

04

## Электрический пробой трансформаторного масла с пузырьками элегаза и воздуха

© М.Х. Гаджиев, Э.Х. Исакаев, А.С. Тюфтяев, П.Л. Акимов, Д.И. Юсупов, Ю.М. Куликов, В.А. Панов

Объединенный институт высоких температур РАН,  
125412 Москва, Россия  
e-mail: makhach@mail.ru

(Поступило в Редакцию 5 ноября 2014 г.)

Экспериментально исследовано влияние пузырьков газа на напряжение пробоя трансформаторного масла. Исследовано влияние протока масла на электрические характеристики пробоя. Показано, что наличие пузырьков с элегазом или воздухом снижает напряжение электрического пробоя.

### Введение

Трансформаторные масла применяются в электротехнике, в силовых и измерительных трансформаторах, а также в масляных выключателях. В энергетических объектах, использующих масло, возможны крупномасштабные аварии при внутреннем коротком замыкании и развитии дугового разряда. Выделяющаяся в разряде энергия может составлять от нескольких десятых долей мегаджоуля в измерительных до нескольких десятков мегаджоулей в силовых трансформаторах. В дуговом разряде трансформаторное масло интенсивно разлагается с выделением большого объема газа, что приводит к росту давления, распространению интенсивных волн давления и возможному разрушению корпуса маслонаполненного оборудования [1].

Одной из важных характеристик трансформаторного масла является его диэлектрическая прочность, определяющая напряжение пробоя [2,3]. Растворенные воздух и другие газы, а также взвешенные углеродные частицы значительно ухудшают электроизоляционные характеристики масла. Электрическая прочность газов при атмосферном давлении значительно ниже, чем у жидких диэлектриков, поэтому разряд может произойти в газовом пузырьке раньше, чем в масле. В настоящее время нет единого представления о процессах электрического пробоя в жидких диэлектриках в целом и в частности трансформаторного масла.

В настоящей работе экспериментально исследовано влияние пузырьков газа и протока масла на напряжение и электрические характеристики пробоя трансформаторного масла. Показано, что наличие пузырьков с элегазом или воздухом снижает напряжение электрического пробоя.

### Экспериментальная установка

Исследования проводились на установке с генератором микропузырьков воздуха или элегаза. Принципиальная схема установки приведена на рис. 1.

В электрическую часть входят ЛАТР Т1 и высоковольтный трансформатор Т2, с выходным напряжением от 0 до 70 кВ (амплитудные значения). Выходное напряжение удваивалось до 140 кВ диодно-емкостным удвоителем. Напряжение на выходе измерялось электростатическим киловольтметром. Для снятия электрических характеристик пробоя использовались два высоковольтных делителя напряжения на резисторах КЭВ-20. Через них и дополнительные высоковольтные пробники Tektronix P6015A был подключен осциллограф Tektronix TDS2014C. На участке цепи умножителя напряжения с нулевым потенциалом подключались активные токовые пробники Tektronix TCP303.

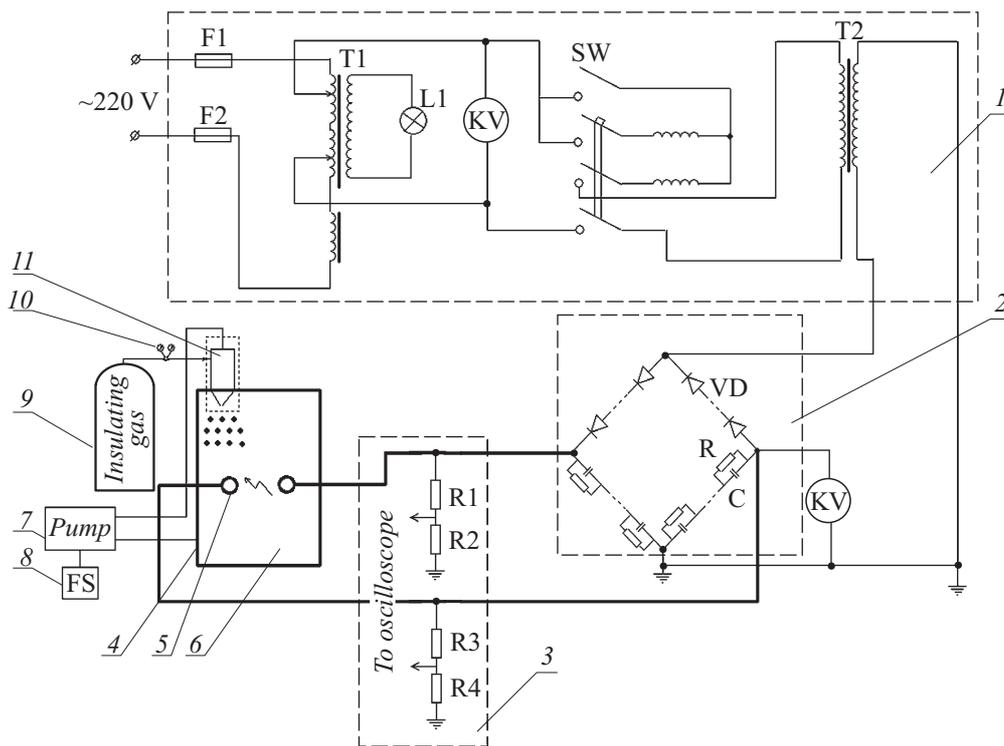
Гидравлическая часть состояла из баллона с элегазом или воздушного компрессора, газового редуктора, центробежного насоса с преобразователем частоты и генератора микропузырьковых сред.

Пробой среды осуществлялся в цилиндрической камере из оргстекла с внутренним диаметром 200 мм, высотой 550 мм. На высоте 260 мм располагались электроды из меди, имеющие форму шарового сегмента диаметром 36 мм, толщиной 13 мм и радиусом кривизны 25 мм, межэлектродное расстояние равнялось 8 мм. Генератор микропузырьков обеспечивал равномерное заполнение объема пузырьками. Фотографирование процессов разряда осуществлялось через кварцевое окно на боковой поверхности камеры.

Микропузырьки генерировались при тангенциальной подаче газа в сужающейся части трубки Вентури (рис. 2) [4]. Роль расширяющейся части играло сопло, образованное окружающей жидкостью. Конструкция обеспечивала создание микропузырьков размером 100–200 мкм. Запуск генератора начинался с подачи масла при давлении  $4 \cdot 10^5$ – $5 \cdot 10^5$  Па, затем подавался газ.

### Экспериментальные результаты

При медленном повышении разности потенциалов между электродами пробой регистрировался по скачкообразному падению напряжения и возникновению све-

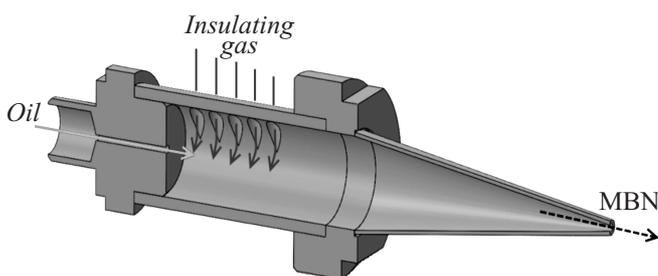


**Рис. 1.** Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования двухфазной среды: 1 — испытательная установка АИИ-70, 2 — диодно-емкостной удвоитель напряжения, 3 — высоковольтные делители напряжения, 4 — емкость испытательная, 5 — электроды, 6 — двухфазная среда, 7 — насос центробежный, 8 — преобразователь частоты, 9 — баллон элегазовый, 10 — редуктор газовый, 11 — генератор микропузырьковых сред.

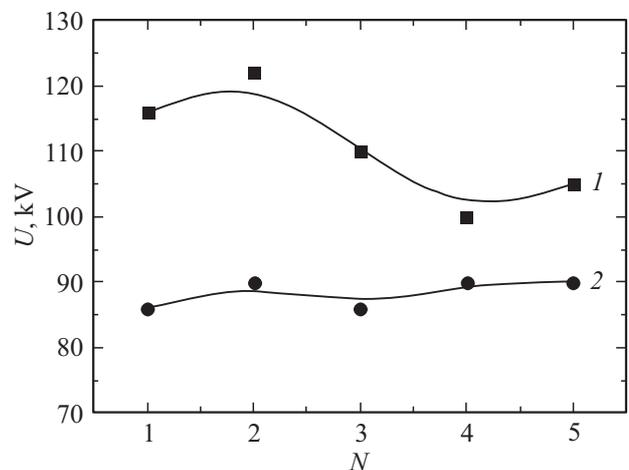
чения в межэлектродном промежутке. Предварительно проводились измерения напряжения пробоя при следующих условиях:

- 1) пробой неподвижного отстоявшегося в течение 7 h масла с последующим его перемешиванием и повторным испытанием на пробой;
- 2) пробой проточного масла с расходом около 2 L/min;
- 3) пробой проточного масла с расходом около 2 L/min, газированного элегазом при объемной доле газа 2–10%.

Электростатический киловольтметр фиксировал среднюю величину сигнала, имевшего небольшие пилообразные пульсации выпрямленного напряжения. Погрешность измерения напряжения пробоя составляла 10 kV.



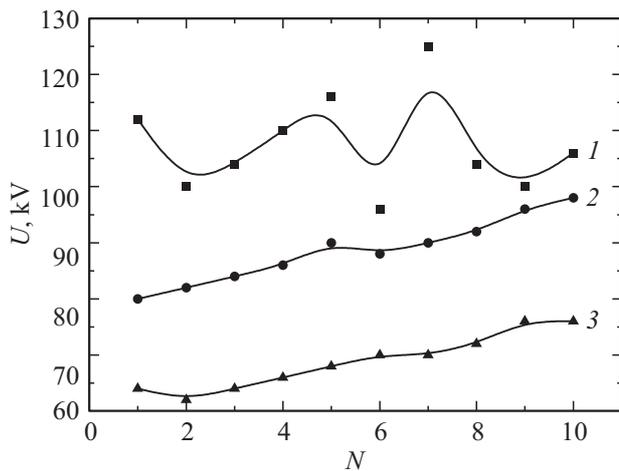
**Рис. 2.** Продольное сечение ротационного генератора.



**Рис. 3.** Пробивное напряжение чистого (1) и газированного элегазом (2) трансформаторного масла с объемной долей газа в масле 2–3%.

Результаты испытаний приведены на рис. 3. Наблюдающееся уменьшение напряжения пробоя в повторных разрядах, по-видимому, связано с накоплением продуктов распада масла.

Пробой проточного масла происходил при среднем напряжении 128 kV, при этом удалялись продукты распада масла. Эксперимент показал, что наличие пузырьков



**Рис. 4.** Пробивное напряжение чистого (1) и газированного элегазом (2) и воздухом (3) трансформаторного масла с объемной долей газа до 10%.

- [3] Торшин Ю.В. Физические процессы формирования пробоя конденсированных диэлектриков. М.: Энергоиздат, 2008. 212 с.
- [4] Parmar R., Majumder S.K. Microbubble generation and microbubbleaided transport process intensification // A state-of-the-art report, Chemical Engineering and Processing, 2013. Vol. 64. P. 79–97.

элегаза снижает пробивное напряжение масла, при этом оно не меняется от импульса к импульсу. Понижение напряжения пробоя, возможно, связано с тем, что разряд внутри пузырьков происходит при меньших полях.

Результаты измерения напряжения пробоя трансформаторного масла, газированного воздухом и элегазом, приведены на рис. 4.

Обращает на себя внимание тот факт, что пузырьки воздуха снижают пробивное напряжение больше, чем пузырьки с элегазом. Некоторый рост напряжения пробоя от испытания к испытанию происходит из-за уменьшения числа пузырьков.

## Заключение

Результаты экспериментальных исследований показали, что при повторных пробоях неподвижного масла пробивное напряжение снижается из-за накопления продуктов распада масла в разрядном промежутке. Наибольшее пробивное напряжение наблюдается в чистом проточном масле. Наличие пузырьков с элегазом и воздухом снижает пробивное напряжение.

Авторы благодарят А.В. Недосасова и Э.Е. Сола за постоянное внимание и полезные советы.

Работа выполнена по плану научной школы НШ–1800.2014.8 при поддержке гранта РФФИ 13-08-00821-а.

## Список литературы

- [1] Дарьян Л.А., Козлов А.В., Пазюк Д.А., Поварешкин М.Н., Полищук В.П., Шурупов А.В. // Энергетика. 2010. № 6. С. 32–34.
- [2] Ушаков В.Я., Климкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 488 с.