

УДК 621.315.229

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИН
ПОВРЕЖДЕНИЯ КАБЕЛЬНЫХ МУФТ
В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПОГРУЖНЫХ УСТАНОВОК**

Ю. А. РУДЧЕНКО, Д. Г. КРОЛЬ, Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

О. В. ЛЫМАРЬ

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение
«Белоруснефть», г. Гомель*

Проведен анализ причин повреждений кабельных муфт в системе электроснабжения электропогружных установок скважинной добычи нефти РУП «Производственное объединение «Белоруснефть». Даны рекомендации по повышению надежности электроснабжения и снижению вероятности повреждений.

Ключевые слова: соединительная муфта, повреждения, силовой кабель, электропогружная установка, пробой изоляции, электрическое поле.

**DETERMINATION OF POSSIBLE CAUSES OF DAMAGE
TO CABLE COUPLINGS IN THE POWER SUPPLY
SYSTEM OF ELECTRIC SUBMERSIBLE
INSTALLATIONS**

Y. A. RUDCHENKO, D. G. KROL, D. I. ZALIZNY

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

O. L. LIMAR

*BelNIPIneft State “Production Association “Belorusneft”,
Gomel*

The article analyzes the causes of damage to the cable couplings in the power supply system of the electrical submersible units of the well oil production unit of the Production Association Belorusneft. Recommendations are given to improve the reliability of power supply and reduce the likelihood of damage.

Keywords: coupling, damages, power cable, electric submersible installation, insulation breakdown, electric field.

Введение

В настоящее время несколько сотен электропогружных установок скважинной добычи нефти эксплуатируется на РУП «Производственное объединение «Белоруснефть». Кабельная линия в системе электроснабжения этих установок прокладывается по наружной поверхности насосно-компрессорной трубы (НКТ) и в общем случае содержит: концевую муфту для присоединения к погружному электродвигателю (ПЭД); кабельный удлинитель плоской формы, прокладываемый по ПЭД, приемно-

му модулю и электроцентробежному насосу; основной кабель плоской или круглой формы, соединяемый с кабельным удлинителем с помощью соединительной муфты. Основной кабель, прокладываемый по НКТ, может быть выполнен одним отрезком либо состоять из нескольких, соединенных между собой муфтами.

Для подачи электрической энергии к погружным электродвигателям установок добычи нефти на РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» используют плоские кабели с полимерной изоляцией (марки КПБП, КППБП, КПсПБП, КПсППБП, КППТБ(к)П и др.) на номинальное напряжение 3,3 и 4,0 кВ частотой до 70 Гц производства ОАО «НП ПОДОЛЬСКАКАБЕЛЬ», ООО «Татнефть-Кабель» и ООО «Камский кабель». Соединение основного кабеля с кабельным удлинителем, а также отдельных отрезков основного кабеля между собой проводят по методике, разработанной специалистами предприятия.

Указанные элементы кабельной линии работают в скважинной жидкости (смесь нефти, попутной воды, минеральных примесей и нефтяного газа) в условиях высоких значений температуры (до 120 °С и выше) и давления (до 150 атм и выше).

В процессе эксплуатации описанной системы электроснабжения установок добычи нефти на различных скважинах РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» выяснилось, что самый слабый элемент – место соединения кабелей. Причем при наличии нескольких соединительных муфт в кабельной линии повреждение чаще всего происходит в месте соединения основного кабеля с кабелем-удлинителем ПЭД.

В последнее время наблюдается рост числа подобных отказов с сокращением срока службы муфтового соединения вплоть до одного месяца. Принимая во внимание значительные затраты, необходимые для устранения указанных повреждений кабельной линии, становится актуальной проблема повышения надежности систем электроснабжения электроустановок добычи нефти.

Цель данной работы – установить возможные причины повреждений соединительных кабельных муфт, используемых в системах электроснабжения установок скважинной добычи нефти РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», и разработать рекомендации, позволяющие снизить вероятность этих повреждений.

Визуальный осмотр поврежденных муфт

Для проведения анализа возможных причин повреждения был выполнен демонтаж и визуальный осмотр нескольких поврежденных соединительных муфт. В результате установлено следующее:

1. Наблюдается повреждение изоляции жил в виде прогара в месте соединения кабелей (рис. 1 и 2).

2. Повреждение изоляции жил локализовано вблизи места окончания брони основного кабеля (рис 1, а).

3. Существенных повреждений элементов муфты в местах выполнения соединения жил кабелей с помощью гильз не обнаружено, выявлены лишь небольшие локальные потемнения фторопластовой ленты.

4. Повреждений изоляции жил кабеля-удлинителя в месте выполнения муфты нет.

5. Выявлены изменения геометрической формы и цвета изоляции жил основного кабеля вблизи соединительной муфты (примерно на расстоянии 1–1,5 м) (рис. 3). Наблюдалось также увеличение объема изоляционного слоя (размягчение и разбухание). Указанные дефекты начинаются с места окончания намотки фторопластовой ленты; под фторопластовой лентой существенных изменений не обнаружено.

6. Наблюдается разрушение изолирующей ленты ПВХ (рис. 1, б, в) используемой при монтаже муфты (изменение цвета, значительное старение, потеря эластичности).



Рис. 1. Фрагмент соединительной муфты со следами повреждения (в виде прогара):
а – на подушке кабеля после удаления части брони; б – на жилой изоляции
после удаления подушки и подмотки фторопластовой лентой;
в – на отдельных жилах кабеля после полного демонтажа муфты



Рис. 2. Жила основного кабеля со следами прогара изоляции
после демонтажа муфты



Рис. 3. Жилы основного кабеля с дефектной изоляцией

Проведение инструментальных исследований

Для выяснения причин повреждения помимо визуального осмотра был проведен также ряд опытных исследований образцов кабелей и кабельных муфт.

Статистические исследования [1] показывают, что около 85 % аварий, связанных с изоляцией кабелей, возникают вследствие влияния частичных разрядов. Выделим несколько характерных параметров, которые существенным образом влияют на возникновение и уровень частичных разрядов: высокие значения напряженности электрического поля [2]; температура окружающей среды [3]; наличие агрессивной окружающей среды [4]; нарушение технологии монтажа муфт и неверный выбор материала соединительных муфт [5].

Для определения уровня напряженности поля в кабеле и кабельной муфте в продольном и поперечном направлениях в лабораторных условиях кафедры «Электропитание» ГГТУ им. П. О. Сухого была собрана испытательная установка, состоящая из трех однофазных повышающих трансформаторов, соединенных в схему трехфазного трансформатора. Трехфазная система напряжений с линейным значением около 2 кВ (в реальных условиях в скважине – около 1 кВ) подавалась на исследуемые образцы кабелей и соединительных муфт. Для измерения напряженности электрического поля применялся прибор ПЗ-50 [6].

Принципиальная схема испытательной установки дана на рис. 4.

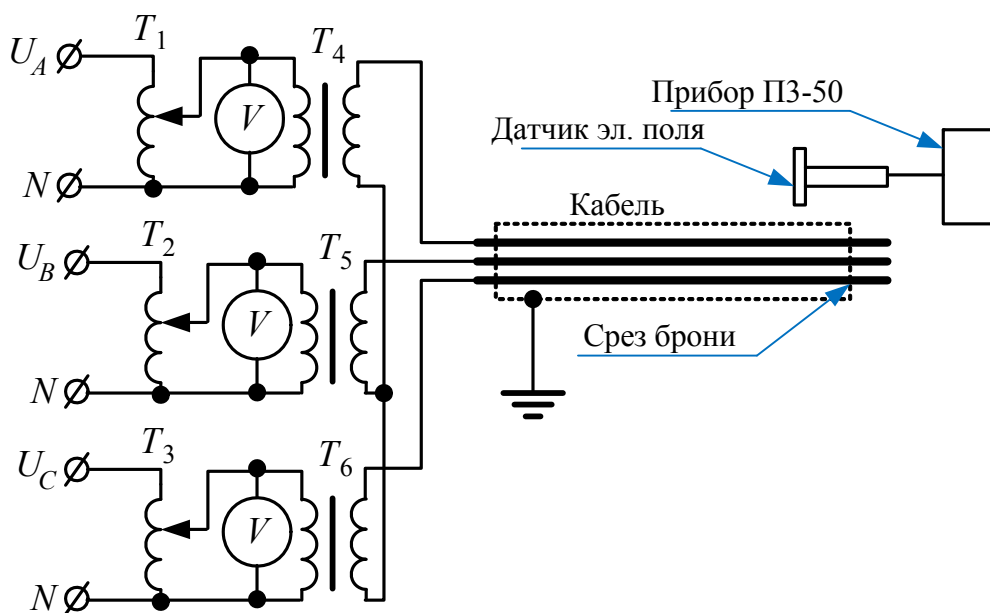


Рис. 4. Принципиальная схема испытательной установки

Поскольку кабель имеет плоское расположение жил, напряженность поля вокруг его изоляции неравномерна. Она минимальна в центре средней жилы и максимальна по краям кабеля. Абсолютные значения напряженности поля не превысили 11 кВ/м, что является пренебрежимо малым значением для новой изоляции из сополимера пропилена, нормируемая электрическая прочность которого составляет не менее 35000 кВ/м (35 кВ/мм).

Характерная картина электрического поля вблизи изоляции кабеля КПпБП-120 3 × 16 приведена на рис. 5.

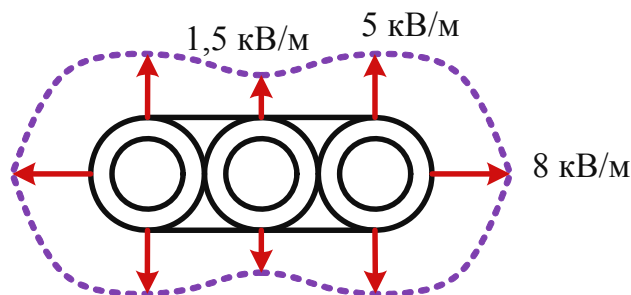


Рис. 5. Характерная картина электрического поля
вблизи изоляции кабеля КППБП-120 3 × 16

Подобные опыты были проведены и с образцами кабельных муфт. В результате исследований обнаружено увеличение уровня электромагнитного поля в местах расположения соединительных гильз, а также в местах среза брони. Однако значения напряженности поля не позволяют сделать вывод о том, что основной причиной повреждения может являться высокая концентрация силовых линий в месте среза брони.

Для определения качества соединения жил кабелей измерены переходные сопротивления в месте монтажа медных гильз. Измерения проводились методом амперметра-вольтметра (вольтметр В7-77, амперметр VC9808) при постоянном токе и температуре 22 °С. Установлено, что значение сопротивления участка соединения жил практически не отличается от значения сопротивления участка целой жилы такой же длины. Следовательно, качество монтажа гильз можно признать удовлетворительным; данное место не может являться источником локального нагрева изоляции кабелей и приводить к повреждению.

Выполнена оценка электрической прочности изоляции жил кабеля, бывшего в эксплуатации. Измерения проводились с помощью аппарата испытания диэлектриков АИД-70. Для испытания были взяты отрезки жил кабеля, имеющие дефекты изоляции, появившиеся в процессе эксплуатации (изменение геометрической формы и цвета, увеличение объема изоляционного слоя). В процессе эксперимента испытательное напряжение плавно увеличивали до 40 кВ – пробоя изолирующего слоя не наблюдалось.

Был проведен электротепловой пробой изоляции отрезка жилы нового кабеля. Изоляция предварительно разогревалась строительным феном до 250 °С, далее образец помещался между электродами цилиндрической формы, которые сжимали жилу с усилием 80 Н. На электроды подавалось испытательное напряжение, которое плавно увеличивали до пробоя изоляции. Температура нагрева образца контролировалась с помощью тепловизора.

Определение электрической прочности изоляции кабеля показано на рис. 6.

Пробой изоляции наблюдался при напряжении 38 кВ (переменное – частотой 50 Гц). При этом температура на поверхности изоляции была около 170 °С. После испытания наблюдалась незначительная деформация изоляции.



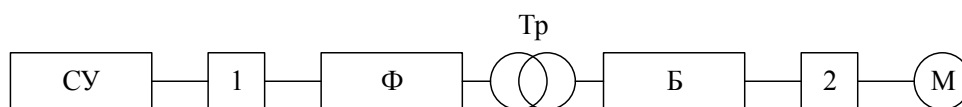
Рис. 6. Определение электрической прочности изоляции кабеля

В БелНИПИнефть специалистами отдела технических средств контроля добычи нефти были проведены экспериментальные исследования с целью оценки влияния высших гармоник тока и напряжения, а также переходного сопротивления на дополнительный нагрев в месте соединения погружного кабеля с кабелем-удлинителем. Испытательная установка моделировала работу кабельных муфт в условиях, приближенных к реальным, за исключением влияния внешней среды (высокие температура и давление, химически активная среда) и нагрузки ПЭД.

Внешний вид и блок-схема испытательного стенда представлены на рис. 7.



а)



б)

Рис. 7. Испытательный стенд:

а – внешний вид; б – блок-схема; СУ – станция управления «Борец-04»; 1 – место соединения двух отрезков погружного кабеля (муфта № 1); Ф – sin-фильтр; Тр – повышающий трансформатор; Б – барабан с погружным кабелем; 2 – место соединения погружного кабеля с кабелем-удлинителем (муфта № 2); М – погружной электродвигатель

Исследования показали, что в месте соединения погружного кабеля и кабельного удлинителя, расположенном между ПЭД и барабаном с погружным кабелем (муфта № 2 на рис. 7), не происходит дополнительного выделения тепла.

Заключение

Повреждение соединительной муфты имеет характер электрического пробоя, причиной которого являются частичные разряды в изоляции кабеля. Надежность и эффективность работы муфты определяется комплексом факторов, среди которых следует отметить: 1) конструкцию и технологию монтажа кабельной арматуры; 2) качество материалов; 3) условия эксплуатации (высокая температура и давление, химически агрессивная среда). В качестве рекомендаций по повышению надежности предлагается усовершенствовать существующую методику монтажа муфт, а именно: исключить из перечня используемых материалов материалы с температурой эксплуатации до 120 °С и малостойкие к химическому воздействию окружающей среды; ввести дополнительный материал, позволяющий значительно снизить напряженность электрического поля в месте среза брони кабеля.

Литература

1. Refaat, S. S. A review of partial discharge detection, diagnosis techniques in high voltage power cables / S. S. Refaat, M. A. Shams // 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, 2018. – P. 1–5.
2. Kucheriava, I. M. Numerical study of electric field distribution in high voltage cable termination with stress control cone / I. M. Kucheriava // Технічна електродинаміка. – 2017. – N. 1. – P. 17–22.
3. Khawaja, R. H. Impact of high temperature on partial discharges in oil-impregnated insulation / R. H. Khawaja, T. R. Blackburn // 2009 Australasian Universities Power Engineering Conference. – 2009. – P. 1–6.
4. Densley, J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – an overview / J. Densley // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2001. – Vol. 17, N 1. – P. 14–22.
5. Кучерявая, И. Н. Причины выхода из строя муфт кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на среднее и высокое напряжение / И. Н. Кучерявая // Гідроенергетика України. – 2017. – № 1-2. – С. 63–80.
6. Исследование характеристик электрического поля в силовых кабелях и соединительных муфтах для погружных нефтедобывающих систем / Д. И. Зализный [и др.] // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2023. – Ч. 2. – С. 31–34.

References

1. Refaat S. S., Shams M. A. A review of partial discharge detection, diagnosis techniques in high voltage power cables. *2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering*, 2018, pp. 1–5.
2. Kucheriava I. M. Numerical study of electric field distribution in high voltage cable termination with stress control cone. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2017, no. 1, pp. 17–22.
3. Khawaja R. H., Blackburn T. R. Impact of high temperature on partial discharges in oil-impregnated insulation. *2009 Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2009, pp. 1–6.

4. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – an overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2001, vol. 17, no. 1, pp. 14–22.
5. Kucheryavaya I. N. Causes of failure of cable couplings with XLPE insulation for medium and high voltage. *Gidroyenergetika Ukraini*, 2017, no. 1-2, pp. 63–80 (in Russian).
6. Zaliznyy D. I., Krol' D. G., Rudchenko Yu. A., Suchkov D. V. Study of the characteristics of the electric field in power cables and couplings for submersible oil production systems. *Sovremennyye problemy mashinovedeniya = Modern problems of mechanical engineering*, 2023, pp. 31–34 (in Russian).

Поступила 22.06.2023 г.