

Давление на поверхность обсадной трубы скважины, создаваемое электрическим разрядом в воде

В. М. Косенков

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: v.m.kosenkov@gmail.com*

Поступила в редакцию 11.01.2024

После доработки 23.07.2024

Принята к публикации 29.07.2024

На основе совместного использования метода математического моделирования процесса электроразрядного воздействия на призабойную зону водозаборной скважины и физического эксперимента определено распределение давления на поверхности обсадной трубы. На основе экспериментальных данных выполнена верификация и уточнение математической модели в условиях малой емкости конденсаторной батареи и индуктивности разрядного контура. Согласованы показания датчика давления на поверхности обсадной трубы с результатами математического моделирования с учетом взаимосвязанных физических процессов в разрядном контуре, канале разряда и жидкости, заполняющей обсадную трубу водозаборной скважины.

Ключевые слова: электрический разряд в воде, водозаборная скважина, давление на обсадную трубу, математическое моделирование, импульсное давление

УДК 621.7.044.4:621.98

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.4.45>

ВВЕДЕНИЕ

Электроразрядные технологии применяют для обработки нефтяных и водозаборных скважин с целью увеличения их дебита [1–6]. Одним из основных действующих факторов в этих технологиях является генерируемая электрическим разрядом в жидкости волна давления [7–9], при этом в электроразрядном способе обработки нефтедобывающих, нагнетательных и артезианских скважин [10–12] определяющую роль играет амплитуда волны давления [13]. Несмотря на большое количество проведенных исследований, задача повышения эффективности электроразрядных технологий обработки скважин остается актуальной в научном и практическом отношении.

При восстановлении проницаемости призабойной зоны скважины большое значение имеет амплитуда падающей волны давления и распределение давления по поверхности обсадной трубы, а также связь давления с параметрами разрядного контура электроразрядного оборудования. Частично эта проблема была исследована в ряде работ [14–16], однако там не содержатся все необходимые данные, связывающие процессы в разрядном контуре, канале разряда и окружающей его жидкости, заполняющей призабойную зону скважины. Наиболее полно изучить эти процессы можно при совместном использовании метода математического моделирования и физического эксперимента. Математическое моделирование обеспечивает детальное описание

физических процессов и полей, сопровождающих электрический разряд в жидкости, но требует предварительной верификации математической модели, которую можно выполнить на основе данных физического эксперимента. Такой подход рассмотрен в данной работе на примере электроразрядного воздействия на обсадную трубу призабойной зоны скважины.

Цель данной работы – изучить возможность определения давления на обсадную трубу скважины, создаваемого электрическим разрядом в воде, с помощью математического моделирования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Математическое моделирование распределения давления на обсадную трубу скважины, создаваемого электрическим разрядом в воде, выполняли, используя схему призабойной зоны скважины, приведенную на [рис. 1](#). Полость 1 обсадной трубы 2 имеет диаметр D и заполнена водой. Длина трубы 2 намного больше ее диаметра D . Трубу 2 считали абсолютно жесткой. Для создания давления на внутреннюю поверхность трубы в нее осесимметрично помещали высоковольтный 3 и низковольтный 4 электроды, расстояние между которыми равно l . Электроды 3 и 4 подключены к разрядному контуру 5, содержащему конденсаторную батарею емкостью C , электрический разрядник 6, характеризующемуся индуктив-

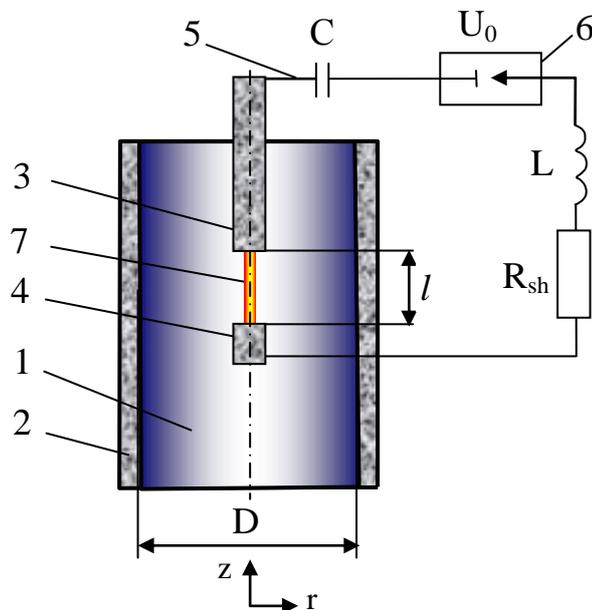


Рис. 1. Схема моделируемой системы: 1 – полость обсадной трубы, заполненная водой; 2 – обсадная труба; 3 – высоковольтный электрод; 4 – низковольтный электрод; 5 – разрядный контур; 6 – воздушный разрядник; 7 – канал разряда; C – емкость конденсаторной батареи; U_0 – напряжение заряда конденсаторной батареи; L – индуктивность разрядного контура; R_{sh} – сопротивление элементов разрядного контура (без канала разряда).



Рис. 2. Внешний вид волноводного пьезоэлектрического датчика импульсного давления типа ДТХ-1 [16].

ностью L и активным сопротивлением R_{sh} всех элементов контура 5, за исключением канала разряда 7. Батарея конденсаторов заряжается до напряжения U_0 , после чего разрядник 6 замыкает электрический контур 5 и между электродами 3 и 4 возникает разность потенциалов, приводящая к электрическому пробое слою воды между ними. В результате этого между электродами 3 и 4 протекает электрический ток, приводящий к образованию канала разряда 7, заполненного плазмой. Давление в канале 7 быстро повышается, что приводит к его расширению и генерированию волн давления в окружающей его воде. Волны достигают поверхности обсадной трубы 2 и создают на нее давление, благоприятно влияющее на увеличение проницаемости призабойной зоны скважины, что и является целью воздействия на нее. Основная задача данного исследования состоит в определении распределения давления на внутренней поверхности трубы 2.

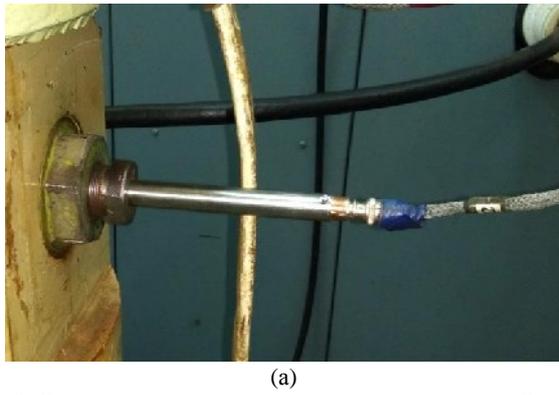
Для исследования использовали математическую модель электрического разряда в воде [17], в которой учтены процессы в разрядном контуре, канале разряда и окружающей его жидкости, заполняющей разрядную камеру осесимметричной формы. Сравнение результатов, полученных по математической модели [17], с данными экспериментов [18–20] показало их удовлетворительное согласование, что свидетельствует об адекватности математической модели [17] физическим явлениям, происхо-

дящим при электрическом разряде в воде, и возможности ее использования для решения подобных задач. Однако в данной работе индуктивность разрядной цепи и емкость конденсаторной батареи на 1–2 порядка меньше, чем в работах [18–20]. Поэтому необходимо выполнить дополнительное тестирование математической модели [17]. Для этого использовали экспериментальные данные из [16]. В нашей статье приведены экспериментальные данные, полученные при подготовке статьи [16], но не полностью в ней представленные.

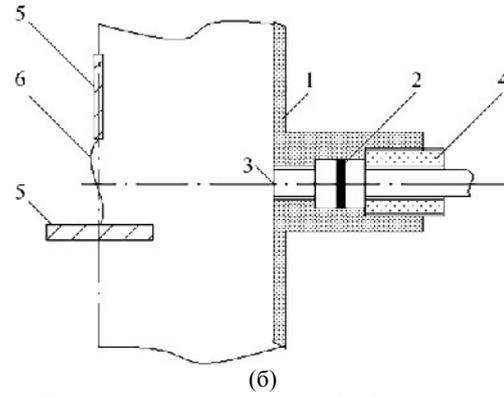
Для измерения параметров волны давления в работе [16] использовали волноводный пьезоэлектрический датчик импульсного давления типа ДТХ-1 [21], который был разработан в ИИПТ НАН Украины. Внешний вид датчика представлен на рис. 2. Датчик давления ДТХ-1 позволяет исследовать временной профиль волн сжатия, источником которых является электрический разряд в воде, в закрытых объемах жидкости с максимальным амплитудным значением до 150 МПа. Датчик ДТХ-1 крепился в специальное отверстие на боковой стенке разрядной камеры в экваториальной плоскости к каналу разряда. Общий вид установленного датчика давления и схема его крепления приведены на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе исследования, в соответствии с работой [16], полагали, что $D = 120$ мм. Этот



(a)



(б)

Рис. 3. Схема крепления датчика на корпусе разрядной камеры: внешний вид (а); схема крепления (б): 1 – корпус разрядной камеры; 2 – уплотнительное резиновое кольцо; 3 – доньшко датчика; 4 – прижимная гайка; 5 – электроды; 6 – канал электрического разряда [16].

диаметр близок к стандартным размерам обсадных труб для скважин. Расстояние между электродами $l = 25$ мм и их диаметр $d_e = 8$ мм оставались неизменными. Также постоянными оставались параметры разрядного контура. Емкость конденсаторной батареи $C = 2,324$ мкФ, индуктивность разрядной цепи $L = 0,9$ мкГн, напряжение заряда батареи $U_0 = 30$ кВ, активное сопротивление элементов разрядного контура без канала разряда $R_{sh} = 0,08$ Ом. Начальное гидростатическое давление в воде $P_0 = 2$ МПа. Учитывали, что инициирование разряда выполняли пробоем слоя воды между электродами после приложения к ним разности потенциалов U_0 .

Экспериментальные данные и результаты математического моделирования с использованием модели [17] представлены на рис. 4–7. Для оценки погрешности экспериментальных данных на рис. 4–7 приведены по 3 кривых, соответствующих наибольшему, наименьшему и среднему значению максимального давления на стенке обсадной трубы, измеренному с помощью датчика (рис. 2) по схеме, показанной на рис. 3б.

В процессе математического моделирования электрического разряда в воде удельную электропроводность плотной неидеальной плазмы определяли с помощью приближенного решения кинетического уравнения Больцмана, используя эмпирическую функцию, в которой коэффициент $a = 0,02$ [17]. При этом условия максимум силы тока приблизительно на 30% больше (рис. 4, линия 8), а напряжение существенно меньше (рис. 4, линия 7), чем в эксперименте, вследствие заниженного приблизительно в 2 раза активного сопротивления канала разряда (рис. 5, линия 4). В результате этого максимум мощности ввода энергии в канал разряда приблизительно на 30% меньше, чем в эксперименте (рис. 6, линия 4) и в такой же степени меньше энергия, выделившаяся в канале разряда (рис. 7, линия 4). Такое отличие

результатов моделирования от экспериментальных данных связано с тем, что тестирование математической модели [17], в результате которого определили величину эмпирического коэффициента $a = 0,02$, выполняли в условиях, когда параметры разрядного контура C и L были на 1–2 порядка больше, чем в данном эксперименте [16]. Вследствие дополнительного тестирования математической модели [17] было определено, что результаты моделирования лучше соответствуют данным эксперимента [16], когда $a = 0,006$, о чем свидетельствует их сравнение (рис. 4–7). Максимум силы тока (рис. 4, линия 10), а также сопротивление канала разряда (рис. 5, линия 5) находятся в пределах погрешности эксперимента [16]. Максимум мощности ввода энергии в канал разряда (N_{ch}) меньше, чем в эксперименте на 15%, а на большей части интервала увеличения N_{ch} ее величины лежат в пределах данных эксперимента (рис. 6, линия 5). Энергия, введенная в канал разряда, (E_{ch}) приблизительно на 5% меньше, чем в эксперименте (рис. 7, линия 5).

Выполнили сравнение результатов расчета давления на стенке обсадной трубы в экваториальной плоскости канала разряда с данными эксперимента [16] (рис. 8), полученными в соответствии со схемой измерения давления, показанной на рис. 3б. Существенное отличие экспериментальных кривых 1–3 (рис. 8) между собой можно объяснить нестабильностью расположения канала разряда между электродами 3 и 4 (рис. 1) и его формы при повторении разрядов. Из динамики сжимаемой жидкости известно, что дифракция волны давления на жесткой стенке приводит к увеличению ее амплитуды в 2 раза [22]. Это подтверждается результатами расчетов по математической модели [17] (рис. 8). Данные, показанные на рис. 8 линиями 5 и 7, получены в результате математического моделирования без учета дифракции волн давления на поверхности обсадной трубы, а линии 4 и 6 – с учетом

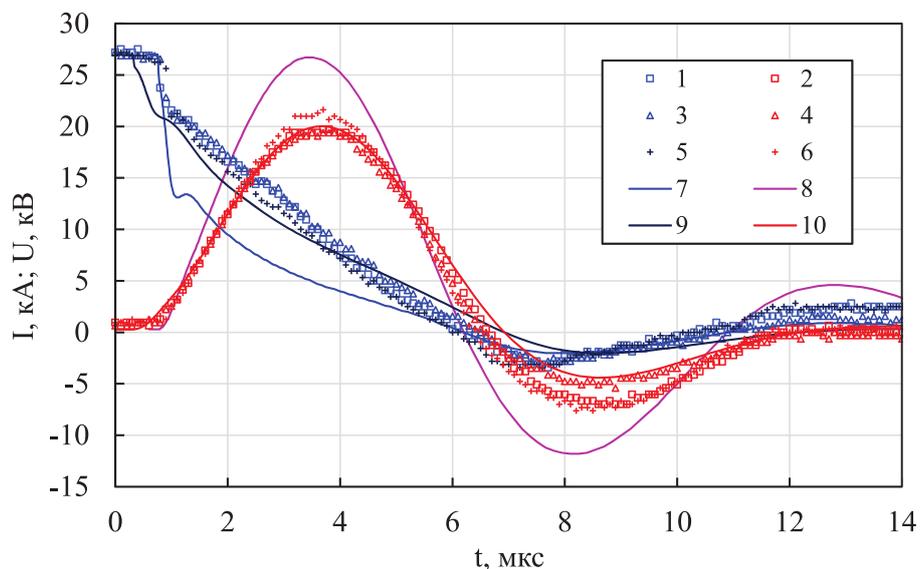


Рис. 4. Изменение силы тока и напряжения в процессе электрического разряда в воде. Напряжение между электродами: 1, 3, 5 – эксперимент, 7, 9 – расчет. Сила тока в канале разряда: 2, 4, 6 – эксперимент, 8, 10 – расчет.

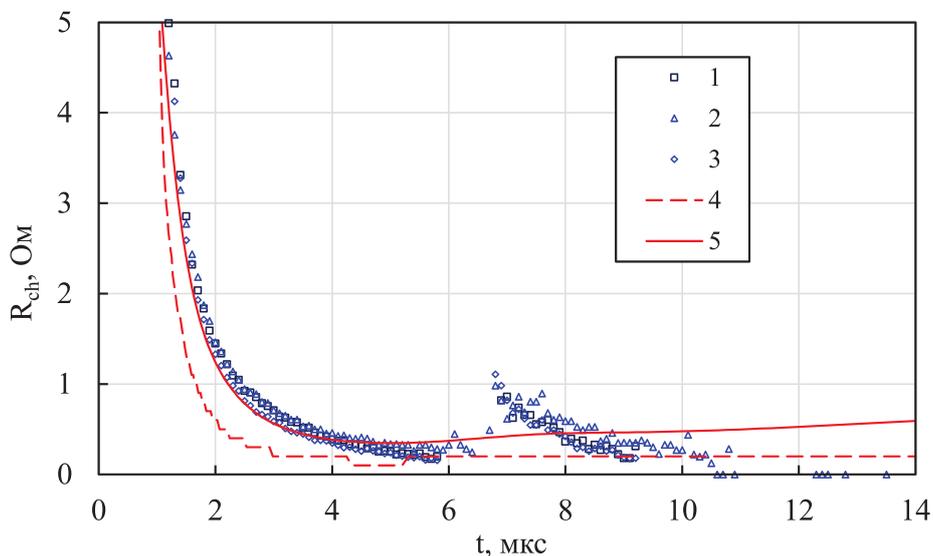


Рис. 5. Изменение активного сопротивления канала разряда: 1, 2, 3 – эксперимент, 4, 5 – расчет.

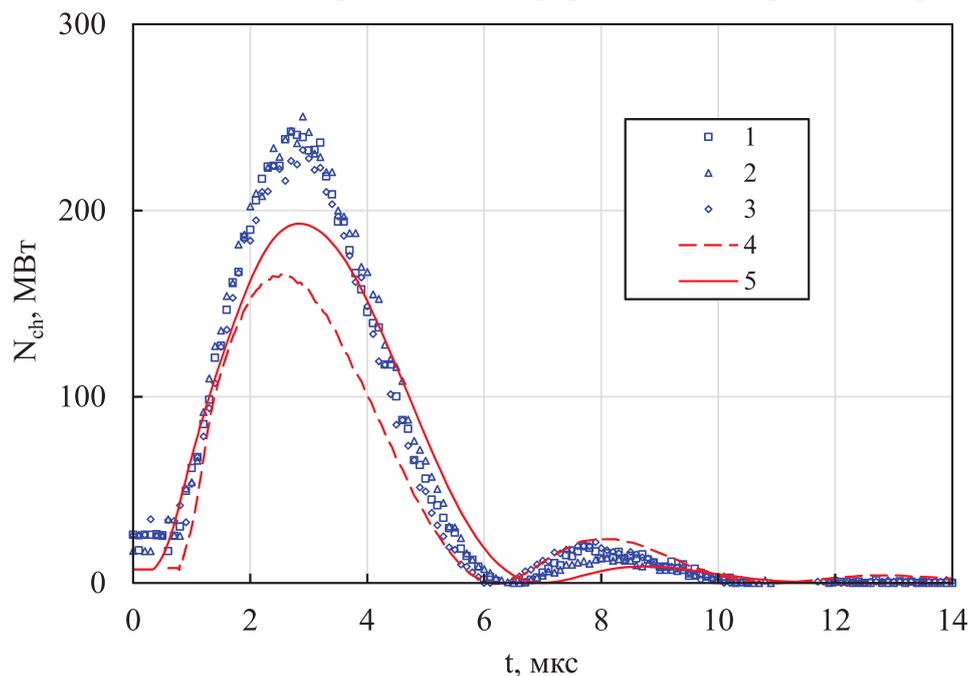


Рис. 6. Мощность ввода энергии в канал разряда: 1, 2, 3 – эксперимент, 4, 5 – расчет.

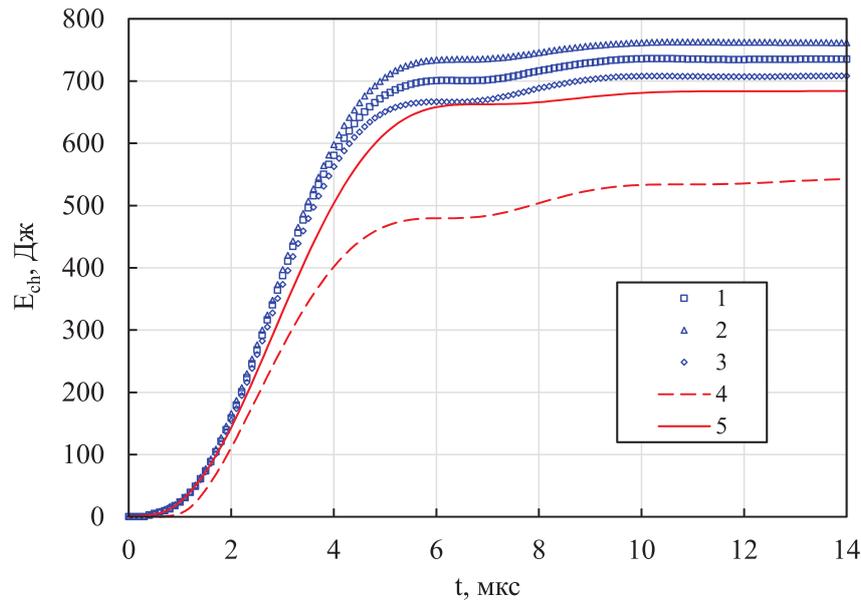


Рис. 7. Энергия, выделившаяся в канале разряда: 1, 2, 3 – эксперимент, 4, 5 – расчет.

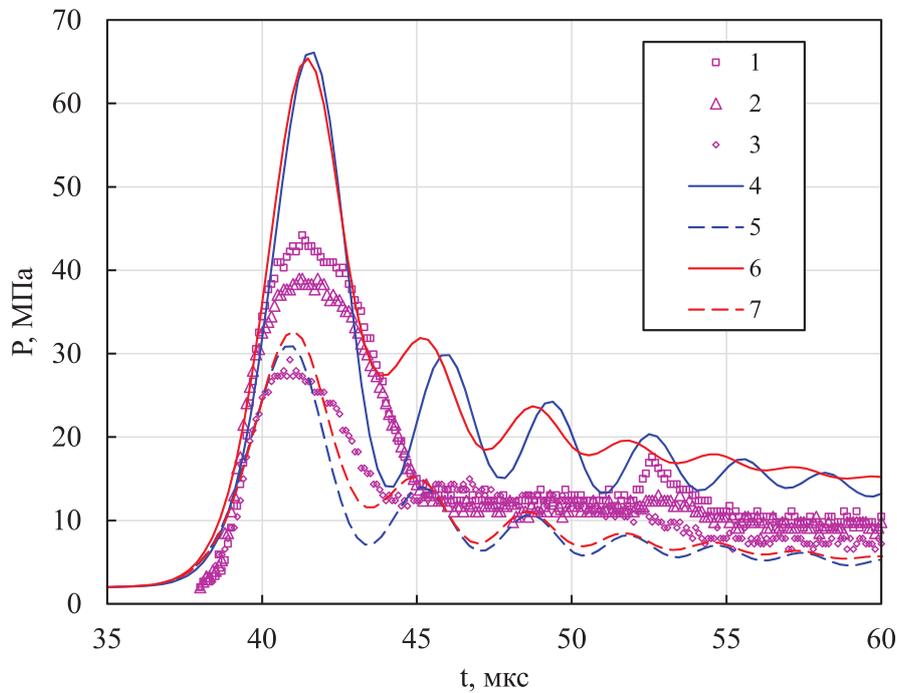


Рис. 8. Давление на стенке обсадной трубы в экваториальной плоскости канала разряда: 1–3 – эксперимент, 4–7 – расчет.

дифракции. Линии 4 и 5 (рис. 8) получены, когда $a = 0,02$, а линии 6 и 7 (рис. 8) – при $a = 0,006$. Малое отличие между линиями 4 и 6, а также 5 и 7 (рис. 8) по сравнению с электрическими характеристиками, вычисленными при $a = 0,02$ и $a = 0,006$ (рис. 4, 5), можно объяснить тем, что на формирование волны давления, излучаемой каналом разряда, в основном влияет скорость возрастания мощности ввода энергии в канал разряда [9]. При $a = 0,02$ амплитуда N_{ch} меньше, но dN_{ch}/dt больше, чем при $a = 0,006$ (рис. 6, линии 4 и 5).

Волноводный пьезоэлектрический датчик импульсного давления (рис. 2), использованный для измерения давления на обсадной трубе, по

схеме, показанной на рис. 3б, спроектирован таким образом, что на его доньшке 3 (рис. 3б) волна давления испытывает минимальную дифракцию, как в свободном объеме жидкости. Поэтому результаты расчетов, не учитывающие дифракцию волны давления на обсадной трубе (рис. 8, линии 5 и 7), лежат в пределах разброса экспериментальных данных (рис. 8, линии 1–3). Между тем отличия экспериментальных данных и результатов расчета могут быть вызваны тем, что давление на обсадной трубе в два раза больше, чем давление на доньшко 3 датчика (рис. 3б), это оказывает некоторое влияние на его показания. В частности, они проявляются в том, что длительность основной части импульса

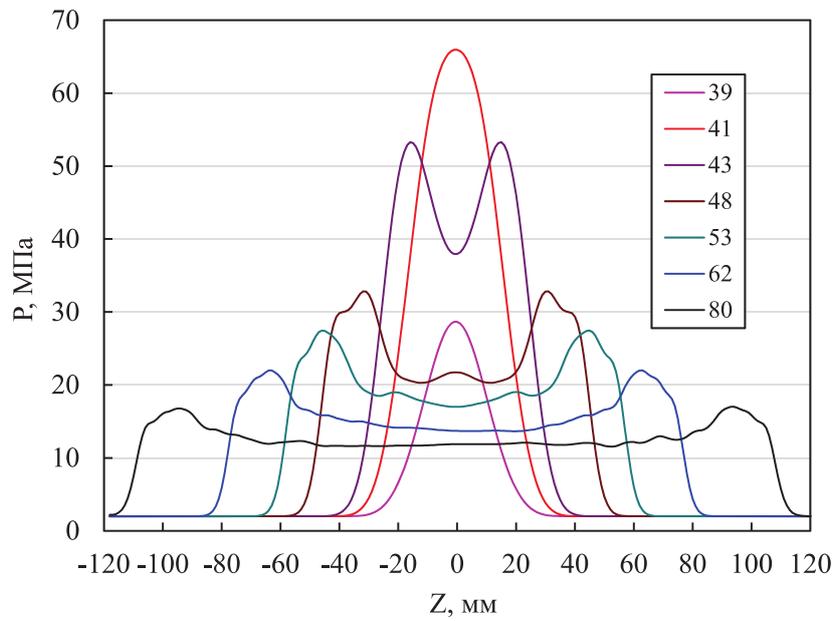


Рис. 9. Распределение давления на стенке разрядной камеры в различные моменты времени от начала разряда (линии обозначены моментом времени в мкс).

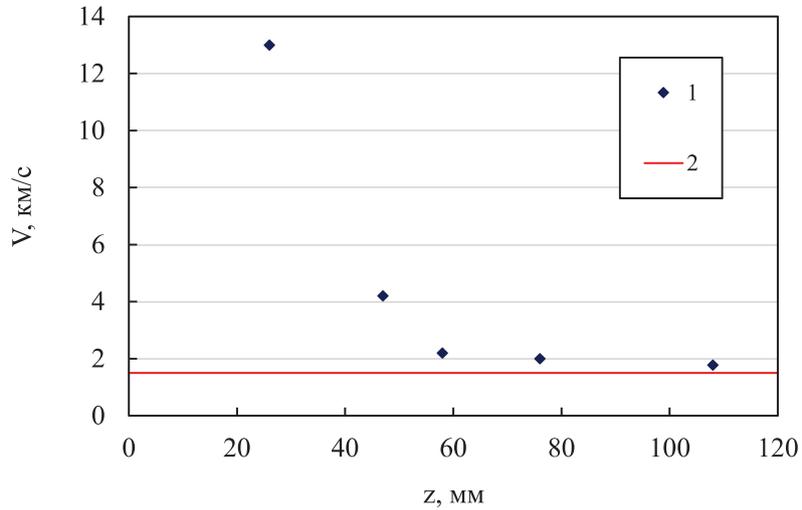


Рис. 10. Скорость границы профиля волны давления вдоль стенки обсадной трубы (1 – «геометрическая» скорость; 2 – скорость звука в невозмущенной воде).

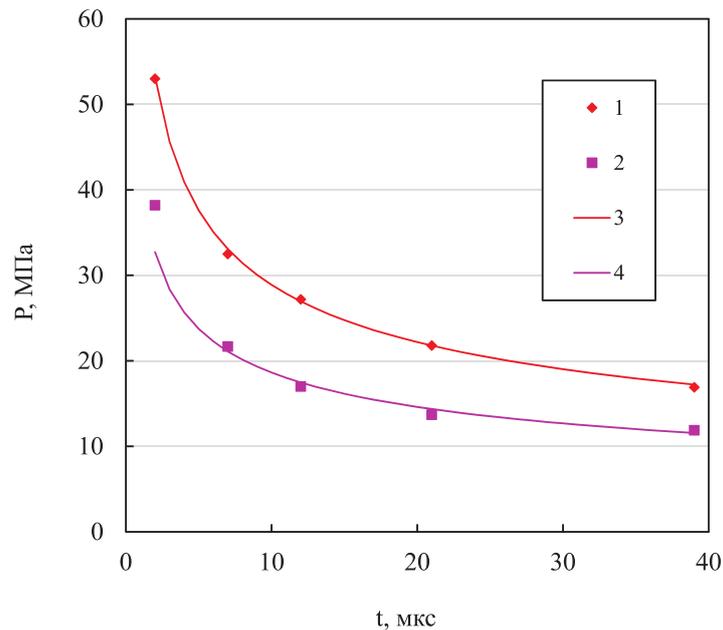


Рис. 11. Максимальное давление на стенке обсадной трубы (1 – расчет; 3 – аппроксимация) и давление на стенке обсадной трубы в экваториальной плоскости канала разряда (2 – расчет; 4 – аппроксимация).

давления, зарегистрированного датчиком (рис. 8, линии 1–3), ближе к длительности давления, полученной в расчете с учетом дифракции волны на обсадной трубе (рис. 8, линии 4 и 6). Возможно, это связано с тем, что давление, действующее на обсадную трубу вблизи доньшка 3 датчика (рис. 3б), распространяется вдоль доньшка 3 и действует на пьезоэлемент датчика, в результате чего уменьшение сигнала датчика замедляется. После 45 мкс от начала разряда показания датчика давления (рис. 2) лучше согласуются с результатами расчета без учета дифракции волны давления на стенке трубы (рис. 8, линии 1–3, 7), чем с результатами расчета с учетом дифракции волны (рис. 8, линии 1–3, 6). Это также свидетельствует о том, что датчик импульсного давления в основном регистрирует давление волны без учета ее дифракции на обсадной трубе. Однако возможно именно дифракция волны давления на стенке трубы увеличивает показания датчика на 25–30% после завершения действия на него передней части волны давления («пика» волны) после 45 мкс от начала активной стадии разряда, когда он регистрирует давление потока воды за фронтом волны («гидравлического потока»).

Результаты тестирования математической модели, приведенные на рис. 4–8, свидетельствуют об адекватности математической модели [17] электрическим, энергетическим и волновым процессам в призабойной зоне скважины, когда коэффициент эмпирической функции $a = 0,006$.

Используя математическую модель [17], выполнили расчет распределения давления на поверхности обсадной трубы водозаборной скважины в различные моменты времени на интервале ее длины от –120 до 120 мм относительно экваториальной плоскости канала разряда (рис. 9). Параметры моделируемой системы (рис. 1) принимали такие же, как при тестировании математической модели [17]. Максимальное давление на поверхности трубы возникает в экваториальной плоскости канала разряда (рис. 3б) через 41 мкс после пробоя слоя воды между электродами (рис. 9). В последующие моменты времени давление распределяется по поверхности обсадной трубы. По краям профиль давления имеет максимумы, а между ними давление распределяется относительно равномерно, отличаясь от максимумов на 30–40%. Границы профиля давления перемещаются от экваториальной плоскости канала разряда с большой, но быстро убывающей «геометрической» скоростью (скоростью движения вдоль трубы точки пересечения фронта волны давления с поверхностью трубы), которая через 60 мм

продвижения профиля давления вдоль трубы уже мало отличается от скорости звука в невозмущенной воде (рис. 10). Максимумы профиля давления на трубу в МПа (рис. 9) с течением времени t в мкс, которое отсчитывается от момента прихода волны к поверхности трубы, уменьшаются (рис. 11) приблизительно по степенной зависимости:

$$P_m = 69,3 \times t^{-0,38}, \quad (1)$$

а давление на трубу в экваториальной плоскости канала разряда:

$$P_e = 41,7 \times t^{-0,35}. \quad (2)$$

Как следует из рис. 11, уменьшение P_m и P_e с течением времени замедляется и на протяжении 40 мкс давление на стенку обсадной трубы остается большим 10 МПа.

ВЫВОДЫ

Из проведенного исследования следует, что математическую модель электрического разряда в воде при рассмотренных параметрах моделируемой системы можно использовать для определения распределения давления на поверхность обсадной трубы скважины, если коэффициент эмпирической функции, используемой в ней для определения удельной электропроводности плазмы в канале разряда, задавать равным 0,006. Давление на обсадную трубу скважины быстро распространяется по ее поверхности от экваториальной плоскости канала разряда при уменьшении максимального давления по степенной зависимости. Между максимумами профиля давления на поверхность обсадной трубы давление распределяется относительно равномерно, и его величина меньше максимального давления на 30–40%. В течение 40 мкс давление на стенку обсадной трубы остается большим 10 МПа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит старших научных сотрудников Института импульсных процессов и технологий НАН Украины Алексея Петровича Смирнова и Олега Вильямовича Хвоцана за предоставление дополнительных экспериментальных данных, не вошедших в статью [16].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bian, D.C., Yan, D., Zhao, J.C. and Niu, S.Q., Experimental study of pulsed discharge underwater shock-related properties in pressurized liquid water, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018, art. ID 8025708. <https://doi.org/10.1155/2018/8025708>

2. 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>
3. 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>
4. Yan, Bingnana, Zhou, Jing, Zhao, Liang, Liu, Chongxin, et al., Experimental study on the discharging characteristics of pulsed high-voltage discharge technology in oil plug removal, *J. Power Technol.*, 2016, vol. 96, no. 4, p. 261.
5. Zhixiang, Cai, Hui, Zhang, Kerou, Liu, Yufei, Chen, et al., Experimental investigation and mechanism analysis on rock damage by high voltage spark discharge in water: Effect of electrical conductivity, *Energies*, 2020, vol. 13, art. ID 5432. <https://doi.org/10.3390/en13205432>
6. Жекул, В.Г., Литвинов, В.В., Мельхер, Ю.И., Смирнов, А.П., и др., Погружные электроразрядные установки для интенсификации добычи полезных ископаемых, *Нафтогазова енергетика*, 2017, т. 27, № 1, с. 23.
7. Курец, В.И., Соловьев, М.А., Жучков, А.И., Барская, А.В., *Электроразрядные технологии обработки и разрушения материалов*. Томск: Изд. Томского политехнич. унив., 2012. 272 с.
8. Кудимов, Ю.Н., Казуб, В.Т., Голов, Е.В., Электроразрядные процессы в жидкости и кинетика экстрагирования биологически активных компонентов. Часть 1. Ударные волны и кавитация, *Вестник ТГТУ*, 2002, т. 8, № 2, с. 253.
9. Кривицкий, Е.В., *Динамика взрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
10. Софийский, К.К., Филимонов, П.Е., Бокий, Б.В., Швец, И.С., и др., *Динамические способы декольматации поверхностных скважин*. Донецк: ТОВ «Східний видавничий дім», 2014. 248 с.
11. Смирнов, А.П., Швец, И.С., Жекул, В.Г., Поклонов, С.Г. и др., Анализ эффективности промышленного применения способа электроразрядного воздействия на призабойную зону скважины с целью интенсификации притока нефти, *Геотехническая механика*, 2014, т. 114, с. 132.
12. Сизоненко, О.Н., *Электроразрядный метод воздействия на структуру пористых материалов*. Киев: НПП Интерсервис, 2015. 300 с.
13. Zhekul, V.G., Poklonov, S.G. and Smirnov, A.P., Experimental studies of the effectiveness of the electrodischarge effect on a physical model of the bottom-hole zone of the productive layer, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2011, vol. 47, no. 1, p. 89.
14. Барбашова, Г.А., Косенков, В.М., Определение гидродинамической нагрузки на стенку нефтяной скважины, формируемой электрическим разрядом, *Прикл. мех. и технич. физика*, 2001, т. 42, № 6, с. 93.
15. Косенков, В.М., Влияние объема цилиндрической разрядной камеры с жесткими стенками на поле давления в заполняющей ее воде, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 2, с. 68. <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.2.68>
16. Smirnov, A.P., Zhekul, V.G., Mel'kher, Yu.I., Taftai, E.I., et al., Experimental investigation of the pressure waves generated by an electric explosion in a closed volume of a fluid, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2018, vol. 54, no. 5, p. 475. <https://doi.org/10.3103/S1068375518050101>
17. Kosenkov, V.M., Gas-vapor cavity effect on pressure field in deformable wall closed discharge chamber, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2022, vol. 58, no. 1, с. 63. <https://doi.org/10.3103/s1068375522010057>
18. Наугольных, К.А., Рой, Н.А., *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1971. 155 с.
19. Косенков, В.М., Бычков, В.М., Влияние индуктивности электрической цепи на энергетические характеристики разряда в воде и деформирования пластин, *Письма в ЖТФ*, 2017, т. 43, № 16, с. 102. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.16.44939.16706>
20. Kosenkov, V.M., Mathematical modeling of change in plasma's specific electrical conductivity and noncylindrical channel resistance during the process of electrical discharge in water, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2020, vol. 56, no. 3, p. 334. <https://doi.org/10.3103/S1068375520030102>
21. Жекул, В.Г., Смирнов, А.П., Тафтай, Э.И., Хвощан, О.В. и др., Пьезоэлектрический волноводный датчик для измерения импульсного давления в замкнутых объемах жидкости при высоковольтном электрическом разряде, *Електротехніка і Електромеханіка*, 2017, № 5, с. 55. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.09>
22. Годунов, С.К., *Численное решение многомерных задач газовой динамики*. М.: Наука, 1976. 400 с.

Summary

Based on the combined use of the method of mathematical modeling of the process of electric discharge impact on the bottom-hole zone of a water intake well and a physical experiment, the pressure distribution on the surface of the casing pipe was determined. Based on physical experiment data, the mathematical model was verified and refined under conditions of low capacitance of the capacitor bank and low inductance of the discharge circuit. The readings of the pressure sensor on the surface of the casing pipe were coordinated with the results of mathematical modeling, taking into account the interrelated physical processes in the discharge circuit, the discharge channel and the liquid filling the casing pipe of the water well.

Keywords: electric discharge in water, water well, pressure on the casing, mathematical modeling, pulse pressure