

Оценка точности измерений при проведении экспериментальных исследований гидродинамических и энергетических характеристик электровзрыва в жидкости

А. Д. Блащенко, И. Н. Старков*

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,

г. Николаев, 54018, Украина

**e-mail: igorstark21@gmail.com*

Поступила в редакцию 09.10.2024

После доработки 03.02.2025

Принята к публикации 05.02.2025

Описан подход к проведению экспериментов и определению оптимального количества опытов при экспериментальных исследованиях гидродинамических и энергетических характеристик при электровзрыве в жидкости. Статистически проанализированы полученные экспериментальные данные, приведен пример расчета доверительного интервала и точности измерения амплитуды давления при электровзрыве. Использование указанного подхода позволило значительно сократить количество необходимых опытов, сохраняя высокую точность и достоверность результатов исследований.

Ключевые слова: электровзрыв в жидкости, высоковольтный электрохимический взрыв, разрядно-импульсные технологии, экспериментальный стенд, генератор импульсных токов, преобразование энергии, гидродинамические характеристики, энергетические характеристики, точность экспериментов, приборная погрешность

УДК 53.088.3

<https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.1.087>

ВВЕДЕНИЕ

Разрядно-импульсные технологии (РИТ), основанные на электровзрыве в конденсированной среде, такой как вода, давно нашли широкое применение в различных отраслях промышленности применительно как к открытым объемам в виде баков или ванн, так и к замкнутым объемам в виде герметичных разрядных камер. К ним относятся технологии по воздействию на различные материалы [1–3] и повышению дебита добывающих скважин [4–7], очистке крупногабаритного литья, использованию электровзрыва в медицине [8], сельском хозяйстве [9], а также для и в качестве источника акустических сигналов [10]. В последнее время наблюдается тенденция к увеличению энергоемкости электрогидроимпульсных установок, работающих на основе подводного электровзрыва. Однако ограниченные энергетические и ресурсные характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов, используемых в качестве накопителей энергии, ставят под сомнение возможность создания такого оборудования, а следовательно, и дальнейший рост эффективности соответствующих РИТ [11–13].

Для решения этой проблемы было предложено объединить традиционный электровзрыв в воде со взрывом химических конденсированных составов. Электровзрыв в химически активных

средах, который известен как высоковольтный электрохимический взрыв (ВЭХВ), дает возможность эффективно сочетать достоинства, присутствующие экзотермическим смесям (ЭС), такие как высокая удельная энергоемкость, с преимуществами традиционного электровзрыва в жидких средах, включающими возможность варьировать параметрами генераторов импульсных токов (ГИТ), а именно режимами ввода энергии в канал разряда, обеспечивая при этом необходимые условия зажигания и горения ЭС и тем самым решая требуемые технологические задачи при использовании такого подхода в каждой конкретной РИТ.

Институт импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины активно занимается разработкой, совершенствованием и внедрением технологий, основанных на таких методах преобразования энергии, и это является важным шагом в обеспечении будущей энергетической потребности и промышленного развития [14–20]. Путем комплексного использования электрохимического взрыва с традиционными технологиями можно разработать эффективное, малогабаритное импульсное оборудование для осуществления потребностей РИТ, используемых во многих отраслях промышленности.

За последние годы ИИПТ НАН Украины в рамках выполняемых научно-исследовательских

работ (НИР) сосредоточил свои усилия на проведении обширных и многоплановых теоретических и экспериментальных исследований, нацеленных на получение глубокого и всестороннего понимания процессов, лежащих в основе ВЭХВ, а именно на анализе и выявлении оптимальных зависимостей исходных данных и режимов ввода электрической энергии в канал разряда, обеспечивающих эффективную его реализацию. Особое внимание уделяется анализу и исследованию разнообразных граничных условий, оказывающих влияние на преобразование энергии в ВЭХВ, таких как размеры камеры, выбор экзотермического состава, многоконтурный ввод энергии, время между включениями контуров (время задержки), которые существенно влияют на эффективность преобразования энергии, результативное зажигание и максимально возможное сгорание ЭС. Ключевым моментом в повышении эффективности такой технологии является необходимость поддержания электрохимической реакции в канале разряда. Для этого требуется обеспечить согласованную работу нескольких источников электрической энергии путем поочередного включения нескольких ГИТ с заданной временной задержкой. В этой связи большое значение приобретает выбор компонентов, рецептура и приготовление ЭС, определение оптимального соотношения между количеством ЭС и величиной вводимой электрической энергии, реализация оптимального временного режима ввода энергии в канал разряда путем применения многоконтурной схемы ГИТ. А в случае реализации ВЭХВ в замкнутом объеме все вышеприведенное следует согласовать с объемом соответствующей разрядной камеры. В процессе проведения НИР выполнялись множественные экспериментальные исследования по методам оптимизации, вследствие которых проводился анализ полученных результатов и формулировались выводы по внедрению инновационных решений для повышения эффективности конкретной технологии.

Как уже было замечено, исследования, которые проводятся в рамках выполнения научно-исследовательских работ, как правило, предполагают достаточно большой объем экспериментов, связанных с варьированием в широких пределах входных параметров. А так как получаемые результаты должны быть использованы в дальнейших расчетах, к ним, несомненно, предъявляются высокие требования с точки зрения их точности. Это, в свою очередь, влечет за собой необходимость большого числа повторяемых опытов. В то же время большое число проводимых экспериментов приводит к

вынужденным затратам, как материальным, в виде расходов на электроэнергию, на приобретение составляющих для комплектации экспериментальных стендов, для приготовления экзотермических смесей и т.п., так и временным, связанным с затратами времени на подготовку и проведение каждого эксперимента.

Соответственно, целесообразно минимизировать количество повторяемых экспериментов с обеспечением высокой точности получаемых результатов, которые, в свою очередь, послужат основой для последующих анализов и выводов в данной области исследований.

В связи с этим целью данной работы было выбрать подход (методику) оценки точности результатов экспериментальных исследований гидродинамических и энергетических характеристик при электровзрыве в жидкости, что позволит минимизировать количество повторяемых экспериментов.

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

Точность (или относительная точность) в экспериментах – это мера того, насколько данные измерений сгруппированы вокруг среднего значения, то есть она отражает близость результатов измерения к истинному значению измеряемой величины и их стабильность. Безусловно, получаемые экспериментальным путем результаты наблюдений подвержены случайным отклонениям от реального значения, то есть содержат случайную ошибку. Также во время проведения экспериментальных исследований имеет место систематическая приборная ошибка, которую можно считать постоянной на протяжении измерений. Результаты многократных измерений и случайную ошибку оценивают статистическими методами при обработке результатов наблюдений.

Для статистического анализа экспериментальных данных необходимо использовать следующие характеристики случайной величины: математическое ожидание, дисперсию, среднее квадратичное отклонение и нормальное распределение. Математическое ожидание и дисперсия – числовые характеристики случайной величины, которые применяются наиболее часто. Они характеризуют наиболее важные черты распределения, а именно положение и степень разброса величины [21].

Математическое ожидание случайной величины – сумма произведений всех ее значений x_i на вероятность этих значений p_i :

$$M[X] = \sum_{i=1}^n x_i \times p_i, \quad (1)$$

где x_i – значение случайной величины; p_i – вероятность.

Дисперсия случайной величины является характеристикой разброса случайной величины вокруг ее математического ожидания и равна:

$$D[X] = M[X^2] - (M[X])^2. \quad (2)$$

Дисперсия имеет размерность квадрата случайной величины, что иногда неудобно, поэтому чаще используется стандартное отклонение:

$$\sigma_z[X] = \sqrt{D[X]}. \quad (3)$$

Известно, что практически все значения нормально распределенной случайной величины отвечают правилу трех сигм [22] и находятся в интервале:

$$M[X] \pm 3\sigma_z[X]. \quad (4)$$

При нормальном распределении результатов наблюдений многократного измерения по его результату (то есть по оценке реального значения физической величины, которая измеряется), принимают среднее арифметическое результатов наблюдений (экспериментальных данных):

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i, \quad (5)$$

где x_i – результат i -го наблюдения; n – количество наблюдений.

В качестве количественной характеристики случайного разброса результатов наблюдений (экспериментальных данных), принимают оценку среднеквадратичного отклонения (СКО) результатов наблюдений, которое вычисляют по следующей формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}. \quad (6)$$

Случайную погрешность результата многократного измерения, рассматриваемую как случайную величину, количественно характеризует СКО среднего арифметического (СКО результата измерения).

$$S(\bar{X}) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)n} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} = S / \sqrt{n}. \quad (7)$$

Таким образом, многократное измерение с промежуточной обработкой результатов наблюдений позволяет значительно повысить точность результата измерения за счет уменьшения влияния на него случайной погрешности.

Как правило, результат измерения представляют в виде интервальной оценки, которую характеризует размер доверительного интервала,

охватывающего действительное значение измеряемой величины с заданной (доверительной) вероятностью P . Истинное значение измеряемой величины с доверительной вероятностью P находится в пределах интервала:

$$\bar{X} - t \times S(\bar{X}), \bar{X} + t \times S(\bar{X}), \quad (8)$$

где t – коэффициент Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности P и количеству результатов наблюдений n .

Наиболее часто доверительная вероятность принимается как $P = 0,95$. Результат измерения в этом случае представляется в виде:

$$\bar{X} \pm \varepsilon(P) \quad P = \dots, n = \dots \quad (9)$$

где $\varepsilon(P) = t \times S(\bar{X})$ – доверительный интервал для случайной погрешности результата многократного измерения (или доверительная случайная погрешность).

В плане оценки точности проведенных измерений применяется относительная ошибка, выраженная в процентах:

$$\sigma = \frac{\varepsilon(P)}{X} \times 100\%. \quad (10)$$

Итоговая (суммарная) погрешность результата измерения состоит из случайной и систематической приборной ошибки.

Касаясь систематической приборной погрешности, следует отметить, что инструментальные или приборные погрешности, обусловленные конструктивными и технологическими недостатками средств измерения, определяются при заводских испытаниях и указываются в их паспортах.

Измерительные приборы по точности делят на классы. Точность средства измерения – это характеристика, отражающая близость его погрешности к нулю. Чем меньше погрешность, тем точнее средство измерения.

Класс точности указывается на шкале прибора. Его обозначение зависит от способа нормирования основной допустимой погрешности прибора и обозначается числом следующего ряда: 6; 4; 2,5; 1,5; 1,0; 0,5; 0,2; 0,1; 0,05; 0,02; 0,01.

Класс точности, указанный в виде числа, обозначает максимальную относительную погрешность результата измерения, выраженную в процентах. Абсолютная погрешность в этом случае составляет:

$$\theta x = \gamma \times x / 100, \quad (11)$$

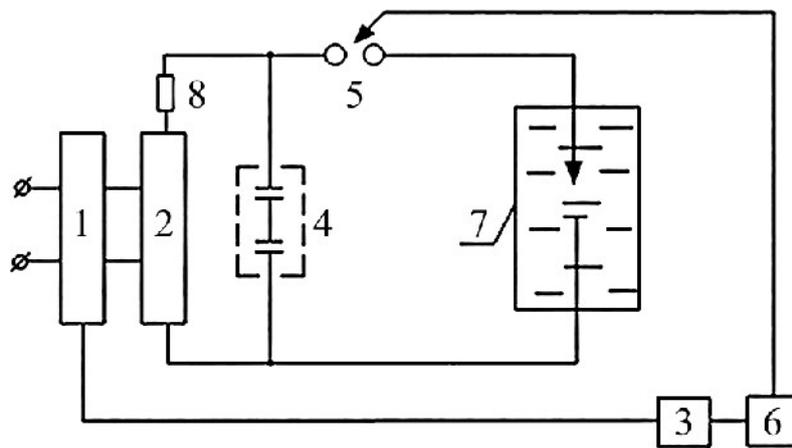


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда.

где x – отсчет измеряемой величины по шкале прибора.

Для определения систематической приборной погрешности измерения нужно учесть погрешности отдельных приборов или элементов:

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 + \gamma_4^2 + \gamma_n^2}. \quad (12)$$

Полная (суммарная) относительная погрешность измерений, определяющая точность проведенных исследований, может быть представлена как:

$$\delta = \sqrt{\sigma^2 + \gamma^2}. \quad (13)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Данная методика была использована в исследованиях гидродинамических и энергетических характеристик как в работах по электровзрыву в жидкости, так и при ВЭХВ. Все исследования проводились на специально разработанном экспериментальном стенде, структурная схема которого приведена на рис. 1, где 1 – регулировочный трехфазный трансформатор масляный РТТМ 25/0,5, его основное предназначение – питание технологических установок, требующих глубокой плавной регулировки или стабилизации напряжения. В данном случае он применен для регулирования питающего напряжения высоковольтного выпрямителя–трансформатора ВТМ 15/50 и, соответственно, зарядного напряжения. Регулировку напряжения осуществляют с пульта управления; 2 – выпрямитель–трансформатор ВТМ 15/50 мощностью до 15 кВт, обеспечивающий выпрямленное выходное напряжение до 50 кВ; 3 – пульт управления; 4 – батарея импульсных конденсаторов; 5 – воздушный управляемый разрядник; 6 – блок поджига; 7 – разрядная камера; 8 – зарядное сопротивление.

Результаты экспериментальных исследований показали, что амплитудные значения тока, напряжения и давления при электровзрыве в

воде или при ВЭХВ подчиняются закону нормального распределения (см. рис. 2). Поэтому было предложено провести статистическую проверку каждого из повторяемых опытов (начиная с третьего повтора) в соответствии с выражениями (5)–(10).

Доверительный интервал и точность измерения амплитуды давления при электровзрыве, инициируемом микропроводником или экзотермической смесью (ЭС), не представляют статистически значимых различий. Представим расчет на примере опытов электровзрыва, инициируемых микропроводником, в воде при запасенной энергии $W = 603,125$ Дж, напряжении $U = 25$ кВ и межэлектродном промежутке $l = 30$ мм. Расчеты выполнялись для значений напряжения с датчика давления, пропорциональных значению давления через калибровочный коэффициент $K_p = 6,1 \times 10^4$ Па/В. Датчик расположен на расстоянии 210 мм от разрядного промежутка.

Как показали расчеты (см. таблицу), для достижения приемлемой точности измерения достаточно пяти повторений соответствующих наблюдений.

Для исследуемых параметров при различных режимах величина относительной случайной погрешности σ , характеризующая точность проводимых измерений, была на уровне, приведенном в рассмотренном примере.

Становится очевидным, что такую статистическую проверку следует проводить для каждой новой схемы экспериментального стенда или при изменении его параметров.

Проведение качественных исследований и получение надежных данных зависит также от качественной настройки лабораторного стенда. Были выполнены тщательный подбор и калибровка оборудования, что обеспечило высокую точность и надежность всех измерений, проводимых в рамках экспериментов, и получение достоверных данных с высокой степенью их повторяемости.

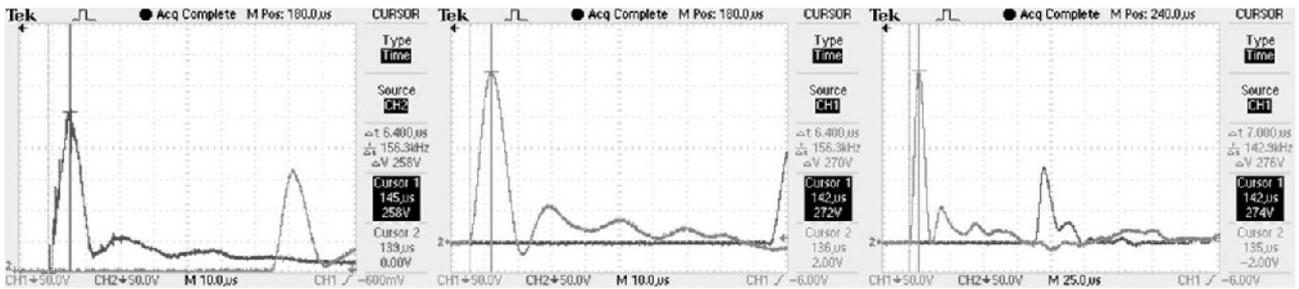


Рис. 2. Пример осциллограмм амплитуд импульса давления из опытов в ходе эксперимента.

Таблица. Расчет доверительного интервала и точности измерения каждого из повторяемых опытов (начиная с третьего повтора)

Номера наблюдений	1	2	3	4	5
x_i	240	246	274	258	272
$\bar{X} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i$			253,33	254,5	258
$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}$			18,148	15,0	15,166
$S(\bar{X}) = S/\sqrt{n}$			10,477	7,5	6,782
$t_{P=0,95, n=5}$			4,3	3,18	2,78
$\varepsilon(P) = t \times S(\bar{X})$			45,051	23,85	18,85
$\bar{X} \pm \varepsilon(P), P = \dots, n = \dots$			253,33 \pm 45,051 $P = 0,95, n = 3$	254,5 \pm 23,85 $P = 0,95, n = 4$	258 \pm 18,85 $P = 0,95, n = 5$
$\sigma = \frac{\varepsilon(P)}{\bar{X}} \times 100\%$			17,78%	9,37%	7,3%

При проведении экспериментальных исследований в рамках выполняемых НИР электрические сигналы датчиков тока и напряжения фиксировались запоминающими осциллографами типа Tektronix TDS 2024B, OWON XDS 3104E, импульс давления и период пульсации парогазовой полости – соответственно осциллографами TDS 2012B, TDS 1012B, Tektronix TDS 2024B, OWON XDS 3104E.

Касаясь систематической погрешности измерений, также необходимо учитывать влияние измерительных кабелей осциллографа, возможно, вносящих погрешность в измерения, которая будет зависеть от их длины, типа, частоты сигнала и других факторов. Согласно документации, предоставленной производителем и руководством по эксплуатации этих осциллографов, оценочная погрешность таких измерений составляет не более 3%.

Импульсное давление в водной среде измерялось с помощью пьезоэлектрического датчика давления фирмы Bruel & Kjaer Hydrophone Model 8100, представляющего собой широкодиапазонный гидроакустический пьезоэлектрический преобразователь импульса давления, погрешность которого, согласно

паспортным данным, в ходе эксперимента не более 0,5%.

Контроль зарядного напряжения до 25 кВ осуществлялся с помощью электростатического киловольтметра типа С196 с относительной погрешностью 1%.

Считывание временной зависимости тока осуществлялось с помощью трансформатора импульсного тока от фирмы Stangenes Inc модели 3–0,01, относительная погрешность которого составляет 0,5%.

Считывание временной зависимости импульсного напряжения осуществлялось с помощью активно-емкостного делителя напряжения, относительная погрешность которого зависит от точности и качества элементов, используемых в его схеме. Для высокоточных импульсных измерений был собран делитель напряжения с расчетной допустимой погрешностью, не превышающей 1%.

Во время изготовления экзотермических смесей были задействованы измерительные приборы, такие как ювелирные весы, погрешность которых составляла не более 1%.

Как видно, среди всех инструментов и устройств, использованных в данных исследо-

ваниях, наибольшую относительную погрешность измерения (до 3%) имеют осциллографы, остающиеся в пределах указанных паспортных технических характеристик.

В формуле (12) относительная приборная погрешность составляет 3,54%.

А следовательно, в формуле (13) суммарная относительная погрешность – 8,11%.

Предварительная статистическая оценка обеспечила возможность проведения исследований в рамках научно-исследовательской работы с относительной погрешностью измерений 8,11% даже при проведении всего пяти повторений каждого из наблюдений.

Такой уровень точности измерений для текущей научно-исследовательской работы можно считать достаточным, он обеспечивает возможность дальнейшего использования полученных данных для построения графиков зависимостей с высокой степенью аппроксимации для качественного последующего анализа и выводов.

ВЫВОДЫ

В работе представлен подход к оценке точности результатов комплексных экспериментальных исследований гидродинамических и энергетических характеристик при электровзрыве в жидкости. Использование данного подхода позволило получить достаточно высокий уровень точности измерений при проведении экспериментальных исследований, тем самым обеспечив возможность использования полученных результатов для последующего анализа в аналитических расчетах и для математического моделирования.

Путем тщательного подбора и калибровки лабораторного оборудования с использованием измерительных приборов высокого класса точности была достигнута высокая степень повторяемости экспериментальных результатов, что позволило значительно сократить необходимое количество повторений опытов. Это, в свою очередь, привело к оптимизации затрат времени и ресурсов.

Систематический подход к проведению экспериментов обеспечивает надежную основу для последующего анализа и обобщения полученных данных экспериментальных исследований гидродинамических и энергетических характеристик при электровзрыве в жидкости.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Xiaodong, Wang and Jing, Zhu, Research and applications of high-voltage pulse discharge crushing, *Eur. J. Electr. Eng.*, 2019, vol. 21, no. 2, p. 157.
<https://doi.org/10.18280/ejee.210205>
- Banožić, M., Jozinović, A., Grgić, J., Miličević, B., et al., High voltage electric discharge for recovery of chlorogenic acid from tobacco waste, *Sustainability*, 2021, vol. 13, art. ID 4481.
<https://doi.org/10.3390/su13084481>
- Rizun, A.R. Denisjuk, T.D. and Domershchikova, A.O., Electric discharge in the process for recovering the wastes of printed circuit boards, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2017, vol. 53, no. 6, p. 592.
<https://doi.org/10.3103/S1068375517060096>
- Kern, Lee, Kyoung-Jae, Chung, Hwang, Y.S. and Kim, C.Y., Underwater spark discharge with long transmission line for cleaning horizontal wells, *J. Appl. Phys.*, 2017, vol. 121, art. ID 243302.
<https://doi.org/10.1063/1.4986634>
- Kyoung-Jae, Chung, Seok-geun, Lee, Hwang, Y.S. and Kim, C.Y., Modeling of pulsed spark discharge in water and its application to well cleaning, *Curr. Appl. Phys.*, 2015, vol. 15, no. 9, p. 977.
<https://doi.org/10.1016/j.cap.2015.05.010>
- Хвоцан, О.В., Смирнов, О.П., Залежність енергетичних процесів високовольтних електророзрядних свердловинних комплексів СКІФ від характеристик навантаження, *Технічна електродинаміка*, 2022, №1, с. 58.
<https://doi.org/10.15407/techned2022.01.058>
- Smirnov, A.P., Kosenkov, V.M., Zhekul, V.G. and Poklonov, S.G., The study of the effect of the electrodischarge action modes on viscous deposits in cylindrical channels, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2010, vol. 46, no. 3, p. 237.
<https://doi.org/10.3103/S1068375510030087>
- Mitsuhiko, Sato, Takashi. Sakugawa, Tomohiko, Yamashita, Nushin, Hosano, et al., Effects of voltage and current waveforms on pulse discharge energy transfer to underwater shock waves for medical applications, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2020, vol. 48, no. 7, p. 2639.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2020.2992638>
- Marček, T., Kovač, T., Jukić, K., Lončarić, A., et al., Application of high voltage electrical discharge treatment to improve wheat germination and early growth under drought and salinity conditions, *Plants*, 2021, vol. 10, art. ID 2137.
<https://doi.org/10.3390/plants10102137>
- Liang, Qiao, Xiaobing, Zhang, Bing, Yan, Yang, Liu, et al., An underwater discharge shockwave separation method based on minimum-phase cepstrum, *AIP Adv.*, 2021, vol. 11, art. ID 095109.
<https://doi.org/10.1063/5.0064322>
- Вовченко, А.И., 50-летний путь развития: теория и практика электроразрядных процессов,

- Материалы XVI международной научной конференции "Физика импульсных разрядов в конденсированных средах". Николаев: КП "Миколаївська обласна друкарня", 2013, с. 3.*
12. Вовченко, А.И., Посохов, А.А., Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах. Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.
 13. Малошевский, П.П., Основы разрядно-импульсной технологии. Киев: Наукова думка, 1983. 258 с.
 14. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Козырев, С.С., Овчинникова, Л.Е., Синтез комбинированных энергоисточников на основе высоковольтного электрохимического взрыва, *ЭОМ*, 2023, т. 59, № 2, с. 67.
<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.2.67>
 15. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Блащенко, А.Д., Старков, И.Н., Факторы влияния на энергетическую эффективность экзотермических превращений при управляемом высоковольтном электрохимическом взрыве, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 2, с. 52.
<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.2.52>
 16. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Козырев, С.С., Овчинникова, Л.Е., Высоковольтный электрохимический взрыв в разрядно-импульсных технологиях, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 1, с. 85.
<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.1.85>
 17. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Параметры высоковольтного электрохимического взрыва в условиях управляемого ввода электрической энергии, *ЭОМ*, 2020, т. 56, № 2, с. 35.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.3747849>
 18. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Старков, И.Н., Алгоритм расчета параметров комбинированного электроразрядного источника энергии при высоковольтном электрохимическом взрыве в ограниченных объемах, *ЭОМ*, 2018, т. 54, № 3, с. 69.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1297941>
 19. Вовченко, А.И., Демиденко, Л.Ю., Старков, И.Н., Процессы преобразования энергии при высоковольтном электрохимическом взрыве в ограниченных объемах, *ЭОМ*, 2017, т. 53, № 5, с. 41.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1054064>
 20. Блащенко, А.Д., Разменов, Е.П., Старков, И.Н., Модернизация управления включением контуров двухконтурного генератора импульсных токов, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 1, с. 93.
<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.1.93>
 21. Leonard, J., Kazmier, *Schaum's Outline of Business Statistics*. New York: McGraw-Hill, 2009. 422 p.
 22. Erik W. Grafarend. *Linear and Nonlinear Models: Fixed Effects, Random Effects, and Mixed Models*. Walter de Gruyter, Berlin, 2006, 752 p.

Summary

This paper presents a methodological approach for conducting experimental studies and determining the optimal number of trials in research related to high-voltage electrochemical explosion (HVECE). A comprehensive statistical analysis of the experimental data was performed and a case study is provided to illustrate the calculation of confidence intervals and the accuracy of pressure amplitude measurements during electroexplosive events. The application of this approach enabled a significant reduction in the number of required experiments, while maintaining high levels of accuracy and reliability in the research outcomes.

Keywords: high-voltage electrochemical explosion, discharge-pulse technologies, experimental setup, pulsed current generator, energy conversion, hydrodynamic characteristics, energy characteristics, experiment accuracy, instrument error