

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОУДАРА

Терентьев В.В., Смирнов С.Ф., Шевяков А.Н., Краснов А.А., Худов Д.И., Барабанов Д.В.

Терентьев Владимир Викторович (ORCID 0000-0002-9189-8076), Шевяков Алексей Николаевич, Барабанов Дмитрий Владимирович

Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет,

г. Иваново, Россия. 153012, Ивановская область, г. Иваново, ул. Советская, д. 45.

E-mail: vladim-terent@yandex.ru, alexshev1982@mail.ru, Barabanov_dmitry@mail.ru

Смирнов Станислав Федорович, Худов Даниил Игоревич

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,

г. Иваново, Россия. 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

E-mail: smirnovst55@gmail.com, khudov.d@mail.ru

Краснов Александр Алексеевич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

г. Иваново, Россия, 153040, Ивановская область, г. Иваново, пр. Строителей, д. 33.

E-mail: krasnow.a.a@mail.ru

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработке методики измерения давления электрогидроудара в жидкой среде. Для определения величины давления электрогидроудара предложен расчет основанный на максимальном прогибе первичного преобразователя (жестко заземленной пластины), соответствующего схеме жестко заземленной консольной балки в момент прохождения ударной волны от единичного электрического разряда. Разработана установка для определения давления при электрогидроударе с применением микроконтроллера Arduino Nano с контроллером ATmega328. Получено выражение для расчета прогибов методом начальных параметров. Проведен расчет давления электрогидроудара в программном комплексе ANSYS. Расхождение между полученными значениями прогиба аналитическим методом и в программном комплексе ANSYS не превышает 1%. Предложенный способ измерения давления может быть применен для исследования давления в установках электрогидроудара.

Ключевые слова: прочность, электрогидроудар, импульсный разряд, деформация, изгиб, давление

THE METHOD OF MEASURING THE PRESSURE OF AN ELECTRIC HYDRAULIC SHOCK

Terentyev V.V., Smirnov S.F., Shevyakov A.N., Krasnov A.A., Khudov D.I., Barabanov D.V.

Terentyev Vladimir Viktorovich (ORCID 0000-0002-9189-8076), Shevyakov Alexey Nikolaevich, Barabanov Dmitry Vladimirovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Upper Volga State Agrobiotechnological University”,

Ivanovo, Russia. 153012, Ivanovo region, Ivanovo, st. Sovetskaya, 45.

E-mail: vladim-terent@yandex.ru, alexshev1982@mail.ru, Barabanov_dmitry@mail.ru

Smirnov Stanislav Fedorovich, Khudov Daniil Igorevich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin”,

Ivanovo, Russia. 153003, Ivanovo region, Ivanovo, st. Rabfakovskaya, 34

E-mail: smirnovst55@gmail.com, khudov.d@mail.ru

Krasnov Alexander Alekseevich

Ivanovo Fire and Rescue Academy of the SFS of Emercom of Russia,

Ivanovo, Russia, 153040, Ivanovo region, Ivanovo, Stroiteley Ave., 33.

E-mail: krasnow.a.a@mail.ru

The article presents the results of theoretical and experimental studies on the development of a method for measuring the pressure of an electric hydraulic shock in a liquid medium. To determine the pressure of an electrohydrostroke a calculation is proposed based on the maximum deflection in an elastic, primary transducer (severely pinched plate) corresponding to the scheme of a rigidly pinched cantilever beam at the time of passage of a shock wave from a single electric discharge. An installation has been developed to determine the pressure during an electrohydrostroke using an Arduino Nano microcontroller with an ATmega328 controller. An expression for calculating deflections using the initial parameter method is obtained. The calculation of the electrohydrostroke pressure in the ANSYS software package is carried out. The discrepancy between the obtained deflection values by the analytical method and in the ANSYS software package does not exceed 1%. The proposed method of pressure measurement can be used to study the pressure in electrohydrostroke units.

Keywords: strength, electrohydrostroke, pulse discharge, deformation, bending, pressure

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Явление электрогидравлического удара нашло применение в различных отраслях промышленности, таких как: машиностроение и металлообработка – очистка поверхностей и внутренних полостей; добывающая промышленность и строительство – электрогидравлический бур, устройство для забивания свай, дробилки для горных пород, прессование древесных плит и т. д.

В частности, электрогидравлический удар применяется для удаления накипи и отложений с теплообменного оборудования.

В работе [1] представлены результаты исследований очистки внутренних полостей труб теплообменного оборудования от твердых и особо твердых минеральных отложений с помощью электрического разряда в жидкости.

Особенно важно поверхностное упрочнение внутренних полостей, которое иными способами провести очень сложно [2-4].

Износостойкость, а соответственно, ресурс детали определяется прочностью их поверхности. Повышение прочности поверхностного слоя детали позволяет повышать ее износостойкость и способствует увеличению срока службы [5, 6].

Твёрдость является важным свойством первичной структуры и обуславливает высокую износостойкость [7].

Одной из основных задач по применению электрогидроудара в установках, является определение создаваемого давления в ударной волне, от величины которого зависит эффективность и область его применения.

В литературе по электрогидроудару приводятся различные модели для теоретической оценки ударных волн электрогидроудара в установках, в которые входят электрические параметры установки (электрическая емкость, индуктивность), а также длина разрядного промежутка, площадь поперечного сечения канала, электропроводность канала.

Математическая модель, разработанная в ПКБ ЭГ АН УССР Е.В Кривицким [7], содержит уравнения:

оценка импульса электрогидроудара

$$p = \frac{\rho}{2\pi} \frac{d^2 S}{dt^2} \ln \left(l_p \sqrt{\frac{\pi}{S}} \right) - \frac{\rho}{8\pi} \left(\frac{dS}{dt} \right)^2; \quad (1)$$

уравнение баланса энергии

$$p \frac{dS}{dt} + \frac{1}{1-\gamma} \frac{\rho}{2\pi} \frac{d(pS)}{dt} = \frac{i^2}{\sigma F}; \quad (2)$$

уравнение разрядного контура

$$L_3 \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{d}{dt} \left(\frac{i l_p + i R_y}{\sigma S} \right) + \frac{i}{C_3} = 0. \quad (3)$$

где ρ – плотность воды, S – площадь поперечного сечения канала, t – время, l_p – длина канала разряда, γ – коэффициент пропорциональности в зависимости мощности от времени в первой четверти разряда электрогидроудара, σ – проводимость плазмы, F – сила трения ионов плазмы, L_3 – индуктивность разрядного контура, C_3 – электрическая емкость разрядного контура, R_y – омическое сопротивление канала электрического разряда, i – ток разряда.

В.В. Арсентьевым получено выражение давления p_ϕ на фронте ударной волны при электрическом разряде в жидкости [8]

$$p_\phi = \frac{1}{5} \cdot \rho_0^{0.5} \cdot \left(\frac{\gamma}{l} \right)^{0.5}, \quad (4)$$

где ρ_0 – плотность невозмущенной жидкости; γ – коэффициент зависимости электрической мощности от времени в течение первой четверти периода разряда; l – длина разрядного промежутка.

Для применения расчетных методик процесса распространения ударных волн на базе математических моделей для ограниченных поверхностей произвольных объемов необходимо определить в экспериментах физические и электрические параметры разрядного промежутка (1-4), что представляет большую сложность.

При этом в работе [9] отмечено, что изменение давления в газовом пузыре может составлять величину порядка 1000 МПа.

Поэтому возникает необходимость опытного исследования давления ударных волн при высоковольтном, электрическом разряде в жидкости. Юткин Л.А. предлагал «пластиграфический» метод изучения электрогидравлических ударов.

Этот метод состоит в фиксации действия электрогидравлических ударов на объекты из пластилина, располагаемые соответствующим образом относительно разряда. В пластилиновых дисках образуются и сохраняются для наблюдения углубления (вмятины), передающие форму и конечные размеры ударной волны.

При открытых ударах, создававшихся с одной стороны диска, на нем отмечались, кроме широких вмятин – следов ударной волны, другие, более глубокие вмятины с вдавленными и рваными краями – следы действия кавитационных ударов, односторонне заполнявших область, образовавшуюся после разряда.

Кроме дисков разряды осуществлялись в погруженных в воду цилиндрах из пластилина, внутри которых через сквозные отверстия были пропущены электроды.

В этом случае при той же длине промежутка отмечалась необходимость повышения пробивного напряжения.

С увеличением длины разряда, когда полость внутри цилиндра становилась большой, стенка цилиндра оказывалась не в состоянии задерживать действие кавитационного удара и вминалась внутрь.

Данный метод исследования давления гидроудара является неоднозначным, зависящим от формы применяемого элемента (диск, цилиндр). Кроме того, нет оценки величины давления гидроудара по изменениям формы дисков, цилиндров и других параметров (изменение глубины погружения разряда и дисков), которые влияют на величину давления электрогидроудара.

Поэтому возникает задача по разработке способа непосредственного определения давления электрогидроудара без экспериментального определения физических и электрических параметров установки.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для определения величины давления электрогидроудара предложен расчет по максимальному прогибу в упругой, жестко защемленной пластине, соответствующей схеме жестко защемленной консольной балки. В основу этого метода введено допущение, что давление на фронте ударной волны на ограниченном расстоянии от источника (канала разряда) принимается постоянным. Поэтому действие давления электрогидроудара p (Н/м^2) на пластину (балку), принимаемую за первичный преобразователь, можно выразить через интенсивность равномерно распределенной нагрузки q (Н/м) (рис. 1):

$$q = \frac{plb}{l} = pb, \quad (5)$$

где l – длина пластины; b – ширина пластины.

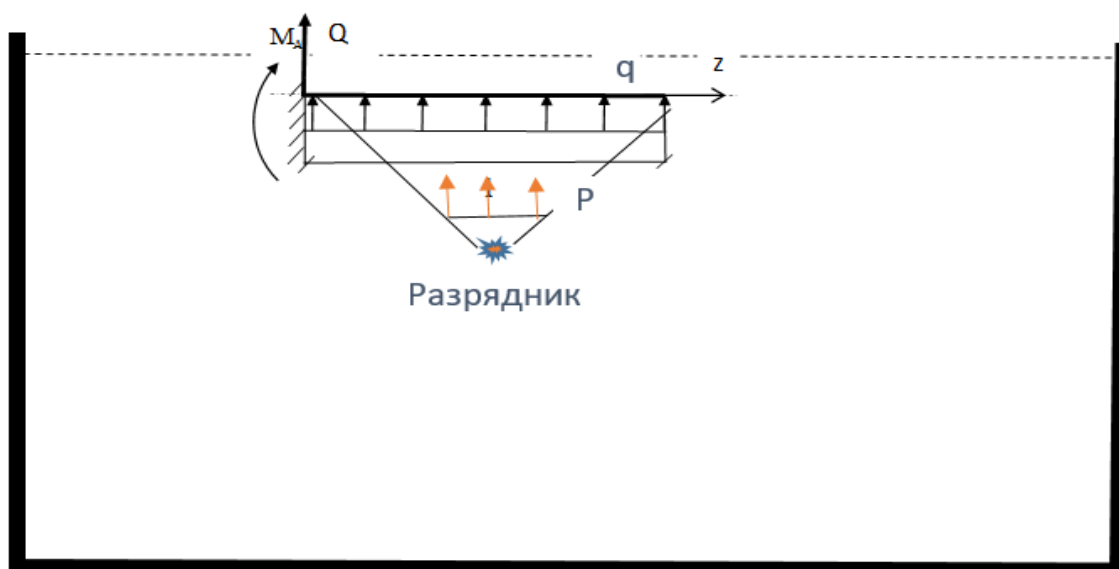


Рис. 1. Схема преобразования давления в распределенную нагрузку
Fig. 1. Scheme of pressure conversion to distributed load

В момент прохождения ударной волны от единичного электрического разряда опытным путем определяется прогиб и по его величине можно в программном комплексе ANSYS и аналитически определить соответствующее давление электрогидроудара. Первичный преобразователь (пластина) должна быть покрыта жидкостью и находиться у границы раздела жидкости с воздухом внутри жидкости. Это необходимо для того, чтобы пренебречь силой сопротивления воды при импульсном давлении электрогидроудара.

Конструктивная схема устройства приведена на рис. 2. В емкость с водой устанавливается жестко заземленная стальная пластина определенного размера, для которой экспериментально определяется прогиб от давления.

Для этого составляется электрическая цепь. При прогибе от давления пластина касается электрода (стального болта, находящегося в соединении с гайкой в неподвижной закрепленной пластине, что позволяет регулировать его положение), установленного на расстоянии, соответствующем максимальному прогибу. При замыкании цепи сигнал поступает на вход микроконтроллера Arduino Nano с контроллером ATmega328, затем по программе записывается диаграмма сигнала на компьютере, которая позволяет фиксировать замыкание электрической цепи.

Внешний вид диаграммы при замыкании контакта, приведен на рис. 3.

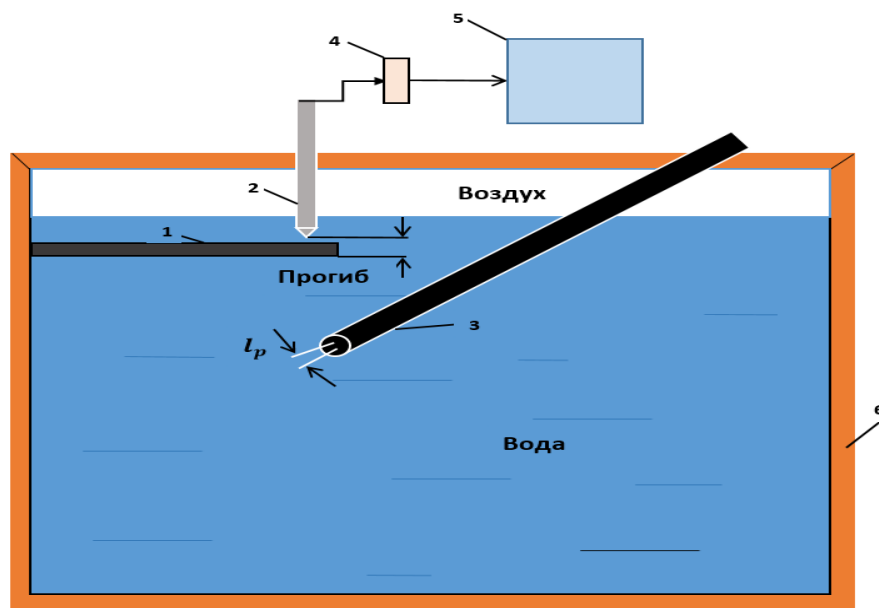


Рис. 2. Конструктивная схема измерения прогиба:

1 – жестко заземленная пластина, 2 – электрод, 3 – разрядник,
 l_p – длина канала разряда, 4 – Arduino, 5 – компьютер, 6 – емкость

Fig. 2. Design diagram of deflection measurement:

1 – a rigidly pinched plate, 2 – an electrode, 3 – a spark gap,
 l_p – the length of the discharge channel, 4 – Arduino, 5 – computer, 6 – capacity

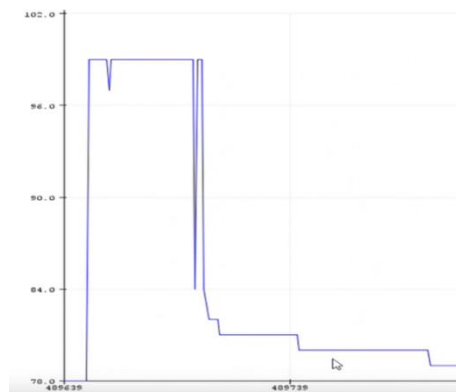


Рис. 3. Внешний вид диаграммы при замыкании контакта

Fig. 3. Diagram appearance when the contact is closed

На диаграмме явно видно «плато» электрического сигнала, свидетельствующего о замыкании электрода с пластиной, что говорит о возможности и надежности предложенного метода регистрации замыкания при импульсном разряде.

Для экспериментальных исследований прогибов при электрогидроударе была изготовлена установка (рис.4).

Она состоит из металлической емкости (1) объемом 10,6 л, жестко заземленной пластины (2) шириной $b = 20$ мм, толщиной $h = 3.0$ мм, длиной консоли $l = 87$ мм, разрядника, состоящего из высоковольтных проводов с фиксированным искровым промежутком между ними (3), соответствующим максимальной величине электрогидроудара электрода (4), связанного Arduino и компьютером.



Рис 4. Экспериментальная установка:
1 – металлическая емкость; 2 – пластина; 3 – разрядник; 4 – электрод
Fig. 4. Experimental setup:
1 – metal container; 2 – plate; 3 – spark gap; 4 – electrode

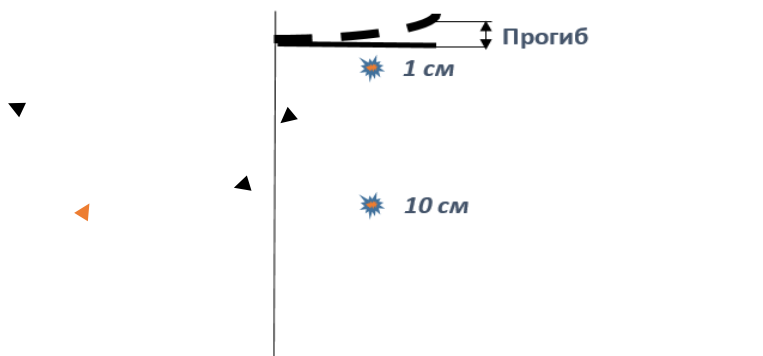


Рис. 5. Схема взаимного расположения пластины и разрядника
Fig. 5. Diagram of the relative position of the plate and the spark gap

Механические характеристики стальной пластинки (первичного преобразователя) определялись в ООО «ТЕСТСИСТЕМЫ» г. Иваново в соответствии с требованиями, представленными в [10]. Были проведены измерения прогибов пластины при различной величине расстояний по глубине между разрядником и пластиной (рис.5).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений прогиба пластины в зависимости от глубины расположения разрядника приведены в таблице. Для расчета давления

был применен программный комплекс ANSYS, который позволяет моделировать и проводить расчет напряжений, перемещений в сложных конструкциях, деталях машин, что позволяет оптимизировать их и повысить надежность.

Расчет производится по компьютерной модели исследуемого объекта. Для расчета напряжений, перемещений применяется метод конечных элементов (МКЭ).

Для обеспечения точности расчетов по модели проводилась верификация модели. Для чего необходимо подобрать минимальное количе-

ство элементов сетки, при котором результаты расчетов будут мало отличаться друг от друга. Для верификации был построен график зависимости максимального напряжения по Мизесу от количества элементов при прогибе полученном экс-

периментально 2,6 мм, для которого путем итераций расчетов было получено давление электрогидроудара $p=0,16$ МПа.

График зависимости напряжений от количества элементов разбиения приведен на рис. 6.

Таблица

Результаты измерений
Table. Measurement results

Глубина, см	Прогиб, мм
1	0,7
10	2,6



Рис.6. График зависимости максимального напряжения от количества элементов
Fig.6. Graph of the dependence of the maximum stresses on the number of elements

При количестве элементов разбиения 72, что соответствует размеру элемента разбиения 5 мм, следует, что это количество элементов разбиения является достаточным для обеспечения надежности и точности расчетов напряжений по предложенной модели пластины и, следовательно, для определения давления электрогидроудара.

Эквивалентные напряжения, соответствующие данному прогибу при наибольшем количестве элементов разбиения 72, приведены на (рис. 7).

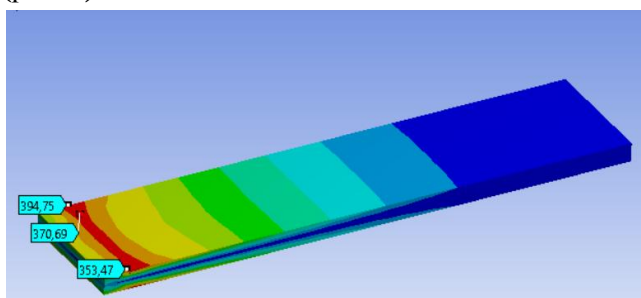


Рис.7. Эквивалентные напряжения
Fig.7. Equivalent stresses

Прогибы сечений пластины при давлении электрогидроудара $p=0,16$ МПа приведены на (рис. 8).

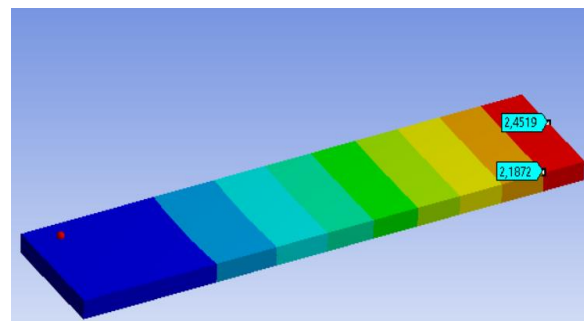


Рис.8. Прогибы сечений пластины
Fig.8. Deflections of the plate sections

Для определения прогибов также был использован метод начальных параметров [10] для расчетной схемы первичного преобразователя (рис. 9).

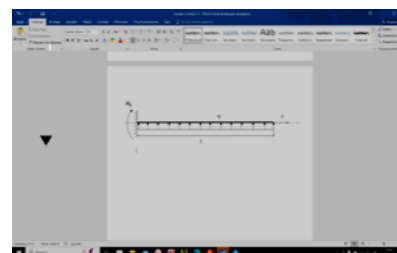


Рис.9. Расчетная схема первичного преобразователя
Fig.9. Calculation scheme of the primary converter

По этому методу эпюра прогибов рассчитывается по формуле:

$$v(z) = \frac{1}{EI} \left(\frac{M_0 z^2}{2} + \frac{Q_0 z^3}{6} + \frac{qz^4}{24} \right). \quad (6)$$

Учитывая начальные параметры: прогиб $V_0 = 0$; угол поворота сечения $\phi_0 = 0$; изгибающий момент $M_0 = ql^2/2$; поперечная сила $Q_0 = -ql$, получаем выражение для расчета максимальных прогибов на конце консоли при $z = l$:

$$v(l) = \frac{1}{8EI} ql^4 = \frac{1}{8EI} pbl^4. \quad (7)$$

По выражению $v(l)$ рассчитывается давление электрогидроудара:

$$p = \frac{v(l)8EI}{bl^4}. \quad (8)$$

Для значения прогиба 2,6 мм, размеров пластины: толщине $h=3,0$ мм, ширине $b = 20$ мм, длине консольной части $l = 87$ мм значение давления $p = 0,16$ МПа, что соответствует численному значению расчета в ANSYS. По полученному значению давления построены эпюры изгибающих моментов, поперечных сил, а также построена эпюра прогибов в пластине (рис. 8).

Для давления $p = 0,16$ МПа было рассчитано нормальное напряжение σ в крайних волокнах пластины при упругой деформации по формуле [11]:

$$\sigma = \frac{M_A}{W} = \frac{6M_A}{bh^2}. \quad (9)$$

Его значение составило $\sigma = 400$ МПа, что на 1% отличается от эквивалентного напряжения, рассчитанного численным способом.

Такое малое расхождение подтверждает численный расчет в программном комплексе ANSYS и надежность расчета.

При больших давлениях электрогидроудара расчет по данной методике для материала с известными механическими характеристиками при больших нормальных напряжениях, превышающих предел прочности, учитывая эффект наклепа, можно провести путем уменьшения размеров пластины, исходя из формулы (9) при условии линейной зависимости напряжения – деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кусанынов К.К., Нусупбеков Б.Р., Сакипова С.Е., Жуандыкова Г.А., Ботпаев Н.К. Электрогидроимпульсная технология восстановления эксплуатационных свойств теплообменников. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. 2013. № 2 (13). С. 86-91.
2. Терентьев В.В., Барабанов Д.В., Шевяков А.Н., Смирнов С.Ф. Конструкция установки для поверхностного упрочнения металлов методом электрогидроудара. Сборник научных трудов кафедры теоретической и прикладной механики. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново. 2023. С. 71-77.

Численный расчет давления имеет преимущество, т.к. позволяет рассчитать давление и при нелинейной зависимости напряжения – деформации при известных механических характеристиках материала пластины.

В частности, при удалении разрядника вглубь от пластины (рис. 5), давление на поверхности увеличивается. Это может быть в следствии отражения ударной волны от дна емкости. Предложенный метод измерения давления электрогидроудара может быть применен для исследований давлений в установках электрогидроудара.

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод оценки величины давления электрогидроудара по деформации упругой, жестко заземленной пластины в момент прохождения ударной волны от единичного электрического разряда.
2. Проведены опытные испытания применения Arduino для определения перемещений и получены диаграммы замыкания электрической цепи при измерении прогибов жестко заземленной пластины по предложенному методу.
3. Проведен расчет давления электрогидроудара в программном комплексе ANSYS.
4. Проведена верификация модели по расчету напряжений в пластине при фиксированном прогибе.
5. Получено выражение для расчета прогибов по методу начальных параметров. Расхождение полученных значений прогибов аналитическим методом и в программном комплексе ANSYS не превышает 1%.
6. Предложенный способ измерения давления может быть применен для исследования давления в установках электрогидроудара.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. Kusainov K.K., Nusupbekov B.R., Sakipova S.E., Zhuandykova G.A., Botpaev N.K. Electrohydroimpulse technology for restoring the operational properties of heat exchangers. *Modern science: research, ideas, results, technologies*. 2013. N 2 (13). P. 86-91.
2. Terentyev V.V., Barabanov D.V., Shevyakov A.N., Smirnov S.F. Installation design for surface hardening of metals by electrohydrostrike method. Collection of scientific papers of the Department of Theoretical and Applied Mechanics. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «V.I. Lenin Ivanovo State Power Engineering University». Ivanovo. 2023. P. 71-77.

3. **Терентьев В.В., Барабанов Д.В., Шевяков А.Н., Смирнов С.Ф.** Применение электрогидравлического эффекта в промышленности и сельском хозяйстве. В сборнике: Сборник научных трудов кафедры теоретической и прикладной механики. Сборник статей. Иваново, 2024. С. 80-87.
4. **Терентьев В.В., Смирнов С.Ф., Барабанов Д.В., Шевяков А.Н.** Исследование влияния электрогидроудара на твердость металлической поверхности. Надежность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. С. 378-384.
5. **Суrowицкий И.И., Терентьев В.В., Телегин И.А., Рябинин В.В.** Исследование противоизносных свойств медьсодержащих покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления. В сборнике: Надежность и долговечность машин и механизмов. Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции. Иваново. 2022. С. 552-557.
6. **Колобов М.Ю., Воробьев С.В., Миронов Е.В., Куваева Е.Ю., Сахаров С.Е., Колобова В.В.** Влияние режимных параметров оборудования на интенсивность изнашивания конструкционных материалов. *Российский химический журнал*. 2023. Т. LXVII, № 1. С. 64–69. DOI: 10.6060/rcj.2023671.9.
7. **Колосовская Н.А.** Расчет характеристик и КПД электрогидравлического удара. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2007. № 3 (12). С. 57-69.
8. **Арсентьев В.В.** К теории импульсных разрядов в жидкой среде. *Прикладная механика и техническая физика*. 1965. №5. С. 51-57.
9. **Асанов А.А.** Технологическое оборудование для проходки скважин импульсными электрическими разрядами. *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*. 2018. № 3 (47). С. 52-57.
10. ГОСТ 1497-2023 Металлы. Методы испытаний на растяжение (ISO 6892-1:2019, NEQ) [Текст]. Введ. 01.07.2024. Взамен ГОСТ 1497-84. М.: Российский институт стандартизации. 2024. 50 с.
11. **Молотников В.Я.** Сопротивление материалов: учебное пособие для вузов. Санкт-Пб.: Лань, 2024. 312 с.
3. **Terentyev V.V., Barabanov D.V., Shevyakov A.N., Smirnov S.F.** Application of the electrohydraulic effect in industry and agriculture. In the collection: Collection of scientific papers of the Department of Theoretical and Applied Mechanics. Collection of articles. Ivanovo, 2024. P. 80-87.
4. **Terentyev V.V., Smirnov S.F., Barabanov D.V., Shevyakov A.N.** Investigation of the effect of electrohydrostroke on the hardness of a metal surface. Reliability and durability of machines and mechanisms: collection of materials of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference– Ivanovo: Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2023. P. 378-384.
5. **Surovitsky I.I., Terentyev V.V., Telegin I.A., Ryabinin V.V.** Investigation of anti-wear properties of copper-containing coatings applied by cold gas dynamic spraying. In the collection: Reliability and durability of machines and mechanisms. Collection of materials of the XIII All-Russian Scientific and practical Conference. Ivanovo. 2022. P. 552-557.
6. **Kolobov M.Yu., Vorobyov S.V., Mironov E.V., Kuvaeva E.Yu., Sakharov S.E., Kolobova V.V.** Influence of equipment operating parameters on the wear rate of structural materials. *Russian Chemical Journal*. 2023. Vol. LXVII, N 1. P. 64–69. DOI: 10.6060/rcj.2023671.9.
7. **Kolosovskaya N.A.** Calculation of characteristics and efficiency of electrohydraulic shock. *Proceedings of the St. Petersburg University of Railway Communications*. 2007. N 3 (12). P. 57-69.
8. **Arsentiev V.V.** On the theory of pulsed discharges in a liquid medium. *Applied mechanics and technical physics*. 1965. N 5. P. 51-57.
9. **Asanov A.A.** Technological equipment for drilling wells with pulsed electric discharges. *Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*. 2018. N 3 (47). P. 52-57.
10. GOST 1497-2023 Metals. Tensile testing methods (ISO 6892-1:2019, NEQ) [Text]. Introduced.01.07.2024. Instead of GOST 1497-84. M: Russian Institute of Standardization. 2024. 50 p.
11. **Molotnikov V.Ya.** Resistance of materials: a textbook for universities. S- Pb: Lan, 2024. 312 p.

Поступила в редакцию(Received) 20.03.2025
Принята к опубликованию (Accepted) 26.04.2025