

УДК 621.316.933.6:622.276.6

В. Г. ЖЕКУЛ, Ю. И. МЕЛЬХЕР, С. Г. ПОКЛОНОВ, А. П. СМИРНОВ, И. С. ШВЕЦ**ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СРАБАТЫВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ РАЗРЯДНИКОВ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ПОГРУЖНЫХ УСТАНОВОК**

В работе выполнено экспериментальное исследование влияния параметров технологических режимов работы электроразрядной погружной установки (изменение частоты следования разрядов от 0,2 до 2 Гц, температуры окружающей среды от 10 °С до 90 °С, количества разрядов) на величину напряжения срабатывания его высоковольтного газонаполненного неуправляемого разрядника. Показано, что влияние указанных параметров может быть существенным и требующим введения циклических режимов работы электроразрядной погружной установки для повышения эффективности обработки скважин.

Ключевые слова: электроразрядная погружная установка, высоковольтный разрядник, температура окружающей среды, частота следования разрядов.

Введение. Эффективность работы электроразрядной погружной установки (ЭПУ), используемой для восстановления притока жидких полезных ископаемых в водозаборных и нефтяных скважинах, а также приемистости нагнетательных скважин [1-6] в значительной степени определяется неизменностью рабочих характеристик высоковольтного газонаполненного неуправляемого разрядника: уровнем напряжения срабатывания и его стабильностью.

Анализ проблемы. Ранее были выполнены исследования неуправляемого газонаполненного высоковольтного разрядника ЭПУ [7, 8]. Вопросу стабильности его работы посвящена работа [8]. В ней была показана возможность его настройки, которая обеспечивает удовлетворительное значение разброса напряжения срабатывания (порядка 2 %) в диапазоне изменения режимов работы установки. Однако расширение технологических режимов работы ЭПУ, в первую очередь связанное с варьированием частоты следования разрядов при обработке скважины от 0,2 до 2 Гц, различными температурными условиями в скважине – от 10 °С до 90 °С, необходимостью непрерывной работы в течение нескольких часов, потребовало проведения исследования важной характеристики разрядника – уровня напряжения его срабатывания. В связи с этим данная работа преследовала своей целью исследование уровня напряжения срабатывания неуправляемого газонаполненного высоковольтного разрядника ЭПУ от частоты следования разрядов, температуры окружающей среды и длительности работы ЭПУ.

Методика исследований. Настоящие исследования являются продолжением ранее выполненных работ по повышению стабильности работы высоковольтного газонаполненного неуправляемого разрядника ЭПУ, в связи с этим экспериментальное оборудование и методика проведения экспериментов являются аналогичными представленным в [8].

Для исследований использовался штатный разрядник ЭПУ. Он был предварительно настроен на рабочий режим с минимальным статистическим разбросом напряжения срабатывания, согласно методике представленной в [8]. Параметры электрической схемы и режим эксперимента были выбраны в соответст-

вии с параметрами и технологическими режимами работы ЭПУ: емкость высоковольтного конденсатора $C = 2 \cdot 10^{-6}$ Ф, частота следования разрядных импульсов – от 0,2 до 2 Гц, нагрузка – водный межэлектродный промежуток оптимальной длины по амплитуде волны давления реальной электродной системы установки [9].

Температура окружающей водной среды разрядника изменялась в диапазоне от 10 °С до 90 °С. Для ее измерения и контроля на корпусе разрядника были помещена термопара типа НУТР-105, для измерения использовался мультиметр МУ 60 (диапазон измерения температуры от –20°С до 1000°С, цена деления – 1 °С, точность $\pm 1,0$ %).

Для визуальной оценки уровня рабочего напряжения и настройки емкостного делителя напряжения использовался киловольтметр типа С-196. В ходе проведения эксперимента (в динамическом режиме) измерения проводились с помощью омического делителя напряжения (коэффициент деления – 3783) и цифрового осциллографа типа TDS-2024В.

Сравнение режимов работы разрядника на разных частотах следования разрядов осуществлялось при одинаковом общем количестве разрядов. Для удобства их статистическая обработка осуществлялась поочередно – поочередно обрабатывались блоки (диапазоны) из 50 последовательно идущих разрядов, находилось среднестатистическое значение напряжения срабатывания и среднеквадратическое отклонение данных (разброс) [10].

Общий вид эпюры напряжений срабатывания разрядника в порядке следования разрядов одного блока представлен на рис. 1.

Исследования уровня напряжения срабатывания разрядника в зависимости от температуры корпуса. Результаты экспериментальных исследований влияния температуры окружающей среды на напряжение срабатывания разрядника показали, что при повышении температуры корпуса от 10 до 90 °С для всех режимов, характеризующихся различными частотами следования разрядов, наблюдается увеличение напряжения срабатывания. Величина увеличения напряжения срабатывания разрядника находится в диапазоне от 700 до 1000 В.

В ходе проведения исследований был отмечен

факт спонтанных выбросов напряжения срабатывания разрядника как в большую, так и в меньшую сторону при температуре окружающей среды 10°C (см. рис. 1, крив. 10°C).

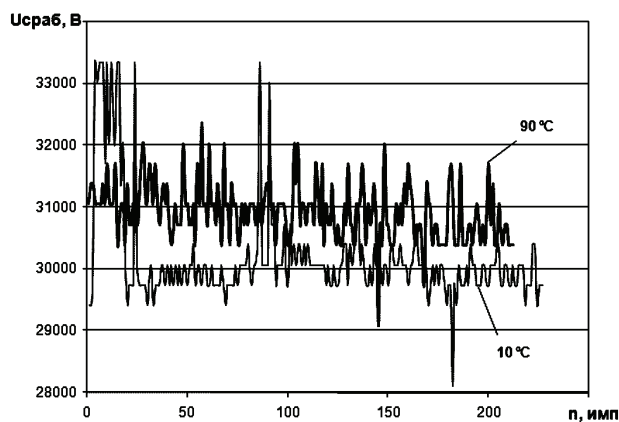


Рисунок 1 – Эпюры напряжений срабатывания разрядника при 10°C и 90°C , частота следования разрядов – $0,25\text{ Гц}$

Подобное явление описано в [11]. Однако оно не связывалось с температурой работы разрядника, а было интерпретировано как следствие загрязнения разрядника продуктами эрозии электродов. Подобное явление присутствует при всяком первоначальном включении разрядника независимо от температуры и может составлять до 12 % от напряжения срабатывания. Действительно, наблюдаемые в наших исследованиях выбросы составляли от 10 до 12 % от напряжения срабатывания разрядника.

Исследования уровня напряжения срабатывания разрядника в зависимости от частоты следования разрядов. Как уже было отмечено ранее, методика проведения данных экспериментальных исследований подразумевает сравнение характеристик разряда (уровня напряжения, разброса) различных, по частоте следования, режимов при условии равного количества реализованных в режимах разрядов. Такой подход обусловлен технологическими особенностями использования ЭПУ: при обработке скважин главную роль играет суммарное силовое воздействие на объект обработки, которое зависит от количества осуществленных разрядов независимо от частоты их следования. При этом важно, чтобы в этот период времени (как по его завершению, так и в процессе обработки) рабочие характеристики всех элементов установки, в том числе и разрядника, не выходили за некоторые допустимые пределы.

Исходя из вышесказанного, в результате статистической обработки, полученных в ходе экспериментальных исследований данных, были определены семейства кривых, определяющих поведение напряжения срабатывания разрядника при увеличении числа произведенных разрядов. Характерные зависимости напряжений срабатывания разрядника от числа разрядов при частоте следования разрядов – 1 Гц , для различных температур окружающей среды приведены на рис. 2.

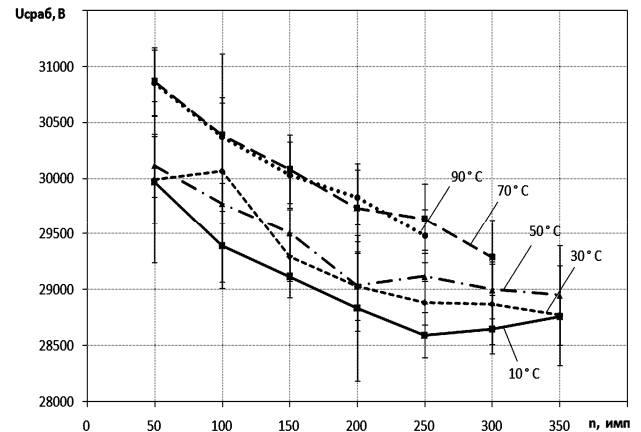


Рисунок 2 – Зависимости напряжений срабатывания разрядника от количества разрядов, при частоте следования разрядов – 1 Гц , для различных температур окружающей жидкой среды

Как следует из рис. 2 зависимости демонстрируют монотонное уменьшение напряжения срабатывания разрядника по мере увеличения количества последовательно совершаемых разрядов (диапазонов) и наличием участков насыщения. При этом следует отметить, что статистический разброс данных в пределах диапазона исследований остается приблизительно на одном уровне, что и было отмечено в [8]. Попытка статистически обработать все диапазоны каждой зависимости как единый массив приводило к искажению результатов, поскольку давало существенное увеличение величины разброса. Это объясняется тем, что систематическая ошибка, возникающая от свойства объекта статистического наблюдения, изменяться в зависимости от числа произведенных разрядов (в нашем случае – уменьшаться), переводится таким расчетом в разряд случайных [10].

Обсуждение результатов. Все полученные в ходе проведения экспериментальных исследований результаты представлены на рис. 3-5 в виде диаграммы напряжения срабатывания разрядника от:

- температуры окружающей среды $U(T)$;
- количества выполненных разрядов $U(n)$.

На рис. 3-5 жирным выделена зависимость $U(T)$, значения которой являются первыми точками при построении зависимостей $U(n)$.

Результаты, представленные на рис. 3, показывают, что при частоте следования разрядов $0,25\text{ Гц}$ (номинальной для ЭПУ типа «Скиф») наблюдается слабая зависимость уровня напряжения срабатывания разрядника от температуры окружающей среды и количества выполненных разрядов. Отдельно хочется отметить, что величина напряжения срабатывания при температуре окружающей среды 10°C характеризуется завышенным средним значением и большим статистическим разбросом значений благодаря описанным ранее выбросам напряжения срабатывания (это характерно как для частоты $0,25\text{ Гц}$, так и для повышенных частот – 1 Гц и 2 Гц).

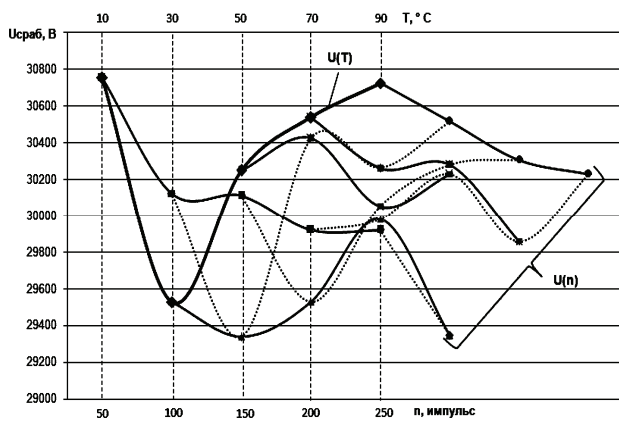


Рисунок 3 – Диаграмма напряжения срабатывания разрядника от температуры и количества разрядов при частоте следования разрядов – 0,25 Гц

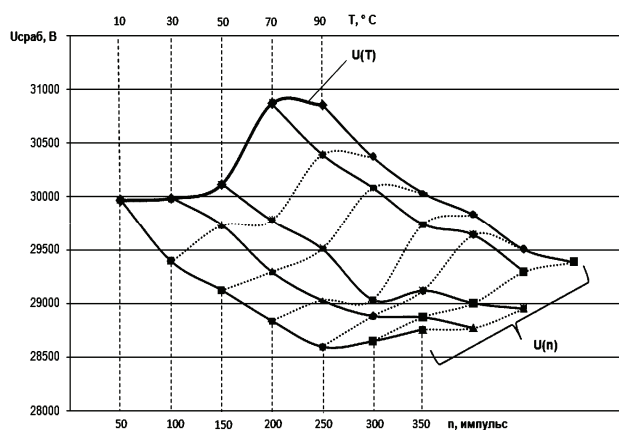


Рисунок 4 – Диаграмма напряжения срабатывания разрядника от температуры и количества разрядов при частоте следования разрядов – 1 Гц

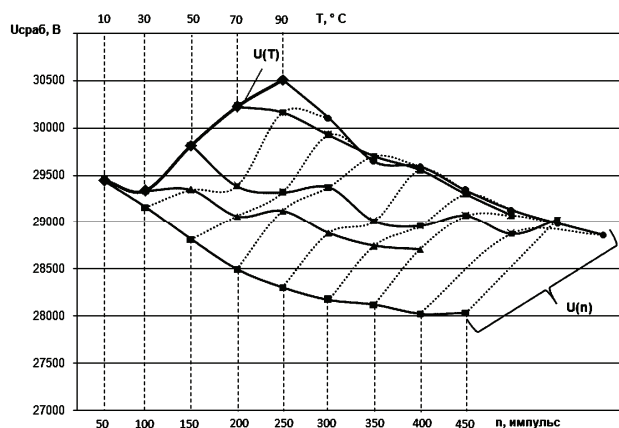


Рисунок 5 – Диаграмма напряжения срабатывания разрядника от температуры и количества разрядов при частоте следования разрядов – 2 Гц

Повышение частоты следования разрядов в 4 раза (от 0,25 до 1 Гц) существенно меняет картину распределения кривых на диаграмме (см. рис. 4). Это проявляется в росте среднего уровня напряжения срабатывания разрядника с повышением температуры окружающей среды (до $\approx 3,5\%$ при повышении температуры от 10 и 90 °C на 50 первых разрядах) и последующем его падении с увеличением числа произведенных разрядов (до 5 % после 300 последовательно

произведенных разрядов). Идентичная картина наблюдается и при частоте 2 Гц (рис. 5). Все это позволяет утверждать, что в случае работы разрядника на частотах 1 Гц, 2 Гц для обеспечения эффективной обработки скважин необходимо учитывать как температуру окружающей среды, так и количество выполненных разрядов. Одним из способов позволяющих достичь этого видится в обеспечении циклических режимов работы ЭПУ – «обработка-отдых». Это обеспечивало бы полное восстановление параметров газовой среды, заполняющей разрядник (цикл «отдых») и работу разрядника на максимальном уровне напряжения срабатывания (цикл «обработка»). Однако, для получения и обоснования эффективных временных параметров таких режимов работы ЭПУ необходимо проведение дополнительных исследований.

Выводы. Результаты проведенных исследований показали, что при работе высоковольтного газонаполненного неуправляемого разрядника на частотах следования импульсов 1 Гц и 2 Гц с повышением температуры окружающей среды происходит рост среднего уровня напряжения срабатывания, который постепенно снижается с увеличением количества выполненных разрядов. Все это свидетельствует о необходимости использования циклических технологических режимов работы ЭПУ для обеспечения эффективной обработки скважин.

Список литературы: 1. *Максотов Р. А.* Использование электроразрядного воздействия на призабойную зону / *Р. А. Максотов, О. Н. Сизоненко, П. П. Малюшевский* // Нефтяное хозяйство. – 1985. – № 1. – С. 34-35. 2. *Жекул В. Г.* Электроразрядная обработка скважин на нефтедобывающих месторождениях Украины / *В. Г. Жекул, В. А. Кучернюк, Ю. И. Мельхер и др.* // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2012. – Вып. 21. – С. 72-77. 3. *Shvets I.S.* Application of elektroimplosion for well stimulation / *I.S. Shvets, O.N. Sezonenko, R.A. Macsutov* // Proceedings volume 1:7 the European Symposium on Improved oil Recovery, 27-29 October, 1993, Moscow, Russia. 4. *Shvets I.S.* Elektrohydroimpulse equipment for Increase of Oil and Intake Wells / *I.S. Shvets, Y.I. Kurashko, N.N. Klimanskiy and others* // 13th International Simposium on High Current Electronics: Proceedings. – Tomsk: Publishing house of the IAO SBRAS, 2004. – P. 409-411. 5. *Dubovenko K. V.* Power supplies for compact submerged high voltage equipment / *K. V. Dubovenko, Yu. I. Kurashko, I. S. Shvets* // Abstraks of the IEEE Intl Pulsed Modulator Conf. (PMC'2002). Report PA55. – Hollywood, California, USA, 2002. – P. 73. 6. *Dubovenko K. V.* Equipment developed at IPRE for well stimulation in the process of oil and water production / *K. V. Dubovenko, Yu. I. Kurashko, L. I. Onyshchenro and others* // IEEE Intl Pulsed Power Plasma Science 2001, Conf. Digest of Technical Papers. – Las Vegas, Nevada, USA, 2002. – 2. – P.1070-1073. 7. *Dubovenko K. V.* The design, fabrication and testing of a closing switch for compact electrical discharge industrial equipment / *K. V. Dubovenko, Yu. I. Kurashko* // 11th IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Technical Papers. – Baltimore, Maryland, USA, 1997. – 2. – P. 868-874. 8. *Жекул В. Г.* Исследования стабильности работы высоковольтных газонаполненных неуправляемых разрядников погружных установок / *В. Г. Жекул, Ю.И. Мельхер, С. Г. Поклонов и др.* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика

високих напруг. – 2014. – № 21 (1064). – С. 23-31. **9.** Жекул В.Г. Электроразрядные погружные установки со стабилизированными рабочими параметрами / В. Г. Жекул, С. Г. Поклонов, И. С. Швец // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 2. – С. 89-91. **10.** Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин / А. Н. Зайдель. – Л.: Наука, 1985. – 112 с. **11.** Киселев Ю.В. Искровые разрядники / Ю. В. Киселев, В. П. Черепанов – М.: Советское радио, серия «Элементы радиоэлектронной аппаратуры», 1976. – 72 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Maksutov R. A., O. N. Sizonenko and P. P. Maljushevskij. Ispol'zovanie jelektrozrazjadnogo vozdejstvija na prizabojnuju zonu. Neftjanoe hozjajstvo. No 1. 1985. 34-35. Print. **2.** Zhekul V. G., et al. Jelektrozrazjadnaja obrabotka skvazhin na neftedobyvajushhih mestorozhdenijah Ukrainy. Vestnik NTU «KhPI». No 21. 2012. 72-77. Print. **3.** Shvets I.S., O.N. Sezonenko and R.A. Macsutov Application of elektroimplosion for well stimulation. Proceedings volume 1:7 the European Symposium on Improved oil Recovery, 27-29 October, 1993, Moscow, Russia. **4.** Shvets I.S. et al. Elektrohydroimpulse equipment for Increase of Oil and Intake Wells. 13th International Simposium on High Current Electronics: Proceedings. Tomsk:Publishing house of the IAO

SBRAS. 2004. 409-411. **5.** Dubovenko K. V., Kurashko Yu. I. and Shvets I. S. Power supplies for compact submerged high voltage equipment. Abstracts of the IEEE Intl Pulsed Modulator Conf. (PMC'2002). Report PA55. Hollywood, California, USA, 2002. P.73. **6.** Dubovenko K. V. et al. Equipment developed at IPRE for well stimulation in the process of oil and water production. IEEE Intl Pulsed Power Plasma Science 2001, Conf. Digest of Technical Papers. Las Vegas, Nevada, USA. 2002. 2. P.1070-1073. **7.** Dubovenko K. V., Kurashko Yu. I. The design, fabrication and testing of a closing switch for compact electrical discharge industrial equipment. 11th IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Technical Papers. Baltimore, Maryland, USA. 1997. 2. P. 868-874. **8.** Zhekul V. G., et al. Issledovanija stabil'nosti raboty vysokovol'tnyh gazonapolnennyh neupravljaemyh razrjadnikov pogruzhnyh ustanovok. Vestnik NTU «KhPI». No 21. 2014. 23-31. Print. **9.** Zhekul V.G., S. G. Poklonov and I. S. Shvec Jelektrozrazjadnye pogruzhnye ustanovki so stabilizirovannymi rabochimi parametrami. Neftjanoe hozjajstvo. No 2. 2006. 89-91. Print. **10.** Zajdel' A.N. Pogreshnosti izmerenij fizicheskikh velichin. Leningrad: Nauka, 1985. **11.** Kiselev Ju. V. and V. P. Cherepanov Iskrovyje razrjadniki. Moskva: Sovetskoe radio, 1976.

Поступила (received) 12.02.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Жекул Василь Григорьевич – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України (ІІПТ НАНУ), Николаев, e-mail: v_zhekul@mail.ru

Zhekul Vasilij Grigoryevich – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: v_zhekul@mail.ru

Мельхер Юрій Іванович – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України (ІІПТ НАНУ), Николаев, e-mail: u19melkher@rambler.ru

Melkher Iurii Ivanovich – Junior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: u19melkher@rambler.ru

Поклонов Сергей Георгиевич – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України (ІІПТ НАНУ), Николаев, e-mail: sergeypoklonov@mail.ru

Poklonov Sergey Georgievich – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: sergeypoklonov@mail.ru

Смирнов Алексей Петрович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України (ІІПТ НАНУ), Николаев, e-mail: aps-78@mail.ru

Smirnov Oleksiy Petrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: aps-78@mail.ru

Швец Иван Сафронович – кандидат фізико-математических наук, виконуючий обов'язки завідуючого відділу, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України (ІІПТ НАНУ), Николаев, e-mail: iipt@iipt.com.ua

Shvets Ivan Safronovych – Candidate of Physics and Mathematics (Ph.D), Head of Department, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, e-mail: iipt@iipt.com.ua