

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-6-36-41>

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАДИЙНОСТИ РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИИ В КАНАЛАХ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ГИДРО- И СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

© **Денис Викторович Ефремов^{1*}, Сергей Витальевич Уваров¹,
Николай Васильевич Дежкунов², Олег Борисович Наймарк¹**

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Россия, 614068, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1;
*e-mail: efremov.d@icmm.ru

² Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6.

*Статья поступила 13 октября 2023 г. Поступила после доработки 28 октября 2023 г.
Принята к публикации 20 марта 2024 г.*

Условия развития кавитации исследуют с использованием эффекта эмиссии света жидкостью при схлопывании кавитационных пузырьков. В работе представлены результаты исследования кавитации в технических жидкостях посредством регистрации гидро- и сонолюминесценции. Условия возникновения гидро- и сонолюминесценции анализировали применительно к геометрии узкого канала, при регистрации применяли высокоскоростную видеокамеру и фотоумножитель. Получены универсальные пороговые значения скорости деформации возникновения гидролюминесценции в диапазоне $10^5 - 10^6 \text{ с}^{-1}$, разработана методология для регистрации гидро- и сонолюминесценции в узких каналах для исследования стадийности развития кавитации. В разработанной экспериментальной установке контуры высокого давления разделялись на контур напора и измерительный контур. В контуре напора давление гидравлического масла создавалось с помощью шестеренчатого насоса. Посредством гидроцилиндра и подвижного поршня оно передавалось жидкости в измерительном контуре, которая далее пропусклась под давлением через узкий канал. Предложенная геометрия узкого канала давала возможность разделить явление гидролюминесценции в узком канале и сонолюминесценцию с последующей кавитацией при выходе жидкости в диффузор в результате падения давления. Конструкция установки и методология позволяли исследовать кавитационные эффекты для широкой номенклатуры технических жидкостей, в том числе агрессивных к материалам насосов высокого давления. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании средств комплексной диагностики смазываемых узлов трения по параметрам продуктов износа в масле, методов подавления акустических эффектов кавитации и др.

Ключевые слова: свечение жидкости; гидролюминесценция; сонолюминесценция; кавитация; течение жидкости в каналах.

STUDY OF THE STAGES OF CAVITATION DEVELOPMENT IN CHANNELS BASED ON HYDRO- AND SONOLUMINESCENCE MEASUREMENTS

© **Denis V. Efremov^{1*}, Sergey V. Uvarov¹, Nikolay V. Dezhkunov², Oleg B. Naimark¹**

¹ Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the RAS, 1, ul. Akademika Koroleva, Perm, 614013, Russia;
*e-mail: efremov.d@icmm.ru

² Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 6, ul. P. Brovki, Minsk, 220013, Belarus.

Received October 13, 2023. Revised October 28, 2023. Accepted March 20, 2024.

Conditions for the development of cavitation are studied using the effect of light emission from a liquid during the collapse of cavitation bubbles. The results of studying cavitation in technical fluids by record-

ing hydro- and sonoluminescence are presented. Conditions for the occurrence of hydro- and sonoluminescence were analyzed in relation to the geometry of a narrow channel; a high-speed video camera and a photomultiplier were used for recording. Universal threshold values for the strain rate of hydroluminescence in the range of $10^5 - 10^6 \text{ sec}^{-1}$ have been obtained, and a methodology has been developed for recording hydro- and sonoluminescence in narrow channels to study the stages of the cavitation development. The proposed experimental setup contained two high-pressure circuits, i.e., a pressure circuit and a measuring circuit. In the pressure circuit, hydraulic oil pressure was created using a gear pump. By means of a hydraulic cylinder and a movable piston, it was transmitted to the liquid in the measuring circuit, which was then passed under pressure through a narrow channel. The proposed geometry of a narrow channel provided separation of the phenomena of hydroluminescence in a narrow channel and sonoluminescence with subsequent cavitation when the liquid exits into the diffuser as a result of a pressure drop. The design of the setup and methodology made it possible to study cavitation effects in a wide range of technical fluids, including those that are aggressive to high-pressure pump materials. The results obtained can be used to improve the means of comprehensive diagnostics of lubricated friction units proceeding from the parameters of wear products in the oil, methods for suppressing the acoustic effects of cavitation, etc.

Keywords: liquid glow; hydroluminescence; sonoluminescence; cavitation; liquid flow in a narrow channel.

Введение

Под гидролюминесценцией (ГЛ) понимают эффект эмиссии света жидкостью, возникающий в интенсивных гидродинамических потоках. Помимо ГЛ, выделяют также сонолюминесценцию (СЛ).

В основе «тепловой» теории (наряду с так называемой «электрической»), описывающей данное явление, лежит предположение, что источник свечения — формирующийся плазменный ступок со средней температурой 10^4 K , необходимой для испускания излучения. Отметим, что эмиссия света при СЛ происходит при схлопывании кавитационных пузырьков, вызванных гидродинамическими эффектами. Механизм ГЛ, в отличие от СЛ, существенным образом зависит от наличия стенок канала [1 – 5].

В эксперименте с пропусканием масла через дросселирующее устройство в виде шайбы в узкой входной полосе проходного отверстия фиксировали гидродинамическую люминесценцию, состоящую из серии многочисленных вспышек [6]. Установка нихромовой струны через проходное отверстие показала наличие электрического потенциала при пропускании масла под давлением более 1 МПа. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют в пользу «электрической» теории возникновения ГЛ.

«Электрическую» теорию возникновения ГЛ подтверждают также результаты исследования течения диэлектрической жидкости в тонком составном коаксиальном канале [7]. Обнаружено, что при пропускании в качестве исследуемой жидкости минерального масла со скоростью потока $V = 2,5 \text{ м/с}$ на границе раздела области оргстекла возникает голубоватое свечение жидкости. Электромагнитное излучение, коррелирующее с образованием вспышек, фиксировали антенной. Очевидно, корреляция световых вспышек и электромагнитного излучения возможна при наличии электрических разрядов.

При пропускании под давлением индустриального масла через цилиндрическую трубку с узким участком диаметром 1 мм наблюдали сине-фиолетовое свечение жидкости, которое диагностировали спектрометром [8, 9]. Спектр свечения состоял из сплошного спектра — собственно спектра ГЛ и полос излучения азота, присутствие которого было обусловлено растворенным в масле воздухом. По полосам азота в спектре определяли параметры излучающей среды. Были определены колебательная ($T_{\text{vib}} = 4000 \text{ K}$) и вращательная ($T_{\text{rot}} = 300 \text{ K}$) температуры газа. По невысокой вращательной температуре заключили об электрической природе возбуждения ГЛ.

Однако тепловую версию механизма возникновения ГЛ также необходимо учитывать. Так, при подаче диэлектрической жидкости (удельное сопротивление выше $10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) под давлением до 7 МПа на вход дроссельного устройства, представляющего собой канал длиной 25 – 30 и диаметром 1 – 2 мм, с помощью регулировки частоты пульсации потока жидкости и давления в системе получали мощные резонансные колебания потока (частота — 5 кГц) [10]. На входной кромке по периметру дросселирующего канала фиксировали плазменное образование, по яркости напоминающее дуговой разряд. Наружный диаметр плазменного кольца достигал 6 мм, плотность энергии — 10^4 Дж/см^3 , средняя температура — 10^4 K . Плазменное образование имело высокий положительный потенциал (около 200 кВ), испускало электроны, рентгеновское излучение и нейтроны.

Механизм ГЛ существенным образом зависит от наличия стенок [7, 11]. При этом форма канала, как правило, не важна, основной параметр возникновения ГЛ — расстояние между стенками канала. Свечение жидкости определяется градиентом скорости вблизи стенки и имеет линейную зависимость (для более тонкого канала свечение достигается при меньших скоростях пото-

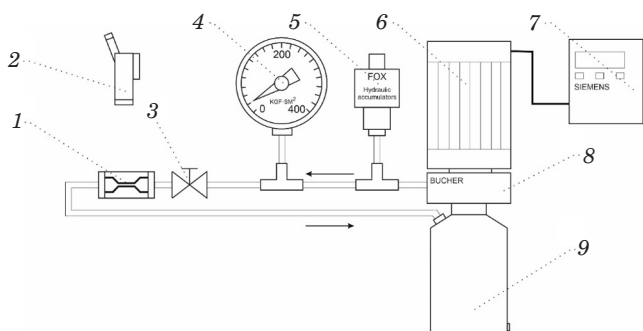


Рис. 1. Схема экспериментальной установки
Fig. 1. The scheme of the experimental setup

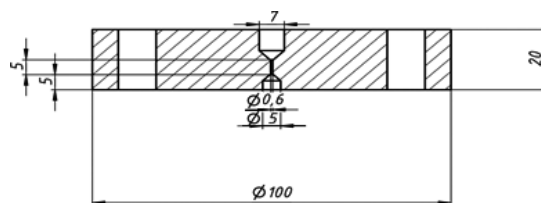


Рис. 2. Геометрия рабочего канала
Fig. 2. Geometry of the working channel

ка). Было показано, что чем больше диаметр узкого канала, тем большую скорость протекания жидкости необходимо создать для инициирования свечения. Кроме того, чем острее кромка входа в узкую часть канала, тем интенсивнее наблюдается свечение [8, 9].

Эксперименты с созданием выемок с острыми краями на внутренней стенке канала показали, что в этом случае могут наблюдаться отрыв жидкости и образование в выемках стационарных карверн [7]. Свечение жидкости в области таких карверн ассоциируется с кавитацией. При создании выемок с закругленными краями свечение не фиксировали. Таким образом, образование кавитации — один из главных факторов, влияющих на возникновение СЛ. Но возможно, что источ-

ник свечения при СЛ — газовая фаза, и образование кавитации лишь достаточное условие [8, 9].

Цель работы — исследование кавитации в технических жидкостях посредством регистрации ГЛ и СЛ.

Материалы, методика, оборудование

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки по регистрации ГЛ и СЛ в узких каналах: 1 — рабочий канал (диаметр — 0,6, 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.

ГЛ и СЛ регистрировали на гидравлическом масле MOBIL DTE-25 (динамическая вязкость

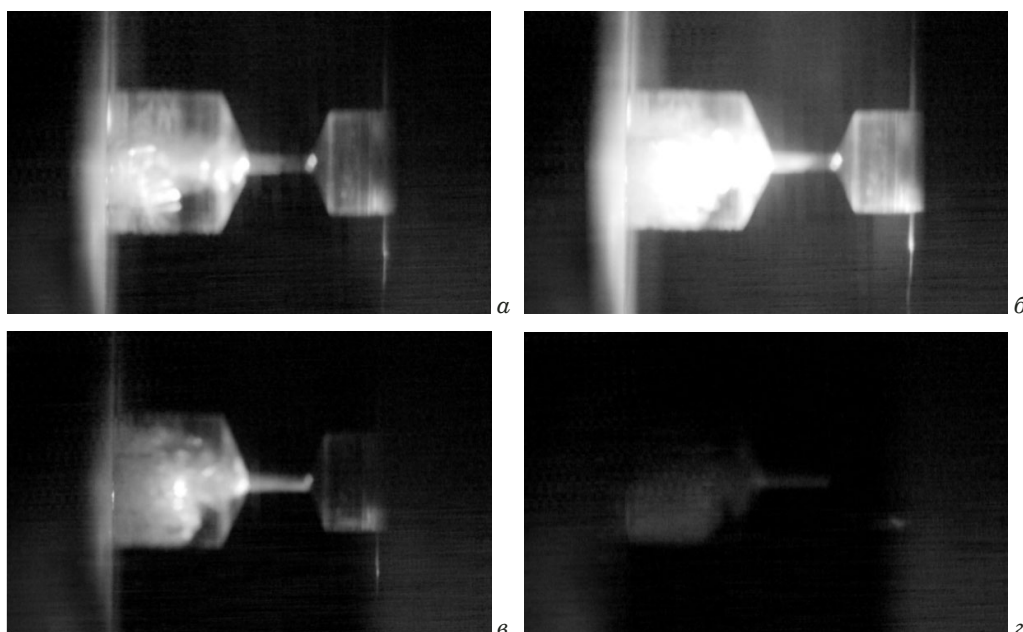


Рис. 3. Начало свечения (а), развитая ГЛ (б), затухание свечения вследствие падения давления в канале диффузора (в, г) (интервал между кадрами — ~10 мс, максимальное давление на входе в канал — ~5 ГПа/м)

Fig. 3. The beginning of the glow (a), the developed GL (b), the attenuation of the glow due to a pressure drop in the diffuser channel (c – d) (the interval between frames — ~10 msec, the maximum pressure at the entrance to the channel — ~5 GPa/m)

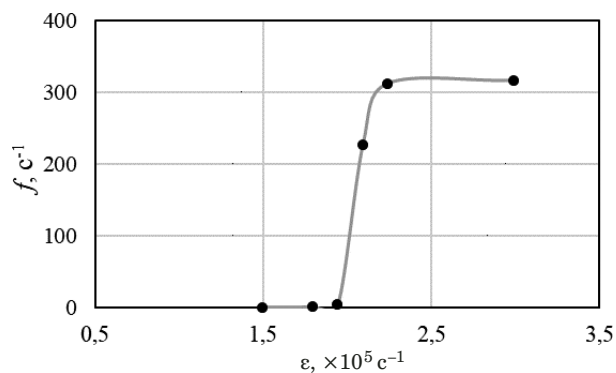


Рис. 4. Зависимость частоты событий f , регистрируемых фотоумножителем, от скорости деформации в канале ϵ

Fig. 4. Dependence of the frequency of events f recorded by a photomultiplier on the strain rate in channel ϵ

$\eta = 0,04 \text{ Па} \cdot \text{с}$, диапазон градиентов давления $\nabla P \approx 0,7 - 5 \text{ ГПа/м}$ с применением фотоумножителя Photon counting heads H12386-01.

Геометрия рабочего канала приведена на рис. 2.

Обсуждение результатов

На видеокдрах (рис. 3) видно интенсивное свечение жидкости. Форма рабочего канала позволяет отдельно наблюдать ГЛ в узком канале и СЛ в диффузоре вследствие резкого падения давления.

Заметим, что в аналогичной геометрии канала фиксировали сплошные спектры свечения — так называемые собственные спектры ГЛ [8, 9]. Анализ показал несоответствие сплошного спектра ГЛ «планковской» кривой излучения абсолютно черного тела. Следовательно, ГЛ не относится к тепловому излучению.

Сплошной спектр непостоянен, его максимумы 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 связано с тем, что свечение возникает не в газе (как это иногда предполагается), а в жидкости. Максимум соответствует высвечивающемуся люминесцентному центру, а уширение обусловлено релаксационными процессами.

На рис. 4 представлена зависимость частоты событий, регистрируемых с помощью фотоумножителя, от скорости деформации в канале. Видно, что интенсивность ГЛ резко возрастает при пороговых значениях скорости деформации $\sim 10^5 - 10^6 \text{ c}^{-1}$ (градиент давления в канале $\sim 1,2 \text{ ГПа/м}$). Отметим, что значения пороговой скорости деформации возникновения ГЛ согласуются с ранее полученными данными [6, 11].

Значения скоростей деформации носят универсальный характер и лежат в диапазоне $\sim 10^5 -$

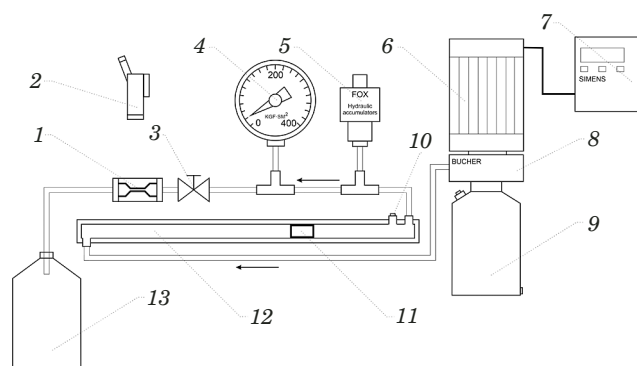


Рис. 5. Схема двухконтурной экспериментальной установки для исследования кавитации

Fig. 5. Diagram of a double-circuit experimental setup for studying cavitation

10^6 c^{-1} . Увеличение ГЛ можно объяснить изменениями механизма переноса импульса и диссипации, обусловленными возникновением зон локализованного сдвига, аналогичных зонам пластического сдвига в твердых телах.

Подобные значения скоростей деформации получены в эксперименте по ударно-волновому нагружению жидкостей методом электрического взрыва проводника [12]. Выявлена универсальная степенная зависимость скорости деформации на волновом фронте от амплитуды давления при времени нагружения $\tau \approx 10^{-5} \text{ с}$ [13, 14].

Дальнейшая модернизация экспериментальной установки может включать разделение узла высокого давления на измерительный контур и контур напора [15]. Схема двухконтурной установки для исследования кавитации приведена на рис. 5.

С помощью гидравлического насоса высокого давления 8 в линии напора создается давление гидравлического масла в левой (по схеме) части гидроцилиндра, которое через подвижный поршень 11 воздействует на исследуемую жидкость в правой (по схеме) части цилиндра, создавая необходимое давление жидкости в измерительной линии. Исследуемая жидкость заливается в правую часть гидроцилиндра через горловину 10, пропускается под давлением через узкий канал 1 и затем сливается в емкость 13. Давление в измерительной линии, фиксируемое с помощью манометра 4, регулируется изменением частоты вращения электродвигателя посредством частотного регулятора 7. Гидроаккумулятор мембранного типа 5 компенсирует колебания давления жидкости, повышая тем самым качество испытаний. Фотоумножителем 2 регистрируется возникновение ГЛ и СЛ при заданном давлении, с помощью высокоскоростной видеокамеры осуществляется наблюдение ГЛ и СЛ в канале [16 – 18]. После завершения эксперимента узкий канал и исследуе-

мая жидкость могут быть исследованы дополнительно другими методами для выявления кавитационного воздействия на них [19, 20].

Двухконтурная схема экспериментальной установки позволит проводить исследования на различных типах жидкостей и без ущерба для насоса высокого давления, поскольку анализируемая жидкость с ним не контактирует. Предложенная методология дает возможность оценивать кавитационные эффекты в узких технологических каналах и воздействия кавитации на технические жидкости в условиях, приближающихся к реальным условиям эксплуатации, в отличие от, например, ультразвуковых методов возбуждения кавитации. Фиксируя ГЛ и СЛ, можно установить точное место возникновения кавитации, что невозможно в случае методов, основанных на регистрации звуковых эффектов.

Заключение

Таким образом, с помощью разработанной и апробированной экспериментальной установки для возбуждения, регистрации и исследования ГЛ и СЛ, сопровождающих развитие кавитации, определены универсальные пороговые значения градиента давления в узком канале возникновения ГЛ. Зафиксировано явление СЛ, непосредственно связанное с кавитацией. Предложенная конструкция узкого канала позволила разделить ГЛ и СЛ (пат. 2796207 РФ).

Разработанный способ применим при исследовании кавитационных явлений в узких технологических каналах, воздействия кавитации на поверхность материалов и свойств технологических жидкостей. Полученные экспериментальные результаты и разработанная методика могут быть использованы при совершенствовании средств комплексной диагностики смазываемых узлов трения по параметрам продуктов износа в масле, методов подавления акустических эффектов кавитации, при создании прототипов бортовых средств трибодиагностики на основе автоматизированных систем предупреждения аварийного износа и др.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края (научный проект № С-26/562 от 23.03.2021 г.).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Френкель Я. И. Об электрических явлениях, связанных с кавитацией, обусловленной ультразвуковыми колебаниями в жидкости / ЖФХ. 1940. Т. XIV. Вып. 3. С. 305 – 308.
2. Маргулис М. А. Сонолюминесценция / Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 3. С. 263 – 287.
3. Бирюков Д. А., Власова М. И., Герасимов Д. Н., Синкевич О. А. Гидродинамическая люминесценция и гамма-излучение / Теплофизика. 2013. № 1. С. 69 – 72.
4. Barber B., Hiller R., Lofstedt R., et al. Physics defining the unknown sonoluminescence / Phys. Rep. 1997. Vol. 281. P. 65 – 143. DOI: 10.1016/S0370-1573(96)00050-6
5. Farhat M., Chakravarty A., Field J. Luminescence from hydrodynamic cavitation / Proc. R. Soc. A. 2011. Vol. 467. P. 591 – 606. DOI: 10.1098/rspa.2010.0134
6. Маргулис М. А., Пильгунов В. Н. Свечение и электризация при течении диэлектрических жидкостей в узком канале / ЖФХ. 2009. Т. 83. № 8. С. 1585 – 1590.
7. 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.
8. 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.
9. Бирюков Д. А., Власова М. И., Герасимов Д. Н., Синкевич О. А. Свечение жидкости в узком канале как триболоминесценция / Оптика и спектроскопия. 2003. Т. 114. № 5. С. 768 – 772. DOI: 10.7868/S0030403413050048
10. Колдамасов А. И. Плазменное образование в кавитирующей диэлектрической жидкости / ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 2. С. 188 – 190.
11. Герценштейн С. Я., Монахов А. А. Свечение жидкости в тонких диэлектрических каналах / Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2007. Т. 5. С. 1 – 5.
12. Банникова И. А., Уваров С. В., Баяндин Ю. В., Наймарк О. В. Экспериментальное исследование неьютоновских свойств воды в условиях электровзрывного нагружения / Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 17. С. 87 – 93.
13. Naimark O. V., Uvarov S. V., Bannikova I. A., et al. Localized shear as a quasi-plastic mechanism of momentum transfer in liquids / Letters on Materials. 2023. Vol. 13. N 2. P. 93 – 97. DOI: 10.22226/2410-3535-2023-2-93-97
14. Naimark O. V. Some regularities of scaling in plasticity, fracture, and turbulence / Phys Mesomech. 2016. Vol. 19. P. 307 – 318. DOI: 10.1134/S1029959916030097
15. Радзюк А. Ю., Кулагин В. А., Истягина Е. Б., Пьяных Т. А. Модернизация кавитационного стенда для исследования двухфазных режимов течения / Инженерия и технология. 2019. Т. 12. № 4. С. 468 – 475.
16. Dezhkunov N., Francescutto A., Serpe L., et al. Physics. Sonoluminescence and acoustic emission spectra at different stages of cavitation zone development / Ultrasonics sonochemistry. 2018. Vol. 40. N 1. P. 104 – 109. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.004
17. Kwon O., Pakh K., Choi M. Simultaneous measurements of acoustic emission and sonochemical luminescence for monitoring ultrasonic cavitation / Journal of the Acoustical Society of America. 2021. Vol. 149. N 6. P. 4477 – 4483. DOI: 10.1121/10.0005136
18. Peterson F. B., Anderson T. P. Light emission from hydrodynamic cavitation / Physics of fluids. 1967. Vol. 10. N 4. P. 874 – 879.
19. Анискович Е. В., Москвичев В. В., Черняев А. П. Оценка остаточного ресурса рабочих колес гидротурбин с эксплуатационной дефектностью / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 6. С. 62 – 75. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-6-62-75
20. Цветков Ю. Н., Горбаченко Е. О. Исследование кавитационного изнашивания сталей методом измерения профиля поверхности / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 11. С. 62 – 65.

REFERENCES

1. **Frenkel Ya. I.** On electrical phenomena associated with cavitation caused by ultrasonic vibrations in liquids / *ZhFKh*. 1940. Vol. XIV. Issue 3. P. 305 – 308 [in Russian].
2. **Margulis M. A.** Sonoluminescence / *Usp. Fiz. Nauk*. 2000. Vol. 170. N 3. P. 263 – 287 [in Russian].
3. **Biryukov D. A., Vlasova M. I., Gerasimov D. N., Sinkevich O. A.** Hydrodynamic luminescence and gamma radiation / *Teplotfizika*. 2013. N 1. P. 69 – 72 [in Russian].
4. **Barber B., Hiller R., Lofstedt R., et al.** Physics defining the unknown sonoluminescence / *Phys. Rep.* 1997. Vol. 281. P. 65 – 143. DOI: 10.1016/S0370-1573(96)00050-6
5. **Farhat M., Chakravarty A., Field J.** Luminescence from hydrodynamic cavitation / *Proc. R. Soc. A*. 2011. Vol. 467. P. 591 – 606. DOI: 10.1098/rspa.2010.0134
6. **Margulis M. A., Pilgunov V. N.** Glow and electrification during the flow of dielectric liquids in a narrow channel / *ZhFKh*. 2009. Vol. 83. N 8. P. 1585 – 1590 [in Russian].
7. **Gertsenshtein S. Ya., Monakhov A. A.** Electrification and glow of liquid in a coaxial channel with dielectric walls / *Mekh. Zhidk. Gaza*. 2009. N 3. P. 114 – 119 [in Russian].
8. **Biryukov D. A., Gerasimov D. N., Sinkevich O. A.** Measurement and analysis of hydroluminescence spectrum / *Technical physics letters*. 2012. Vol. 38. N 1. P. 80 – 81. DOI: 10.1134/S1063785012010191
9. **Biryukov D. A., Vlasova M. I., Gerasimov D. N., Sinkevich O. A.** Glow of a liquid in a narrow channel as triboluminescence / *Optika Spektrosk.* 2003. Vol. 114. N 5. P. 768 – 772 [in Russian]. DOI: 10.7868/S0030403413050048
10. **Koldamasov A. I.** Plasma formation in a cavitating dielectric liquid / *ZhTF*. 1991. Vol. 61. Issue 2. P. 188 – 190 [in Russian].
11. **Gertsenshtein S. Ya., Monakhov A. A.** Glow of liquid in thin dielectric channels / *Fiz.-Khim. Kinet. Gaz. Din.* 2007. Vol. 5. P. 1 – 5 [in Russian].
12. **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. N 9. P. 766 – 768. DOI: 10.1134/S1063785014090041
13. **Naimark O. B., Uvarov S. V., Bannikova I. A., et al.** Localized shear as a quasi-plastic mechanism of momentum transfer in liquids / *Letters on Materials*. 2023. Vol. 13. N 2. P. 93 – 97. DOI: 10.22226/2410-3535-2023-2-93-97
14. **Naimark O. B.** Some regularities of scaling in plasticity, fracture, and turbulence / *Phys Mesomech*. 2016. Vol. 19. P. 307 – 318. DOI: 10.1134/S1029959916030097
15. **Radzyuk A. Yu., Kulagin V. A., Istyagina E. B., Pyanykh T. A.** Modernization of a cavitation stand for studying two-phase flow regimes / *Inzh. Tekhnol.* 2019. Vol. 12. N 4. P. 468 – 475 [in Russian].
16. **Dezhkunov N., Francescutto A., Serpe L., et al.** Physics. Sonoluminescence and acoustic emission spectra at different stages of cavitation zone development / *Ultrasonics sonochemistry*. 2018. Vol. 40. N 1. P. 104 – 109. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.004
17. **Kwon O., Pakh K., Choi M.** Simultaneous measurements of acoustic emission and sonochemical luminescence for monitoring ultrasonic cavitation / *Journal of the Acoustical Society of America*. 2021. Vol. 149. N 6. P. 4477 – 4483. DOI: 10.1121/10.0005136
18. **Peterson F. B., Anderson T. P.** Light emission from hydrodynamic cavitation / *Physics of fluids*. 1967. Vol. 10. N 4. P. 874 – 879.
19. **Aniskovich E. V., Moskvichev V. V., Chernaev A. P.** Assessment of the residual life of turbine runners with operational defectiveness / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2023. Vol. 89. N 6. P. 62 – 75 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-6-62-75
20. **Tsvetkov Yu. N., Gorbachenko E. O.** Estimation of incubation period at cavitation wear of steel through measuring roughness / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2015. Vol. 81. N 11. P. 62 – 65 [in Russian].