

03.1

## Стадийность развития люминесценции при интенсивных течениях жидкостей

© С.В. Уваров<sup>1</sup>, Н.В. Дежкунов<sup>2</sup>, О.Б. Наймарк<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия<sup>2</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

E-mail: usv@icmm.ru

Поступило в Редакцию 26 октября 2023 г.

В окончательной редакции 10 ноября 2023 г.

Принято к публикации 12 ноября 2023 г.

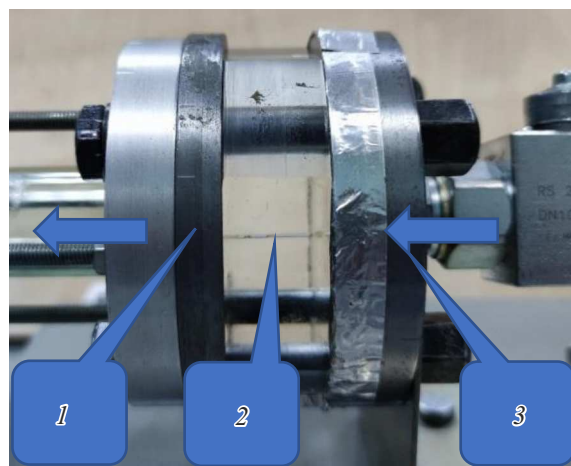
Установлены две стадии развития люминесценции при интенсивных течениях гидравлического масла в узком канале: предвестник и последующий основной импульс свечения. Стадии люминесценции связываются со щелевыми состояниями (gapped momentum states, GMS) при формировании коллективных мод локализованного сдвига.

**Ключевые слова:** гидролюминесценция, стадийность, локализованные сдвиги, GMS (щелевая) динамика, релаксационные свойства жидкостей.

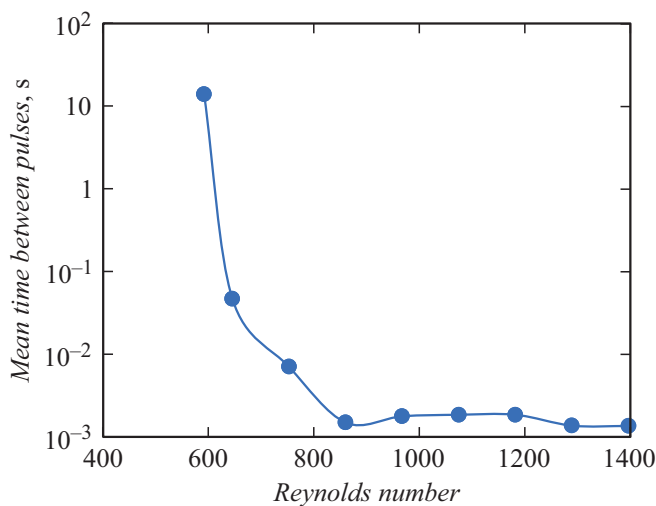
DOI: 10.61011/PJTF.2024.04.57094.19782

Люминесценция при интенсивных течениях жидкостей может служить источником дополнительной информации о механизмах переноса импульса и диссипации энергии в конденсированных средах. В [1,2] отмечалось, что жидкости, являясь конденсированными средами, могут обнаруживать сдвиговую упругость и механизмы переноса импульса, подобные механизмам пластичности, при формировании локализованных сдвигов. Это сопровождается качественным изменением дисперсионных свойств, спектром времен релаксации (времен Френкеля), определяющих „щелевые состояния“ (gapped momentum states, GMS [3]). Люминесценция, вызванная гидродинамической неустойчивостью течения жидкости (гидролюминесценция, ГЛ), наблюдалась в [1,2]. Импульсный характер люминесценции при наличии интенсивной кавитации отмечался в [3,4], были получены распределения импульсов по амплитудам и времени нарастания. Настоящая работа посвящена исследованию ГЛ при относительно малых расходах, когда кавитационные эффекты не являются доминирующими. Экспериментальная установка аналогична установке, предложенной в [4], за исключением конструкции измерительной ячейки (рис. 1). ГЛ исследовалась в масле (Mobil DTE25, класс вязкости ISO VG 46). Свечение наблюдалось в канале диаметром 1 mm и длиной 20 mm, выполненном в центре пластины из полиметилметакрилата (ПММА) диаметром 100 mm (2 на рис. 1), с использованием фотоумножителя Hamamatsu H6779 с диапазоном чувствительности 300–650 nm и временем нарастания импульса 0.78 ns. Фотоумножитель был закреплен непосредственно на пластине с каналом, которая была оклеена по периметру алюминиевым скотчем (на рис. 1 не представлен, чтобы показать канал), за исключением окна для фотоумножителя. Расстояние от канала до фотоумножителя определяется диаметром пластины и

составляет 49.5 mm. В отличие от установки [5] область расширения за каналом была экранирована стальным фланцем (1 на рис. 1) с диаметром отверстия также 1 mm и длиной цилиндрической части 3 mm, чтобы отсечь люминесценцию в области расширения за каналом с существенным вкладом кавитации. При сборке каналы в фланце и пластине из ПММА совмещались при помощи калибра диаметром 1 mm. Сигнал с фотоумножителя регистрировался цифровым осциллографом Tektronix с полосой пропускания 6 GHz, оснащенным активными щупами с полосой пропускания 3 GHz. Чувствительность фотоумножителя позволила регистрировать импульсы при малых расходах, когда свечение не обнаруживалось видеокамерой FASTCAM SA-Z, так как камера имеет ограничение снизу на частоту кадров 1 kHz и выдержки недостаточно для обнаружения свечения. Среднее время между импульсами при малых



**Рис. 1.** Конструкция измерительной ячейки. 1 — выходной фланец, 2 — измерительный канал, 3 — входной фланец.



**Рис. 2.** Средний интервал следования импульсов в зависимости от числа Рейнольдса.

расходах составляло более 10 с (рис. 2). При малых расходах (число Рейнольдса  $Re < 650$ ) импульсы ГЛ имеют малую и практически одинаковую амплитуду ( $12 \pm 1$  мВ) и длительность (рис. 3, *a*) и возникают относительно редко (рис. 2). Средняя интенсивность излучения настолько мала, что оно не регистрируется видеокамерой.

Но так как импульсы достаточно короткие, пиковая интенсивность свечения достаточна для обнаружения их быстродействующим фотоумножителем. При нулевых расходах импульсы не регистрировались в течение как минимум 10 мин, что исключает иную природу возникновения импульсов.

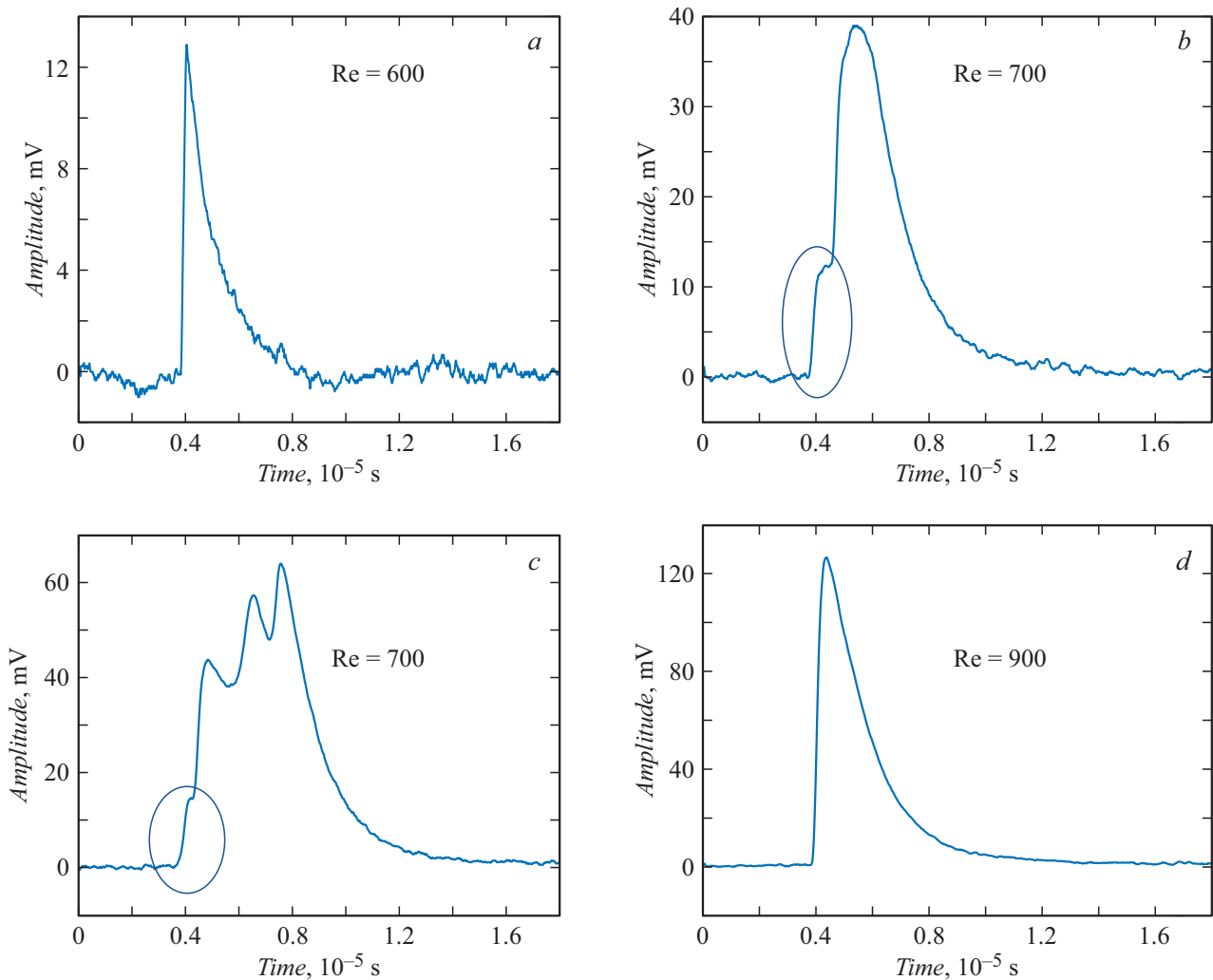
Установлено, что по мере увеличения расхода жидкости частота следования импульсов возрастает, меняется их форма и пиковая амплитуда, и свечение уже регистрируется обычными способами. При этом при средних ( $Re = 800$ ) расходах оно локализовано ближе к входной кромке канала и затем, при числах Рейнольдса более 900, наблюдается во всем канале. После достижения определенного расхода ( $Re \sim 900$ ) средняя частота следования импульсов выходит на плато (рис. 2) и интенсивность свечения в основном растет за счет увеличения энергии импульсов.

На переходном этапе можно выделить две стадии развития: импульс-предвестник, имеющий ту же амплитуду  $12 \pm 1$  мВ, что и импульс при малых расходах (рис. 3, *b*), и основной импульс. Формирование основного импульса на этом этапе еще неустойчиво. Он может возникнуть через 10–100 нс после предвестника и иметь достаточно сложный профиль (рис. 3, *c*). На рис. 3, *c* представлена только одна осциллограмма. В экспериментах наблюдались различные варианты эволюции свечения. Но в каждом случае вначале был импульс-предвестник и за ним наблюдалось развитие более мощного свечения. На развитой стадии ГЛ, когда свечение видно невооруженным

глазом, импульсы имеют значительно ббольшую амплитуду (на порядок ббольшую, чем амплитуда импульсов-предвестников), и на этом этапе уже невозможно выделить предвестник (рис. 3, *d*). Амплитуда импульсов на этой стадии значительно варьируется в отличие от практически постоянной амплитуды импульсов при малых расходах, и распределение импульсов по амплитуде аналогично, полученному в [5]. Одинаковые формы и длительности импульсов-предвестников и импульсов свечения при больших расходах, по-видимому, связаны с постоянной времени, определяемой паразитной емкостью фотоумножителя и входным сопротивлением активного щупа. Истинная длительность импульсов может быть значительно меньше. В дальнейшем планируется уменьшить сопротивление и повторить эксперименты.

Рейнольдс обращал внимание на то, что неньютоновское поведение простых жидкостей при сдвиговом течении может быть связано с неравновесной вязкоупругой реакцией с соответствующим спектром времен релаксации [6]. Это позволяет сделать вывод о возможности появления в жидкостях как конденсированных средах спектрального диапазона, соответствующего временам релаксации  $\tau \sim 10^{-5}$  с, при реализации коллективного сдвига молекулярных групп в присутствии упругих сдвиговых напряжений [7]. Коллективные эффекты такого взаимодействия аналогичны сценариям формирования мод локализованного сдвига при пластической деформации и могут сопровождаться диссипативными эффектами (в частности, люминесценцией) в соответствии с установленными типами коллективных мод (автосоли-тонные и обостряющиеся), ответственными за эффекты гидро- и сонолюминесценции и условия инициирования кавитации [8]. Условия протекания жидкости в узком канале (высокая интенсивность сдвиговой деформации в пограничном слое) способствуют формированию очага кавитации в виде области локализованного сдвига, в которой возможна локальная электризация [9].

Проведенные исследования, основанные на регистрации люминесценции при интенсивных течениях жидкости, позволили установить стадийность развития люминесценции: формирование предвестника, соответствующего малоамплитудным сигналам, и основного импульса с амплитудой, на порядок превышающей амплитуду импульса предвестников. Стадийность люминесценции связывается с формированием коллективных мод сдвига, резким изменением спектра времен релаксации, соответствующего GMS (щелевым) состояниям, определяющим качественно новые механизмы переноса импульса и диссипации энергии [3]. При малых расходах происходит формирование очага кавитации в виде области локализованного сдвига фиксированного размера, в которой возможна локальная электризация [9], приводящая к свечению до стадии схлопывания. Это объясняет постоянство амплитуды и длительности импульсов при малых расходах. При дальнейшем увеличении расхода жидкости через канал эти области становятся очагами



**Рис. 3.** Импульсы гидролюминесценции при различных числах Рейнольдса. Овалом выделена начальная стадия, по амплитуде равная импульсам при малых расходах.

развития кавитационных пузырьков, „схлопывание“ которых формирует выраженные очаги люминесценции. Следовательно, стадийность развития люминесценции можно объяснить стадийностью развития самого кавитационного пузырька. На первой стадии образуется зародыш, в котором вследствие локальной электризации генерируется начальный импульс свечения, а затем на месте зародыша образуется уже развитый кавитационный пузырек, генерирующий более мощный импульс свечения.

В дальнейших исследованиях планируется оценить влияние температуры на характер ГЛ при малых расходах, проверить термоактивационную природу формирования областей микродвига, а также изучить спектр излучения с целью выявления возможных различий между стадиями люминесценции. Также планируется более детально исследовать пространственное распределение свечения в жидкости, чтобы разделить свечение, вызванное образованием дефектов в жидкости, и возможное свечение, вызванное электрическим пробоем

в пристеночной области, связанное с электризацией стенок канала.

### Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/562 от 23 марта 2021 г.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Я.И. Френкель, *Кинетическая теория жидкостей* (Наука, Л., 1975).
- [2] О.Б. Наймарк, Письма в ЖТФ, **23** (13), 81 (1997). [O.B. Naimark, Tech. Phys. Lett., **23** (7), 529 (1997). DOI: 10.1134/1.1261735].

- [3] O.B. Naimark, AIP Conf. Proc., **2509** (1), 020139 (2022). DOI: 10.1063/5.0085489
- [4] В.А. Константинов, Докл. АН СССР, **14**, 259 (1947).
- [5] D.A. Biryukov, D.N. Gerasimov, in *Triboluminescence: theory, synthesis, and application*, ed. by D.O. Olawale, O.O.I. Okoli, R.S. Fontenot, W.A. Hollerman (Springer, Cham, 2016), p. 95–123. DOI: 10.1007/978-3-319-38842-7\_5
- [6] D.J. Evans, H.J.M. Hanley, S. Hess, Phys. Today, **37** (1), 26 (1984). DOI: 10.1063/1.2916042
- [7] И.А. Банникова, С.В. Уваров, Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк, Письма в ЖТФ, **40** (17), 87 (2014). [I.A. Bannikova, S.V. Uvarov, Yu.V. Bayandin, O.B. Naimark, Tech. Phys. Lett., **40** (9), 766 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014090041].
- [8] M. Farhat, A. Chakravarty, J.E. Field, Proc. Roy. Soc. A, **467** (2126), 591606 (2011). DOI: 10.1098/rspa.2010.0134
- [9] М.А. Маргулис, И.М. Маргулис, ЖФХ, **81** (1), 136 (2007). [M.A. Margulis, I.M. Margulis, Russ. J. Phys. Chem., **81** (1), 129 (2007). DOI: 10.1134/S0036024407010232].