

О.В.ХВОЩАН, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
Ю.И.КУРАШКО, канд.техн.наук, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
Ю.И.МЕЛЬХЕР, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
В.В.ЛИТВИНОВ, ИИПТ НАН Украины, Николаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ РАЗРЯДНИКА ПОГРУЖНЫХ СКВАЖИННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Проведено теоретичний розрахунок втрат в розряднику електрогідрравлічних свердловинних комплексів, теоретично і експериментально досліджено його температурне поле. Розроблено рекомендації щодо конструктивного виконання розрядників.

The theoretical calculation of losses in the spark-gap of electro-hydraulic oil-well complexes is conducted, its temperature theoretical and experimental fields are explored. Recommendations in relation to structural implementation of spark-gaps are developed.

Введение. Критические условия работы погружных комплексов для обработки нефтяных скважин (температура окружающей среды до 100 °С, гидростатическое давление до 50 МПа) наряду с ограниченными габаритными размерами, определяемыми диаметром скважин, вызывают ряд вопросов, связанных с надежностью и стабильностью работы высоковольтного оборудования. Увеличение производительности комплексов вызывает увеличение потерь при их работе, что ведет к перегреву элементной базы и ее возможному выходу из строя.

Комплекс имеет модульную структуру. Ранее [1] был проведен расчет оптимальных параметров высоковольтного трансформатора модуля зарядного блока комплекса с полезной мощностью 10³ Вт для обработки нефтяных скважин, определены температуры перегрева его наиболее уязвимых частей.

Целью настоящей работы является анализ тепловых потерь в высоковольтном разряднике комплекса и определение его температуры перегрева для решения вопросов, касающихся надежности и стабильности работы комплекса.

Постановка задачи и методика расчета. Разрядник электрогидравлического погружного комплекса установки предназначен для передачи запасенной в конденсаторах комплекса энергии в нагрузку при достижении уровня зарядного напряжения 3·10⁴ В. В настоящее время разрядник выполнен газонаполненным и неуправляемым. В качестве газовой среды использован азот газообразный ГОСТ 9293-74 при давлении 1,01·10⁵ Па.

На основании проведенных в [2] исследований была разработана следующая конструкция разрядника (рис. 1). Корпус разрядника 1 представляет стальную трубу, внутри которой на стальных фланцах установлены с обеих сторон фарфоровые изоляторы 2 и 3 с медными электродами 4 и 5. Электроды имеют возможность осевого перемещения. Герметизация внутренней полости разрядника осуществляется с помощью резиновых уплотнительных колец прокладок, заглушки 6 и 7 используются при транспортировке и хранении.

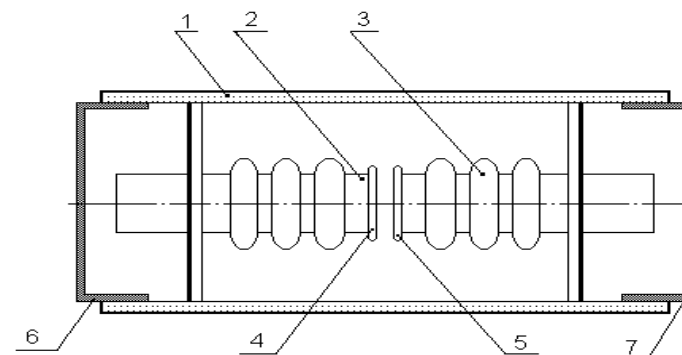


Рисунок 1 – Разрядник

Теоретический анализ тепловых режимов работы разрядника проводился с помощью программы для расчета различного рода физических полей *Femlab 3.1*, позволяющей, в частности, моделировать переходные характеристики и стационарную тепловую картину одно-, дву- и трехмерных конфигураций методом конечных элементов с достаточно высокой точностью. Анализ подвергалась осесимметричная двумерная модель (см. рис. 2). При составлении модели принимались следующие допущения:

- теплофизические характеристики материалов разрядника (см. таблицу) взяты при температуре 20 °С и принимались неизменными в процессе нагрева;
- граничное условие для образующей поверхности цилиндрической области, заключающей модель – условие постоянной температуры, поддерживаемой внешней средой;
- внутренняя цилиндрическая область заполнена азотом;
- рассмотрена модель при учете механизма теплопроводности, принято, что энергия, выделяющаяся в межэлектродном промежутке, идет на нагрев средней части электродов, джоулевы потери в тоководах разрядника не учитывались;
- потери в разряднике рассчитаны на основании гидродинамической теории импульсной дуги [3], методика расчета приведена ниже.

Материал	азот	сталь	воздух	медь	фарфор
Плотность ρ , кг/м ³	1,06	7840	1	8700	2450
Удельная теплоемкость C_m , Дж/(кг·К)	1060	465	1010	385	850
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	0,027	49,8	0,03	400	2

Согласно [3], мощность джоулевых потерь в канале дуги можно определить по формуле

$$P(i, t) = \frac{g \cdot i^{4/3}}{t^{2/3} \cdot t^{1/3}}, \quad (1)$$

где i – ток, протекающий через межэлектродный промежуток, кА; τ – период колебаний тока, мкс; t – время, мкс.

Коэффициент g определялся выражением

$$g = d \cdot \left(\frac{2 \cdot x \cdot r_0}{P \cdot S_0^2} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где d – длина межэлектродного промежутка, мм;

$$x = \frac{K_p \cdot g}{g - 1};$$

K_p – коэффициент поршня, $K_p \approx 0,75-0,9$; γ – эффективный показатель адиабаты Пуассона, для двухатомных газов $\gamma = 1,4$; ρ_0 – относительная плотность газа, для азота $\rho_0 = 1,06$; $\sigma_0 \approx 3 \cdot 10^3$ (Ом · м)⁻¹ при $d > 5$ мм.

Энергия, выделяющаяся в межэлектродном промежутке за время протекания разряда

$$W = \int_0^{1/f} P(i, t) dt, \quad (3)$$

где f – частота следования разрядных импульсов, Гц.

Энергия за полупериод периодического разряда согласно [3] аппроксимируется выражением

$$W_n \approx 0,45 \cdot g \cdot I_{mn}^{4/3}, \quad (4)$$

где I_{mn} – амплитуда разрядного тока в n -ый полупериод, кА.

Средняя зарядная мощность энергии, выделяющейся при работе разрядника, необходимая для теоретического расчета температурного режима, определялась выражением

$$P_{cp} = f \cdot \sum_n W_n. \quad (5)$$

Результаты теоретического расчета. Современные погружные комплексы для обработки нефтяных скважин имеют следующие параметры разрядного контура:

- напряжение зарядки емкостного накопителя – $U_0 = 30$ кВ;
- емкость накопителя – $C = 2,4$ мкФ;
- индуктивность разрядного контура $L \sim 3$ мкГн.

Известно, что оптимальным разрядом в электрогидравлических технологиях является затухающий синусоидальный, близкий к критическому. При этом амплитуды токов можно определить из [4]:

$$I_{mn} \approx U_0 \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot e^{-\frac{P \cdot (2n-1) \cdot R}{4}} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (6)$$

где R – активное сопротивление контура, Ом.

Активное сопротивление канала разряда в моменты максимума тока при режиме разряда накопителя, близком к критическому, $R \approx 0,8$ Ом. При этом $I_{m1} = 15,3$ кА; $I_{m2} = 5$ кА; $I_{m3} = 1,6$ кА; $I_{m4} = 0,5$ кА, декремент затухания (отношение амплитуд ближайших периодов тока) $\delta = 10$.

Суммарная энергия, выделившаяся в разряднике, рассчитана по формуле (4) и составила $\sum_n W_n = 1,63$ Дж.

Перегрев элементов разрядника в установившемся режиме при частоте разрядных импульсов 1 Гц, которой можно достичь в реальных условиях [5], представлен на рис. 2.

Как видно из рис. 2, при оптимальной работе погружного комплекса перегрев электродов разрядника относительно его корпуса ~ 40 °С. При уменьшении величины разрядного промежутка и, соответственно, его активного сопротивления уменьшится декремент затухания разрядного тока, увеличится его амплитуды, что приведет к более высоким значениям перегрева элементов. Результаты расчета приведены на рис. 3.

Сравнение результатов теоретического расчета и эксперимента. Для определения достоверности результатов, полученных расчетом, был поставлен эксперимент, при котором разрядник P замыкал контур (рис. 4) с параметрами:

- напряжение зарядки емкостного накопителя C – от 30 до 32 кВ;
- емкость накопителя – $C = 2,7$ мкФ;
- длина межэлектродного промежутка электродной системы ЭС – от 15 до 16 мм.

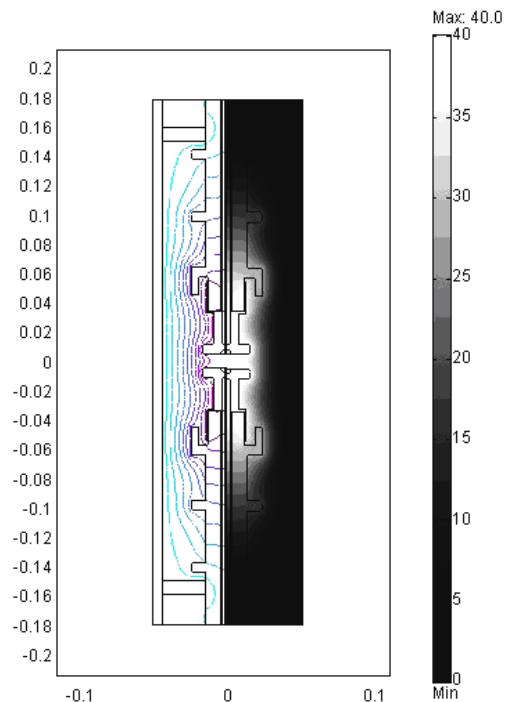


Рисунок 2 – Расчет температур перегрева элементов разрядника

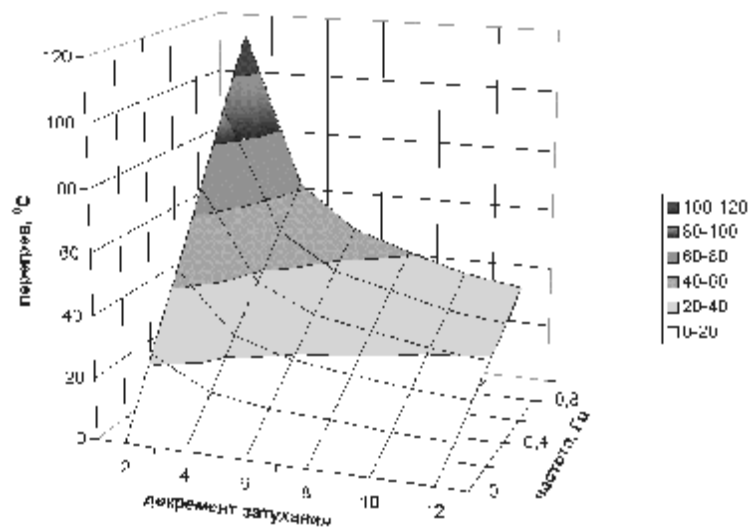


Рисунок 3 – Зависимость перегрева электродов разрядника относительно корпуса от декремента затухания и частоты разрядных импульсов

В процессе эксперимента фиксировались ток и напряжение на межэлектродном промежутке. Использовались осциллограф Tektronics TDS1012B, емкостно-резистивный делитель напряжения с коэффициентом уменьшения 1000, коаксиальный шунт с сопротивлением 0,0033 Ом. Характерные осциллограммы тока и напряжения на промежутке изображены на рис. 5. Масштабные коэффициенты:

- по напряжению – 9 кВ/дел.;
- по току – 17кА/дел.;
- по времени – 20 мкс/дел.

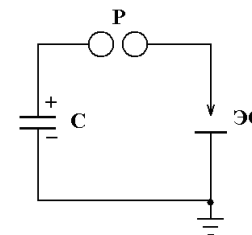


Рисунок 4 – Разрядный контур генератора тока скважинного комплекса

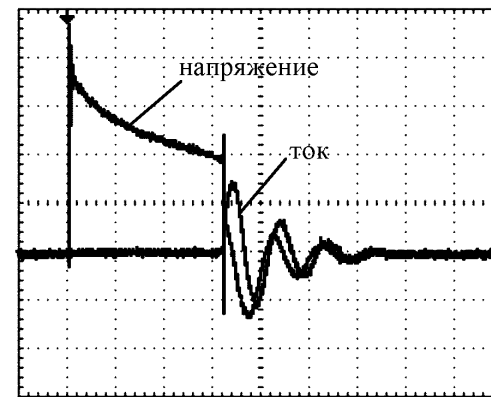


Рисунок 5 – Осциллограммы разрядного тока и напряжения на межэлектродном промежутке электродной системы

Следует отметить, что эксперимент проводился в условиях естественной воздушной конвекции корпуса разрядника, в то время как рабочий режим на скважине предполагает расположение погружной части комплекса с разрядником в скважинной жидкости. Поэтому в обоих случаях оценивался перепад температуры электродов разрядника относительно его корпуса.

Амплитуды токов согласно рис. 5 $I_{m1} = 22$ кА; $I_{m2} = 15$ кА; $I_{m3} = 10$ кА; $I_{m4} = 5$ кА, $I_{m5} = 1$ кА. Суммарная энергия по формуле (4) составила

$\sum_n W_n = 3,9$ Дж, при частоте следования разрядных импульсов $f = 0,8$ Гц мощность $P_{cp} = 3,1$ Вт. Теоретически рассчитанный перегрев электродов относительно стенки корпуса составил 76 °С.

Экспериментальное измерение температуры электродов разрядника производилось двумя термопарами К-типа.

Динамика нагрева элементов разрядника в процессе его работы с частотой повторения импульсов $0,8$ Гц приведена на рис. 6.

Измерения проводились до установления постоянной величины нагрева при температуре окружающей среды (воздуха) 17 °С. Перегрев электрода вычислялся путем вычитания соответствующих значений температур электрода и корпуса разрядника. Как видно из рис. 6, перегрев электродов разрядника вышел на установившееся значение за 45 минут работы, при этом его измеренная величина (60 °С) на 21 % меньше определенной теоретическим расчетом. Учитывая, что от 20 до 30 % разрядных импульсов не завершались пробоем рабочей среды, а происходило стекание заряда накопителя при малом разрядном токе, в разряднике выделялось меньшее количество энергии по сравнению с расчетом. Повысить точность результатов можно, производя осциллографирование тока и напряжения каждого импульса, протекающего через разрядник, что является достаточно трудоемким процессом. В то же время сравнение полученных данных с учетом описанных ранее погрешностей измерения свидетельствует о хорошей сходимости теоретических результатов с экспериментом.

Точечной оценки температур перегрева элементов разрядника при работе погружного комплекса. При затухающих синусоидальных, близких к критическим, разрядах возможно крепление электродов к тоководам при помощи припоев с высоким содержанием олова, имеющих начальную температуру плавления 183 °С (например, ПОС 30, ПОС 40). Однако учитывая возможность работы комплексов при температуре окружающей среды ~ 100 °С на короткие промежутки со слабо затухающей периодической формой разрядного тока, следует использовать более тугоплавкие сплавы (например, ПОСС 4-6 с температурой начала плавления 245 °С) и тщательно подходить к вопросу выбора фарфоровых изоляторов разрядника.

Авторы выражают благодарность м.н.с. Тафтаю Э.И. за участие в проведении эксперимента и обсуждении результатов.

Список литературы: 1. О.В.Хвоцан, Ю.И.Курашко, В.В.Литвинов. Оптимизация габаритных размеров высоковольтного трансформатора погружных электроразрядных устройств повышенной мощности // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2007. – № 34. – С. 112-118. 2. К.В.Дубовенко, Ю.И.Курашко, И.С.Швец. Анализ вероятностных характеристик пробоя компактного высоковольтного разрядника с газовой изоляцией // Труды 3-й Международной конференции «Электрическая изоляция – 2002». – С.-Петербург, 2002. – С. 370-372. 3. И.Н.Романенко. Импульсные дуги в газах. – Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1976. – 136 с. 4. Л.А.Бессонов. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1964. – 752 с. 5. О.В.Хвоцан, Ю.И.Курашко, В.В.Литвинов. Повышение эффективности зарядных процессов электроразрядных погружных комплексов увеличенной мощности // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2006. – №37. – С. 86-92.

Поступила в редакцию 04.08.2009

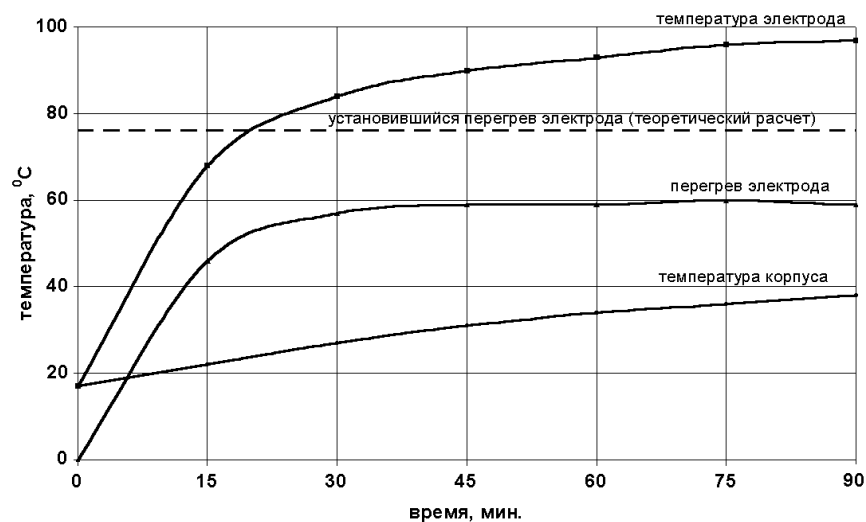


Рисунок 6 – Динамика изменения температуры элементов разрядника

По результатам исследований можно сделать вывод о возможности теоре-