъявляемым требованиям.

Основные результаты диссертационного исследования апробированы на всероссийских и международных конференциях. Основные материалы диссертационной работы опубликованы в 38 работах, 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).

#### **Замечания к диссертационной работе**

1. При описании методики исследования статистических закономерностей разрушения трубчатых образцов (параграф 2.3) не указан материал образца, его механические свойства, приведена только плотность  $2600 \text{ кг/м}^3$  и не проведен сравнительный анализ массы исходного образца и суммарной массы осколков.

2. Было бы полезно исследовать фрагментацию не только керамик (глава 4), но и более пластичных материалов (сталь, медь и т.п).

3. Нечетко определены границы корректного применения предложенных методик – интенсивность нагрузок, свойства материалов.

**Заключение:**

Диссертационная работа И.А. Банниковой «Автомодельные закономерности деформирования и разрушения сплошных сред при интенсивных воздействиях» является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком квалификационном уровне, и отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Ирина Анатольевна Банникова, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент:

директор Института кадастра, экономики и инженерных систем в строительстве федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», доктор физико-математических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), профессор

Радченко Андрей Васильевич

25 августа 2017 г.

Подпись Радченко Андрея Васильевича удостоверено  
Проректор по научной работе ТГАСУ



В.А. Клименов

*Сведения об организации:* Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет»; 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; (3822) 47-28-91; rector@tsuab.ru; сайт организации: <http://www.tsuab.ru>