

УДК 537.523, 537.528
EDN: RKPIKV

PACS: 77.22.Jp

Электрическая прочность и демпфирующие свойства смеси трансформаторное масло–элегаз

А. С. Савельев, В. А. Панов, Ю. М. Куликов

Экспериментально исследуются свойства газожидкостной смеси трансформаторное масло–элегаз на предмет электрических изоляционных и демпфирующих свойств. При прохождении волны сжатия по такой среде ее интенсивность значительно уменьшается за счет изменения сжимаемости среды и уменьшения скорости распространения, что может быть применено при решении задач уменьшения последствий электрического пробоя высоковольтного маслонаполненного электрооборудования. Использование трансформаторного масла в смеси с элегазом приводит к снижению электрической прочности, однако остается приемлемой в рамках объемного газо-содержания менее 1 %. Для определения столь малых значений в работе предложен акустический метод определения газосодержания при его величине, существенно меньшей 1 %.

Ключевые слова: трансформаторное масло, элегаз, электрическая прочность, волна сжатия, газожидкостная смесь

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-57-62

Введение

Электрический трансформатор – важный элемент энергетической системы. Выход из строя этого элемента может привести к серьезным последствиям. Одной из самых серьезных нештатных ситуаций является короткое замыкание внутри трансформатора с последующими повреждениями его корпуса и пожаром, вызванным воспламенением трансформаторного масла. Развитие разряда возможно как непосредственное через масло при его старении и загрязнении, так и при по-

ниженном напряжении в случае скопления воды [1,2]. При возникновении электрического разряда внутри трансформатора может формироваться ударная волна, которая, достигая стенки трансформатора, приводит к резкому повышению давления [3]. Если от относительно медленного повышения давления существует защита, то от резкого повышения давления внутри трансформатора защиты в настоящее время нет. Это приводит к необходимости поиска новых способов защиты трансформатора от последствий короткого замыкания. В частности, ранее был предложен способ защиты трансформатора от разрушения при использовании смеси жидкости (трансформаторного масла) и газа (элегаза) [4, 5]. Способ основан на свойстве пузырьковой жидкости поглощать акустические возмущения [6] и волны конечной амплитуды [7]. Для оценки его применимости требуется исследование как электроизоляционных свойств такой среды, так и демпфирующих. В работах [8, 9] было показано, что наличие газовой фазы (элегаза) в трансформаторном масле не-

Савельев Андрей Сергеевич, с.н.с., к.ф.-м.н.
Панов Владислав Александрович, с.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: panovvladislav@gmail.com
Куликов Юрий Матвеевич, с.н.с., к.ф.-м.н.
Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 13.05.2024

После доработки 29.05.2024

Принята к публикации 11.06.2024

Шифр научной специальности: 1.3.13

© Савельев А. С., Панов В. А., Куликов Ю. М., 2024

сколько снижает электрическую прочность жидкой изоляции трансформатора. Целью данной работы является определение электрической прочности газожидкостной среды и степени ослабления волн конечной амплитуды (волн сжатия) при прохождении по ней, а также определение границ объемной концентрации элегаза в трансформаторном масле, при которых происходит существенное уменьшение амплитуды волн сжатия при относительно небольшом снижении электрической прочности. При этом под величиной газосодержания (объемной доли) φ подразумевается отношение объема нерастворенной газовой фазы (в виде газовых пузырьков) к общему объему газожидкостной среды.

Описание эксперимента

Для создания газожидкостной среды использовался метод газации с помощью про-

пускания элегаза через трансформаторное масло марки ГК, описанный в [9]. Экспериментальная установка создания газожидкостной среды представлена на рисунке 1а. В прозрачную диэлектрическую емкость из оргстекла (1), имеющего форму прямого параллелепипеда с размерами 50×80×20 см (Ш×В×Г), через устройство (2), называемое генератор микропузырьковой жидкости [9], подавалась смесь масла и элегаза. Масло в генератор подавалось из емкости (1) с помощью насоса (3), а элегаз – из баллона с редуктором (4). Движение масла и элегаза показано стрелками. Важно отметить, что при выключении масло с пузырьками относительно быстро стекали в емкость (1) из генератора и насоса, поскольку находились выше, чем уровень жидкости (5), таким образом весь объем смеси участвовал в эксперименте. Емкость (1) снабжена линейной шкалой для отсчета уровня микропузырьковой жидкости (5). Диаметр образующихся пузырьков до 1 мм.

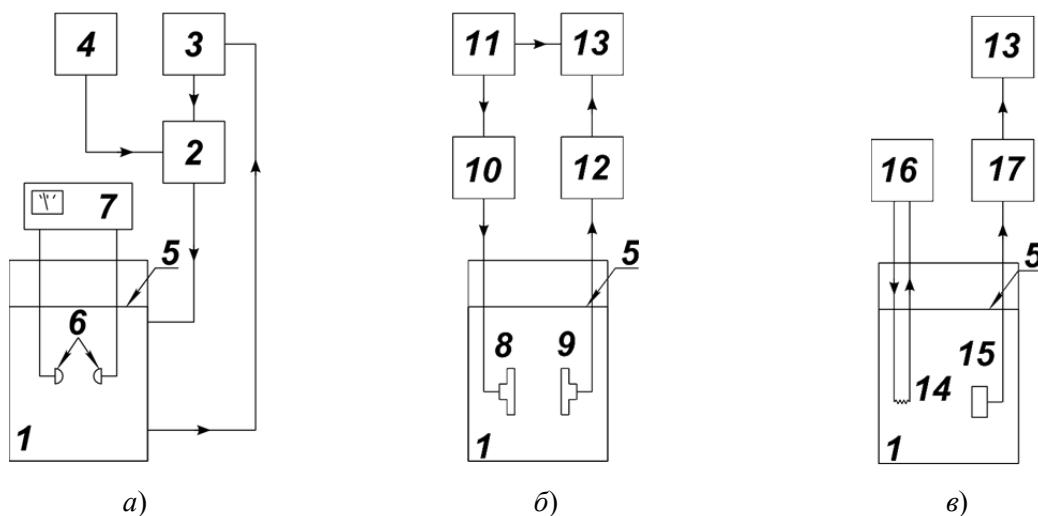


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для получения газожидкостной среды и определения: ее электрической прочности (а), объемного газосодержания (б), степени ослабления волн сжатия (в)

Эксперимент показал, что через несколько минут после начала работы насоса и генератора уровень микропузырьковой жидкости достигал своего стационарного значения h_{\max} , при этом начальный уровень масла h_0 , т. е. уровень до включения насоса и подачи элегаза, был меньше h_{\max} . После выключения насоса и остановки подачи элегаза уровень микропузырьковой жидкости h начинал относительно медленно уменьшаться от значения h_{\max} , стремясь к величине h_0 . Таким образом,

величину газосодержания φ можно вычислить как

$$\varphi(t) = 1 - \frac{h_0}{h(t)},$$

где t – время после выключения насоса и генератора, которое варьировалось в диапазоне 0–500 с, при этом $h(t)$ менялось от h_{\max} до практически начального значения h_0 . Следует отметить, что недостатком такого относитель-

но простого способа определения газосодержания является то, что с его помощью можно измерять относительно большие значения φ (1 % и более).

Для определения электрической прочности микропузырьковой жидкости в емкость (1) размещались два полусферических электрода (6) с радиусом кривизны 25 мм и диаметром 36 мм (ГОСТ 6581–75) на расстоянии 8 мм друг от друга, которые подключались к высоковольтному источнику (7), снабженному высоковольтным вольтметром (см. рис. 1а). Источник позволял поднимать напряжение между электродами относительно плавно, что позволяло регистрировать напряжение в момент возникновения пробоя промежутка.

Для измерения газосодержания относительно малой величины, когда электрическая прочность имеет значение, близкое к начальному (т. е. прочность для масла без пузырьков элегаза), применялась методика, основанная на измерении скорости прохождения звукового возмущения по среде. Для этого в емкость с микропузырьковой жидкостью размещались излучатель (8) и приемник (9) ультразвука (рис. 1б). Возбуждение излучателя (8) происходило с помощью высоковольтного усилителя мощности (10), который в свою очередь управлялся цифровым программируемым генератором (11). Сигнал генератор (синус, частота ~ 10 кГц) подавался также и на один из каналов осциллографа (13). На другой канал осциллографа подавался сигнал усилителя (12) приемника звукового излучения. С течением времени после остановки газации масла задержка по времени Δt между началом излучения и его регистрацией приемником звука непрерывно уменьшалась. Таким образом, вычислялась скорость звука a в микропузырьковой среде в зависимости от времени после остановки газации. В соответствии с [10] можно установить связь между скоростью звука в дисперсной среде и относительным газосодержанием:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\varphi}{a_g^2} + \frac{1-\varphi}{a_f^2} + \frac{\varphi(1-\varphi)\rho_g}{p} + \frac{\varphi(1-\varphi)\rho_g}{\rho_f a_f^2} + \frac{\varphi(1-\varphi)\rho_f}{p} + \frac{(1-\varphi)}{a_f^2},$$

где p – давление масла (атмосферное давление), ρ_f – плотность чистого масла, ρ_g – плотность элегаза, a_f – скорость звука в чистом масле, a_g – скорость звука в элегазе.

Наконец, для исследования демпфирующих свойств микропузырьковой жидкости «масло–элегаз» использовалась следующая экспериментальная схема (рис. 1в). В объеме жидкости размещались медная проволока (14) диаметром 0,2 мм и пластина с вмонтированным заподлицо пьезодатчиком импульсного давления (15). Проволока подключалась с помощью силовых проводов к блоку (16) коммутации энергии, запасенной в конденсаторах. При подаче напряжения с конденсаторов на проволоку происходил ее электровзрыв с формированием относительно мощной волны сжатия, распространяющейся в объеме масла. Таким образом, моделировался электрический пробой маслонеполненного силового оборудования с формированием волны сжатия (ударной волны). Регистрация амплитуды давления волны сжатия происходила с помощью пьезодатчика (15), соединенного с осциллографом (13) через блок преобразования заряда датчика (17). Следует отметить, что пластина с пьезодатчиком не контактировала со стенками емкости (1), так что влиянием распространения механических колебаний по ее стенкам на сигнал датчика можно пренебречь.

Результаты и обсуждение

Результат измерения электрической прочности показан на рисунке 2: зависимость пробойной напряженности электрического поля E для микропузырьковой жидкости, отнесенной к этой величине для чистого масла E_0 . Из представленной зависимости видно, что при газосодержании φ более 1 % наблюдается значительное уменьшение электрической прочности до почти 70 % от начального значения. При меньших значениях φ величина прочности восстанавливается до значения почти 90 % от начального значения. При этом следует отметить, что поскольку газосодержание измерялось по уровню жидкости (см. предыдущий раздел), точность определения φ в диапазоне до 1 % невелика, чем и объ-

ясняется существенный разброс точек на графике в данной области значений. Тем не менее, главным выводом данной части работы является то, что для реального применения микропузырьковой жидкости в качестве изолятора в маслonaполненном высоковольтном оборудовании необходимо обеспечивать объемное газосодержание не более 1 %. Вторым выводом является необходимость использования более точных (в диапазоне до 1 %) способов измерения газосодержания.

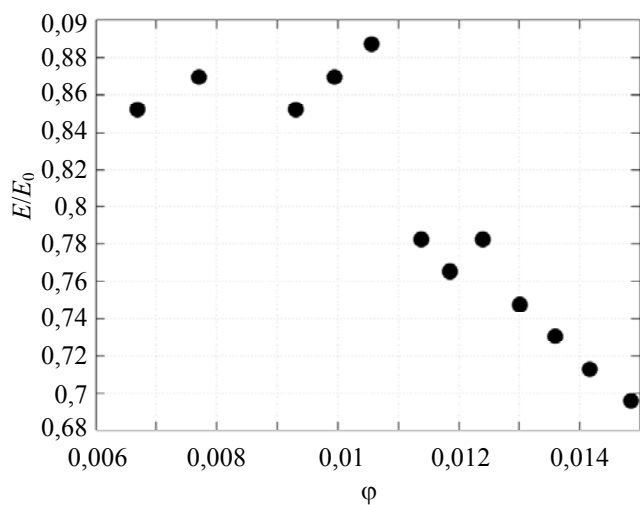


Рис. 2. Зависимость относительной электрической прочности E/E_0 микропузырьковой жидкости «масло–элегаз» от газосодержания ϕ

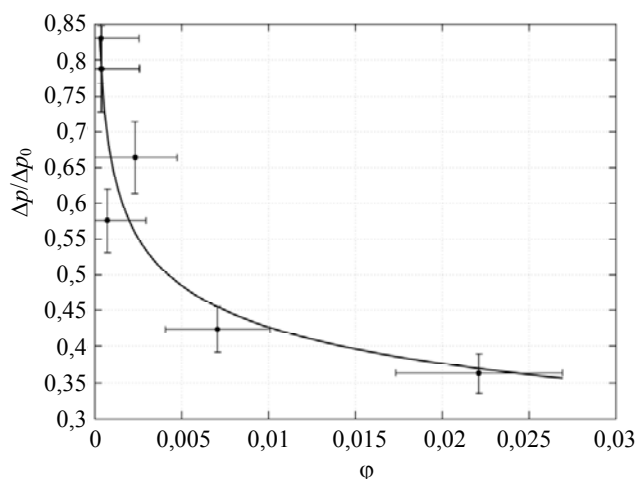


Рис. 3. Зависимость ослабления амплитуды давления волны сжатия $\Delta p/\Delta p_0$ в микропузырьковой жидкости «масло–элегаз» от газосодержания ϕ

Для этого была применена методика, схема которой описана в предыдущем разделе,

основанная на измерении скорости a распространения звуковой волны, величина которой находится в зависимости от газосодержания ϕ . Известно [10], что в смесях «жидкость–газ» скорость звука может быть близка как к скорости звука в жидкости (при очень малых ϕ , характерных для микропузырьковых жидкостей), так и к скорости звука в газе (при очень больших ϕ , характерных для газокapпельного потока). При этом промежуточным значениям ϕ может соответствовать скорость, которая одновременно меньше скорости звука как в жидкости, так и в газе. Существует теория, описывающая данное явление, которая позволяет связать скорость звука в дисперсной среде и газосодержание (см. формулу выше). В результате измерений получена зависимость газосодержания от времени после окончания длительной газации масла элегазом. Эксперимент показал, что получаемая зависимость хорошо повторяется от опыта к опыту. Кроме того, оказалось, что при высоких значениях газосодержания (около 1 %) происходит значительное ослабление звуковой волны, вплоть до -50 дБ при газосодержании 0,1 %. Такое сильное затухание ограничило возможность измерения скорости звука в микропузырьковой жидкости при $\phi > 0,1$ % из-за невозможности достоверной регистрации звуковой волны, пришедшей к приемнику излучения. Таким образом, измерения демпфирующих свойств микропузырьковой жидкости проводилось при газосодержании менее 0,1 %.

Эксперимент показал, что основным источником погрешности в определении газосодержания является неопределенность в измерении времени распространения звукового сигнала. Оказалось, что измеряемая по осциллограммам задержка прихода сигнала от передатчика к приемнику, полученная в один и тот же момент после газации, меняется в диапазоне ± 2 мкс относительно среднего значения. Заметную величину случайной погрешности в измерении времени распространения звуковой волны в газожидкостной среде можно объяснить неравномерной по объему дегазацией среды. Наибольший вклад в погрешность измерения газосодержания это явление дает при относительно низком его значении ϕ .

Для определения затухания волны конечной амплитуды (волны сжатия), возникающей после электроразрыва проволоки, в микропузырьковой среде с помощью пьезодатчика регистрировалась амплитуда давления Δp . В эксперименте варьировалась величина φ , но параметры проволоки и напряжение заряда электрических емкостей, подаваемое на нее, оставались неизменными. Получаемая величина амплитуды давления нормировалась на ту же величину, измеренную в чистом трансформаторном масле при $\varphi = 0$. На рисунке 3 представлена зависимость $\Delta p/\Delta p_0$ от φ .

Для проверки повторяемости экспериментов было проделано несколько электровзрывов проволоки в чистом масле при одинаковой запасенной в конденсаторе энергии. Оказалось, что измеренная датчиком давления амплитуда волны сжатия, распространяющаяся в чистом масле, отличается от средней ее величины Δp_0 (составляет величину около 3 атм) не более чем на 15 %, что принимается в качестве случайной погрешности в определении степени затухания интенсивности волны сжатия. По всей видимости, эта погрешность связана с несколько различными параметрами (длина, сопротивление соединения, неравномерность диаметра по длине и т. п.) проволок, используемых для инициирования электровзрыва.

Выводы

В работе проведены измерения электрической прочности микропузырьковой жидкости «трансформаторное масло–элегаз» и демпфирующие свойства данной среды. Показано, что при газосодержании менее 1 % электрическая прочность такой жидкости может достигать 90 % от этой величины для чистого трансформаторного масла. Наличие микропузырьков элегаза в масле наделяет его дополнительными свойствами, такими как значительная величина сжимаемости. Кроме того, отмечается значительное снижение скорости распространения звуковых волн и значительное ослабление амплитуды волны конечной амплитуды (волны сжатия).

Первое обстоятельство использовалось для измерения газосодержания в диапазоне до

1 %, где измерения по уровню жидкости невозможны из-за низкой их точности. Метод основан на измерении скорости прохождения звуковой волны по микропузырьковой жидкости и на вычислении газосодержания в соответствии с теорией, развитой в [10]. При газосодержании 0,1 % точность его измерения составляет 10–20 %, что связано с неопределенностью измерения величины задержки прихода звуковой волны от излучателя к приемнику, т. к. в этом случае скорость ее распространения близка к скорости звука в масле. Увеличение расстояния между излучателем и приемником не приведет к повышению точности измерения, т. к. в этом случае волна может не регистрироваться из-за сильного ослабления в микропузырьковой жидкости.

В эксперименте получено ослабление волны сжатия, созданной с помощью электровзрыва проволоки, в три раза при газосодержании 0,02 %. При этом электрическая прочность смеси трансформаторное масло–элегаз при таком газосодержании окажется близким к этой величине для чистого масла. Полученный экспериментальный результат показывает возможность использования такого диэлектрика для пассивной защиты высоковольтного маслонаполненного силового оборудования от разгерметизации и возникновения пожара после короткого замыкания внутри.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панов В. А., Василяк Л. М., Печеркин В. Я., Ветчинин С. П., Куликов Ю. М. / Прикладная физика. 2022. № 4. С. 5–10.
2. Панов В. А., Куликов Ю. М., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Савельев А. С. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 5–10.
3. Muller S., Brady R., Bressy G., Magnier P., Perigaud G. / ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference. – Chicago, 2008. Vol. 4. P. 357.
4. Фортвов В. Е., Сон Э. Е., Исакаев М.-Э. Х., Карпунин А. В., Леонов А. А., Спектор Н. О., Юсупов Д. И. Способ защиты маслонаполненного трансформатора от взрыва и маслонаполненный трансформатор с защитой от взрыва. Патент на изобретение № 2516307 (РФ). 2014.
5. Фортвов В. Е., Сон Э. Е., Аксенов А. А., Бондарь В. С., Зибаров Я. В., Иванов Э. Х., Тюфтяев А. С., Шурупов А. В., Горюшин Ю. А., Деметьев Ю. А. Инновационные технические решения в программе НИОКР ПАО «ФСК ЕЭС». Сборник статей под общей редакцией Мурова А. Е. – М.: Издательство АО «НТЦ «ФСК ЕЭС», 2016. С. 228.

6. Loye D. P., Arndt W. F. / J. Acoust. Soc. Am. 1948. Vol. 20. № 2. P. 143.
 7. Kedrinskii V. K. / J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1968. Vol. 9. № 4. P. 370.
 8. Gadzhiev M. Kh., Tyuftyaev A. S., Il'ichev M. V. / Tech. Phys. 2017. Vol. 62. P. 1500.
 9. Panov V. A., Kulikov Y. M., Son E. E., Tyuftyaev A. S., Gadzhiev M. Kh., Akimov P. L. / High Temp. 2014. Vol. 52. № 5. P. 770.
 10. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003.

PACS: 77.22.Jp

Electrical strength and damping properties of a mixture of transformer oil and SF₆ gas

A. S. Saveliev, V. A. Panov and Yu. M. Kulikov

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
 Bld. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia
 E-mail: panovvladislav@gmail.com

Received 13.05.2024; revised 29.05.2024; accepted 11.06.2024

The properties of the gas-liquid mixture transformer oil – SF₆ gas are experimentally studied for electrical insulating and damping properties. When a compression wave passes through such a medium, its intensity decreases significantly due to a change in the compressibility of the medium and a decrease in the propagation speed, which can be used in solving problems of reducing the consequences of electrical breakdown of high-voltage oil-filled electrical equipment. The use of transformer oil in a mixture with SF₆ gas leads to a decrease in electrical strength, but remains acceptable within the volumetric gas content of less than 1 %. To determine such small values, the work proposes an acoustic method for determining gas content when its value is significantly less than 1 %.

Keywords: transformer oil, SF₆ gas, dielectric strength, compression wave, gas-liquid mixture.

REFERENCES

- Panov V. A., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Vetchinin S. P. and Kulikov Yu. M., Applied Physics, № 4, 5–10 (2022) [in Russian].
- Panov V. A., Kulikov Yu. M., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. and Saveliev A. S., Applied Physics, № 6, 5–10 (2023) [in Russian].
- Muller S., Brady R., Bressy G., Magnier P. and Perigaud G. Proc. ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference. Chicago, 2008, p. 537.
- Fortov V. E., Son E. E., Isakaev E. M.-H., Karpuhin A. V., Leonov A. A., Spektor N. O. and Yusupov D. I. Method for protection of oil-filled transformer from explosion and explosion-proof oil-filled transformer. Patent for invention № 2516307 (RF). 2014.
- Fortov V. E., Son E. E., Aksenov A. A., Bondar' V. S., Zibarov YA. V., Ivanov E. H., Tyuftyaev A. S., Shurupov A. V., Goryushin Yu. A. and Dement'ev Yu. A., Innovacionnye tekhnicheskie resheniya v programme NIOKR PAO «FSK EES». Sbornik statej pod obshchej redakciej A.E. Murova, Moscow, Izdatel'stvo AO «NTC «FSK EES», 2016, p. 228 [in Russian].
- Loye D. P. and Arndt W. F., J. Acoust. Soc. Am. **20** (2), 143 (1948).
- Kedrinskii V. K., J. Appl. Mech. Tech. Phys. **9** (4), 370 (1968).
- Gadzhiev M. Kh., Tyuftyaev A. S. and Il'ichev M. V., Tech. Phys. **62**, 1500 (2017).
- Panov V. A., Kulikov Y. M., Son E. E., Tyuftyaev A. S., Gadzhiev M. Kh. and Akimov P. L., High Temp. **52** (5), 770 (2014).
- Lojcyanskij L. G., Mekhanika zhidkosti i gaza, Moscow, Drofa, 2003 [in Russian].