

УДК 533.6

ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ НА КАВИТАЦИОННУЮ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ

© 2021 г. Цзянь Чжан^{а,*}, Наймин Ци^б, Цзихай Цзян^с

^а Space Environment Simulation Research Infrastructure, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China

^б School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China

^с School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China

*E-mail: freezeman007@hit.edu.cn

Поступила в редакцию 31.05.2020 г.

После доработки 20.08.2020 г.

Принята к публикации 10.09.2020 г.

Схлопывание кавитационных пузырьков в гидравлической системе приводит к возникновению локальных зон повышенных температуры и давления и — при определенных условиях — к люминесценции. В настоящей работе изучается влияние вязкости гидравлической жидкости на кавитационную люминесценцию. В гидравлическом коническом дроссельном клапане в качестве противоизносной жидкости используется гидравлическое масло с вязкостью 32 и 46 мм²/с при 40°C. Численное моделирование течения в коническом дроссельном клапане выполнено при различных значениях вязкости. Создание визуальной экспериментальной установки для изучения гидравлической кавитации позволило наблюдать кавитационную люминесценцию в клапане при трех различных параметрах гидравлического масла. По завершении эксперимента показатель вязкости масла возрастает, а температура затвердевания и температура вспышки уменьшаются. Таким образом, в результате люминесценции улучшаются характеристики зависимости между температурой и вязкостью и текучесть среды при низких температурах, но понижается безопасность системы.

Ключевые слова: гидравлическая жидкость, вязкость, кавитационная люминесценция, вычислительная гидродинамика

DOI: 10.31857/S0568528121030129

В гидравлических системах течение гидравлической жидкости (гидравлического масла) в устье клапана приводит к падению давления в устье. При падении давления ниже давления насыщенных паров масла зарождаются пузырьки, которые движутся из областей низкого в области высокого давления. Из-за большой разницы в давлении на внутренней и внешней сторонах пузырьков происходит их схлопывание и образование локальных зон сверхвысоких температуры и давления. Эти экстремальные условия способствуют ионизации молекул в пузырьке, излучению и люминесценции. Подобная люминесценция обычно наблюдается в ультразвуковых системах, где она носит название сонолюминесценции. В гидравлических системах на кавитационную люминесценцию влияет вязкость гидравлической жидкости. В настоящей работе этот эффект изучается для случая течения в гидравлическом коническом дроссельном клапане. Исследуется вопрос о том, как люминесценция соответствует физическим и химическим изменениям параметров масла.

Еще в 1933 г. Маринеско и соавт. первыми выдвинули концепцию люминесценции пузырьков. В последующие годы было обнаружено, что ультразвуковые волны способны вызвать люминесценцию пузырьков в воде [1]. Первое теоретическое объяснение этого явления было дано в работе [2]. Согласно предложенной теории “горячей точки”, пузырьки кавитационного происхождения порождают в точке схлопывания высокие температуры вплоть до десятков тысяч градусов и производят люминесценцию. Интенсивность люминесценции зависит от радиуса пузырька, температуры жидкости, параметров звукового поля и других факторов [3]. В работе [4] кавитационная люминесценция была объяснена на основе теории тормозного излучения, причем было отмечено вредное влияние высоких температур и давлений на гидравлические компоненты. Теория тормозного излучения также рассматривалась в работе [5]; она стала наиболее распространенной теорией сонолюминесценции. В работе [17] разработана модель люминес-

ценции пузырьков, основанная на представлении о тонком “жидком кольце”, окружающем пузырек, как об источнике излучения. В [18] высказано предположение, что внутренний газ, нагреваемый пузырьками в стадии сжатия, не только является источником излучения, но и что в момент максимального сжатия пузырька фазовый переход жидкости может произвести электрический ток, который вызовет люминесценцию.

Во многих работах рассматривалось влияние температуры жидкости на кавитационную люминесценцию. Так, в работе [6] рассчитано изменение со временем температуры жидкости на поверхности пузырька при излучении пузырьком света. В [7] показано, что сонолюминесценция меняется при изменении температуры и интенсивности ультразвука. В [8] обнаружено, что порог люминесценции единичного пузырька растет линейно с температурой воды при низких температурах, но быстро возрастает в интервале от 14 до 20°C. В работе [11] изучено влияние температуры на сонолюминесценцию множества пузырьков ионов Tb_3^+ в растворе $TbCl_3$ и сделан вывод, что количество образовавшихся ионов Tb_3^+ монотонно убывает с температурой жидкости. В математическом исследовании [12] показано, что расширение пузырька не является адиабатическим и зависит от температуры жидкости.

Что касается спектра сонолюминесценции, в работе [9] показано, что когда скорость схлопывания пузырьков велика, время свечения и ширина вспышки не зависят от длины волны. Кроме того, в [10] сделан вывод, что спектр сонолюминесценции может быть представлен в виде функции длины волны общего вида и зависит только от произведения длины волны и температуры поверхности. В [13] при помощи высокоскоростной фотосъемки изучены спектры люминесценции множества пузырьков в растворе $NaCl$. Для того чтобы понять зависимость между химическими реакциями и динамикой пузырьков, в работе [14] выполнены эксперименты с растворами сульфата натрия и ксенона в серной кислоте: обнаружено, что цвет пузырьков менялся в зависимости от условий окружающей среды.

В работе [15] исследованы факторы, влияющие на кавитацию в гидравлическом коническом дроссельном клапане. Изучено поведение давления в коническом клапане в процессе кавитации, причем наблюдалась гидравлическая люминесценция. Влияние звукового давления (10–120 кПа) и частоты (40–100 кГц) на время агрегации пузырьков изучено при помощи высокоскоростной фотосъемки. Проанализировано влияние вторичной силы Бьеркнеса и максимальной скорости осцилляций на время агрегации и сделан вывод, что основным фактором, влияющим на агрегацию, является именно вторичная сила Бьеркнеса. В работе [19] также при помощи высокоскоростной фотосъемки продемонстрировано взаимодействие между двумя кавитационными пузырьками после кавитации. В [20] разработана модель динамики взаимодействия между двумя пузырьками и показано, что характеристики кавитации зависят от расстояния между пузырьками, размера пузырьков и конкретного инертного газа, содержащегося в пузырьке. Сонолюминесценция в коллапсирующих и осциллирующих пузырьках широко обсуждалась в работах [21–23]. В работах [24–26] описаны рост, схлопывание и осцилляции пузырьков водяного пара и даны оценки для скорости поверхности и энергии пузырьков. Кроме того, эффекты люминесценции при движении контактной линии были экспериментально обнаружены в [27].

Несмотря на то что сонолюминесценция изучалась в течение почти столетия, имеется очень мало работ, посвященных кавитационной люминесценции в гидравлических системах. В связи с этим в данной работе исследуется влияние вязкости гидравлических жидкостей на люминесценцию.

1. ТЕОРИЯ

Кавитация — это сложный процесс, сходный с кипением. Главным отличием кавитации от кипения является термодинамика образования пузырька. Кавитация представляет собой испарение жидкости без нагрева, благодаря падению давления в жидкости, тогда как кипение — это испарение при нагреве. Термодинамическое различие между кавитацией и кипением состоит в том, что равномерные изменения во внутреннем давлении жидкости могут быть легко осуществлены, но такие же изменения температуры едва ли осуществимы. Необходимым условием кавитации является существование крохотных ядер свободного газа в жидкости. В данной работе рассмотрен упрощенный подход к задаче и вышеназванное условие считается выполненным при следующих предположениях: (1) пузырьки не меняют форму при расширении; (2) пузырьки не движутся относительно окружающей жидкости; (3) баланс сил поддерживается после образования пузырьков; (4) давление газа в пузырьке равномерно распределено в радиальном направле-

нии; (5) ядра свободного газа содержат только пар гидравлического масла и газ; (6) в пузырьке не протекают химические реакции; (7) гидравлическая жидкость несжимаема.

В случае кавитации давление в пузырьке равно

$$p_b = p_v + p_g \quad (1.1)$$

где p_v — давление пара (в Па), а p_g — давление газа (в Па).

Рассматривается совершенный газ из уравнения для совершенного газа следует, что

$$\frac{p_g}{p_{g_0}} = \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \quad (1.2)$$

где R_0 — начальный радиус пузырька (в м), R — радиус пузырька в произвольный момент времени (в м), p_{g_0} — начальное давление газа (в Па) и γ — показатель политропы ($\gamma = 1$ соответствует изотермическому процессу, а $\gamma = 1.4$ — адиабатическому процессу).

С учетом поверхностного натяжения пузырька и статического равновесия получим начальное состояние в виде

$$p_0 = p_v + p_{g_0} - \frac{2\sigma}{R_0} \quad (1.3)$$

где p_0 — начальное давление гидравлической жидкости (в Па), а σ — поверхностное натяжение в жидкости (в Н/м).

Из уравнения состояния совершенного газа получим

$$\frac{T_b}{T_{b0}} = \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3(\gamma-1)} \quad (1.4)$$

где T_{b0} — начальная температура пузырька (в К), а T_b — температура пузырька в произвольный момент времени (в К).

Изменение радиуса пузырька со временем описывается уравнением Рэлея—Плессе с учетом теплового эффекта [28]:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\mu}{\rho R} \frac{dR}{dt} + \frac{2\sigma}{\rho R} = \frac{p_{g_0}}{\rho} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{p_\infty}{\rho} + \frac{p_v(T_b)}{\rho} \quad (1.5)$$

где μ — динамическая вязкость гидравлической жидкости (в Па·с), $p_v(T_b)$ — давление насыщенных паров в жидкости при температуре пузырька (в Па) и ρ — плотность жидкости (в кг/м³).

Согласно этой теории, вязкость влияет на развитие кавитационных пузырьков, так что более крупные пузырьки порождают более сильную кавитацию и, следовательно, более интенсивную люминесценцию.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Течение гидравлической жидкости в гидравлическом клапане представляет собой типичную задачу о взаимодействии жидкости с твердым телом. Для моделирования течения в коническом дроссельном клапане был применен метод конечных объемов. Для расчета распределения кавитации в дроссельном клапане при различных рабочих условиях использованная модель включала теоретическую модель кавитации. Модельный конический дроссельный клапан изображен на рис. 1.

Моделирование поля течения в коническом дроссельном клапане проводилось с использованием нелинейного конечно-элементного матобеспечения ADINA. Для моделирования конструкции избран неявный динамический метод, а для моделирования течения жидкости — метод интерполяции, зависящий от параметров жидкости (fluid-conditional-based interpolation, FCBI). Данный метод представляет собой частный случай метода конечных объемов, локально удовлетворяющий законам сохранения массы и импульса. Условие со стороны набегающего потока удовлетворяется путем интерполяции скорости. Ячейки в методе FCBI в целом более устойчивы и точны, чем в других алгоритмах. Модель использует тетраэдральную сетку, изображенную на рис. 2. Для обеспечения точности вычислений необходимая густота сетки выбиралась согласно работе [29]. Параметры сетки автоматически настраивались на заданную постоянную нагрузку.

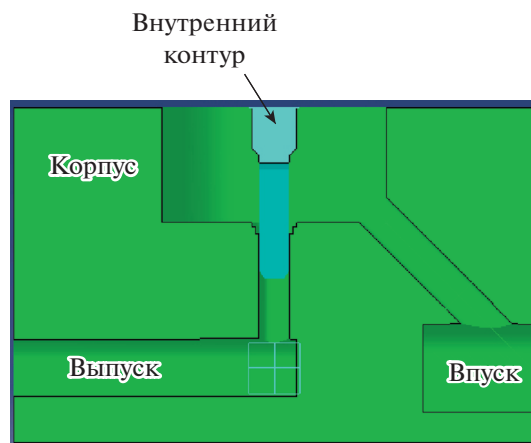


Рис. 1. Модель конического дроссельного клапана.

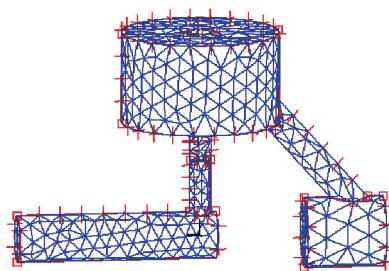


Рис. 2. Расчетная сетка на модели.

В связи с тем, что сечение жидкости, протекающей через золотник клапана, меняется радикальным образом, приводя к возникновению турбулентности, была использована k – ϵ модель турбулентности, а сама жидкость считалась несжимаемой. Для обеспечения вычислительной сходимости модели нагрузка подавалась постепенно, причем начальная нагрузка была равна нулю. Для того чтобы обеспечить точность расчетов, не прибегая к чрезмерным вычислительным ресурсам, использована умеренно густая сетка.

Стандартная k – ϵ модель турбулентности имеет вид

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad} k \right] + 2\mu_t \mathbf{S}_{ij} \cdot \mathbf{S}_{ij} - \rho \epsilon \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad} \epsilon \right] + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t \mathbf{S}_{ij} \cdot \mathbf{S}_{ij} - c_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.2)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности (в $\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$), ϵ – степень турбулентной кинематической диссипации (в $\text{м}^2/\text{с}^3$), $\mathbf{U}$ – вектор скорости гидравлической жидкости (в $\text{м}/\text{с}$), μ_t – турбулентная вязкость (в $\text{Па} \cdot \text{с}$), $\mathbf{S}$ – тензор средних скоростей деформации и t – время (в с).

Турбулентная вязкость имеет вид

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.3)$$

Коэффициенты c_μ , σ_k , σ_ϵ , $c_{1\epsilon}$, $c_{2\epsilon}$ в (2.1)–(2.3) безразмерные. Их значения взяты следующими: $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$ [30].

В пакете ADINA k и ϵ задаются формулами

$$k = 1.5((0.01 \sim 0.1)u)^2 \quad (2.4)$$

$$\varepsilon = k^{1.5} / (0.3X) \quad (2.5)$$

где U — скорость гидравлической жидкости (в м/с), а X — характерная длина (в м). В данной работе значение X взято равным диаметру трубки, а $k = 1.5(0.05U)^2$.

Число кавитации характеризует кавитационную способность жидкости. В общем, если его значение меньше, чем критическое число кавитации, то кавитация происходит, в противном случае она не имеет места. Для конических дроссельных клапанов число кавитации у отверстия клапана определяется следующим образом

$$\sigma = \frac{p_1 - p_v}{p_1 - p_2}, \quad (2.6)$$

где p_1 и p_2 — давления на входе и на выходе из клапана.

Объемные доли пара и жидкости, обозначенные f_v и f_l , определяются следующим образом

$$f_v = \frac{V_v}{V_v + V_l}, \quad (2.7)$$

$$f_l = 1 - f_v, \quad (2.8)$$

где V_v — объем пара, а V_l — объем жидкости. Предполагается, что плотность смеси пара и жидкости имеет вид

$$\rho_m = f_v \rho_v + f_l \rho, \quad (2.9)$$

где ρ_v — плотность пара.

Уравнение неразрывности для смеси сред

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}) = 0, \quad (2.10)$$

где t — время, отсчитываемое от начального момента, а $\mathbf{v}$ — вектор скорости.

Уравнение переноса жидкости, выраженное через объемную долю, имеет вид

$$\frac{\partial f_l}{\partial t} + \nabla \cdot (f_l \mathbf{v}) = -\frac{1}{\rho} \dot{m}, \quad (2.11)$$

где $\dot{m}$ — скорость превращения жидкости в пар.

Для кавитационных течений модель турбулентности должна учитывать сжимаемость смеси вблизи поверхности кавитации. С учетом поправки плотность смеси сред приобретает вид

$$\overline{\rho_m} = \rho_v - \left(\frac{\rho_v - \rho_m}{\rho_v - \rho} \right)^n (\rho_v - \rho), \quad (2.12)$$

где показатель n должен удовлетворять неравенству $n \geq 1$; для больших чисел кавитации n полагают равным единице. Значение n растет с уменьшением числа кавитации и ростом числа Рейнольдса.

В данных расчетах давление на входе равно 5 мПа, расход равен 1 м/с, $k = 0.0135$ и $\varepsilon = 0.0375$. Вязкости гидравлических масел #32, #46 и #68 взяты равными 0.02784, 0.04 и 0.05916 Па · с соответственно.

На рис. 3 и 4 представлены распределения давления (в Па) и скорости (в м/с) в поле течения в коническом дроссельном клапане при различных значениях вязкости. Местное падение давления в клапане имеет место, когда жидкость протекает через золотник, причем наименьшее давление реализуется на дне золотника. При увеличении вязкости расход жидкости в золотнике уменьшается, а давление возрастает. Этот факт указывает на то, что увеличение вязкости приводит к меньшей интенсивности кавитации при прохождении клапана и, следовательно, к меньшей вероятности люминесценции кавитационного пузырька или к меньшей интенсивности люминесценции.

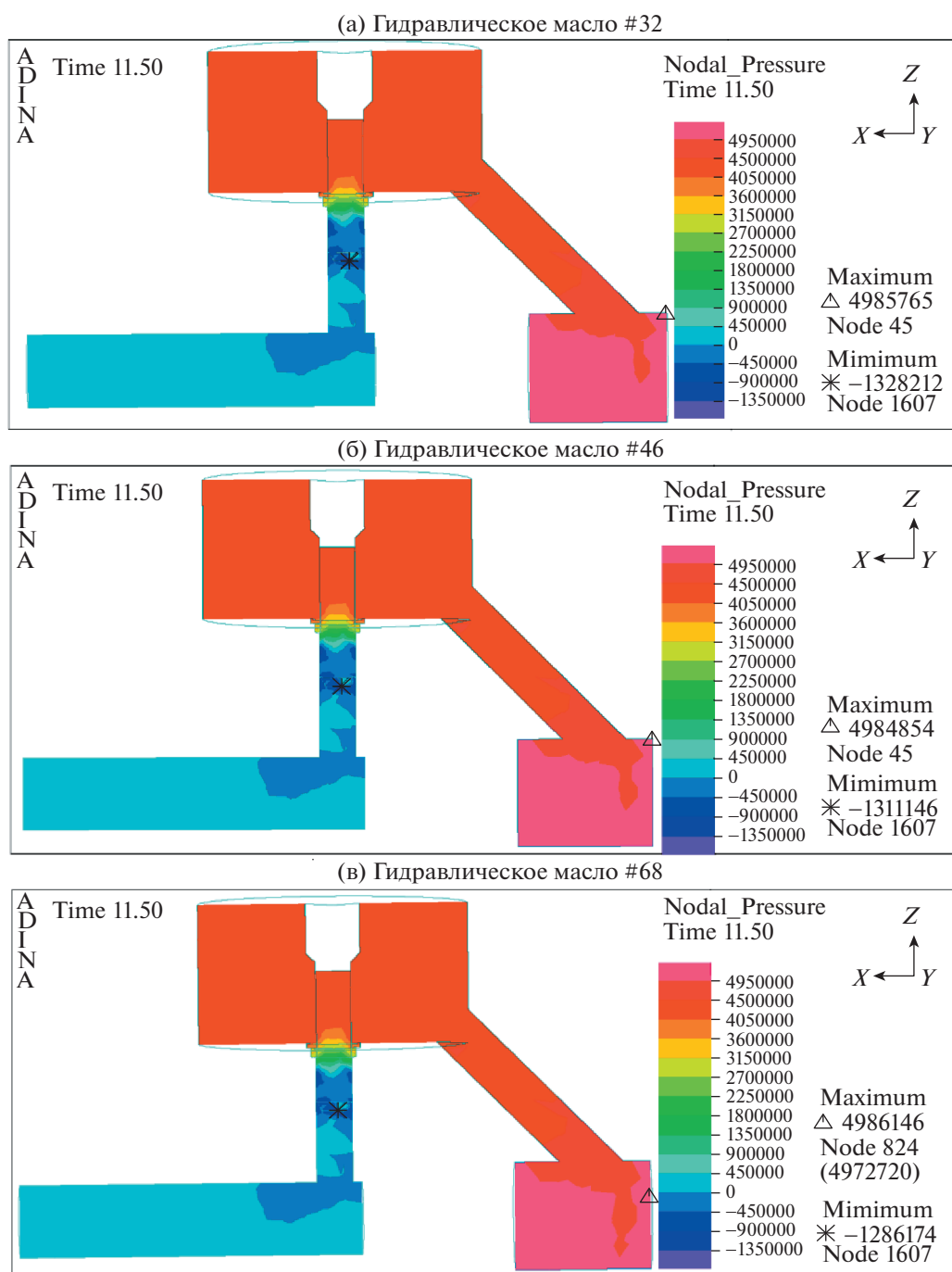


Рис. 3. Распределение давления в поле течения для гидравлических масел с различными вязкостями.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Кавитационная люминесценция

Для экспериментального измерения люминесценции, сопровождающей гидравлическую кавитацию, была создана установка, показанная на рис. 5. Средняя часть круга разделена, чтобы наблюдать различные области люминесценции. Схематическое представление системы дано на рис. 6.

Для облегчения наблюдений за люминесценцией модельный клапан был выполнен из полиметилметакрилата. Как показано на рис. 6, головка клапана пригнана к входному отверстию кла-

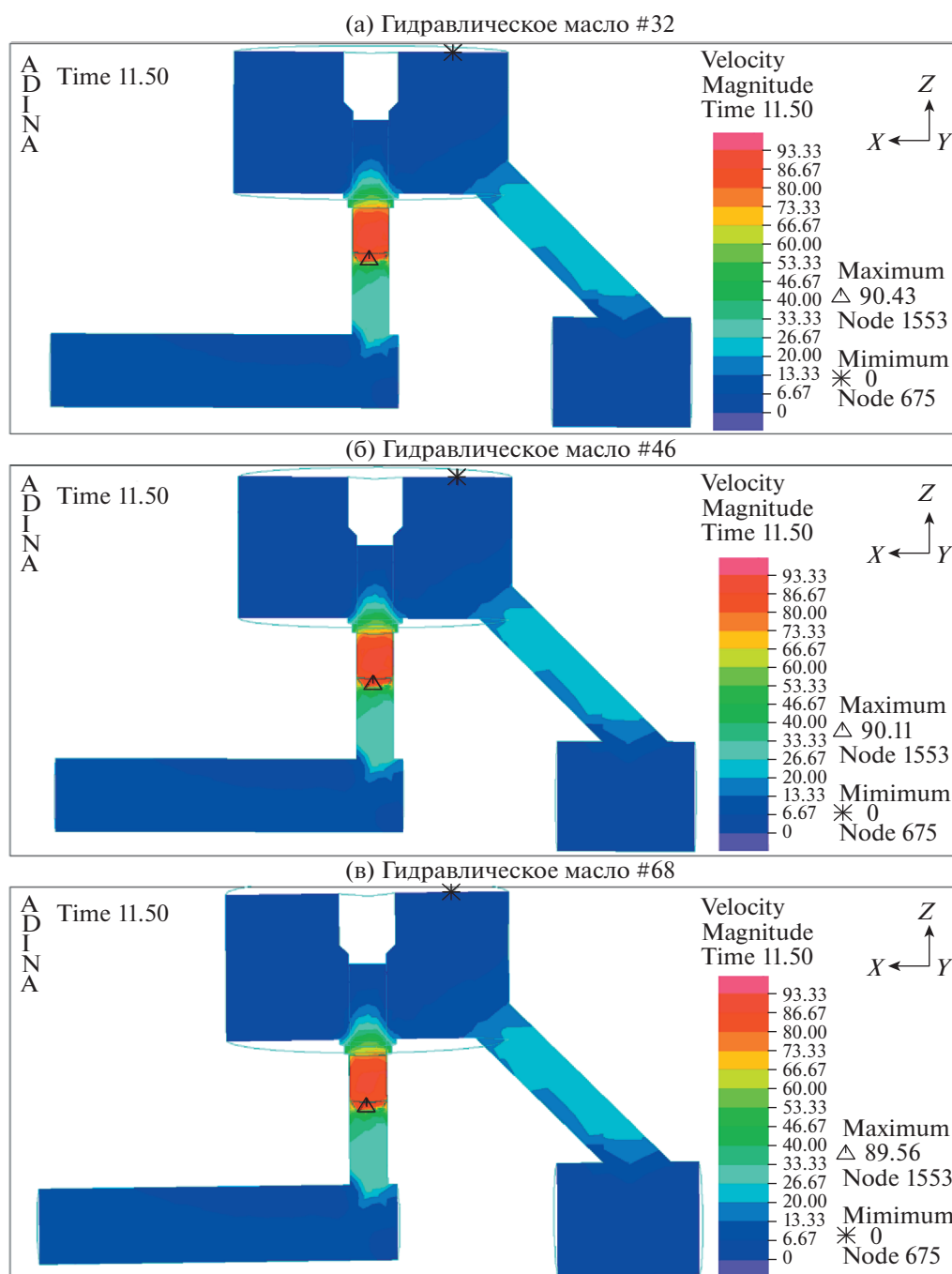


Рис. 4. Распределение скорости в поле течения для гидравлических масел с различными вязкостями.

пана, сливной клапан подогнан под выходное давление гидравлического насоса, дроссельный клапан подогнан под обратное избыточное давление системы, датчики давления (3, 7 и 8 на рис. 6) измеряют давление перед клапаном, в устье клапана и за клапаном, соответственно, датчик температуры регистрирует изменения температуры при прохождении через клапан и датчик расхода измеряет расход жидкости через выпускное отверстие клапана. Экспериментальные параметры приведены в табл. 1.

Для каждого из трех масел эксперименты проводились в следующем порядке. Сначала в устье клапана создавалось отверстие в 6 мм при помощи головки дроссельного клапана. Затем устанавливалось выпускное давление в 4 мПа и избыточное обратное давление в 0 мПа. При помощи



Рис. 5. Экспериментальная система для наблюдения люминесценции при гидравлической кавитации.

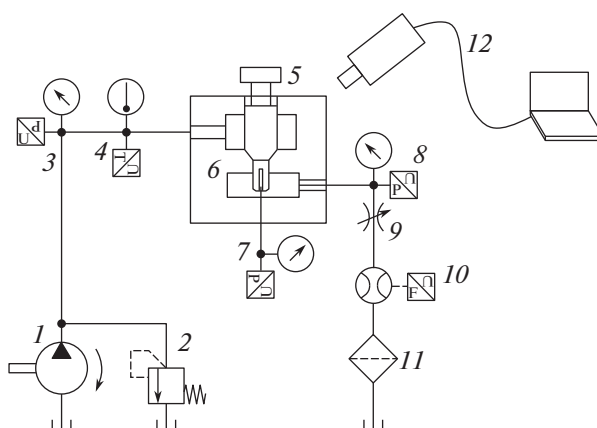


Рис. 6. Схематическая диаграмма экспериментальной системы. 1 – насос; 2 – сливной клапан; 3, 7, 8 – датчики давления; 4 – датчик температуры; 5 – головка клапана; 6 – испытуемое отверстие; 9 – дроссельный клапан; 10 – датчик расхода; 11 – фильтр возвращаемого масла; 12 – камера.

соответствующего датчика записывалось значение расхода жидкости и при помощи камеры наблюдалась люминесценция при различных температурах, измеряемых датчиком температуры. Картины, полученные для трех масел, приведены на рис. 7–9.

Для определения влияния вязкости для каждого из масел были сделаны по четыре фотографии при каждой температуре. Обнаружено, что для каждого данного масла интенсивность люминесценции возрастала с увеличением температуры, до тех пор пока не достигалось насыщение. При заданной температуре увеличение вязкости приводило к уменьшению интенсивности, что соответствует результатам моделирования. Таким образом, при низких температурах и высоких значениях вязкости эффект кавитации и люминесценции ограничен. С ростом температуры давление насыщенных паров в жидкости возрастает, а вязкость уменьшается, облегчая, таким образом, процесс кавитации и увеличивая интенсивность люминесценции. Однако, когда кавитация происходит во всем контуре и достигает насыщения, люминесценция с дальнейшим увеличением температуры уже не растет. Полученные результаты показывают, что интенсивность люминесценции в гидравлических жидкостях зависит от интенсивности кавитации.

Таблица 1. Параметры экспериментов

Марка гидравлического масла	Впускное отверстие клапана, мм	Давление в системе, мПа	Обратное давление, мПа	Температура, °C
32, 46, 68	6	4	0	20–60

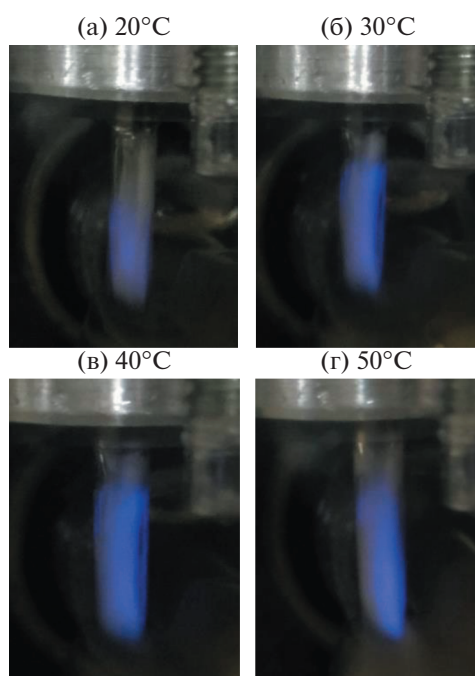


Рис. 7. Кавитационная люминесценция гидравлического масла #32 при различных температурах.

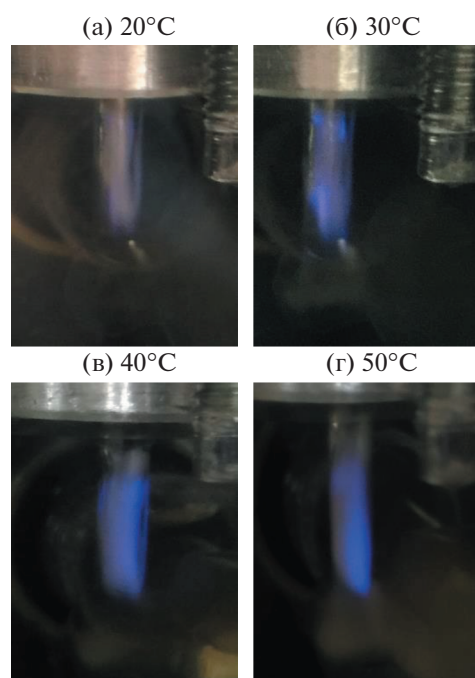


Рис. 8. Кавитационная люминесценция гидравлического масла #46 при различных температурах.

3.2. Анализ результатов испытаний гидравлических жидкостей

Как показано выше, кавитация порождает области сверхвысоких температуры и давления в момент схлопывания пузырьков, а также приводит к ионизации молекул в пузырьке и люминесценции. Для того чтобы исследовать вопрос о том, изменяются ли свойства самой гидравлической жидкости в ходе эксперимента с кавитационной люминесценцией, гидравлическая жид-

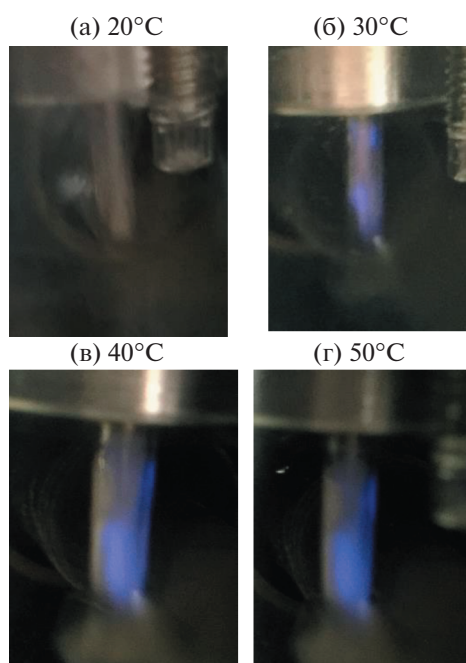


Рис. 9. Кавитационная люминесценция гидравлического масла #68 при различных температурах.

кость #32 была протестирована до и после эксперимента в профессиональном центре тестирования гидравлических масел. В табл. 2 представлены результаты теста гидравлического масла #32 перед выполнением эксперимента, в том виде, в каком оно было поставлено с производства, а в табл. 3 аналогичные результаты даны после выполнения эксперимента с люминесценцией (после того как жидкость была прокачана много раз).

Сравнение данных, приведенных в табл. 2 и 3, указывает на следующие изменения в свойствах гидравлической жидкости:

(1) Кинематическая вязкость. Кинематическая вязкость измерялась при 40°C. Перед экспериментом кинематическая вязкость гидравлического масла была равна 33.2 мм²/с. После эксперимента с люминесценцией кинематическая вязкость стала равна 32.99 мм²/с. Таким образом, кавитация не оказывает влияния на кинематическую вязкость гидравлического масла.

(2) Индекс вязкости. Вязкость гидравлического масла крайне чувствительна к температуре. Индекс вязкости используется, чтобы оценить вязкостные и температурные характеристики гидравлических масел, причем большее значение этого индекса соответствует более слабой зависимости от температуры и, следовательно, лучшей вязкостно-температурной характеристики. Согласно результатам тестов, индекс вязкости гидравлического масла был равен 95 до эксперимента и 111 после него. Таким образом, кавитация в условиях, когда имеет место люминесценция, способствует улучшению вязкостно-температурной характеристики гидравлического масла.

Таблица 2. Результаты теста для гидравлического масла #32 перед экспериментом

Параметр	Стандартное значение	Результат теста
Кинематическая вязкость (40°C), мм ² /с	28.8–35.2	33.2
Индекс вязкости	85	95
Температура вспышки (на входе), °C	175	205
Влажность, %	Следы	Отсутствие
Механические примеси, %	Отсутствие	Отсутствие
Температура затвердевания, °C	–15	–17
Коррозия меди (°C, 3 ч), уровень	1	1a

Таблица 3. Результаты теста для гидравлического масла #32 после эксперимента

Параметр	Стандартное значение	Результат теста
Кинематическая вязкость (40°C), мм ² /с	28.8–35.2	33.2
Индекс вязкости	(не менее чем) 85	111
Температура вспышки (на входе), °C	(не ниже чем) 175	196
Влажность, %	Следы	Отсутствие
Механические примеси, %	Отсутствие	Отсутствие
Температура затвердевания, °C	(не выше чем) –15	–28
Коррозия меди (°C, 3 ч), уровень	(не более чем) 1	1a

(3) Температура вспышки. Температура вспышки является важным показателем безопасности гидравлических масел и мерой его летучести. Гидравлические масла с низкой температурой вспышки имеют высокую летучесть, легко воспламеняемы и небезопасны; высокая летучесть способствует испарению и потере жидкости в ходе операции. Обнаружено, что температура вспышки уменьшилась от 205°C перед экспериментом до 196°C после эксперимента. Таким образом, кавитация понижает температуру вспышки и, следовательно, снижает безопасность гидравлического масла.

(4) Влажность. Изменений в содержании воды до и после эксперимента не отмечено. Это показывает, что любые изменения параметров масла в ходе эксперимента с люминесценцией имеют физический, а не химический характер.

(5) Механические примеси. Изменений в механических примесях до и после эксперимента не отмечено. Это указывает на тот факт, что кавитация не приводит к образованию взвесей или осадков.

(6) Температура затвердевания. Температура затвердевания гидравлического масла является общим показателем, используемым для определения эффективности течения при низких температурах. После выполнения эксперимента температура затвердевания снизилась от –17 до –28°C, что означает более высокую эффективность течения при низких температурах.

(7) Коррозия меди. Для исследования сопротивления коррозии при протекании гидравлической жидкости исследовалась коррозия медного щита. Уровень коррозии определяется значениями 1, 2, 3 и 4 и каждый уровень может быть подразделен на уровни a, b, c и т.д. Уровень коррозии до и после эксперимента может быть определен как 1a. Таким образом, кавитация не производит продуктов коррозии и не снижает хорошую устойчивость к коррозии при протекании гидравлического масла.

В целом кавитация в ходе экспериментов с люминесценцией оказывает влияние главным образом на индекс вязкости гидравлического масла и температуры вспышки и затвердевания. Эти изменения улучшают вязкостно-температурные характеристики гидравлического масла при низких температурах, но снижают безопасность при его использовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Посредством моделирования и экспериментального исследования изучено влияние вязкости на процесс люминесценции, сопровождающий гидравлическую кавитацию. При этом сделаны следующие выводы:

(1) Интенсивность люминесценции конкретной гидравлической жидкости возрастает с увеличением температуры до наступления насыщения. Этот рост может быть объяснен усилением кавитации при высоких температурах.

(2) При данной температуре интенсивность люминесценции зависит от вязкости жидкости, так что большей вязкости соответствует меньшая интенсивность. Эта тенденция объясняется тем фактом, что высокая вязкость препятствует кавитации.

(3) Люминесценция ограничена интенсивностью кавитации.

(4) Кавитация в условиях, когда она приводит к люминесценции, изменяет свойства гидравлической жидкости, улучшая ее вязкостно-температурную характеристику, но снижая ее безопасность.

Работа выполнена при поддержке Национальной программы фундаментальных исследований и развития Китая (грант № 2018YFB2001201), Национального фонда естественных наук Китая (грант № 51805108), Научного фонда для молодых ученых Китая (грант № 2019M661271), Программы воспитания молодых инновационных талантов в колледжах и университетах провинции Хэйлунцзян, Китай в 2017 г. (грант № UNPYSCT-2017205) и Проекта 111 (грант № B18017).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chen Q.D., Wang L.* Luminescence from transient cavitation bubbles in water // *Phys. Letters A.* 2005. V. 339. № 1–2. P. 110–117.
2. *Noltingk B.E., Neppiras E.A.* Cavitation produced by ultrasonics // *Proc. Phys. Soc.* 1950. V. 63B. P. 674–685.
3. *Chen Weizhong, Xie Zhixing.* Multi-bubble and single-bubble sonoluminescence // *Progr. Phys.* 1996. V. Z1. P. 313–323.
4. *Moss W.C., Clarke D.B., White J.W., et al.* Sonoluminescence and the prospects for table-top micro-thermonuclear fusion // *Phys. Lett. A.* 1996. V. 211. P. 69–74.
5. *Xie Zhixing, Chen Weizhong, Wei Rongjue.* Acoustic luminescence // *Physics.* 1998. № 1. P. 25–31.
6. *Kyuichi Yasui.* Effect of non-equilibrium evaporation and condensation on bubble dynamics near the sonoluminescence threshold // *Ultrasonics.* 1998. V. 36. № 1. P. 575–580.
7. *Dezhkunov N.V.* Multibubble sonoluminescence intensity dependence on liquid temperature at different ultrasound intensities // *Ultrasonics – Sonochemistry.* 2002. V. 9. № 2. P. 103–106.
8. *Germano M., Alippi A., Bettucci A., Brizi F., Passeri D.* Water temperature dependence of single bubble sonoluminescence threshold // *Ultrasonics.* 2009. V. 50. № 1. P. 81–83.
9. *Li Tongbao, Ge Caoyan, Cheng Qian, et al.* Single bubble sonoluminescence // *J. Tongji Univ. (Natural Science Edition).* 2002. V. 30. № 4. P. 504–509.
10. *Levinsen Mogens T.* Data collapse of the spectra of water-based stable single-bubble sonoluminescence // *Phys. Rev. E.* 2011. V. 82. № 3. Pt 2. P. 036323.
11. *Шарунов Г.Л., Якшембетова Л.Р., Абдрахманов А.М.* Влияние температуры жидкости на многопузырьковую сонолюминесценцию ионов Tb³⁺ в водном растворе // *Журн. физической химии.* 2012. Т. 86. № 7. С. 1294–1296.
12. *Zhang Jian.* Research on cavitation thermal effect and noise of hydraulic conical throttle valve / Harbin Institute of Technology, Dissertation. 2014.
13. *Cairós C. et al.* Effects of argon sparging rate, ultrasonic power, and frequency on multibubble sonoluminescence spectra and bubble dynamics in NaCl aqueous solutions // *Ultrasonics Sonochemistry.* 2014. V. 21. № 6. P. 2044–2051.
14. *Thiemann A. et al.* Sonoluminescence and dynamics of cavitation bubble populations in sulfuric acid // *Ultrasonics Sonochemistry.* 2017. V. 34. P. 663–676.
15. *Zhang Jian, Jiang Jihai, Baiyunfeng, Li Yanjie.* Simulation and test of pressure characteristics of conical throttle valves // *J. Huazhong Univ. of Science and Technology (Natural Science Edition).* 2015. V. 43. № 4. P. 64–68.
16. *Jiao Junjie, He Yong, Pan Xuchao, He Yuan, Wang Chuanting.* Analysis on the factors that influence bubble coalescence in an acoustic field // *Chinese J. Acoustics.* 2016. V. 35. № 01. P. 48–56.
17. *Pishbini M., Sadighi-Bonabi R.* A new source of radiation in single-bubble sonoluminescence // *Pramana J. Physics.* 2017. V. 88. № 724. P. 72.
18. *Борисенок В.А., Медведев А.Б.* Расчет термодинамических параметров и степени ионизации азота и его смесей с аргоном в условиях, типичных для однопузырьковой сонолюминесценции // *Ядерная физика и инжиниринг.* 2016. Т. 7. № 3. С. 260–267.
19. *Xiaojian Ma, Tianyu Xing, Biao Huang, Qiuhe Li, Yifei Yang.* Combined experimental and theoretical investigation of the gas bubble motion in an acoustic field // *Ultrasonics – Sonochemistry.* 2018. V. 40. P. 480–487.
20. *Wang Dexin, Naren Mandula.* Theoretical study on acoustic cavitation characteristics of coupled double bubbles // *J. Physics.* 2018. V. 67. № 3. P. 231–238.
21. *Нигматулин Р.И., Аганин А.А., Топорков Д.Ю.* Возможность реализации сверхсжатия кавитационного пузырька в тетрадекане // *Доклады РАН.* 2018. Т. 481. № 6. С. 625–629.
22. *Аганин А.А., Ильгамов М.А., Нигматулин Р.И., Топорков Д.Ю.* Эволюция искажений сферичности кавитационного пузырька при акустическом сверхсжатии // *Известия РАН. МЖГ.* 2010. № 1. С. 57–69.
23. *Нигматулин Р.И., Лэхи (мл.) Р.Т., Талейархан Р.П., Вест К.Д., Блок Р.С.* О термоядерных процессах в кавитирующих пузырьках // *Успехи физических наук.* 2014. Т. 184. № 9. С. 947–960.
24. *Ivashnyov O.E., Ivashneva M.N., Smirnov N.N.* Slow waves of boiling under hot water depressurization // *J. Fluid Mech.* 2000. V. 413. P. 149–180.

25. *Ивашнев О.Е., Смирнов Н.Н.* Тепловой рост парового пузырька, движущегося в перегретой жидкости // Известия РАН. МЖГ. 2004. № 3. С. 69–84.
26. *Ивашнев О.Е., Ивашнева М.Н., Смирнов Н.Н.* Ударные волны разрежения в потоках неравновесно кипящей жидкости // Известия РАН. МЖГ. 2000. № 4. С. 20–33.
27. *Чернявский В.М., Монахов А.А.* Нарушение сплошности при движении линии контакта: новые экспериментальные и теоретические результаты // Доклады РАН. 2010. Т. 433. № 6. С. 767–769.
28. *Rodio M.G., De Giorgi M.G., Ficarella A.* Influence of convective heat transfer modeling on the estimation of thermal effects in cryogenic cavitating flows // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 6538–6554.
29. *Smirnov N.N., Betelin V.B., Nikitin V.F., Stamov L.I., Altoukhov D.I.* Accumulation of errors in numerical simulations of chemically reacting gas dynamics // Acta Astronautica. 2015. V. 117. P. 338–355.
30. *Launder B.E., Spalding D.B.* The numerical computation of turbulent flows // Comput. Methods Appl Mech Eng. 1990. P. 269–289.

Перевод с англ. М.Г. Лебедева

Effect of oil viscosity on hydraulic cavitation luminescence

Jian Zhang^{1,#}, Naiming Qi^b, and Jihai Jiang^c

¹ *Space Environment Simulation Research Infrastructure, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China*

² *School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China*

³ *School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China*

[#] *E-mail: freezeman007@hit.edu.cn*

The collapse of cavitation bubbles in a hydraulic system generates localized zones of high temperature and pressure, and, under certain conditions, luminescence. In this study, we studied the influence of the viscosity of hydraulic oil on cavitation luminescence. We used a hydraulic cone-type throttle valve with antiwear hydraulic oils with kinematic viscosities at 40°C of 32, 46, and 46 mm²/s. Computational fluid dynamics was used to simulate the flow field of the cone-throttle valve under different viscosities. After constructing the visual experiment platform of hydraulic cavitation, we observed cavitation luminescence of the valve under three different hydraulic oil conditions. After the experiment, the viscosity index of the oil increased, the pour point decreased, and the flash point decreased. Thus, the viscosity–temperature characteristics and low-temperature fluidity improved, and the safety decreased after luminescence.

Keywords: hydraulic oil, viscosity, cavitation luminescence, computational fluid dynamics