

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМаш РАН)



В.О., Большой проспект, д.61, Санкт-Петербург, 199178
Тел.: (812)-321-4778; факс: (812)-321-4771; www.ipme.ru

ОГРН 1037800003560, ИНН/КПП 7801037069/780101001

УТВЕРЖДАЮ

Директор федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт проблем
машинovedения Российской академии
наук, д.т.н.


Полянский В.А.

Полянский В.А.

«15» сентября 2025 г.

Отзыв ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машинovedения Российской академии наук на диссертацию Ефремова Дениса Викторовича «Экспериментальное исследование механизмов переноса импульса в структурированных сплошных средах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8.

Механика деформируемого твердого тела

Актуальность работы. В диссертационной работе Ефремова Д.В. исследуются закономерности механизмов деформации и переноса импульса в структурированных сплошных средах за счет активизации коллективных свойств ансамблей дефектов. Актуальность темы диссертации определяется назревшей к настоящему времени необходимостью учета стохастичности и многомасштабного характера процессов деформирования с целью повышения адекватности описания указанных процессов. Данные модели востребованы также для описания явлений

гидролюминесценции в диапазоне скоростей деформации $\sim 10^5 \div 10^6 \text{ с}^{-1}$. 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-магниевый сплав АМгб) и структурированные жидкие среды (глицерин; среды, применяемые в технологии гидроразрыва пласта на основе гуара и сурфогеля, гидравлическое масло) в широком диапазоне скоростей деформации с целью изучения связи механизмов деформации и коллективными явлениями в ансамблях сдвигов.

Структура и содержание диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, 66 рисунков, 6 таблиц, библиографии из 126 наименований. Объем диссертации составляет 127 страниц.

Во **введении** обоснована актуальность, практическая и теоретическая значимость и новизна выбранной темы диссертации; сформулированы цель и задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, и основные научные результаты диссертационной работы.

В **первой главе** представлен обзор литературных данных, посвящённых теме исследования. Обоснованы предположения, что при временах на 6-7 порядков больше времени самодиффузии в конденсированных средах могут проявляться механизмы переноса импульса локализованными сдвигами, свойственные твёрдым телам. 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.

¹Герценштейн С.Я. Электризация и свечение жидкости в коаксиальном канале с диэлектрическими стенками / С.Я. Герценштейн, А.А. Монахов // Механика жидкости и газа. – 2009. – № 3. – С. 114–119

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 $4,4\div 17,8\cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Деформационная диаграмма сплава АМгб показывает множественные флуктуации напряжения течения, имеющие различную динамику на разных участках деформационной кривой. Анализ времён следования и амплитуд флуктуаций напряжения течения демонстрирует резкое увеличение характерных времен «релаксации» (интервалов следования импульсов) в окрестностях двух значений макроскопической деформации. 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.

В диссертационной работе, на примере явления Портевена-Ле Шателье, выполнены исследования явления стохастичности процесса динамического деформирования. На основе экспериментов по сжатию цилиндрических образцов построена функция плотности вероятности распределения интервалов времени между конечно-амплитудными флуктуациями напряжения течения и флуктуации амплитуд напряжения. Установлено, что указанная функция плотности вероятности имеет негауссовый характер. Обнаруженный в процессе исследования множественной локализации пластической деформации в твердых телах механизм зарождения стохастичности в двух критических точках деформационной зависимости является важным фундаментальным результатом исследования.

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 квази-пластическими сдвигами.

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. Показано, 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.

В главе 3 представлены результаты исследований механизмов формирования локализованных сдвигов при течении структурированных «сплошных» сред. На примере глицерина на оригинальной экспериментальной установке по типу реометра «коаксиальные цилиндры» по изменениям значений вязкости при сдвиговом течении изучены тангенциальные разрывы. Установлено, что глицерин при достижении определённых сдвиговых нагрузок теряет оптическую однородность в областях, где реализуется критическая скорость сдвига. Эти области представляют собой тонкие цилиндрические слои с «разрушенной» структурой. Эксперимент показал, что при слабых сдвиговых воздействиях глицерин имеет упорядоченную структуру и проявляет псевдо-пластические свойства. С увеличением скорости сдвига упорядоченная структура нарушается, глицерин демонстрирует традиционное ньютоновское поведение. Тангенциальные разрывы параметров среды (вязкости) можно рассматривать как аналог зоны локализации сдвиговой деформации, в которой резко падает вязкость среды, образуя полосы сдвига.

Аналогичное явление наблюдается в структурированных растворах полимеров, проявляющих псевдо-пластические (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, применяемых в технологии гидроразрыва пласта при добыче нефти из трудно извлекаемых источников. Экспериментальные результаты исследования представленных сред, полученные различными методами, хорошо согласуются между собой.

Исследования показали, что распространение пластического фронта волны имеет автомодельный характер. установлена степенная зависимость вида $\dot{\varepsilon}^p = A\tau_a^4$ между скоростью деформирования и амплитудой напряжения сдвига. Это соотношение совпадает с известным законом «четвертой степени» Грэди и Свигла. Для случая сдвигового течения это соотношение получено впервые.

В главе 4 представлены результаты экспериментальных исследований явлений гидро- и соно-люминесценции при высоких скоростях сдвига. Анализ показал, что во всем исследованном диапазоне амплитуд справедливо распределение Вейбулла. При этом интервалы между событиями распределены по экспоненциальному закону. 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 $\sim 10^5 \div 10^6 \text{ с}^{-1}$. 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 $\dot{\epsilon} \sim 10^5 \text{ с}^{-1}$. Характер такого перехода сопровождается резким изменением диссипативных свойств жидкости, проявлением которых является ГЛ.

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

В заключении приведены выводы, полученные в диссертационной работе. Получены экспериментальные данные о пространственно-временной локализации пластического течения сплава АМгб на стадии развитой пластической деформации; обработкой данных по флуктуациям напряжений течения определены области деформирования, в которых реализуются множественные локализованные сдвиги. Сопоставлением данных по статистическим закономерностям развития множественных локализованных пластических сдвигов и результатов дифференциальной сканирующей калориметрии сплава АМгб выявлено существование двух критических точек при множественной локализации пластической деформации в условиях проявления эффекта Портевена–Ле Шателье; в сплаве АМгб установлена статистическая автомодельность пространственно-временной динамики флуктуаций пластического течения, позволившая обосновать предположение об универсальности механизма переноса импульса в структурированных сплошных средах по механизму псевдо-пластического сдвига. 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 псевдо-пластического течения, обусловленного множественными дефектами сдвига.

Научная новизна результатов исследования.

В рамках диссертационной работы впервые получены новые экспериментальные данные о закономерностях развития гидро- и соно-люминесценции при интенсивных течениях структурированных сред. Установлено существование порогового значения скорости сдвига $10^5 \div 10^6 \text{ с}^{-1}$ при реализации степенного закона распределения сигналов гидро-люминесценции, что может быть ассоциируемо с псевдо-пластическим механизмом переноса импульса.

Важным фундаментальным результатом является экспериментальное установление того факта, что в режиме хаотизации процесса динамического деформирования имеет место увеличение внутренней энергии деформируемой среды.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что в работе получены новые фундаментальные знания о физических механизмах переноса

импульса при динамическом деформировании гетерогенных сред. Важным научным результатом является подтверждение так называемого «закона четвертой степени» для случая свигообразования и существование порогового значения скорости сдвига $10^5 \div 10^6 \text{ с}^{-1}$, а также степенного закона распределения сигналов гидролюминесценции,

Практическая значимость результатов исследования заключается в следующем:

Экспериментальные данные о характере распределения функции плотности вероятности амплитуд напряжения в критических режимах деформирования весьма полезны при разработке адекватных моделей деформирования с учетом стохастичности процессов деформирования.

Полученные данные по гидролюминесценции позволяют более детально обосновать режимы нагружения при реализации взрывного разрыва нефтеносных и газоносных пластов.

Результаты работы могут быть использованы в научно-исследовательской деятельности таких научных учреждений, как Институт проблем машиноведения РАН, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича СО РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, а также в научно-образовательной деятельности таких вузов, как Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербургский государственный университет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Новосибирский государственный университет, Южный федеральный университет и других.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обоснована применением современного оборудования для экспериментальных исследований, использованием апробированных методик исследования, соответствием полученных результатов представлениям, имеющимся в данной области научных исследований.

Замечания по содержанию и оформлению, общая оценка диссертации

По содержанию работы имеются следующие замечания:

1. В работе утверждается, что явление локализованного свигообразования относится к процессам мезоскопического масштаба. Однако нигде не указаны пространственные масштабы продольных сдвигов в процессе реализации механизма Портлевена-Ле Шателье. Не ясно, чем определяется масштаб локализованных сдвигов в твердом теле и жидкости.

2. Представляется неудачным в заголовке и в тексте сочетание двух характеристик деформируемой среды, а именно: «структурированная» и «сплошная» среда.

3. Не ясно, как такая характеристика среды как вязкость характеризует инициирование автомодельного режима процесса деформирования. Видимо подобная связь обоснована в работах О.Б. Наймарка. Но тогда надо было об этом сказать.

4. Совокупность результатов, установивших автомодельные закономерности волновых фронтов в твердых телах и жидкостях, степенные зависимости вязкости от скорости деформации в структурированных средах и универсальность плотности распределений флуктуаций напряжения пластического течения и момента при развитой турбулентности отражают общие закономерности, которые могут быть интерпретированы в терминах самоорганизованной критичности (СОК), что не обсуждается в работе.

5. Убедительно показанная экспериментально качественная смена механизмов переноса импульса в жидкостях в пограничных слоях при течении в круглых каналах при характерных скоростях деформации 10^5 с^{-1} регистрацией сигналов гидролюминесценции позволяет получение количественных данных о природе локализованных сдвигов применением методов активационного анализа.

6. Не приведены четкие физические различия и сходство между множественной локализованной локализацией процесса деформирования твердого тела и «квазипластическими сдвигами» в структурированных средах. Хорошо бы воспользоваться данными микроструктурных исследований, приведенных в диссертации. На наш взгляд подобное заключение можно было бы сделать не только на основе аналогии с распределением моментов в кармановской жидкости, но также из данных непосредственных микроструктурных исследованиях.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Ефремова Д.В., посвященной решению важной проблемы мезомеханики структурированных сред. Таким образом, диссертация Ефремова Д.В. «Экспериментальное исследование механизмов переноса импульса в структурированных сплошных средах» представляет собой законченное научное исследование, имеющее важное значение для механики материалов.

Заключение. Представленная к защите диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., а ее автор Ефремов Денис Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Материалы кандидатской диссертации Ефремова Д.В. «Экспериментальное исследование механизмов переноса импульса в

структурированных сплошных средах» заслушаны и получили одобрение на семинаре по механике ИПМаш РАН, протокол № 11 от 12 сентября 2025 г.

Отзыв на диссертацию Ефремова Д.В. заслушан, обсужден и одобрен на заседании лаборатории физики разрушения ИПМаш РАН, протокол № 15 от 05 сентября 2025 года.

Заведующий лабораторией
Физики разрушения ИПМаш РАН,
д.ф.-м.н.



Мещеряков Юрий Иванович

Мещеряков Юрий Иванович
д.ф.-м.н. (01.04.07 - Физика конденсированного состояния),
профессор, заведующий лабораторией Физики разрушения
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН)»
Адрес: В.О., Большой проспект, д.61, Санкт-Петербург, 199178
Тел.: +7(931)379-98-08
Email: ym38@mail.ru;

Я, Мещеряков Юрий Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Ефремова Дениса Викторовича, и их дальнейшую обработку.

Подпись Мещерякова Ю.И. заверяю:
Ученый секретарь ИПМаш РАН



Ю.А. Мочалова