

На правах рукописи



Ефремов Денис Викторович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕНОСА ИМПУЛЬСА В СТРУКТУРИРОВАННЫХ
СПЛОШНЫХ СРЕДАХ**

1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2025

Работа выполнена в Институте механики сплошных сред УрО РАН – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук.

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

Официальные оппоненты: **Волков Александр Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теории упругости, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Константинов Александр Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории динамических испытаний материалов НИИ механики ННГУ имени Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

Ведущая организация: **Институт Проблем машиноведения РАН (ИП-Маш РАН)**, г. Санкт-Петербург

Защита состоится « **8** » октября 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук" (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « » сентября 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент



/ А.Л. Зув

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. В работе экспериментально исследуются закономерности механизмов деформации и переноса импульса в структурированных сплошных средах, обусловленные коллективными свойствами ансамблей дефектов сдвига.

На роль дефектов и возможность «псевдопластических» механизмов в сплошных средах впервые было обращено внимание в работах Я.И. Френкеля, в которых отмечалась общность механизмов переноса импульса конденсированных средах¹. Экспериментально установленная в работах А.Д. Сахарова с сотрудниками² универсальная асимптотика вязкости конденсированных сред при скоростях деформации $\sim 10^5 \text{ с}^{-1}$ связывалась с возможностью «дислокационных механизмов» переноса импульса. Исследованиями Б.В. Дерягина с сотрудниками³ было показано, что данные механизмы реализуются в эксперименте при инициировании сдвиговых деформаций в жидкостях резонансным методом, при проявлениях сдвиговой упругости при частотах воздействия $10^5 \div 10^6$ Гц. В развитие указанных работ в лаборатории Физических основ прочности ИМСС УрО РАН проведены экспериментальные исследования по ударно-волновому нагружению сплошных сред методом электрического взрыва проводника⁴, и установлен псевдопластический механизм переноса импульса в диапазоне скоростей деформации $\sim 10^5 \div 10^7 \text{ с}^{-1}$.

Я.И. Френкелем было введено время $\tau_F \sim 10^{-5}$, характеризующее акты коллективного движения групп молекул (сдвиговые моды) при частотах ω_F :

$$\omega > \omega_F = 1/\tau_F,$$

Для реализации такого механизма, в отличие от традиционного диффузионного, определяемого kT , необходимы флуктуации, порождаемые акустическими модами при наличии сдвиговой упругости, что впервые экспериментально установлено в работах Б.В. Дерягина³.

В работах С.В. Стебновского⁵ установлено, что полярные среды (вода, глицерин, ацетон, этиловый спирт) в определённом диапазоне температур и при слабых сдвиговых воздействиях имеют упорядоченную структуру и проявляют неньютоновские свойства. С увеличением скорости сдвига упорядоченная структура нарушается и среды демонстрируют традиционное ньютоновское поведение. Аналогичное явление наблюдается в структурированных растворах полимеров, проявляющих псевдопластические (неньютоновские) свойства, когда с ростом скорости деформации упорядоченная структура разрушается, что проявляется в виде уменьшения вязкости жидкости с ростом скорости деформации.

¹Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости. Л., 1975. 592 с.

²Сахаров А.Д., Зайдель Р.М., Минеев В.Н., Олейник А.Г. Экспериментальное исследование устойчивости ударных волн и механических свойств вещества при высоких давлениях и температурах // Докл. АН СССР. – 1964. – Том 159, № 5. – С. 1019–1022

³Derjagin B.V., Churaev N.V. Nature of "Anomalous Water" // Nature. – 1973. – Vol. 244. – P. 430–431

⁴Банникова И.А., Зубарева А.Н., Уткин А.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Метастабильные состояния, релаксационные механизмы и разрушение жидкостей при интенсивных воздействиях // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 69–77.

⁵Стебновский С.В. Тангенциальные разрывы параметров полярной жидкости при сдвиговом деформировании // Прикладная механика и техническая физика. – 2005. – Т. 46, № 3. – С. 41–48

Качественные изменения механизма переноса импульса в интенсивных сдвиговых потоках и диссипативных свойств сред наблюдаются в экспериментах по регистрации явления гидролюминесценции в диапазоне скоростей деформации $\sim 10^5 \div 10^6 \text{ с}^{-1}$ ⁶. Резкий рост интенсивности гидролюминесценции свидетельствует о качественном изменении механизмов переноса импульса и может быть ассоциирован с коллективными сдвигами в ансамблях молекул, эффектами сдвиговой упругости и формированием мезоскопических носителей, определяющих псевдопластические закономерности течения.

Цель и задачи исследования: Целью диссертационной работы является экспериментальное обоснование механизмов переноса импульса в структурированных сплошных средах, обусловленных коллективными свойствами локализованных сдвигов. Экспериментально исследуются твёрдые тела (алюминий-магнийевый сплав АМгб) и структурированные среды (глицерин; среды, применяемые в технологии гидроразрыва пласта на основе гуара и сурфогеля, гидравлическое масло) в широком диапазоне скоростей деформации для изучения связи механизмов деформации с коллективными явлениями в ансамблях локализованных сдвигов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие основные задачи:

1. Экспериментальное исследование закономерностей множественной локализации сдвиговой пластической деформации в условиях проявления эффекта Портевена–Ле Шателье при сжатии «наклонных» образцов из сплава АМгб, с последующей статистической обработкой флуктуаций напряжения течения;

2. Экспериментальное исследование образцов из сплава АМгб при различной степени деформации методом дифференциальной сканирующей калориметрии с целью изучения баланса запасенной энергии, связанной с накоплением дефектов сдвига и диссипативными процессами, ассоциируемых с пластическим течением;

3. Разработка, создание экспериментальной установки и методики исследования локализации сдвиговой деформации в полярных сплошных средах для изучения механизмов деформации, обусловленных пластическими сдвигами;

4. Реологические исследования псевдопластических свойств структурированных растворов полимеров в широком диапазоне скоростей сдвига и давлений;

5. Разработка и создание экспериментальной установки, методики для исследования закономерностей гидролюминесценции в диапазоне скоростей деформации $\sim 10^5 \div 10^6 \text{ с}^{-1}$.

Научная новизна исследования заключается в том, что:

1. Исследования кинетических и термодинамических закономерностей развитого пластического течения в условиях проявления эффекта Портевена–Ле Шателье позволили обосновать существование двух критических точек, характеризующих качественно-различную динамику пространственно-временной

⁶Герценштейн С.Я., Монахов А.А. Электризация и свечение жидкости в коаксиальном канале с диэлектрическими стенками // Механика жидкости и газа. – 2009. – № 3. – С. 114–119

локализации пластического течения, обусловленные коллективными свойствами дефектов сдвига;

2. Установлена статистическая автомодельность пространственно-временной динамики флуктуаций напряжений пластического течения в сплаве АМгб, позволившая обосновать предположение об универсальности механизма переноса импульса в структурированных сплошных средах по механизму псевдопластического сдвига.

3. Установлена универсальная степенная зависимость вязкости в структурированных сплошных средах в широком диапазоне интенсивностей нагружения с величиной показателя, характерного для псевдопластического течения, обусловленного множественными дефектами сдвига.

4. Установлено существование порогового значения скорости деформации $10^5 \div 10^6 \text{ с}^{-1}$, соответствующего возникновению эффектов гидро- и сонолюминесценции. По данным статистических распределений сигналов, полученных с фотумножителя, обосновано предположение, что явление гидролюминесценции вызвано формированием множественных локализованных сдвигов в структурированных сплошных средах.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что:

1. Разработана новая экспериментальная методика, позволившая выявить качественно новые закономерности локализации пластической деформации и подтвердить существование двух критических точек в условиях проявления эффекта Портевена-Ле Шателье;

2. Предложено объяснение механизма пластической деформации в присутствии двух критических точек с использованием калориметрических измерений, подтвердивших стадийность развития деформации локализованным сдвигом и переход к формированию очагов разрушения;

3. Доказана необходимость учета множественных локализованных сдвигов в структурированных сплошных средах и их роли в механизмах переноса импульса в соответствующих диапазонах скоростей деформирования;

4. Введены на основе оригинальных экспериментальных данных новые трактовки явления гидролюминесценции при интенсивных течениях структурированных сред в условиях инициирования множественных локализованных сдвигов.

5. Обоснованы методические рекомендации для разработки программно-аппаратных комплексов для оценки условий инициирования кавитационных режимов по данным гидро- и сонолюминесценции.

Методы исследования:

1. Деформирование сжатием наклонных цилиндрических образцов из сплава АМгб с регистрацией флуктуаций напряжения пластического течения реализовано на сервогидравлической испытательной машине Shimadzu AG-300 с использованием средств регистрации высокого временного разрешения;

2. Исследование доли запасённой энергии проведено методом дифференциальной сканирующей калориметрии с помощью прибора Netzsch STA "Jupiter" 449;

3. Исследование локализации сдвиговой деформации и измерение вязкости в структурированных сплошных средах проведено на оригинальной экспериментальной установке по типу реометра «коаксиальные цилиндры»; на реометрах промышленного изготовления RheolabQS производства компании Anton Paar, оснащённого измерительной системой «коаксиальные цилиндры», реометра Physica MCR501, оснащённого измерительной системой «конус-плоскость»;

4. Исследование явлений гидро- и сонолюминесценции проведено на оригинальной установке с применением высокоскоростной видеокамеры PHOTRON FASTCAM SA-Z MODEL 2100 K, фотоумножителя Hamamatsu H6779, осциллографа Tektronix DPO 7254.

5. Обработка результатов измерений проведена с использованием оригинальных программных комплексов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Обоснование существования двух критических точек при множественной локализации пластической деформации в условиях проявления эффекта Портевена–Ле Шателье, определяющих различную коллективную динамику пластических сдвигов и переход к локализации разрушения;

2. Статистическая автомодельность пространственно-временной динамики флуктуаций напряжений пластического течения в сплаве АМгб, позволившая обосновать предположение об универсальности механизма переноса импульса в структурированных сплошных средах по механизму псевдопластического сдвига.

3. Обоснование степенной зависимости вязкости от скорости деформации с учётом давления для структурированных сплошных сред, отражающей автомодельные закономерности коллективного поведения локализованных сдвигов.

4. Существование порогового значения скорости деформации $10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$ возникновения явлений гидро- и сонолюминесценции, соответствующего смене механизма переноса импульса от диффузионного к псевдопластическому сдвигу;

5. Соответствие степенного закона распределения сигналов гидролюминесценции при достижении скорости деформации $10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$ коррелированному поведению локализованных сдвигов при смене механизма переноса импульса от диффузионного к псевдопластическому сдвигу.

Достоверность полученных результатов достигается применением современной измерительной аппаратуры, апробированных экспериментальных методик, высокой степенью воспроизводимости экспериментальных данных. Полученные результаты согласуются с литературными данными, теоретическими и экспериментальными результатами других исследователей.

Личный вклад автора: автором были подготовлены и проведены эксперименты по деформированию сжатием наклонных образцов из сплава АМгб с использованием испытательной машины; проведена статистическая обработка результатов измерений флуктуаций напряжения пластического течения; проведено исследование доли запасённой энергии методом дифференциальной

сканирующей калориметрии. Автором разработана и изготовлена экспериментальная установка для регистрации локализации сдвиговой деформации в жидкостях и измерения вязкости жидкостей, в том числе, с добавлением твёрдых наполнителей; проведено измерение реологических свойств структурированных сред с помощью реометров промышленного изготовления. Совместно к.ф.-м.н. Баяндиным Ю.В. разработана физическая модель вязкости. Совместно с к.ф.-м.н. Уваровым С.В. разработана и изготовлена экспериментальная установка по исследованию явлений гидро- и сонолюминесценции, разработана методика исследования кавитации посредством регистрации явления сонолюминесценции. Автором проведены статистическая обработка сигналов гидро- и сонолюминесценции, анализ полученных данных, подготовлен и опубликован ряд статей по теме диссертационной работы.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на российских и международных конференциях, в том числе: Всероссийская конференция «Зимняя школа по механике сплошных сред» (Пермь, 2017, 2019, 2021, 2023, 2025); Международный симпозиум «Неравновесные процессы в сплошных средах» (Пермь, 2017, 2021, 2024); Петербургские чтения по проблемам прочности (Санкт-Петербург, 2018); Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, 2019); Международная конференция «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения» (Томск, 2020); Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (Беларусь, Витебск, 2022); Международная конференция «Физическая мезомеханика материалов» (Томск, 2022, 2023); Международная конференция «Техническая акустика» (Беларусь, Витебск, 2023); Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург, 2023); Международная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2023, 2024); Fortov International Conference (п. Терскол, 2024, 2025); XI теплофизический семинар (Екатеринбург, 2024); Всероссийский симпозиум по горению и взрыву (Суздаль, 2024); Механика деформируемого твердого тела в проектировании материалов и конструкций (Пермь, 2024).

Ключевые результаты получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ темы АААА-А19-119013090021-5); проектов РФФИ (№ 19-48-590016, 17-01-00867_a, 19-48-590016_p_a) и РФФИ (№ 21-79-30041); при финансовой поддержке Правительства и Пермского края в рамках научного проекта С-26/562 от 23 марта 2021 г.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 39 работ, из них 12 статей в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук (из них 4 статьи в российских научных журналах индексируемых в базе данных Scopus, 2 статьи в российских научных журналах индексируемых в базе данных Web of Science, 2 статьи в российских журналах, переводная версия которых индексируется в базе данных Web of Science, Scopus), 5 статей в сборниках материалов

конференций, индексируемых в базе данных Scopus, 1 патент, 26 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских конференций.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, содержащего 126 источников. Работа представлена на 127 страницах, содержит 66 рисунков и 6 таблиц.

Автор выражает **благодарность** научному руководителю д.ф.-м.н., профессору О.Б. Наймарку, сотрудникам лаборатории Физических основ прочности ИМСС УрО РАН, сотрудникам кафедры Нанотехнологий и микросистемной техники ПГНИУ, сотруднику кафедры Физики фазовых переходов ПГНИУ В.Г. Гилёву, за помощь и поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** представлен обзор литературных данных, посвящённых теме исследования. Обоснованы предположения, что в конденсированных средах могут проявляться механизмы переноса импульса локализованными сдвигами, свойственные твёрдым телам, при временах на 6-7 порядков больше времени самодиффузии. Приведены литературные данные экспериментальных исследований по определению релаксационных свойств и разрушения конденсированных сред при ударно-волновом нагружении методом электрического взрыва проводника и методом взрывного генератора, где было установлено существование псевдопластического механизма переноса импульса в конденсированных средах при скоростях деформации $\sim 10^5 \div 10^7 \text{ с}^{-1}$. Приведён обзор работ по экспериментальному изучению неустойчивости пластического течения при деформировании металлов, в которых исследуются закономерности «критичности» при множественной локализации пластической деформации. Представлен обзор работ по регистрации явления гидролюминесценции, позволивший связать резкий рост интенсивности люминесценции с качественными изменениями механизма переноса импульса в структурированных сплошных средах.

В **параграфе 1.1** представлен обзор работ, посвящённых исследованию поведения структурированных сплошных сред, закономерностям изменения вязкости условиях высокоскоростного нагружения. Отмечается существование универсальной асимптотики вязкости $\sim 2 \cdot 10^4$ пуаз, впервые установленной в работах А.Д. Сахарова с сотрудниками, для различных материалов (свинец, медь, алюминий, оргстекло, сталь, вода) при скоростях деформации $\sim 10^5 \text{ с}^{-1}$. Показано соответствие условий для проявления универсальной асимптотики вязкости режимам сдвигового деформирования жидкостей резонансным методом (данные Б.В. Дерягина с сотрудниками), установившими проявления сдвиговой упругости при частотах $10^5 \div 10^6$ Гц. Данные экспериментальные результаты обобщаются на основе идеи Я.И. Френкеля о возможности реализации в конденсированных средах псевдопластических механизмов переноса импульса, традиционно свойственных твёрдым телам. В развитие экспериментов А.Д. Сахарова приведены литературные данные экспериментов И.А. Банниковой с коллегами по ударно-

волновому нагружению жидкостей методом электрического взрыва проводника, где был установлен псевдопластический механизм переноса импульса в диапазоне скоростей деформации $\sim 10^5 \div 10^7 \text{ с}^{-1}$. Проведено сопоставление с работами С.В. Стебновского, в которых показано, что полярные конденсированные среды (вода, глицерин, ацетон, этиловый спирт) в определённом диапазоне температур и при слабых сдвиговых воздействиях имеют упорядоченную структуру и проявляют псевдопластические свойства. Отмечается, что с увеличением скорости сдвига упорядоченная структура нарушается и жидкости демонстрируют традиционное ньютоновское поведение. Проведен анализ данных по автотомельным статистическим закономерностям динамики флуктуаций момента в режимах развитой турбулентности при течении между вращающимися дисками (данные Ж.-Ф. Пинтона с сотрудниками) и флуктуациями напряжения пластического течения в алюминий-магниевом сплаве в условиях проявления эффекта Портевена–Ле Шателье.

В **параграфе 1.2** приведён обзор работ, посвящённых эффектам локализации пластической деформации металлов как механизма переноса импульса, обусловленного зарождением и движением дефектов. Отмечается, что в отличие от механизма «диффузии импульса», традиционно рассматриваемого в жидкостях, энергия типичных носителей механизма переноса импульса при пластическом течении (дислокаций, микросдвигов) существенно превосходит kT и недостающий энергетический вклад обеспечивается флуктуациями упругого поля, фононным спектром. В работах Л.Б. Зуева с коллегами установлено, что локализация пластической деформации протекает неоднородно, существует большое число промежуточных стадий между пределами текучести и прочности, классификация которых сопоставлена с законами упрочнения на стадии пластического течения. Показано, что пластическая деформация протекает коррелировано по всему объёму образца, причём характерный пространственный период локализации имеет мезоскопический масштаб. Одним из проявлений локализации пластической деформации на стадии упрочнения в условиях жёсткого нагружения является прерывистое деформирование (эффект Портевена–Ле Шателье). Физическим механизмом эффекта Портевена–Ле Шателье является динамическое взаимодействие ансамблей дефектов (подвижных дислокаций и растворённых атомов), инициирующее зарождение зон локализованной пластической деформации с типичным масштабом 10–100 нм. В работах Л.Б. Зуева, М.М. Кристалла, М.А. Лебёдкина, G. Ananthakrishna, Y. Brechet, L.P. Kubin и др. приведены различные подходы к описанию эффектов множественной локализации пластического течения и эффекта Портевена–Ле Шателье, иллюстрирующего закономерности поведения «критических» систем, далеких от равновесия.

В **параграфе 1.3** представлен обзор работ, посвящённых явлениям сонолюминесценции (СЛ) и гидролюминесценции (ГЛ). Отмечается, что эмиссия света при СЛ происходит при схлопывании кавитационных пузырьков, вызванных гидродинамическими эффектами. Подтверждено, что необходимым условием возникновения ГЛ, в отличие от СЛ, является локализация деформации в пограничном слое. Обсуждаются две основные теории возникновения ГЛ – «тепловая» и «электрическая». В основе «тепловой» теории лежит предположение, что

источником свечения является образовавшийся плазменный сгусток со средней температурой 10^4 К, который был зафиксирован в работах А.И. Колдамасова с коллегами при пропускании жидкости под давлением через дросселирующее устройство. В работах Д.А. Бирюкова с соавторами при исследовании спектра люминесценции масла, протекающего под высоким давлением через узкий канал, был установлен спектр ГЛ, включающий компоненты полосчатого и сплошного спектров. Полосчатый спектр принадлежит полосам азота, присутствие которого объяснено наличием воздуха в исследуемой жидкости. Анализ сплошного спектра показал несоответствие спектра ГЛ «планковской» кривой излучения абсолютно чёрного тела. Установлено, что сплошной спектр ГЛ содержит максимумы, которые лежат на разных длинах волн в зависимости от того, на какой участок рабочего канала направлен регистрирующий датчик. Наличие максимумов сплошного спектра на разных длинах волн связывается с тем, что эта компонента свечения возникает не в газе, а в жидкости: максимум сплошного спектра ГЛ соответствует люминесцентному центру, а уширение обусловлено релаксационными процессами. Проведённый анализ показал, что явление ГЛ связано с резким изменением механизма переноса импульса и диссипативных свойств жидкости при достижении пороговых значений скорости деформации $\sim 10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$.

В главе 2 изложены результаты исследования закономерностей множественной локализации пластической деформации в условиях проявления эффекта Портевена–Ле Шателье при сжатии наклонных на 2° от вертикали цилиндрических образцов из сплава АМгб с постоянной скоростью деформации в диапазоне $4,4 \div 17,8 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (скорость перемещения захвата $1 \div 4$ мкм/с) на электромеханической машине Shimadzu AG-300. Такая форма образцов обеспечивает преимущественное направление образования полос скольжения, что позволяет достичь больших деформаций до $\varepsilon = 1,6$ без разрушения образца.

Деформационная диаграмма сплава АМгб показывает множественные флуктуации напряжения течения, имеющие различную динамику на разных участках деформационной кривой (рис. 1). Анализ времён следования и амплитуд флуктуаций напряжения течения демонстрирует резкое увеличение характерных времён «релаксации» (интервалов следования импульсов) в окрестностях двух значений макроскопической деформации $\varepsilon_{\kappa 1}, \varepsilon_{\kappa 2}$ (рис. 2). По аналогии с теорией критических явлений, эти значения могут рассматриваться как аналоги критических точек, в окрестности которых наблюдается быстрый рост времён релаксации. Первая критическая точка соответствует переходу к развитому пластическому течению с формированием множественных областей локализации пластической деформации по всей длине образца. Переход через вторую критическую точку соответствует стадии формирования очагов макроскопического разрушения образца.

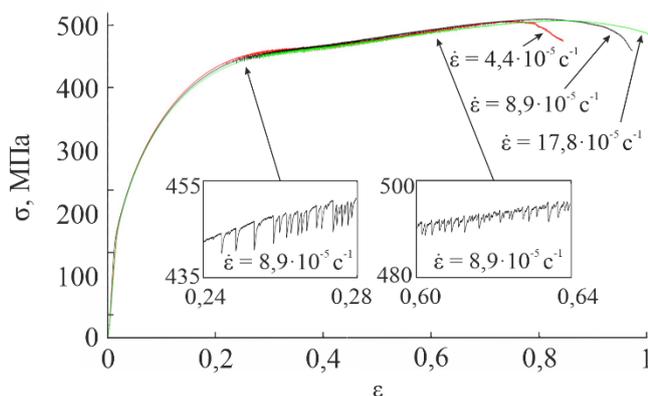


Рисунок 1 – Деформационные диаграммы сплава АМгб.

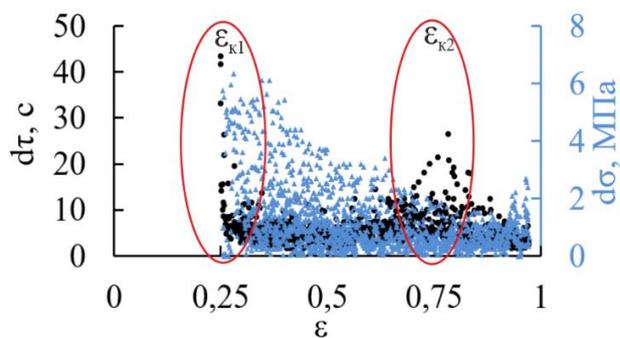


Рисунок 2 – Зависимость интервалов времени между конечно-амплитудными флуктуациями напряжения течения (●); зависимость флуктуаций напряжения течения (▲)

Функция плотности вероятности распределения интервалов времени между конечно-амплитудными флуктуациями напряжения течения и флуктуации самих амплитуд напряжения обнаруживает негауссовый характер (рис. 3).

В работах Ж.-Ф. Пинтона⁷ по исследованию автомодельных статистических закономерностей динамики флуктуаций момента в режимах развитой турбулентности, инициированной между вращающимися дисками, установлено, что функция плотности вероятности для конечно-амплитудных флуктуаций момента может быть представлена с высокой точностью в виде:

$$P(y) = K \exp(x(y) - e^{x(y)})^a, \quad (1)$$

где $x = b(y - s)$; $a = \pi/2$; $y = (\ln t - \langle \ln t \rangle) / D_t$; K, b, s – эмпирические константы.

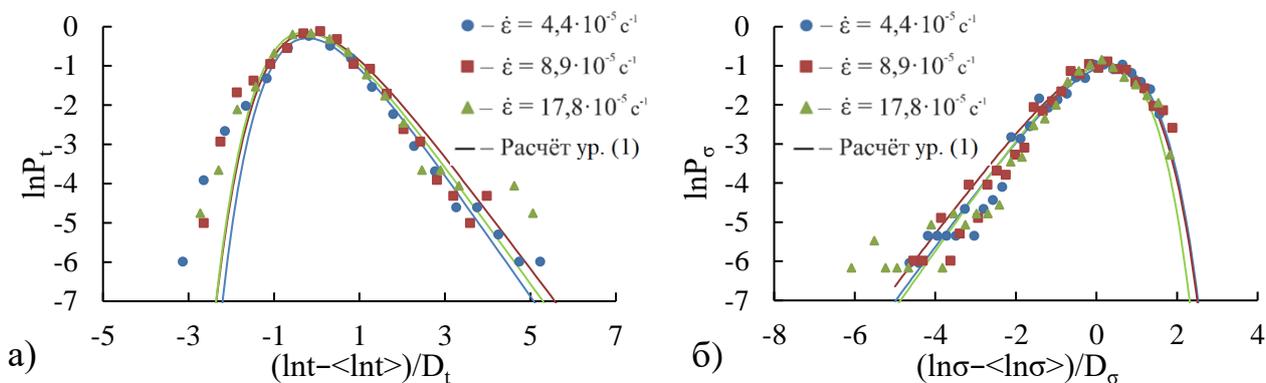


Рисунок 3 – Плотность распределения флуктуаций временных интервалов P_t (а) и напряжения P_σ (б) на стадии пластического течения для сплава АМгб. Экспериментальные данные флуктуации временных интервалов отмечены маркерами; линиями показан расчёт функции плотности вероятности, выполненный по формуле (1).

Функция плотности вероятности, вычисленная по формуле (1), показывает хорошее согласование с экспериментальными распределениями, соответствующим флуктуациям напряжений пластического течения (рис. 3). Полученные результаты согласуются с данными анализа спектра амплитуд флуктуаций напряжения пластического течения при растяжении металлических образцов, полученными И.А. Пантелеевым, С. Frustey, О.Б. Наймарком.

⁷Bramwell S. Holdsworth P., Pinton J.-F. Universality of rare fluctuations in turbulence and critical phenomena // Nature. – 1998. – Vol. 396. – P. 552-554.

Существование идентичных негауссовых статистических распределений флуктуаций напряжений пластического течения в сплаве АМгб и флуктуаций момента при течении жидкостей при больших числах Рейнольдса позволяет высказать предположение о существовании единого механизма переноса импульса пластическим сдвигом [1-4].

Известно, что деформированный металл содержит большое количество внутренних дефектов, главным образом в виде дислокаций, которые аккумулируют часть энергии деформирования в полях структурных напряжений. С целью выявления закономерностей баланса запасённой энергии, связанной с накоплением дефектов и диссипативными процессами, соответствующими пластической деформации, были проведены калориметрические исследования образцов из алюминий-магниевого сплава с различной степенью деформации с помощью прибора Netzsch STA «Jupiter» 449 методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

Для исследования методом ДСК была проведена серия дополнительных испытаний по осадке наклонных цилиндрических образцов из сплава АМгб. Сжатие проводилось со скоростью $8,9 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ до деформации $\varepsilon = 0,16; 0,29; 0,35; 0,46; 0,58; 0,69$, после чего эксперимент останавливался и образец извлекался из испытательной машины.

На ДСК кривых (рис. 4.), соответствующих деформированным образцам, в области температуры $300 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается экзотермический эффект, который наиболее ярко проявляется на образцах с деформацией $\varepsilon = 0,35; 0,46; 0,58$. Значения величин выделившейся запасённой энергии представлены на рисунке 5.

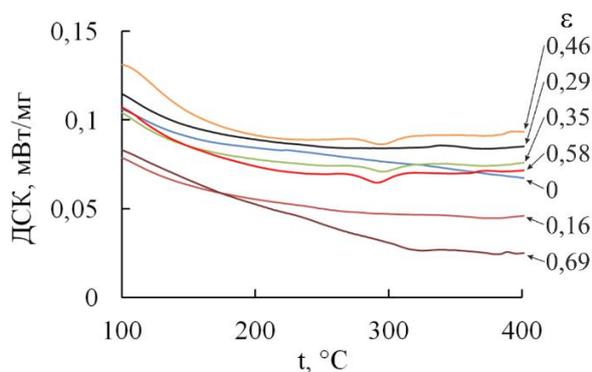


Рисунок 4 – ДСК кривые образцов сплава АМгб различной степени деформации

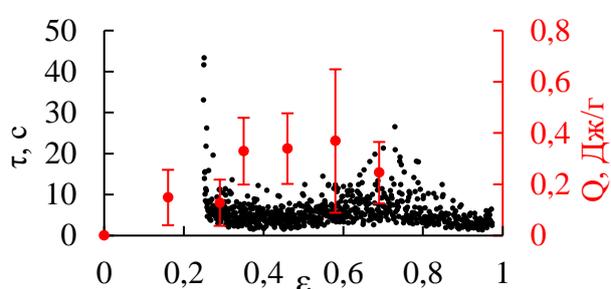


Рисунок 5 – Зависимость интервалов времени между конечно-амплитудными флуктуациями напряжения течения (Рис. 2) и калориметрических эффектов от деформации

При совмещении с графиком на рисунке 2, видно, что величина запасённой энергии образцов хорошо согласуется с установленными критическими точками: переход через первую критическую точку соответствует активному накоплению энергии в ходе деформации, переход через вторую критическую точку соответствует активному перераспределению запасённой энергии на формирование очагов макроскопического разрушения [3-4].

В главе 3 представлены результаты исследований механизмов формирования локализованных сдвигов при течении структурированных сплошных сред. На примере глицерина изучены тангенциальные разрывы по изменениям значений вязкости при сдвиговом течении на оригинальной экспериментальной

установке по типу реометра «коаксиальные цилиндры». Установлено, что глицерин при достижении определённых сдвиговых нагрузок теряет оптическую однородность в областях с критической скоростью сдвига, представляющих собой тонкий цилиндрический слой с «разрушенной» структурой (рис. 6).

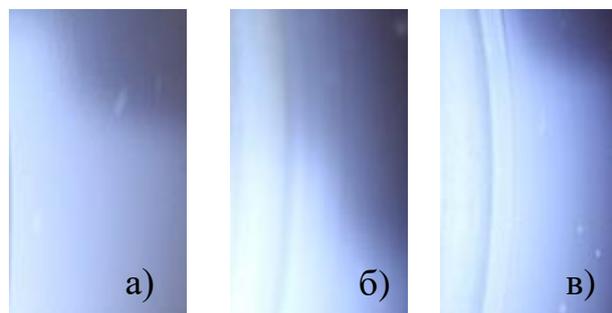


Рисунок 6 – Фотографии формирования тангенциальных разрывов сдвиговой вязкости в глицерине: исходное состояние (а); $\dot{\epsilon} = 0,33 \text{ c}^{-1}$ (б); $\dot{\epsilon} = 3,33 \text{ c}^{-1}$ (в).

Эксперимент показал, что при слабых сдвиговых воздействиях глицерин имеет упорядоченную структуру и проявляет псевдопластические свойства. С увеличением скорости сдвига упорядоченная структура нарушается, глицерин демонстрирует традиционное ньютоновское поведение⁸. Тангенциальные разрывы параметров среды (вязкости) можно рассматривать как аналог зоны локализации

сдвиговой деформации, в которой резко падает вязкость среды, образуя полосы сдвига [5].

Аналогичное явление наблюдается в структурированных растворах полимеров, проявляющих псевдопластические (неньютоновские) свойства, когда с ростом скорости деформации упорядоченная структура разрушается, что проявляется в виде уменьшения вязкости с ростом скорости деформации. Проведены комплексные исследования реологического поведения вязкоупругих растворов полимеров (на основе гуаровой камеди и раствор вязкоупругого ПАВ – Сурфогель, производства АО «Полиэкс»), применяемых в технологии гидроразрыва пласта при добыче нефти из трудноизвлекаемых источников.

Реологические испытания данных сред проводились различными методами: методом Стокса; с помощью реометра оригинальной конструкции и реометра RheolabQS (производство Anton Paar), реализующих сдвиговое течение между коаксиальными цилиндрами; реометра Physica MCR501, оснащённого измерительной системой конус-плоскость в ротационном и осцилляционном режимах контроля скорости сдвига и напряжения сдвига в (рис. 7). На рисунке 8 показаны результаты динамических испытаний методом осцилляционного теста с амплитудой колебания конуса реометра равной 1° в диапазоне частот от 1 до 10 Гц [6].

Испытания жидкостей при высоких скоростях сдвига (до 10^5 c^{-1}) осуществлялись совместно с И.А. Банниковой на оригинальной установке методом электрического взрыва проводника (ЭВП)⁹. Значений сдвиговой вязкости жидкостей от скорости деформации на фронте волны сжатия, полученной методом ЭВП отмечены на рисунке 10 красными маркерами [7].

⁸Стебновский С.В. Тангенциальные разрывы параметров полярной жидкости при сдвиговом деформировании / С.В. Стебновский // Прикладная механика и техническая физика. – 2005. – Т. 46, № 3. – С. 41–48

⁹Банникова И.А. Уваров С.В., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Экспериментальное исследование неньютоновских свойств воды в условиях электровзрывного нагружения // Письма в Журнал Технической Физики – 2014. – Т. 40, №17. – С. 87–93.

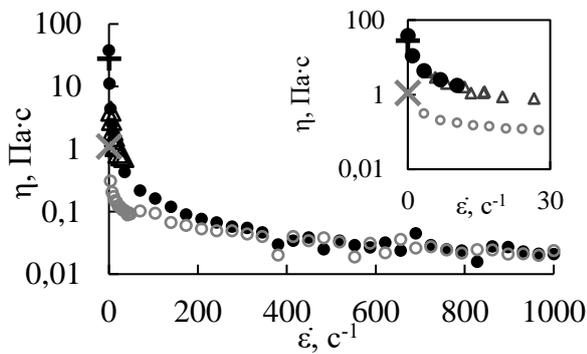


Рисунок 7 – Зависимости вязкости от скорости сдвига для жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ (● – реометр Physica MCR501; + – метод Стокса; Δ – метод измерения вязкости с помощью коаксиальных цилиндров) и на основе гуара (○ – реометр Physica MCR501; X – метод Стокса).

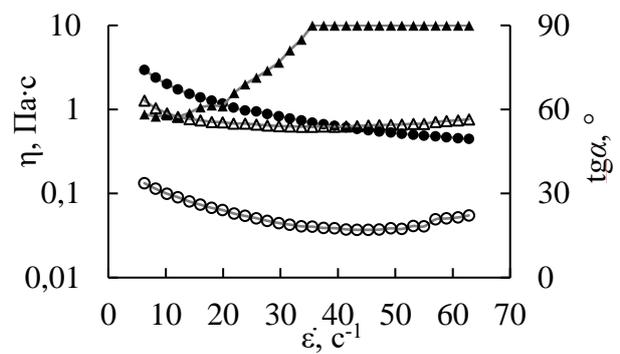


Рисунок 8 – Зависимость комплексной вязкости жидкостей от скорости деформации. На графике отмечены: ● – комплексная вязкость жидкости на основе вязкоупругого ПАВ; ○ – комплексная вязкость жидкости на основе гуара; ▲ – угол сдвига фаз жидкости на основе вязкоупругого ПАВ; Δ – угол сдвига фаз жидкости на основе гуара.

Динамические исследования установили, что угол сдвига фаз для среды на основе вязкоупругого ПАВ слабо зависит от частоты колебания конуса в отличие от среды на основе гуара, угол сдвига фаз которой увеличивается, а при частоте колебаний 5,5 Гц (скорость деформации 35 c^{-1}) становится равным 90° , что свидетельствует о полной потере упругой реакции.

На основании анализа полученных экспериментальных результатов было сделано предположение, что реологическое поведение исследуемых сред в широком диапазоне условий нагружения можно описать уравнением в виде:

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^\alpha / \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^\beta \quad (2)$$

Формула (2) описывает зависимость вязкости от скорости сдвига и давления при $P > P_0$ и $\dot{\epsilon} > \dot{\epsilon}_0$, в остальных случаях $\eta = \eta_0$. В статическом эксперименте $P/P_0 = 1$, где P – давление в среде, P_0 – атмосферное давление, η – динамическая вязкость, η_0 – статическое значение вязкости, которая экспериментально определяется по методу Стокса, коэффициенты α и β – являются параметрами аппроксимации. Значения параметров $\dot{\epsilon}_0$ и $\beta = n - 1$ определяются по данным реометрических измерений – зависимости вязкости от скорости сдвига (рис. 9а).

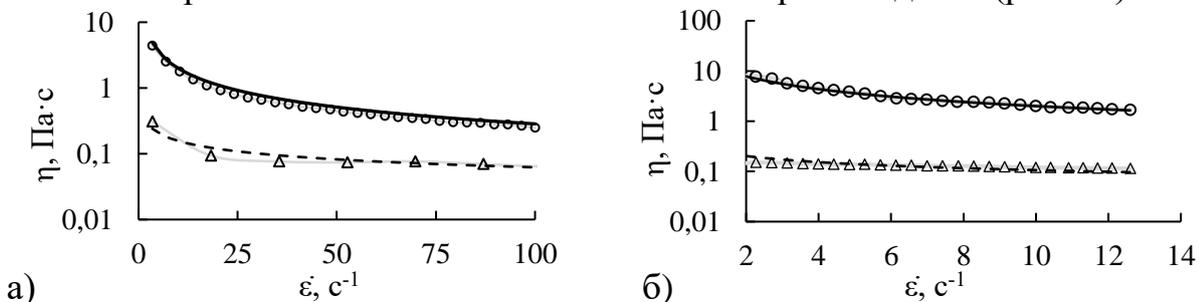


Рисунок 9 – Зависимости вязкости от скорости сдвига (а); зависимость вязкости в эксперименте с осциллирующими напряжениями (б). На графиках отмечено: ○ – экспериментальные данные и сплошной линией описание с помощью уравнения (2) для среды на основе вязкоупругого ПАВ; Δ – экспериментальные данные, штриховой линией аппроксимация на основе уравнения (2) для среды на основе гуара.

Результаты эксперимента по нагружению сред методом ЭВП с использованием формулы (2) позволяют определить коэффициент α . На рисунке 9б показаны результаты верификации расчетных кривых по данным динамического поведения исследованных сред в эксперименте с осциллирующими напряжениями, которые хорошо согласуются между собой. На рисунке 10 показаны данные, полученные в эксперименте методом ЭВП (маркеры), и результаты аппроксимации предложенной моделью в зависимости от скорости сдвига и давления.

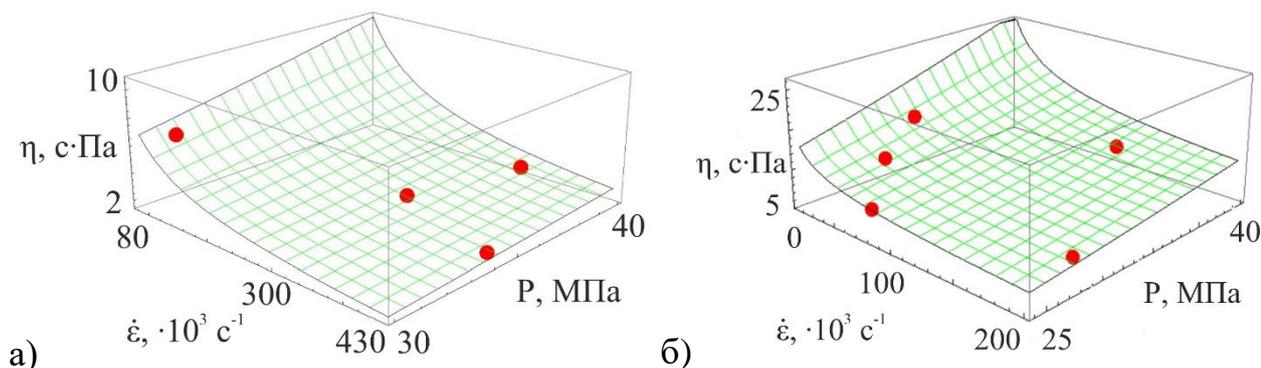


Рисунок 10 – Зависимости вязкости жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ (а) и гуара (б), полученные в ходе эксперимента (маркеры) и с помощью уравнения (2) (поверхность).

Исследования¹⁰ показали, что распространение пластического фронта волны имеет автомодельный характер и установлена степенная зависимость вида $\dot{\epsilon}^p = A \tau_a^4$ между скоростью деформирования и амплитудой напряжения сдвига. Преобразованием этого выражения, была получена зависимость для вязкости вида:

$$\eta = A^{-1/4} \cdot (\dot{\epsilon}^p)^{-3/4}$$

Соответствие показателей степени для вязкоупругого ПАВ (–0.85) и гуара (–0.43) степенной зависимости $\eta \sim (\dot{\epsilon}^p)^{-3/4}$, следующей из работ по исследованию пластических волновых фронтов в твёрдых телах, указывает на автомодельный характер переноса импульса в заданном диапазоне интенсивностей нагружения, который может быть обусловлен множественными локализованными сдвигами.

Предложенная реологическая модель показала хорошее согласование с экспериментальными результатами и может быть применима к другим средам, проявляющим псевдопластические свойства [7].

Коэффициенты в уравнении (2), описывающем поведение исследованных сред в широком диапазоне скоростей сдвига, представлены в таблице 2:

Таблица 2 Параметры уравнения (2) для жидкостей ГРП

Среда	η_0 , Па·с	$\dot{\epsilon}_0$, c ⁻¹	α	β
Вязкоупругий ПАВ	28.1	0.38	1.57	0.85
Гуар	1.1	0.1	1.42	0.43

С помощью реометров, реализующих сдвиговое течение между коаксиальными цилиндрами, осуществлены реологические исследования сред на основе вязкоупругого ПАВ с добавлением расклинивающего наполнителя – пропанта в виде

¹⁰ Swegle, J. W., Grady D.E. Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times // Journal Applied Physics. – 1985. – Vol. 58, No.2. – P. 692–701.

алюмосиликатных шариков со средним диаметром 1,041 мм «Пропант 16/20» в концентрации 10 % и 20 % по массе.

Добавление пропанта в исследуемую среду практически не влияет на её вязкость при высоких скоростях сдвига ($>50 \text{ с}^{-1}$), однако, начальная стадия кривых течения резко «поднялось», что свидетельствует о появлении предельных напряжений, что связывается с седиментацией и коагуляцией (слипанием) наполнителя. Но при больших скоростях сдвига увеличение концентрации наполнителя приводит к уменьшению напряжения сдвига, что связывается с иницированием крупномасштабных дефектов сдвига, разрушением структуры жидкости и снижением напряжения течения [8].

В главе 4 представлены результаты экспериментальных исследований явлений гидро- и сонолюминесценции в средах при высоких скоростях сдвига. Исследование явлений ГЛ и СЛ осуществлялось на оригинальной установке, схема которой и геометрия рабочего канала показаны на рисунке 11.

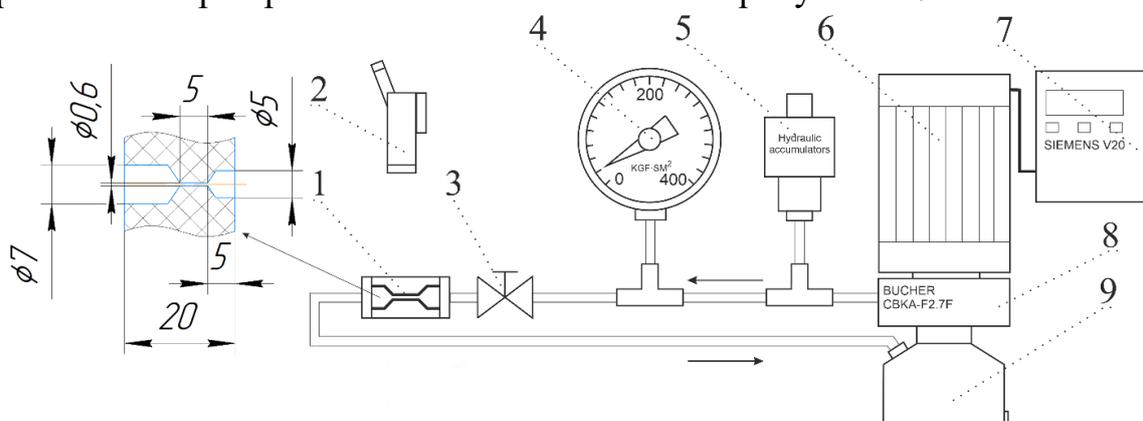


Рисунок 11 – Схема экспериментальной установки и геометрия рабочего канала. Цифрами на рисунке отмечено: 1 – рабочий канал (диаметр – 0,6 мм; длина – 5 мм); 2 – высокоскоростная видеокамера или фотоумножитель для регистрации ГЛ и СЛ; 3 – запорный вентиль; 4 – манометр; 5 – гидроаккумулятор; 6 – асинхронный электродвигатель; 7 – частотный регулятор; 8 – шестеренчатый гидравлический насос высокого давления (до 210 атм); 9 – бак с гидравлическим маслом.

Проявления ГЛ и СЛ регистрировались на гидравлическом масле MOBIL DTE-25 (динамическая вязкость $\eta = 0,04 \text{ Па}\cdot\text{с}$) в диапазоне градиентов давления $\nabla P \sim 0,7 \div 5 \text{ ГПа/м}$ с помощью фотоумножителя или скоростной видеокамеры. Скорость деформации в приграничных слоях $\dot{\epsilon} > 10^5 \div 10^7 \text{ с}^{-1}$, которая вычислялась по формуле $\dot{\epsilon} = dV / dr$, где r – радиус канала (м). Для ламинарного потока жидкости в круглой трубе профиль скорости является параболическим $V = V_{max}(1 - (r/R)^2)$, V_{max} – максимальная скорость потока жидкости в центре трубы, которая вычислялась как $V_{max} = Q/S$, где S – сечение канала (м^2), Q – расход жидкости ($\text{м}^3/\text{с}$). Расход жидкости оценивался по производительности шестерёнчатого насоса – 2,7 мл/об. Видеокадр наблюдения ГЛ показан на рисунке 12, на котором видны интенсивные свечения жидкости при иницировании ГЛ в канале и СЛ - в диффузоре. На рисунке 13 представлена зависимость числа событий, регистрируемых с помощью фотоумножителя, от скорости деформации в канале, которая иллюстрирует резкое увеличение интенсивности ГЛ при пороговых значениях скорости деформации $\sim 10^5 \text{ с}^{-1}$ (градиент давления в канале $\sim 1,2 \text{ ГПа/м}$; $Re \sim 1350$).

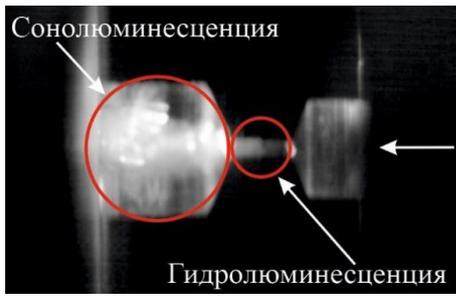


Рисунок 12 – Наблюдение развитой ГЛ в канале при градиенте давления на входе в канал ~ 5 ГПа/м

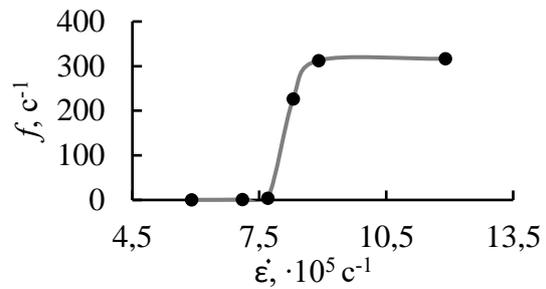


Рисунок 13 – Число импульсов, регистрируемых фотоумножителем, от скорости деформации в канале

По результатам предварительно проведённых экспериментов измерительная ячейка была изменена с целью разделить проявления ГЛ в узком канале и СЛ - в области расширения в диффузоре (рис. 12). Геометрия и внешний вид измерительной ячейки показаны на рисунке 14. Рабочий канал диаметром 0,8 мм и длиной 20 мм выполнен из оргстекла (ПММА), область расширения отделена металлическим фланцем.

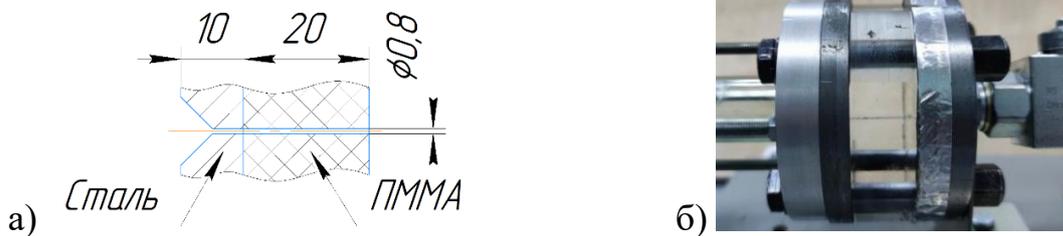


Рисунок 14 – Геометрия модернизированной измерительной ячейки (а); внешний вид измерительной ячейки (б).

Анализ распределения амплитуд показал, что распределение для всего амплитудного диапазона данных, полученных в эксперименте на исходной измерительной ячейке, соответствует распределению Вейбулла, тогда как для данных эксперимента на модернизированной измерительной ячейке было получено степенное распределение (рис. 16а). Временные интервалы между событиями для экспериментов, проведённых на исходной и на модернизированной измерительной ячейке, распределены по экспоненциальному закону, что показано на рисунке 16б. На графиках отчетливо видно совпадение между наблюдаемым и экспоненциальным распределением, кроме эксперимента, проведённого на исходной измерительной ячейке, где наблюдаются незначительные отклонения.

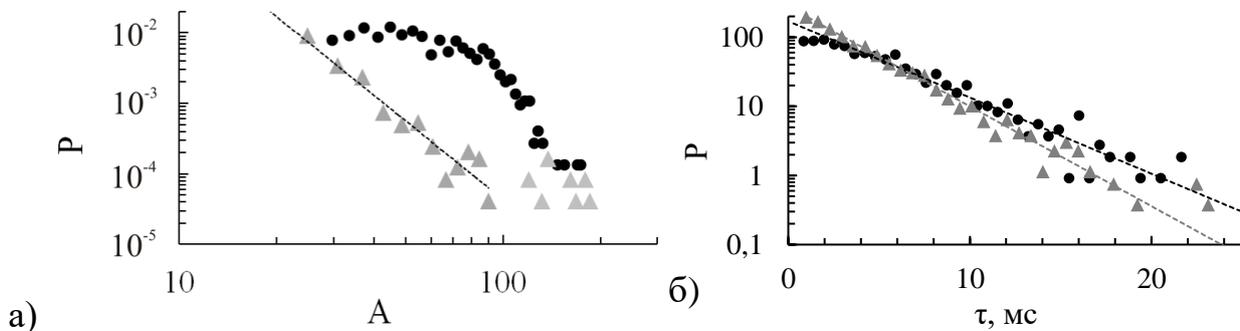


Рисунок 16 – Амплитудные распределения сигналов ГЛ и СЛ для испытаний на исходной измерительной ячейке (а); распределение временных интервалов между последующими сигналами для испытаний на исходной измерительной ячейке (б) для испытаний на исходной измерительной ячейке (●) модернизированной измерительной ячейке (▲).

В результате экспериментов по течению в узком канале установлены пороговые значения скорости деформации и градиента давления, соответствующие возникновению ГЛ. Значения скоростей деформации носят универсальный характер, лежат в диапазоне $\sim 10^5 \div 10^6 \text{ с}^{-1}$, что согласуется с литературными данными¹¹.

Статистический анализ сигналов, полученных с помощью фотоумножителя, показал качественные отличия явления ГЛ от СЛ. Явление СЛ связано с кавитацией. Явление ГЛ связывается с формированием коллективных мод сдвига, аналогично сценариям формирования мод локализованного сдвига при пластической деформации твёрдых тел при достижении пороговых значений скорости деформации $\dot{\varepsilon} \sim 10^5 \text{ с}^{-1}$. Характер такого перехода сопровождается резким изменением диссипативных свойств жидкости, проявлением которых является ГЛ [9–12].

На основе полученных данных был разработан лабораторный стенд и метод исследования кавитационных явлений в узких технологических каналах и воздействия кавитации на материалы и технологические среды посредством регистрации ГЛ и СЛ (Патент на изобретение № RU 2796207 С1) [13].

В **заключении** приведены выводы, полученные в диссертационной работе.

1. Получены экспериментальные данные о пространственно-временной локализации пластического течения сплава АМгб на стадии развитой пластической деформации; обработкой данных по флуктуациям напряжений течения определены области реализации механизмов деформирования множественными локализованными сдвигами и инициирования разрушения;

2. Сопоставлением данных по статистическим закономерностям развития множественных локализованных пластических сдвигов и результатов дифференциальной сканирующей калориметрии сплава АМгб обосновано существование двух критических точек при множественной локализации пластической деформации в условиях проявления эффекта Портевена–Ле Шателье;

3. Показана статистическая автомодельность пространственно-временной динамики флуктуаций напряжений пластического течения в сплаве АМгб, позволившая обосновать предположение об универсальности механизма переноса импульса в структурированных сплошных средах по механизму псевдопластического сдвига.

4. Предложено обоснование степенной зависимости вязкости от скорости деформации с учётом давления для структурированных сплошных сред в широком диапазоне интенсивностей нагружения с величиной показателя, характерного для псевдопластического течения, обусловленного множественными дефектами сдвига.

5. Получены новые экспериментальные данные по закономерностям развития ГЛ и СЛ при интенсивных течениях структурированных сплошных сред; установлено существование порогового значения скорости сдвига $10^5 \div 10^6 \text{ с}^{-1}$ и степенного закона распределению сигналов ГЛ, ассоциируемые с псевдопластическим механизмом переноса импульса.

¹¹Герценштейн С.Я., Монахов А.А. Электризация и свечение жидкости в коаксиальном канале с диэлектрическими стенками // Механика жидкости и газа. – 2009. – № 3. – С. 114–119

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук:

1. **Ефремов Д.В.**, Оборин В.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Критическая динамика локализованных неустойчивостей пластического течения в сплаве АМг6 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 4. – С. 28-39. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.4.03>.
2. Naimark O., Uvarov S., Bannikova I., **Efremov D.** Multiscale plastic shear instability as mechanism of turbulence // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2051, № 1. – Art. id. № 020209. <https://doi.org/10.1063/1.5083452>.
3. Uvarov S., **Efremov D.** Critical phenomena in portevin-le chatelier effect during compression of aluminium-magnesium alloy and stored energy evolution // Procedia Structural Integrity. – 2019. Vol. 18. – P. 309-313. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.170>.
4. **Ефремов Д.В.**, Уваров С.В., Спивак Л.В., Наймарк О.Б. Статистические закономерности развития локализации деформации при пластическом течении в сплаве АМг6 // Письма о материалах. – 2020. – Т. 10, № 1(37). – С. 38-42. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-1-38-42>.
5. **Efremov D.V.**, Chudinov V.V., Uvarov S.V. Investigation of the tangential discontinuities formation in the glycerol under shear load // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1093. – Art. id. № 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1093/1/012006>.
6. **Ефремов Д.В.**, Банникова И.А., Баяндин Ю.В., Крутихин Е.В., Журавлёв В.А. Экспериментальное исследование реологических свойств жидкостей для гидроразрыва пласта // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. – № 4. – С. 69-77. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2020-4-69-77>.
7. **Ефремов Д.В.**, Банникова И.А., Уваров С.В., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б., Крутихин Е.В., Журавлёв В.А. Исследование псевдопластических свойств жидкостей, применяемых для гидроразрыва пласта, в широком диапазоне скоростей сдвига и давлений // Вестник Пермского университета. Физика. – 2023. – № 3. – С. 81-87. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2023-3-81-87>.
8. **Efremov D.V.**, Bannikova I.A., Bayandin Yu.V., Krutihin E.V., Zhuravlev V.A. Study of viscoelastic properties of fluids for hydraulic fracturing // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1945. – Art. id. № 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1945/1/012003>.
9. Naimark O.B., Uvarov S.V., Bannikova I.A., **Efremov D.V.**, Bayandin Yu.V., Dezhkunov N.V. Localized shear as a quasi-plastic mechanism of momentum transfer in liquids // Letters on Materials. – 2023. – Vol. 13, № 2. – P. 93-97. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2023-2-93-97>.

10. Котухов А.В., **Ефремов Д.В.**, Банникова И.А., Баяндин Ю.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б., Жарко Н.А., Дежкунов Н.В. Наблюдение кавитационного шума без субгармоники // Письма в журнал технической физики. – 2023. – Т. 49, № 6. – С. 39-42. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.06.54816.19455>.

11. **Efremov D.V.**, Uvarov S.V., Naimark O.B. Experimental study of hydro- and sonoluminescence in intense hydrodynamic flows and a method for recording cavitation / Orlov M.Y., Visakh P.M. (eds.) Proceedings of the XII All Russian Scientific Conference on Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics (XII CICMCM), 15-17 November 2023, Tomsk, Russia // Springer Proceedings in Physics. Vol 412. P. 95-100. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-97-1872-6_14.

12. **Ефремов Д.В.**, Уваров С.В., Дежкунов Н.В., Наймарк О.Б. Исследование стадийности развития кавитации в каналах по данным измерений гидро- и сонолюминесценции // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2024. – Т. 90, № 6. – С. 36-41. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-6-36-41>.

13. **Ефремов Д.В.**, Уваров С.В., Банникова И.А., Наймарк О.Б. Способ исследования кавитационных явлений в технологических жидкостях и стенд для его осуществления // Патент Российской Федерации на изобретение № 2796207 от 09.12.2022.