

УДК 537.52

## Исследование электрического пробоя двухфазной смеси трансформаторного масла с пузырьками газа

М. Х. Гаджиев, А. С. Тюфтяев, П. Л. Акимов, М. А. Саргсян, Н. А. Демиров

*Описана установка для исследования электрического пробоя двухфазной среды трансформаторного масла с пузырьками газа на основе источника питания с удвоителем напряжения. Исследованы электрические, оптические и спектральные характеристики разряда. Показано, что в промежутке происходят периодические разряды с частотой до 1 кГц. Наибольшим пробивным напряжением обладает проточное чистое масло. Наличие пузырьков воздуха или элегаза снижает напряжение электрического пробоя и наиболее близким пробивным значением к чистому трансформаторному маслу является двухфазная среда с элегазом.*

PACS: 52.80.Wq

*Ключевые слова:* трансформаторное масло, двухфазная среда, пробой, разряд.

### Введение

Трансформаторное масло широко используется в качестве изоляции различной высоковольтной техники и применяется для заливки силовых и измерительных трансформаторов, реакторного оборудования, масляных выключателей. Известно, что электрический пробой в жидкостях начинается с возникновения первичной искры, которая не всегда приводит к зажиганию стабильного разряда, так как успевает восстановиться электрическая прочность жидкого диэлектрика. Поэтому интерес вызывают исследования разрядных процессов в маслонаполненных высоковольтных аппаратах, где при внутреннем коротком замыкании и развитии дугового разряда выделяющаяся энергия может составлять от нескольких десятых долей мегаджоуля в измерительных до нескольких десятков мегаджоулей в силовых трансформаторах.

В жидких диэлектриках пузырьки газа могут существовать изначально [1] или образовываться в ней в результате нагрева, электролиза, кавитации и т.д. [2]. Известно также, что электрическая прочность газа ниже электрической прочности трансформаторного масла и частичный разряд может происходить в газовом пузырьке в полях меньших, чем необходимо для пробоя масла [3—5]. Несмотря на это интерес к двухфазным средам связан с их демпфирующими свойствами, которое активно изучается с середины XX века [6—11], а так же двухфазными течениями в энергоустановках, где существенна роль концентрации, размеров и состав пузырьков.

Также в работе [3] было показано, что при полях ниже напряжения пробоя масла в пузырьках происходят периодические разряды, которые не всегда сопровождаются перекрытием разрядного промежутка высокопроводящим каналом.

В связи с этим целью работы было регистрация электрических, оптических и спектральных характеристик пробоя двухфазной газожидкостной среды в установке на основе источника переменного напряжения АИ-70 с диодно-емкостным удвоителем напряжения.

### Экспериментальная установка

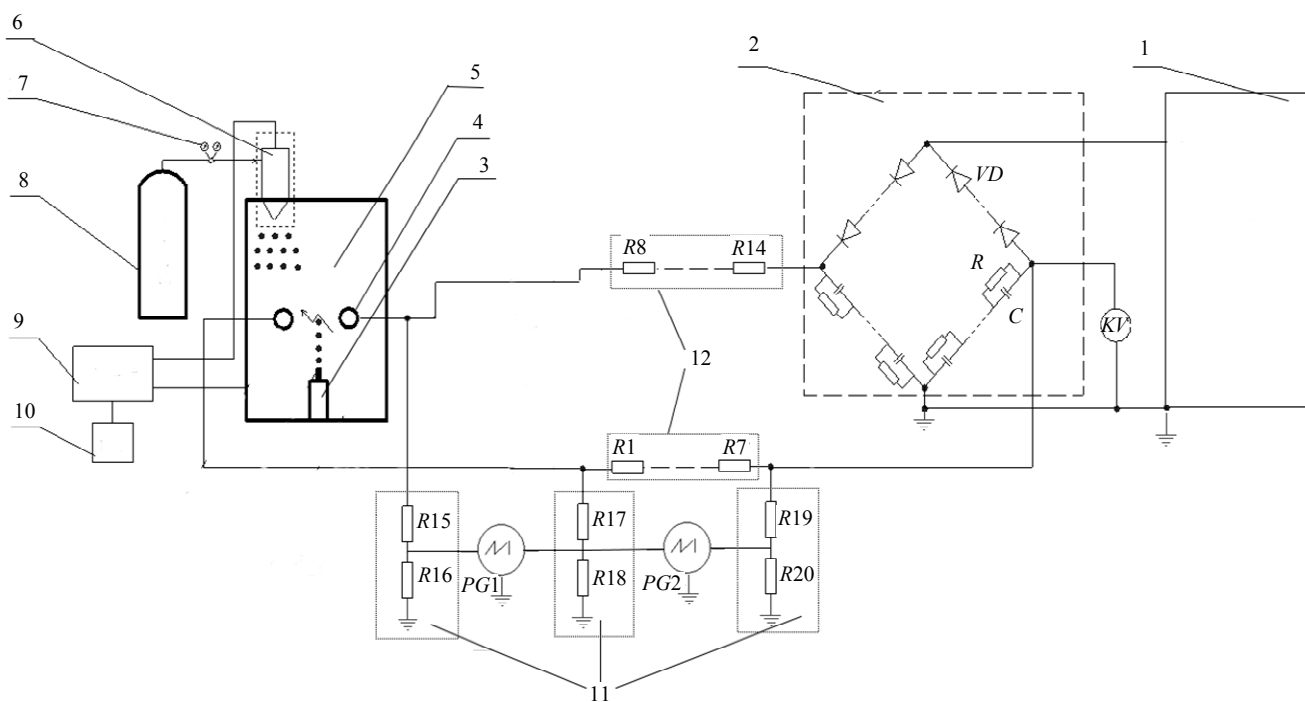
Экспериментальная установка исследования пробоя в двухфазных средах состоит из электрической и гидродинамической части (рис. 1).

---

Гаджиев Махач Хайрудинович, зав. лабораторией.  
Тюфтяев Александр Семенович, зав. отделом.  
Акимов Петр Леонидович, ведущий инженер.  
Саргсян Микаэль Арменович, аспирант.  
Демиров Назир Арабханович, ведущий инженер.  
Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН).  
Россия, 125412 Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.  
Тел. +7 (495) 485-96-66. E-mail: makhach@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28 июня 2016 г.

© Гаджиев М. Х., Тюфтяев А. С., Акимов П. Л., Саргсян М. А., Демиров Н. А., 2016



**Рис. 1.** Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования электрических характеристик разряда в жидких диэлектриках: 1 — испытательная установка АИИ-70; 2 — диодно-емкостной удвоитель напряжения; 3 — игла для создания одиночных пузырьков; 4 — электроды; 5 — емкость испытательная; 6 — генератор микропузырьковых сред; 7 — редуктор газовый; 8 — баллон газовый; 9 — насос центробежный; 10 — преобразователь частоты центробежного насоса; 11 — высоковольтные делители напряжения ( $R_{15} = R_{17} = R_{19} = 86 \text{ МОм}$ ,  $R_{16} = R_{18} = R_{20} = 12,7 \text{ кОм}$ ); PG1 и PG2 — цифровые осциллографы; 12 — ограничительные сопротивления  $R_1 = R_2 = \dots = R_{14} = 680 \text{ кОм}$ .

Электрическая часть состоит из стандартной установки АИ-70 для испытаний электрической прочности с выходным переменным напряжением амплитудой до 70 кВ, диодно-емкостного удвоителя напряжения и токоограничивающих сопротивлений  $R_1 \dots 7 \dots 14$ , с общим сопротивлением на каждом плече удвоителя  $R_0 = R_1 + R_2 + \dots + R_7 = R_8 + R_9 + \dots + R_{14} = 4,76 \text{ МОм}$  ( $R_1 = R_2 = \dots = R_{14} = 680 \text{ кОм}$ ).

Гидравлическая часть состоит из баллона с элегазом или воздушного компрессора, газового редуктора, центробежного насоса с преобразователем частоты для установления расхода жидкости на требуемом уровне и генератора микропузырьковых сред, принцип работы которого основан в генерации микропузырьков при тангенциальной подаче газа в сужающейся части трубки Вентури [12]. Генератор микропузырьковых сред обеспечивал создание микропузырьков размером  $\sim 100 \div 200 \text{ мкм}$  с объемной долей газа до 10 % [13, 14]. Степень газации определялась по изменению уровня в разрядной камере чистого и газированного масла. Одиночные пузырьки газа радиусом  $r \approx 1 \text{ мм}$  создавались медицинской иглой с внутренним диаметром  $\leq 1 \text{ мм}$ .

Для снятия электрических характеристик пробоя использовались стрелочный киловольтметр С100 и осциллограф типа Tektronix TDS2014С, под-ключенный к высоковольтным делителям

напряжения на резисторах КЭВ-20 ( $R = 86 \text{ МОм}$  каждый).

Киловольтметр С100 соединен с положительным электродом и регистрирует разность потенциалов на клеммах и показывает качественную картину напряжения пробоя. Так как киловольтметр фиксирует среднее значение с погрешностью  $\pm 5 \text{ кВ}$ , а полная разность потенциалов на электродах (без учета утечек тока в жидкости, на разрядном устройстве и на делителях) определяется как удвоенное значение показаний киловольтметра (в силу симметричности электрической цепи), то суммарная погрешность измерения на обоих плечах составляет  $\pm 10 \text{ кВ}$ . Более точное амплитудное значение пробивного напряжения регистрируется осциллографом (рис. 2). Выпрямленный сигнал с умножителя имеет пилообразную форму (см. рис. 2, луч 1) с максимальным размахом пульсации 24 кВ и отклонения от среднего 12 кВ.

Экспериментальная установка на основе источника питания с удвоителем напряжения [13, 14] формирует удвоенную разность потенциалов между двумя плечами (см. рис. 1), что делает невозможным применение прямых стандартных методов измерения тока и напряжения. Это связано с тем, что применение малоомного шунта приводит к отключению одного из плеч и уменьшению напряжения на разрядном промежутке в 2 раза, и

применение только одного делителя дает нам напряжение на одном плече относительно земли, а не разность потенциалов между электродами. Поэтому снятие осциллограмм тока и напряжения на установке производится тремя высоковольтными делителями, имеющими коэффициент деления  $k = 6770$  и  $RC \approx (4 \div 7) \cdot 10^{-4}$  с, где  $C$  — собственная емкость резистора. Эта емкость измерена подачей

на резистор прямоугольного бесконечного импульса и фиксацией на осциллографе времени нарастания до амплитудного значения  $RC$ . Тогда с учетом емкости измерительного щупа для нашего резистора  $C \approx 6 \div 8$  пФ, также из литературных данных погонная емкость резистора  $c \approx 0,1$  пФ/см, следовательно, при длине резистора 50 см имеем  $C \approx 5$  пФ.



Рис. 2. Осциллограмма напряжения и тока: 1 — колебания напряжения на разрядном промежутке при подаче напряжения меньше пробивного (цена деления 13,5 кВ/дел, развертка 10 мс); 2 — напряжение разряда (цена деления 13,5 кВ/дел, развертка 10 мс); 3 — ток разряда (цена деления 3 мА/дел, развертка 1 мс).

Два делителя ( $R15$ ,  $R16$  и  $R17$ ,  $R18$ ) регистрируют напряжение на выводах разрядной камеры, что пропорционально (с коэффициентом 6770) разности потенциалов на электродах камеры. Итоговая осциллограмма напряжения формируется при подаче сигналов с делителей на двухканальный осциллограф  $PG1$  с включенной функцией вычитания сигналов.

Между делителями  $R17$ ,  $R18$  и  $R19$ ,  $R20$  выделяется сигнал, пропорциональный разности потенциалов на ограничительной резисторной сборке, собранной из резисторов  $R1 \div R7$ . В этом случае разность потенциалов на сборке пропорциональна току с коэффициентом  $1/R_0$ . Таким образом, итоговая осциллограмма тока формируется аналогично осциллограмме напряжения, а именно, при подаче сигналов с данных делителей на двухканальный осциллограф  $PG2$  с включенной функцией вычитания сигналов. Синхронизации осциллографов производится внешним запуском от генератора одиночного импульса.

Оптические измерения выполнялись с использованием скоростной камеры типа RedLake MotionPro X3 (с диагональю 19,7 мм, частотой кадров  $1 \div 10$  кГц и минимальной экспозицией 1 мкс) через вмонтированную в разрядную камеру кварцевое окно. В сочетании с длиннофокусным объективом камера регистрировала изображение в масштабе 1:3 в течение всего периода наблюдения с сохранением в буферной памяти до 3000 кадров.

Спектральные измерения выполнялись с использованием одноканального и трехканального спектрометра AvaSpec 3648 и Avaspec в диапазоне длин волн  $220 \div 1100$  нм со спектральным разрешением около 1 нм.

### Экспериментальные результаты и обсуждение

Пробой чистого отстоявшегося масла (специальная осушка не производилась и масло в раз-

рядной камере находилась в постоянном контакте с воздухом) осуществлялся в цилиндрической разрядной камере из оргстекла между электродами из латуни, имеющие форму шарового сегмента диаметром 36 мм, толщиной 13 мм и радиусом кривизны 25 мм, причем межэлектродное расстояние равнялось 8 мм. При медленном повышении разности потенциалов между электродами пробой регистрировался по скачкообразному падению напряжения и возникновению свечения в межэлектродном промежутке.

Важной характеристикой разряда в масле является его вольт-амперная характеристика (ВАХ) и диэлектрическая прочность, определяющая напряжение пробоя [1, 15]. Форма сигнала напряжения источника питания с диодно-емкостным удвоителем определялась подачей выпрямленного напряжения между электродами ниже пробивного (рис. 2, луч 1, отсчет идет от нуля). Видно, что напряжение имеет пилообразную форму с частотой 100 Гц, где при полной амплитуде сигнала  $38 \div 39$  кВ на постоянную составляющую приходится  $\sim 14$  кВ, а на амплитуду пилообразных пульсаций  $14 \div 15$  кВ.

При достижении пробойного напряжения между электродами происходит разряд с частотой 100 Гц (рис. 2, луч 2), где на каждый период еще накладываются пробои с частотой около 1 кГц (рис. 2, луч 3), что подтверждается и скоростной видеорегистрацией процесса пробоя (см. рис. 3). Анализ ВАХ и скоростной съемки показывает, что количество пробоев в каждой серии частоты 100 Гц не постоянно и варьирует от 1 до 6. При этом максимальное амплитудное значение напряжения составляет  $\sim 110$  кВ, т.е. с учетом коэффициента деления  $k$  и величины токоограничивающего сопротивления  $R_0$  максимальное амплитудное значение тока  $\sim 10$  мА.

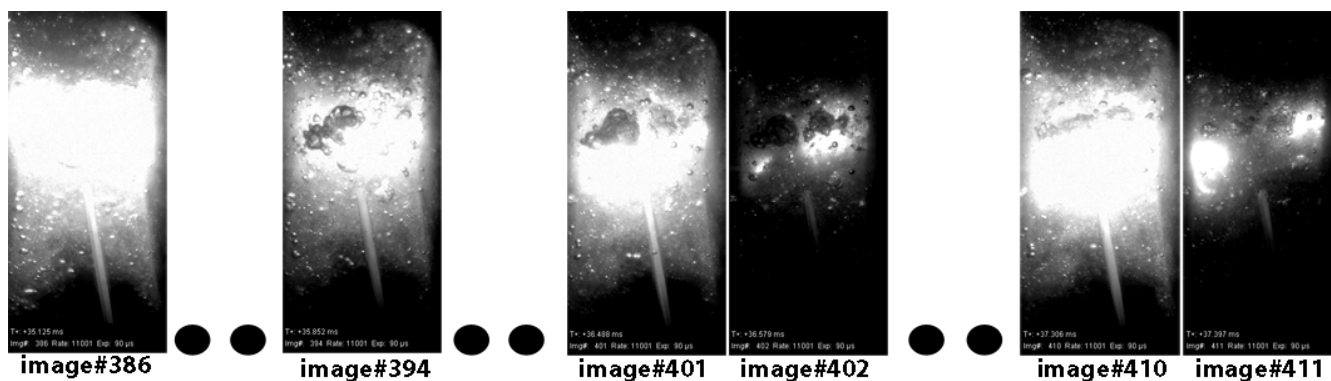


Рис. 3. Скоростная визуализация процесса пробоя трансформаторного масла с частотой 11001 кадров/с и экспозицией 90 мкс.

Спектральные измерения с использованием кварцевых конденсоров, где резкое изображение разряда проецировалось на вход высокочувствительного оптоволоконного спектрографа, показали, что масло поглощает весь спектр излучения вплоть до 400 нм, а в диапазоне 450–600 нм наблюдается скачок на длине волны 516 нм и группа пиков на 470–475 нм, которые были идентифицированы как молекулярная полоса  $C_2$ . Также отчетливо видна линия  $H_\alpha$  с длиной волны 656 нм. Более детальный спектральный анализ пробоя как чистого трансформаторного масла, так и двухфазной среды необходимо проводить с более чувствительным спектрометром и диэлектрическим оптоволоконном для максимально возможного приближения к зоне разряда.

На следующем этапе для оценки относительного влияния пузырьков газа на пробивное напряжение, проводились исследования разряда чистого трансформаторного масла (без учета химической чистоты и влажности исходного масла) и масла с пузырьками элегаза или воздуха при следующих условиях:

- пробой неподвижного и отстоявшегося масла;
- пробой проточного с расходом 2 л/мин масла без газа;
- пробой проточного с расходом 2 л/мин масла газированного элегазом или воздухом с объемной долей газа в масле 3 %;
- пробой проточного с расходом 2 л/мин масла газированного элегазом или воздухом с объемной долей газа в масле 10 %;
- пробой неподвижного чистого трансформаторного масла с одиночными пузырьками элегаза и воздуха диаметром ~1 мм.

При этом каждый раз при газации пузырьками различных газов масло менялось на аналогичное отстоявшееся новое масло. Напряжение между электродами увеличивалось постепенно до возникновения пробоя. В табл. 1 приведены усредненные значения напряжения пробоя чистого трансформаторного масла и двухфазной среды.

Таблица 1

Напряжение пробоя среды

Среда	Чистое масло	Проточное чистое масло	Одиночные пузырьки элегаза	Одиночные пузырьки воздуха	Газация 3 % (элегаз)	Газация 3 % (воздух)	Газация 10 % (элегаз)	Газация 10 % (воздух)
$U_{пр.ср}$ , кВ	107	128	90	77	89	73	88	68

Из табл. 1 видно, что наибольшим пробивным напряжением обладает проточное чистое масло, очевидно, обусловленное удалением продуктов распада масла из разрядного промежутка. Пузырьки газа снижают пробивное напряжение среды, при этом пузырьки воздуха снижают больше чем пузырьки элегаза, т.к. электрическая прочность газов значительно ниже электрической прочности трансформаторного масла и поэтому частичный разряд может происходить в газовом пузырьке в полях меньших, чем необходимо для пробоя масла [3, 4].

### Заключение

Разработана и создана установка для исследования пробоя газожидкостных двухфазных сред на основе источника питания с диодно-емкостным удвоителем. Исследованы электрические, оптические и спектральные характеристики пробоя как чистого трансформаторного масла (без учета химической чистоты и влажности исходного трансформаторного масла), так и с одиночными пу-

зырьками элегаза и воздуха, а также при газации масла 3 и 10 %. Показано, что пробой происходит с постоянной частотой удвоителя 100 Гц, где на каждый период накладываются разряды с частотой до 1 кГц. Наибольшим пробивным напряжением обладает проточное чистое масло, присутствие пузырьков газа снижает пробивное напряжение. С учетом погрешности измерений, наиболее близким к пробивному напряжению чистого трансформаторного масла является проточная двухфазная среда, газированная элегазом.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 14-12-01295.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ушаков В. Я., Климкин В. Ф., Коробейников С. М., Лопатин В. В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. — Томск: Изд-во НТЛ. 2005.
2. Дарьян Л. А., Дрожжин А. П., Коробейников С. М., Тесленко В. С., Анисеева М. А. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 17. С. 88.

3. Недоспасов А. В., Исакаев Э. Х., Тюфтяев А. С., Гаджиев М. Х. // ЖТФ. 2015. № 7. С. 142.
4. Babaeva N. Yu., Tereshonok D. V., Naidis G. V. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2015. Vol. 48. No. 35. P. 355201.
5. Панов В. А., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Сон Э. Е. // Прикладная физика. 2016. № 1. С. 61.
6. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р. Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. — Новосибирск: Институт теплофизики, 1983.
7. Naidis G. // IEEE. Transactions on Plasma Science. 2015. Vol. 43. No. 9. P. 3138.
8. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987.
9. Сычев А. И. // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 6. С. 31.
10. Nakoryakov V. E., Kuznetsov V. V., Dontsov V. E., Markov P. G. // Int. J. Multiphase Flow. 1990. Vol. 16. No. 5. P. 741.
11. Dontsov V. E. and Nakoryakov V. E. // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2002. Vol. 43. No. 2. P. 264.
12. Parmar R., Majumder S. K. // A state-of-the-art report, Chemical Engineering and Processing. 2013. Vol. 64. P. 79.
13. Son E. E., Tyuftyaev A. S., Gadzhiev M. Kh., Kulikov Y. M., Panov V. A., Akimov P. L. // High Temperature. 2014. Vol. 52. No. 5. P. 770.
14. Гаджиев М. Х., Исакаев Э. Х., Тюфтяев А. С., Акимов П. Л., Юсупов Д. И., Куликов Ю. М., Панов В. А. // ЖТФ. 2015. Вып. 7. С. 156.
15. Торшин Ю. В. Физические процессы формирования пробоя конденсированных диэлектриков. — М.: Энергоиздат, 2008.

## Investigation of the electric breakdown in a two-phase mixture of transformer oil and gas bubbles

*M. Kh. Gadzhiev, A. S. Tyuftyaev, P. L. Akimov, M. A. Sargsyan, and N. A. Demirov*

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences  
Bld. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia  
E-mail: makhach@mail.ru

*Received June 28, 2016*

***The installation for the investigation of the electric breakdown in the two-phase mixture of transformer oil and gas bubbles using the power supply with voltage doubler is described. Electrical, optical and spectral characteristics of the discharge are investigated. Periodical discharges with the frequency up to 1 kHz are detected in the gap. Maximal breakdown voltage is attributed to the running pure oil. Appearance of air or insulating gas bubbles lowers the breakdown voltage. In case of insulating gas bubbles two-phase breakdown voltage values are most close to the values for pure transformer oil.***

PACS: 52.80.Wq

**Keywords:** transformer oil, two-phase medium, breakdown, discharg.

### REFERENCES

1. V. Ya. Ushakov, V. F. Klimkin, S. M. Korobeinikov, and V. V. Lopatin, *Breakdown of Liquids at pulse Voltage* (NTL, Tomsk, 2005) [in Russian].
2. L. A. Daryan, A. P. Drozhzhin, S. M. Korobeinikov, V. S. Teslenko, and M. A. Anikeeva, *Technical Physics Letters* **34** (9), 768 (2008).
3. A. V. Nedospasov, E. Kh. Isakaev, A. S. Tyuftyaev, and M. Kh. Gadzhiev, *Technical Physics* **60** (7), 1086 (2015).
4. N. Yu. Babaeva, D. V. Tereshonok, and G. V. Naidis, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **48** (35), 355201 (2015).
5. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin, and E. E. Son, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 61 (2016).
6. V. E. Nakoryakov, B. G. Pokusaev, I. R. Shreyber, *Propagation of waves in gas- and vapor-liquid mediums* (Novosibirsk: Institute of thermophysics, 1983) [in Russian].
7. G. Naidis, *IEEE. Transactions on Plasma Science*, **43** (9), 3138 (2015).
8. R. I. Nigmatulin, *Multiphase Mediums Dynamics* (M.: Nauka, 1987) [in Russian].
9. A. I. Sichev, *Technical Physics*, **55** (6), 783 (2010).
10. V. E. Nakoryakov, V. V. Kuznetsov, V. E. Dontsov, and P. G. Markov, *Int. J. Multiphase Flow*, **16** (5), 741 (1990).
11. V. E. Dontsov and V. E. Nakoryakov, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **43** (2), 264 (2002).
12. R. Parmar and S. K. Majumder, *A state-of-the-art report, Chemical Engineering and Processing*, **64**, 79 (2013).
13. E. E. Son, A. S. Tyuftyaev, M. Kh. Gadzhiev, Y. M. Kulikov, V. A. Panov, and P. L. Akimov, *High Temperature*, **52** (5), 770 (2014).
14. M. Kh. Gadzhiev, E. Kh. Isakaev, A. S. Tyuftyaev, P. L. Akimov, D. I. Yusupov, Yu. M. Kulikov, and V. A. Panov, *Technical Physics* **60** (7), 1101 (2015).
15. Yu. V. Torshin, *The physical Processes of Breakdown Formation in Condensed Dielectrics* (M.: Enrgoizdat, 2008) [in Russian].