

УДК 53.01; 53.06  
PACS 47.27.N–; 47.55.Bx

## Экспериментальное исследование механизмов гидро- и сонолюминесценции и инициирования микровзрывного распыления топлива

Д. В. Ефремов<sup>†</sup>, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

<sup>†</sup> efremov.d@icmm.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию явлений гидро- и сонолюминесценции при течении гидравлического масла в узком канале с применением оригинальной экспериментальной установки. Обоснованы предположения, что жидкости, являясь конденсированными средами, могут проявлять механизмы пластического переноса импульса при скоростях деформации  $\dot{\epsilon} > 10^5 \text{ с}^{-1}$ . Одним из проявлений локализованного сдвига в жидкостях при достижении скоростей сдвига  $\dot{\epsilon} > 10^5 \text{ с}^{-1}$  в пристеночной области является гидролюминесценция. Экспериментально установлено, что существует пороговое значение скорости деформации  $\dot{\epsilon} \sim 10^5 \text{ с}^{-1}$  ( $Re \sim 1350$ ,  $\nabla P \sim 1.2 \text{ ГПа/м}$ ), при котором наблюдается резкое увеличение интенсивности сигналов гидро- и сонолюминесценции. Предложенные конструкции измерительных ячеек позволили разделить сигналы, характерные для проявлений гидро- и сонолюминесценции. Статистическая обработка сигналов, полученных с фотоумножителя, позволила установить различия законов распределения импульсов гидро- и сонолюминесценции, что подтверждает качественные различия исследуемых явлений. Гидролюминесценция вызвана реализацией псевдопластического механизма переноса импульса в жидкостях, сонолюминесценция связывается с механизмами кавитации. В заключении предложены рекомендации по изготовлению фильер топливных форсунок для инициации микровзрывного распыления топлива посредством активации «горячих точек», ассоциируемых с локализованными сдвигами в жидкостях.

**Ключевые слова:** гидролюминесценция; сонолюминесценция; кавитация; микровзрыв

*Поступила в редакцию 04.06.2025; после рецензии 24.07.2025; принята к опубликованию 24.07.2025*

## An experimental study into the mechanisms of hydro- and sonoluminescence and initiation of microexplosive fuel atomization

D. V. Efremov<sup>†</sup>, S. V. Uvarov, O. B. Naimark

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

<sup>†</sup> efremov.d@icmm.ru

We have experimentally studied hydro- and sonoluminescence phenomena during the flow of hydraulic oil in a narrow channel, with an original experimental setup used. The study substantiates the assumptions that liquids, being condensed media, can exhibit mechanisms of quasi-plastic momentum transfer at strain rates of  $\dot{\epsilon} > 10^5 \text{ s}^{-1}$ . One of the manifestations of localized shear in liquids

upon reaching shear rates of  $\dot{\epsilon} > 10^5 \text{ s}^{-1}$  in the near-wall region is hydroluminescence. It has been experimentally established that there is a threshold value of the strain rate  $\dot{\epsilon} \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$  ( $\text{Re} \sim 1350$ ,  $\nabla P \sim 1.2 \text{ GPa/m}$ ) at which a sharp increase in the intensity of hydro- and sonoluminescence signals is observed. The proposed designs of measuring cells made it possible to separate signals characteristic of hydro- and sonoluminescence manifestations. Statistical processing of signals obtained from a photomultiplier allowed us to establish differences in the laws of distribution of hydro- and sonoluminescence pulses, which confirms the qualitative differences in the phenomena under study. Hydroluminescence is caused by the implementation of a pseudoplastic momentum transfer mechanism in liquids, while sonoluminescence is associated with cavitation mechanisms. In conclusion, recommendations are proposed concerning the manufacture of fuel injector channels for initiating microexplosive fuel atomization by activating ‘hot spots’ associated with localized shifts in liquids.

**Keywords:** hydroluminescence; sonoluminescence; cavitation; micro explosion

*Received 04 June 2025; revised 24 July 2025; accepted 24 July 2025*

doi: 10.17072/1994-3598-2025-3-34-42

## 1. Введение

В последнее время проявляется интерес к сжиганию водотопливных эмульсий. Водотопливная эмульсия представляет собой смесь базового топлива и воды, иногда с добавлением ПАВ. Различают микро- и макроэмульсию. Микроэмульсия включает дисперсионные капли размером менее 1 нм, макроэмульсия состоит из капель размером порядка нескольких микрометров. Как правило, они демонстрируют разные характеристики сгорания, даже при одинаковом содержании воды.

Сжигание водотопливной эмульсии дает ряд преимуществ по сравнению с сжиганием чистого топлива. Помимо первичного распыления капель жидкости, реализуемого инжекторами, капиллярами, компрессорами, достаточно широко распространено вторичное распыление, обусловленное различными механизмами. Наиболее часто применяемыми схемами вторичного распыления являются: смешивание жидких аэрозолей под разными углами с помощью пересекающихся конусов форсунок; столкновения капли с поверхностью твердого тела; впрыск газового потока. [1].

Существует метод инициации вторичного распыления микровзрывом [1–3]. Явление микровзрыва вызвано разницей летучести между водой и базовым топливом. При попадании водотопливной эмульсии в камеру сгорания, капля воды перегревается за счет горячих газов и пламени. Перегрев жидкости, находящейся в термодинамически метастабильном состоянии, сохраняется до тех пор, пока внутри капли не происходит фазового превращения. Как только температура капли воды приближается к пределу перегрева, образуются пузырьки пара, быстрое испарение и, как следствие, микровзрывной распад перегретой жидкости с образованием множества более мелких вторичных капель. Взрывное распыление капель усиливает локальное перемешивание топлива с

воздухом в зоне сгорания, что приводит к более полному и эффективному сжиганию.

Существует способ взрывного вскипания перегретых водных струй в результате резкого снижения давления. Как правило, для воздействия на кинетику зарождения пара в рабочую жидкость вводят различные добавки или вносят изменение геометрических условий потока. В работах [4, 5] экспериментально исследована динамика вскипания двухкомпонентных перегретых жидкостей (раствор этанол–вода), истекающих через короткий канал. В исследованиях кинетика рождения пузырьков пара в перегретой жидкости связывается с частотой зародышеобразования, которая равна числу жизнеспособных пузырьков, образующихся в единице объема перегретой жидкости за единицу времени. Определяются соответствующие температурные зависимости зародышеобразования, например, для раствора вода–этанол. Выделяются несколько видов форм струи, соответствующих различным степеням перегрева и механизмам парообразования.

Механизмом инициации микровзрыва при истекании жидкости из распыляющей форсунки, может быть реализация псевдопластического механизма переноса импульса в жидкости в канале форсунки. В экспериментальных работах [6, 7] была установлена универсальная асимптотика вязкости конденсированных при скоростях деформации  $\dot{\epsilon} > 10^5 \text{ s}^{-1}$ , связанная с возможностью реализации «дислокационных механизмов» переноса импульса. В работе [8] показано, что данные механизмы реализуются при проявлениях сдвиговой упругости в жидкостях при частотах воздействия  $10^5\text{--}10^6 \text{ Гц}$ , то есть временах на 5–6 порядков больше времени самодиффузии. В последующем в экспериментальных работах [9–11] по ударно-волновому нагружению жидкостей методом электрического взрыва проводника был установлен неньютоновский (псевдопластический) механизм

переноса импульса в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\epsilon} > 10^5 \div 10^7 \text{ с}^{-1}$ .

Проявлением псевдопластического механизма переноса импульса может быть явление гидролюминесценции [12]. Под гидролюминесценцией понимается эффект свечения жидкостей при течении их в узком канале. В жидкости, протекающей в узком канале со скоростью, позволяющей достичь скорости деформации в пристеночной области  $\dot{\epsilon} > 10^4 \div 10^6 \text{ с}^{-1}$ , реализуются локализованные сдвиги (ассоциируемые со скольжением групп молекул относительно групп молекул), проявлением которых может быть явление гидролюминесценции. На выходе из канала в жидкости образуется множество мелких пузырьков (кавитация) за счет сдвиговых разрывов в жидкости вследствие реализации псевдопластического механизма переноса импульса.

Данная работа посвящена исследованию явления гидро- и сонолюминесценции, установлению пороговых значений возникновения свечения, регистрации исследуемых явлений с помощью высокоскоростной видеокамеры и фотоумножителя, с последующей статистической обработкой.

Условно выделяют два явления: гидролюминесценцию (ГЛ) и сонолюминесценцию (СЛ). Механизм ГЛ существенным образом зависит от наличия стенок канала, чем больше диаметр узкого канала, тем большую скорость протекания жидкости необходимо создать, чтобы зафиксировать свечение в пристеночных зонах [13]. Эмиссия света при СЛ происходит при схлопывании кавитационных пузырьков, вызванных гидродинамическими эффектами. Обсуждаются две основные теории возникновения ГЛ и СЛ – «тепловая» и «электрическая». В основе «тепловой» теории лежит предположение, что источником свечения является образовавшийся плазменный сгусток со средней температурой  $10^4 \text{ К}$  [14].

В работах [15] при исследовании люминесценции индустриального масла, был зафиксирован

спектр ГЛ, включающий в себя полосчатый спектр, соответствующий свечению азота, присутствующего в жидкости в виде растворенного воздуха, и сплошной – собственный спектр ГЛ. Анализ показал несоответствие спектра ГЛ «планковской» кривой излучения абсолютно черного тела, следовательно, ГЛ не является тепловым излучением. Зафиксировано, что максимум сплошного спектра ГЛ лежит 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.

В работе [16] сформулирована теория локальной электризации кавитационных пузырьков. В жидкостях у поверхности раздела с кавитационным пузырьком образуется двойной электрический слой, включающий в себя плотный неподвижный слой и удаленный подвижный диффузионный слой. В акустических потоках кавитационные пузырьки деформируются, расщепляются, удаленная подвижная часть двойного электрического слоя «смывается»; возникает нескомпенсированный электрический заряд, что приводит к электрическому пробое и возникновению свечения (СЛ).

## 2. Экспериментальная часть

Исследования явлений ГЛ и СЛ осуществлялись на оригинальной установке [17], схема которой представлена на рис. 1; где цифрами показано: 1 – рабочий канал диаметром  $0.6 (\pm 10\%) \text{ мм}$  и длиной  $5 \text{ мм}$ ; 2 – высокоскоростная видеокамера Photron Fastcam SA-Z Model 2100 K или фотоумножитель Hamamatsu H6779, подключенный к осциллографу Tektronix DPO 7254 для регистрации и наблюдения явлений ГЛ и СЛ; 3 – запорный вен-

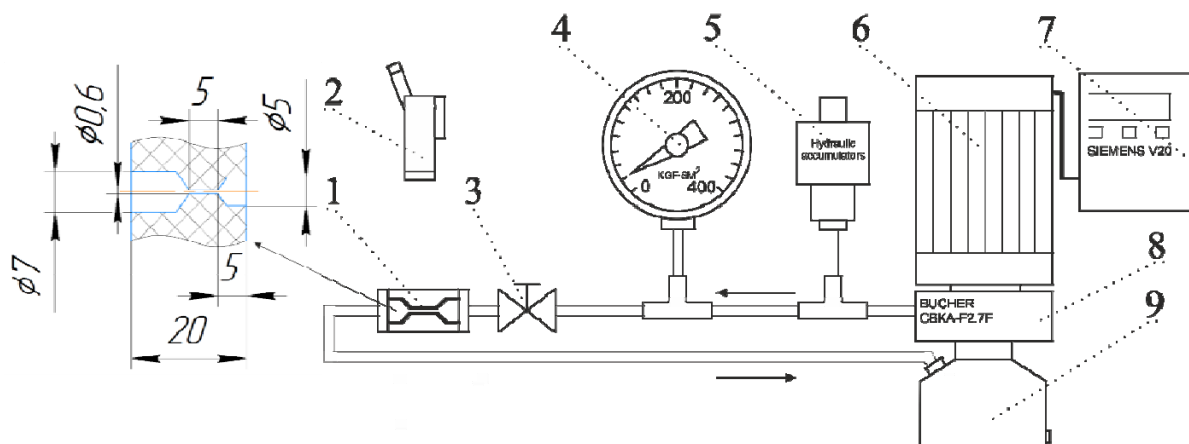


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования явлений ГЛ и СЛ

тиль; 4 – манометр; 5 – гидроаккумулятор; 6 – асинхронный электродвигатель; 7 – частотный регулятор; 8 – шестеренчатый гидравлический насос высокого давления (до 210 атм); 9 – бак с маслом. Регистрация явлений ГЛ и СЛ осуществлялась на гидравлическом масле MOBIL DTE-25 (динамическая вязкость  $\eta = 0.04$  Па·с) в диапазоне градиентов давления  $\nabla P \sim 0,7 \div 5$  ГПа/м, скорость деформации в приграничных слоях  $\dot{\epsilon} > 10^4 \div 10^6$  с<sup>-1</sup>.

Видеокадр наблюдения явления ГЛ и СЛ, полученный с помощью высокоскоростной камеры, показан на рис. 2. В узком канале наблюдается менее интенсивное свечение – ГЛ. При выходе жидкости из узкого канала в диффузор наблюдается явление СЛ (за счет образования и схлопывания кавитационных пузырей).

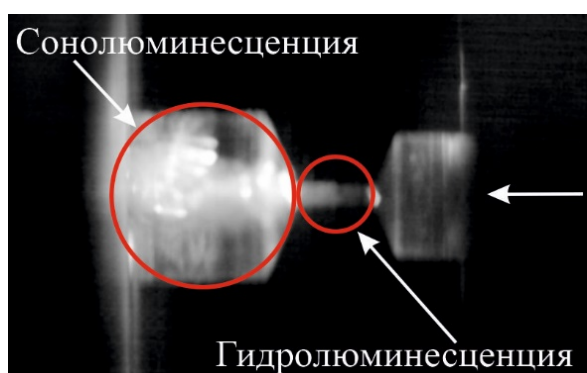


Рис. 2. Наблюдение развитой ГЛ в канале и СЛ при выходе жидкости в диффузор ( $\nabla P \sim 5$  ГПа/м)

На рис. 3 представлена зависимость частоты событий, регистрируемых с помощью фотоумножителя, от скорости деформации в канале, которая иллюстрирует резкое увеличение интенсивности ГЛ при пороговых значениях скорости деформации  $\dot{\epsilon} \sim 10^5$  с<sup>-1</sup> ( $\nabla P \sim 1.2$  ГПа/м,  $Re \sim 1350$ ).

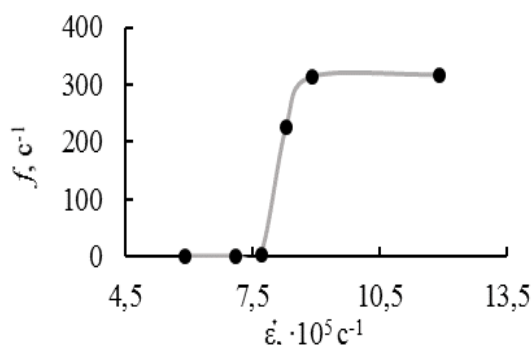


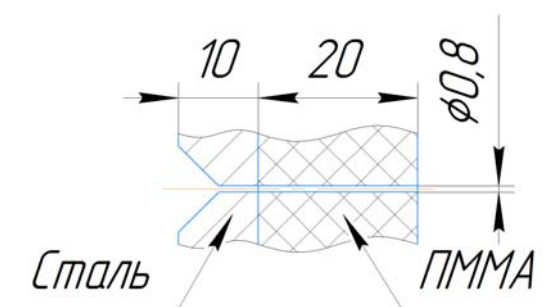
Рис. 3. Зависимость числа событий ГЛ и СЛ, регистрируемых фотоумножителем, от скорости деформации в канале

Скорость деформации оценивалась по формуле  $\dot{\epsilon} = dV / dr$ , где  $r$  – радиус канала (м), с учетом параболического профиля скорости  $V = V_{max}(1 - (r/R)^2)$ , максимальная скорость потока жидкости в центре

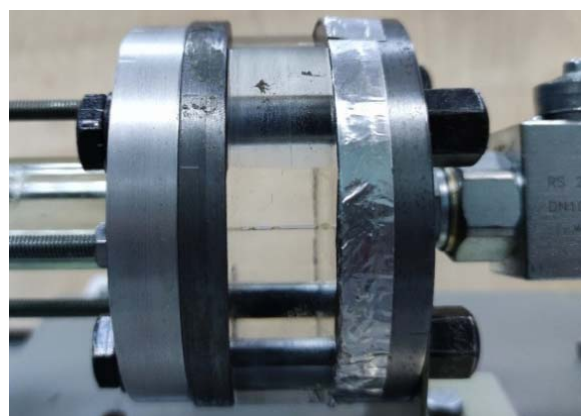
трубы определялась как  $V_{max} = Q/S$ , где  $S$  – сечение канала, м<sup>2</sup>,  $Q$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/с. Расход жидкости оценивался по производительности шестеренчатого насоса – 2.7 мл/об.

Резкое увеличение интенсивности гидролюминесценции связывается с изменениями в механизмах переноса импульса и диссипации, обусловленными возникновением коллективных мод локализованного сдвига. «Критический» характер такого перехода характеризуется резким изменением диссипативных свойств жидкости, проявлением которых является ГЛ при достижении пороговых значений скоростей деформации  $\dot{\epsilon} \sim 10^5$  с<sup>-1</sup> в пристеночном сдвиговом слое [9, 12].

С целью разделения явлений ГЛ в узком канале и СЛ в области расширения измерительная ячейка была изменена. Геометрия и внешний вид модернизированной измерительной ячейки показаны на рис. 4, а и б, соответственно. Рабочий канал диаметром  $0.8 (\pm 10\%)$  мм и длиной 20 мм выполнен из прозрачного пластика (ПММА), область расширения отделена стальным фланцем.



а)



б)

Рис. 4. Геометрия модернизированной измерительной ячейки (а); внешний вид измерительной ячейки (б)

В последующем была произведена статистическая обработка данных с фотоумножителя для экспериментов при развитой ГЛ до и после модернизации измерительной ячейки. Запись сигналов осуществлялась с частотой дискретизации  $50 \div 100$  МГц.

### 3. Статистическая обработка сигналов ГЛ и СЛ

Обработка сигналов ГЛ и СЛ заключалась в детектировании событий, исследовании распределений амплитуд импульсов и времени между импульсами. На рис. 5 показаны результаты статистической обработки сигналов ГЛ и СЛ, полученных с помощью фотоумножителя, до и после модернизации измерительной ячейки. Запись сигналов осуществлялась с частотой дискретизации  $50 \div 100$  МГц. Анализ функции распределения амплитуд сигналов показал, что на модернизированной измерительной ячейке амплитуда сигналов значительно меньше, чем на исходной (рис. 5, а). Следовательно, энергия свечения СЛ значительно выше, чем свечения ГЛ. Функция распределения временных интервалов между импульсами отличается незначительно в экспериментах до и после модернизации (рис. 5, 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. 6, а).

Временные интервалы между событиями для экспериментов, проведенных на исходной и на модернизированной измерительной ячейке, распределены по экспоненциальному закону (рис. 6, б). На графиках отчетливо видно совпадение между наблюдаемым и экспоненциальным распределением, кроме эксперимента, проведенного на исходной измерительной ячейке, где наблюдаются незначительные отклонения.

В работах [18, 19] для прогнозирования вероятности возникновения микровзрыва было использовано распределение Вейбулла, которое выведено математически из модели разрушения слабейшего звена и используется при анализе надежности [20]. Модель предполагает, что система состоит из цепочки звеньев и разрушается в целом при разрушении одного из звеньев. Скорость начала микровзрыва  $J(\tau)$ , функция распределения времени ожидания начала микровзрыва  $F(\tau)$  и функция плотности вероятности  $f(\tau)$  выражается следующим соотношениями:

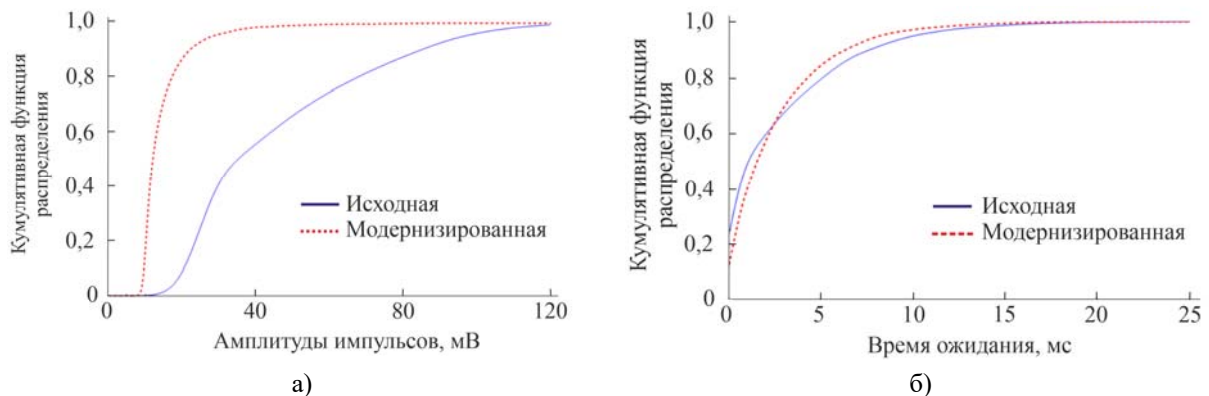


Рис. 5. Функции распределения амплитуд импульсов (а) и распределения временных интервалов между импульсами (б), полученных с помощью фотоумножителя на исходной измерительной ячейке и модернизированной

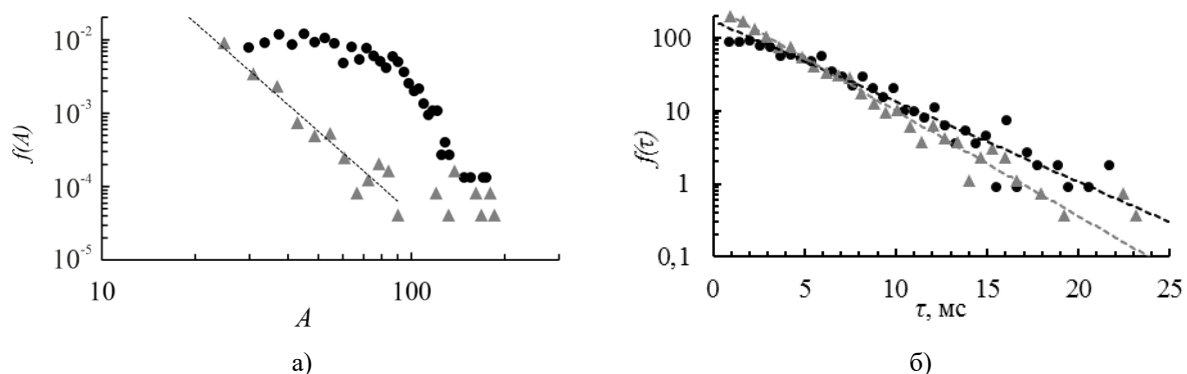


Рис. 6. Функция плотности вероятности распределения амплитуд сигналов ГЛ и СЛ для испытаний на исходной измерительной ячейке – распределение Вейбулла (●) и после модернизации измерительной ячейки – степенное распределение (▲) (а); функция плотности вероятности распределения временных интервалов между последующими сигналами для испытаний на исходной измерительной ячейке – экспоненциальное распределение (●) и модернизированной измерительной ячейке – экспоненциальное распределение (▲) (б)

$$J(\tau) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \left(\frac{\tau}{\alpha}\right)^{\beta-1},$$

$$F(\tau) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\tau}{\alpha}\right)^{\beta}\right],$$

$$f(\tau) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \left(\frac{\tau}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{\tau}{\alpha}\right)^{\beta}\right],$$

где  $\tau$  – время,  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры распределения.

Распределение Вейбулла подразделяется на три типа в зависимости от значения параметра формы  $\beta$ .

1. Ранний отказ ( $\beta < 1$ ): зарождение вызвано внутренним фактором, и скорость зародышеобразования снижается со временем;
2. Случайный отказ ( $\beta = 1$ ): зарождение вызвано случайным фактором, и скорость зародышеобразования не зависит от времени;
3. Износ ( $\beta > 1$ ): скорость зародышеобразования увеличивается со временем.

Для процесса в установившемся состоянии, а именно процесса в режиме случайного отказа ( $\beta = 1$ ), распределение Вэйбулла принимает вид экспоненциального распределения:

$$J = \frac{1}{\alpha},$$

$$F(\tau) = 1 - \exp\left[-\frac{\tau}{\alpha}\right],$$

$$f(\tau) = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \exp\left[-\left(\frac{\tau}{\alpha}\right)\right].$$

Масштабный параметр  $\alpha$  эквивалентен среднему времени ожидания начала микровзрыва. Время ожидания, известное в теории горения как «время индукции», определяется как период времени между моментом достижения эмульсией асимптотической установившейся температуры и моментом микровзрыва.

Вероятность начала микровзрыва при горении эмульгированной топливной капли обсуждалась с помощью предложенной статистической модели в работах [21, 22]. Было установлено, что время ожидания начала микровзрыва в начальный период нагрева коррелирует с распределением Вейбулла (коэффициент  $\beta \sim 2$ ), скорость начала микровзрыва зависит от скорости нагрева капли [21], гравитации и микрогравитации [22]. При достижении постоянной температуры, время ожидания начала микровзрыва соответствует распределению Вэйбулла с коэффициентом  $\beta = 1$ , скорость начала микровзрыва не зависит от внешних факторов: скорости нагрева капли, гравитации и микрогравитации.

Соответствие функции распределения времени ожидания между сигналами ГЛ и СЛ экспоненциальному распределению, указывает на то, что явления ГЛ и СЛ классифицируются как случайный

тип отказа. Масштабный параметр  $\alpha$  определяется как среднее время ожидания между сигналами ГЛ и СЛ, и равен  $\alpha = 2.5 \cdot 10^{-3}$  с для эксперимента на исходной измерительной ячейке;  $\alpha = 2.45 \cdot 10^{-3}$  с для эксперимента на модернизированной измерительной ячейке.

Полученный результат согласуется с теорией, предложенной в [16], предполагающей, что кавитационный пузырек какое-то время пульсирует в акустических потоках, а после деформируется, расщепляется или коллапсирует, что ведет к образованию некомпенсированного электрического заряда и, как следствие, свечения в результате электрического пробоя. Соответствие экспоненциальному распределению указывает, что процесс стабильный и не зависит от внешних факторов.

## 4. Заключение

Экспериментальные исследования ГЛ и СЛ установили пороговые значения градиента давления в узком канале возникновения ГЛ. Значения скоростей деформации носят универсальный характер и лежат в диапазоне  $\dot{\epsilon} \sim 10^4 \div 10^6 \text{ с}^{-1}$ . Полученные значения пороговой скорости деформации возникновения ГЛ согласуются с результатами, полученными авторами [13].

Предложенная конструкция измерительной ячейки позволила разделить явление ГЛ в узком канале и явление СЛ при выходе жидкости в диффузор. Статистический анализ амплитуд сигналов ГЛ и СЛ, полученных с помощью фотоумножителя, показал качественные различия явления ГЛ, наблюдаемого непосредственно при протекании жидкости в узком канале и явления СЛ, наблюдаемого при выходе жидкости в диффузор и соответственно резкого падения давления.

Явление ГЛ может быть объяснено изменением механизма переноса импульса и диссипации при достижении скоростей сдвига в приграничном слое  $\dot{\epsilon} > 10^4 \div 10^6 \text{ с}^{-1}$ , обусловленными возникновением зон локализованного сдвига, аналогичных зонам пластического сдвига в твердых телах [9–12]. Явление СЛ вызвано деформацией, расщеплением, коллапсом кавитационных пузырьков [16].

Статистический анализ интервалов времени между последующими сигналами ГЛ и СЛ показывает, что они подчиняются экспоненциальному распределению, аналогичному статистическим законам в моделях разрушения на основе распределения Вейбулла. В предельном случае модели разрушения, соответствующего концепции наиболее слабого звена, распределение Вейбулла принимает вид экспоненциального распределения (при  $\beta = 1$ ), и можно предположить, что явления ГЛ и СЛ классифицируются как случайный процесс с «масштабным параметром»  $\alpha$ , определяемым как среднее время ожидания между сигналами ГЛ и СЛ.



Полученные результаты могут иметь практическое приложение при проектировании топливных форсунок. Диаметр фильеры форсунки и скорость потока в ее канале должны достигать скорости деформации в приграничных слоях  $\dot{\epsilon} > 10^5 \text{ с}^{-1}$ , длина канала должна быть соизмерима с временем прохождения топливной смеси  $\sim 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , в соответствии с временем инкубации явлений ГЛ и СЛ. В жидком топливе реализуется псевдопластический механизм переноса импульса в пограничном слое в узком канале фильеры форсунки со скоростью деформации  $\dot{\epsilon} > 10^5 \text{ с}^{-1}$ , проявлением которого является ГЛ. При выходе топлива из форсунки в камеру сгорания, вследствие падения давления, интенсивно образуются кавитационные пузырьки (микровзрывы) за счет сдвиговых разрывов в жидкости (центров ГЛ). Данный способ позволяет инициировать кавитационные пузырьки (микровзрывы) как в базовом топливе, так и в различных топливных смесях и топливных эмульсиях.

В дальнейшем планируются дополнительные исследования явлений ГЛ и СЛ на различных жидкостях (керосин, вода, додекан и др.), с помощью двухконтурной экспериментальной установки [23], позволяющей исследовать различные технические жидкости без ущерба да шестеренчатого насоса высокого давления.

Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер темы 124020200116-1.

## Список литературы

1. *Shlegel N., Strizhak P., Tarlet D., Bellettre J.* Comparing the integral characteristics of secondary droplet atomization under different situations // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 108, 104329. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104329
2. *Федоренко Р. М., Антонов Д. В., Стрижак П. А.* Влияние температуры двухжидкостных капель на характеристики вторичных фрагментов при микровзрывном распаде // *Горение и взрыв*. 2024. Т. 17, № 2. С. 43–54. DOI: 10.30826/CE24170206
3. *Антонов Д. В., Зубрилин И. А., Сажин С. С., Скрипов П. В., Стрижак П. А., Яновский Л. С.* Моделирование микровзрывного распада двухжидкостных капель // *Многофазные системы*. 2023. Т. 18, № 3. С. 213–215. DOI: 10.21662/mfs2023.3.061
4. *Решетников А. В., Мажейко Н. А., Виноградов А. В., Бусов К. А., Коверда В. П.* Динамические характеристики вскипающих струй перегретых водных растворов // *Теплоэнергетика*. 2010. № 8. С. 69–73
5. *Pavlenko A. N., Koverda V. P., Reshetnikov A. V., Surtaev A. S., Tsoi A. N., Mazheiko N. A., Busov K. A., Skokov V. N.* Disintegration of flows of superheated liquid films and jets // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2013. Vol. 22. № 3. P. 174–193.
6. *Сахаров 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. Т. 159, № 5. С. 1019–1022.
7. *Mineev V. N., Mineev A. V.* Viscosity of metals under shock-loading conditions // *J. Phys. IV France*. 1997. Vol. 7. P. 583–586.
8. *Derjagin B. V., Churaev N. V.* Nature of “anomalous water” // *Nature*. 1973. Vol. 244. P. 430–431.
9. *Наймарк О. Б.* О некоторых закономерностях скейлинга в пластичности, разрушении, турбулентности // *Физ. Мезомех*. 2015. Т. 18, № 3. С. 71–83.
10. *Банникова И. А., Уваров С. В., Баяндин Ю. В., Наймарк О. Б.* Экспериментальное исследование неньютоновских свойств воды в условиях электровзрывного нагружения // *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40, № 17. С. 87–93.
11. *Банникова И. А., Зубарева А. Н., Уткин А. В.* Импульсное сжатие и растяжение додекана и минеральных масел при ударно-волновом воздействии // *ЖТФ*. 2018. Т. 88, Вып. 4. С. 514–520. DOI: 10.21883/JTF.2018.04.45718.2446
12. *Naimark O. B., Uvarov S. V., Bannikova I. A., Efremov D. V., Bayandin Y. 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. DOI: 10.22226/2410-3535-2023-2-93-97
13. *Герценштейн С. Я., Монахов А. А.* Электризация и свечение жидкости в коаксиальном канале с диэлектрическими стенками // *Механика жидкости и газа*. 2009. № 3. С. 114–119.
14. *Колдамасов А. И.* Плазменное образование в кавитирующей диэлектрической жидкости // *ЖТФ*. 1991. Т. 61, Вып. 2. С. 188–190.
15. *Бирюков Д. А., Герасимов Д. Н., Синкевич О. А.* Измерение и анализ спектра гидролюминесценции // *Письма в ЖТФ*. 2012. Т. 38, вып. 2. С. 53–57.
16. *Маргулис М. А.* Сонолюминесценция // *Успехи физических наук*. 2000. Т. 170, № 3. С. 263–287.
17. *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. DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-6-36-41
18. *Kadota T., Yamasaki H.* Recent advances in the combustion of water fuel emulsion // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2002. Vol. 28. P. 385–404.
19. *Yamasaki H., Tsue M., Kadota T.* Evaporation and combustion of emulsified fuel: onset of microex-

- plosion // *JSME Int. J. B.* 1993. Vol. 36, № 4. P. 677–681. DOI: 10.1299/jsmeb.36.677
20. Weibull W. *A Statistical Theory of the Strength of Materials*. Stockholm: Generalstabens litografiska anstalts förlag, 1939. 45 p.
  21. Tsue M., Kadota T., Segawa D. Statistical analysis on onset of microexplosion for an emulsion droplet // *Proc. of Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*. 1996. P. 1629–1635.
  22. Tsue M., Yamasaki H., Kadota T., Segawa D. Effect of gravity on onset of microexplosion for an oil-in-water emulsion droplet // *Proc. of Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion*, 1998. P. 2587–2593.
  23. 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.
- ### References
1. Shlegel N, Strizhak P., Tarlet D., Bellettre J. Comparing the integral characteristics of secondary droplet atomization under different situations. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 108, 104329. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104329
  2. Fedorenko R. M., Antonov D. V., Strizhak P. A. Effect of temperature of two-liquid droplets on the characteristics of secondary fragments during microexplosive decomposition. *Combustion and Explosion*, 2024, vol. 17, no. 2, pp. 43–54. DOI: 10.30826/CE24170206 (In Russian).
  3. Antonov D. V., Zubrilin I. A., Sazhin S. S., Skripov P. V., Strizhak P. A., Yanovsky L. S. Modeling of microexplosive disintegration of two-liquid droplets. *Multiphase Systems*, 2023, vol. 18, no. 3, pp. 213–215. DOI: 10.21662/mfs2023.3.061 (In Russian).
  4. Reshetnikov A. V., Mazheiko N. A., Vinogradov A. V., Busov K. A., Koverda V. P. Dynamic characteristics of boiling jets of superheated aqueous solutions. *Thermal Engineering*, 2010, no. 8, pp. 69–73. (In Russian).
  5. Pavlenko A. N., Koverda V. P., Reshetnikov A. V., Surtaev A. S., Tsoi A. N., Mazheiko N. A., Busov K. A., Skokov V. N. Disintegration of flows of superheated liquid films and jets. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, vol. 22, no. 3, pp. 174–193.
  6. Sakharov A. D., Zaidel R. M., Mineev V. N., Oleynik A. G. Experimental study of the stability of shock waves and mechanical properties of matter at high pressures and temperatures. *Doklady AN SSSR*, 1964, vol. 159, no. 5, pp. 1019–1022. (In Russian).
  7. Mineev V. N., Mineev A. V. Viscosity of metals under shock-loading conditions. *J. Phys. IV France*, 1997, vol. 7, pp. 583–586
  8. Derjagin B. V., Churaev N. V. Nature of “Anomalous Water”. *Nature*, 1973, vol. 244, pp. 430–431
  9. Naimark O. B. Some regularities of scaling in plasticity, fracture, and turbulence. *Physical Mechanics*, 2016, vol. 19, pp. 307–318.
  10. Bannikova I. A., Uvarov S. V., Bayandin Yu. V., Naimark O. B. An experimental study of non-Newtonian properties of water under electroexplosive loading. *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40, pp. 766–768.
  11. Bannikova I. A., Zubareva A. N., Utkin A. V. Shock wave pulse compression and stretching of dodecane and mineral oils. *Technical Physics*, 2018, vol. 88, Issue 4, pp. 514–520. DOI: 10.21883/JTF.2018.04.45718.2446.
  12. Naimark O. B., Uvarov S. V., Bannikova I. A., Efremov D. V., Bayandin Y. V., Dezhkunov N. V. Localized shear as a quasi-plastic mechanism of momentum transfer in liquids. *Letters on Materials*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 93–97. DOI: 10.22226/2410-3535-2023-2-93-97
  13. Gertsenshtein S. Ya., Monakhov A. A. Electrification and glow of liquid in a coaxial channel with dielectric walls. *Mechanics of Liquid and Gas*, 2009, no. 3, pp. 114–119 (In Russian).
  14. Koldamasov A. I. Plasma formation in a cavitating dielectric liquid. *Technical Physics*, 1991, vol. 61, no. 2, pp. 188–190. (In Russian).
  15. Biryukov D. A., Gerasimov D. N., Sinkevich O. A. Measurement and analysis of the hydroluminescence spectrum. *Technical Physics Letters*, 2012, vol. 38, no. 2, pp. 53–57. (In Russian).
  16. Margulis M. A. Sonoluminescence. *Phys. Usp.*, 2000, vol. 170, no. 3, pp. 263–287. (In Russian).
  17. Efremov D. V., Uvarov S. V., Dezhkunov N. V., Naimark O. B. Study of the stages of cavitation development in channels based on hydro- and sonoluminescence measurements. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2024, vol. 90, no. 6, pp. 36–41. DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-6-36-41. (In Russian).
  18. Kadota T., Yamasaki H. Recent advances in the combustion of water fuel emulsion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2002, vol. 28, pp. 385–404
  19. Yamasaki H., Tsue M., Kadota T. Evaporation and combustion of emulsified fuel: onset of microexplosion. *JSME Int. J. B.* 1993, vol. 36, no. 4, pp. 677–681. DOI: 10.1299/jsmeb.36.677
  20. Weibull W. *A Statistical Theory of the Strength of Materials*. Stockholm: Generalstabens litografiska anstalts förlag, 1939. 45 p.
  21. Tsue M., Kadota T., Segawa D. Statistical analysis on onset of microexplosion for an emulsion droplet. *Proc. of Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, 1996, pp. 1629–1635



22. Tsue M., Yamasaki H., Kadota T., Segawa D. Effect of gravity on onset of microexplosion for an oil-in-water emulsion droplet. *Proc. of Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion*, 1998, pp. 2587–2593
23. Efremov D. V., Uvarov S. V., Bannikova I. A., Naimark O. B. Method for studying cavitation phenomena in process fluids and a stand for its implementation. RU Patent No. 2796207 dated 09 Dec 2022.

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Ефремов Д. В., Уваров С. В., Наймарк О. Б. Экспериментальное исследование механизмов гидро- и сонолюминесценции и инициирования микровзрывного распыления топлива // Вестник Пермского университета. Физика. 2025. № 3. С. 34–42. doi: 10.17072/1994-3598-2025-3-34-42

**Please cite this article in English as:**

Efremov D. V., Uvarov S. V., Naimark O. B. An experimental study into the mechanisms of hydro- and sonoluminescence and initiation of microexplosive fuel atomization. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2025, no. 3, pp. 34–42. doi: 10.17072/1994-3598-2025-3-34-42

**Сведения об авторах**

1. *Ефремов Денис Викторович*, младший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, ул. Академика Королева, д.1, г. Пермь, 614068
2. *Уваров Сергей Витальевич*, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, д.1, г. Пермь, 614068
3. *Наймарк Олег Борисович*, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией Физических основ прочности, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, д.1, г. Пермь, 614013

**Author information**

1. *Denis V. Efremov*, Junior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia
2. *Sergey V. Uvarov*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia
3. *Oleg B. Naimark*, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Physical Foundations of Strength, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia