

03

## Одиночный пузырек электроотрицательного газа в трансформаторном масле под действием электрического поля

© М.Х. Гаджиев, А.С. Тюфтяев, М.В. Ильичев

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

(Поступило в Редакцию 11 января 2017 г. В окончательной редакции 12 апреля 2017 г.)

Исследовано влияние электрического поля на одиночный пузырек воздуха и элегаза в трансформаторном масле. Показано, что в зависимости от размера пузырек может являться эпицентром развития пробоя. Из условия лавинно-стримерного перехода оценен размер пузырька воздуха и элегаза, когда пробой в нем не наблюдается.

DOI: 10.21883/JTF.2017.10.44992.2163

### Введение

В различном высоковольтном оборудовании в качестве изолятора используется трансформаторное масло, и долгое время из-за внешней схожести считалось, что механизм пробоя жидких диэлектриков аналогичен механизму пробоя газов [1,2], но применение газовых аналогий дали результаты, противоречащие экспериментальным данным. В настоящее время существуют в основном две теории пробоя жидких диэлектриков: теория, связанная с пробоем в пузырьках газа, которые могут присутствовать в жидкости изначально [3], либо образовываться в ней в результате нагрева, электролиза, кавитации и т. д., и теория пробоя в самой жидкости под действием сильного электрического поля (электронные теории пробоя) [4–6]. Несмотря на то что при наличии пузырьков газа в жидком диэлектрике частичный разряд может происходить в газовом пузырьке в полях меньших, чем необходимо для пробоя масла [7–11], интерес к газожидкостным средам связан с их демпфирующими свойствами и двухфазными течениями в энергоустановках [12–17]. В связи с этим целью работы было исследование относительного влияния пузырька электроотрицательного газа (воздух, элегаз) на электрический пробой как чистого, так и отстоявшегося старого трансформаторного масла без учета химической чистоты и влажности исходного масла.

### Экспериментальная установка

Исследования проводились на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 1, где в качестве источника питания используется стандартная установка АИ-70 с диодно-емкостным удвоителем напряжения и токоограничивающими сопротивлениями  $R_3 = 4.76 \Omega$  [7,8].

Напряжение на выходе измерялось электростатическим киловольтметром. Для оценки амплитудных значений напряжения и тока использовались три высоковольт-

ных делителя напряжения на резисторах КЭВ-20 [18]. Делители 6 и 12 регистрируют напряжение на выводах разрядной камеры, что пропорционально (с коэффициентом 6770) разности потенциалов на электродах камеры и итоговая осциллограмма напряжения формируется при подаче сигналов с делителей на двухканальный осциллограф с включенной функцией вычитания сигналов. Между делителями 6 и 9 выделяется сигнал пропорциональный разности потенциалов на токоограничивающем сопротивлении. В этом случае разность потенциалов на сборке пропорциональна току с коэффициентом  $1/R_3$ . Таким образом, итоговая осциллограмма тока формируется аналогично осциллограмме напряжения: при подаче сигналов с данных делителей на двухканальный осциллограф с включенной функцией вычитания сигналов.

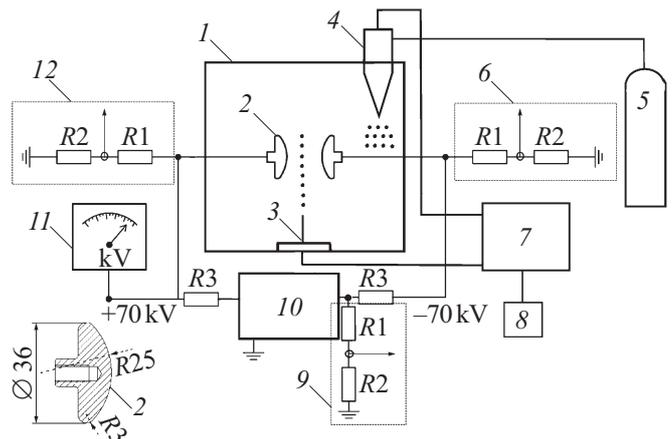


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования двухфазной среды: 1 — разрядная камера, 2 — электроды, 3 — игла для создания одиночных пузырьков газа, 4 — генератор микропузырьковых сред, 5 — баллон газовый, 6, 9, 12 — высоковольтные делители напряжения, 7 — насос центробежный, 8 — преобразователь частоты центробежного насоса, 10 — испытательная установка АИИ-70 с диодно-емкостным удвоителем напряжения, 11 — киловольтметр С100.

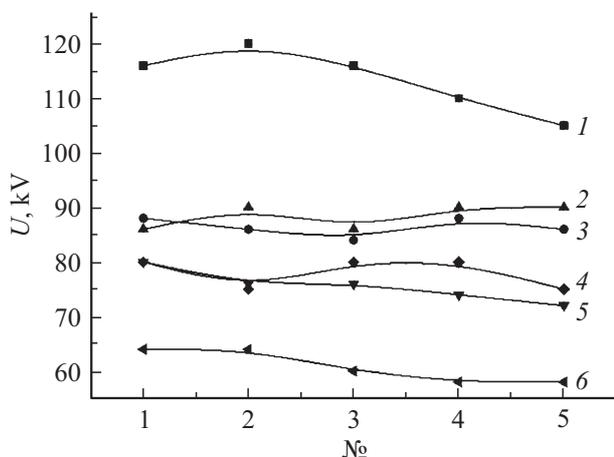
Оптические измерения выполнялись с использованием скоростной камеры RedLake MotionPro X3 (с диагональю 19.7 mm) или Motion Pro X3 США (с диагональю 19.7 mm и трехцветной матрицей  $1248 \times 1008$  pixels) [9]. Съемка производилась с частотой кадров 1–10 kHz и минимальной экспозицией 1  $\mu$ s.

## Результаты и обсуждение

В работах [7–9,18] показано, что наличие пузырьков с газом (с объемной долей до 10%) снижает пробивное напряжение трансформаторного масла и наибольшим пробивным напряжением обладает проточное чистое масло, а наиболее близким пробивным значением к чистому трансформаторному маслу — двухфазная среда с элегазом.

При исследовании пробоя жидкого диэлектрика с барботированными одиночными пузырьками электроотрицательных газов (элегаз, воздух) использовалось как чистое, так и отстоявшееся старое трансформаторное масло марки ГК без учета химической чистоты и влажности. Каждый раз после барботации одиночными пузырьками различных газов и проведения эксперимента масло менялось. Напряжение между сферическими электродами (диаметр 36 mm, толщина 13 mm, радиус кривизны 25 mm) увеличивали постепенно до возникновения пробоя, межэлектродное расстояние равнялось 8 mm. Пробой регистрировался по скачкообразному падению напряжения и возникновению свечения в межэлектродном промежутке.

Исследования показали, что напряжение пробоя трансформаторного масла с одиночными пузырьками электроотрицательных газов меньше, чем у масла без пузырьков и зависит от рода газа (рис. 2).



**Рис. 2.** Пробивное напряжение среды: 1 — чистое масло, 2 — чистое газированное одиночными пузырьками элегаза масло, 3 — старое масло, 4 — старое газированное одиночными пузырьками элегаза масло, 5 — чистое газированное одиночными пузырьками воздуха масло, 6 — старое газированное одиночными пузырьками воздуха масло.

Так, например, из электроотрицательных газов пузырьки воздуха снижают пробивное напряжение больше, чем пузырьки с элегазом (таблица), кроме этого, пробивное напряжение старого масла ниже, чем даже пробивное напряжение чистого масла барботированного одиночными пузырьками элегаза.

Очевидно, что при напряжении между электродами меньше, чем необходимо для пробоя масла, сначала пробой происходит в газовом пузырьке (рис. 3) и не всегда сразу сопровождается перекрытием разрядного промежутка высокопроводящим каналом (рис. 2, *b* и *c*).

На рис. 4 приведена вольт-амперная характеристика (ВАХ) разряда трансформаторного масла с пузырьками элегаза. Анализ ВАХ показывает, что в разрядном промежутке происходят пробой с частотой 100 Hz, связанные с источником питания, где на каждый период накладываются пробой с частотой до 1 kHz (рис. 4, луч 1 — левая часть происходит пробой, правая часть — пробой не наблюдаются, так как не всегда пузырек попадет между электродами). Во время одного пробоя длительностью  $\sim 100 \mu$ s максимальное амплитудное значение напряжения и тока составляет  $\sim 80$  kV и 10 mA соответственно (ток разряда ограничен резисторами). Такая же картина наблюдается и при использовании пузырьков воздуха.

За время одного пробоя в разрядном промежутке выделяется энергия

$$W_p = U_a I_a t_p \approx 0.08 \text{ J}, \quad (1)$$

где  $U_a$  — амплитудное значение напряжения разряда ( $\sim 80$  kV),  $I_a$  — амплитудное значение тока разряда ( $\sim 10$  mA),  $t_p$  — время разряда ( $\sim 100 \mu$ s).

В зависимости от величины электрического поля происходит деформация пузырька и изменение давления газа внутри пузырька [5].

В нашем случае деформацию пузырька можно оценить из выражения [5]

$$\Delta = \frac{9r\epsilon_0}{32\sigma} E_m^2 (\epsilon_m - 3.2), \quad (2)$$

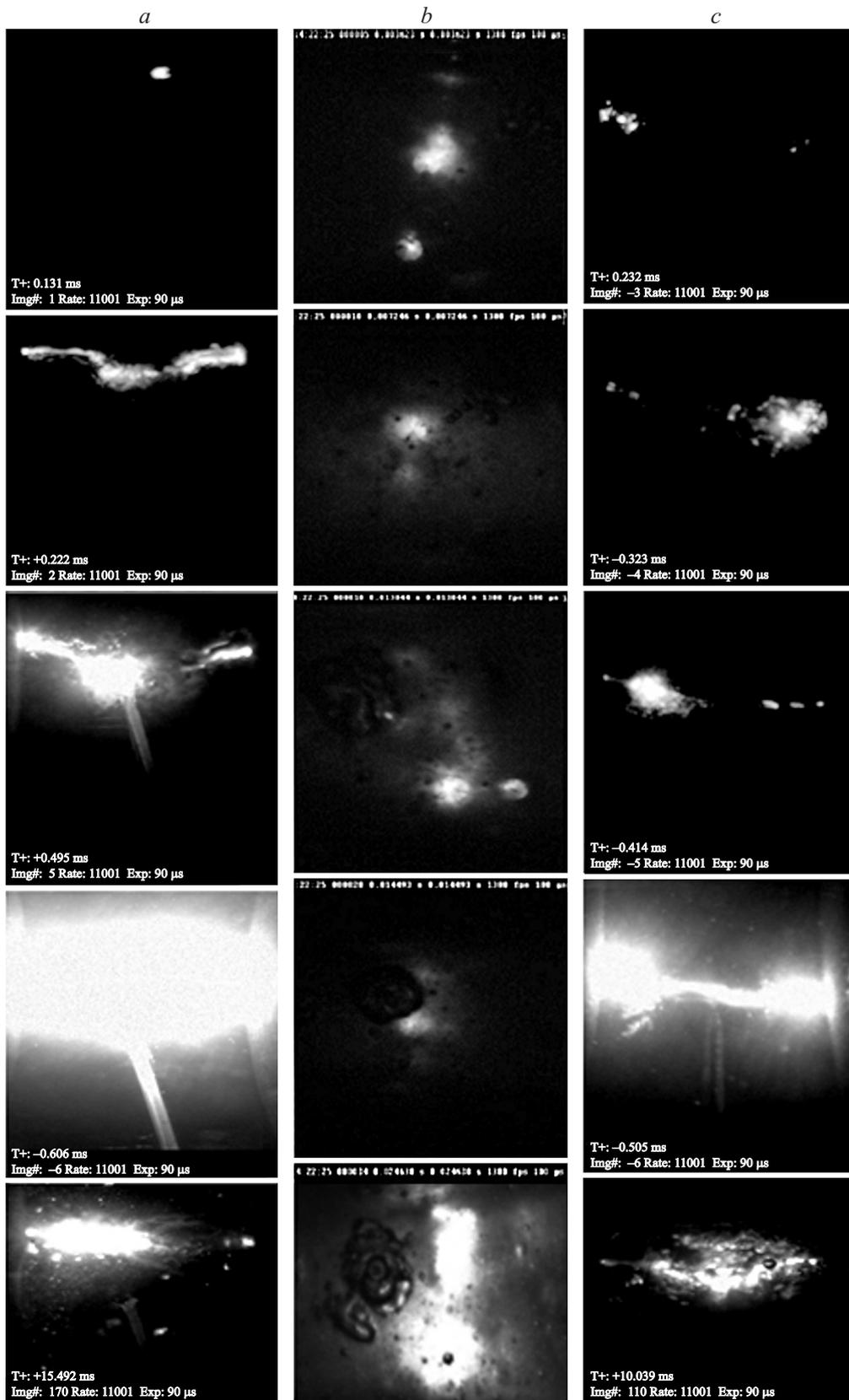
где  $\Delta$  — эксцентриситет эллипсоида пузырька,  $r$  — радиус пузырька,  $E_m$  — напряженность поля в масле,  $\sigma$  — поверхностное натяжение масла,  $\epsilon_m$  — диэлектрическая проницаемость масла.

Изменение давления в пузырьке под действием электрического поля в неполярных диэлектриках можно найти из выражения [5]

$$\Delta p = -\frac{p + \frac{2\sigma}{r}}{p + \frac{4\sigma}{3r}} \frac{\epsilon_0 (\epsilon_m - 1)^3}{2(2\epsilon_m + 1)} E_m^2, \quad (3)$$

где  $p$  — давление в масле.

Для внешнего электрического поля с напряженностью  $E_0 = 100$  kV/cm,  $\epsilon_m \approx 2.2$  и  $r \approx 0.1$  cm,  $\sigma \approx 40 \cdot 10^{-3}$  N/m в трансформаторном масле марки ГК при атмосферном давлении из формул (2) и (3)



**Рис. 3.** Скоростная визуализация процесса пробоя трансформаторного масла с пузырьком газа: *a* — напряжение близкое к пробивному чистого масла (с частотой 11001 frames/s и экспозицией 90 μs), *b* — напряжение ниже пробивного чистого масла (с частотой 1380 frames/s и экспозицией 100 μs), *c* — напряжение ниже пробивного старого масла (с частотой 11001 frames/s и экспозицией 90 μs).

Среднее напряжение пробоя среды

Среда	Чистое масло	Старое масло	Чистое масло с элегазом	Старое масло с элегазом	Чистое масло с воздухом	Старое масло с воздухом
$U, \text{ kV}$	115	85	88	78	75	60

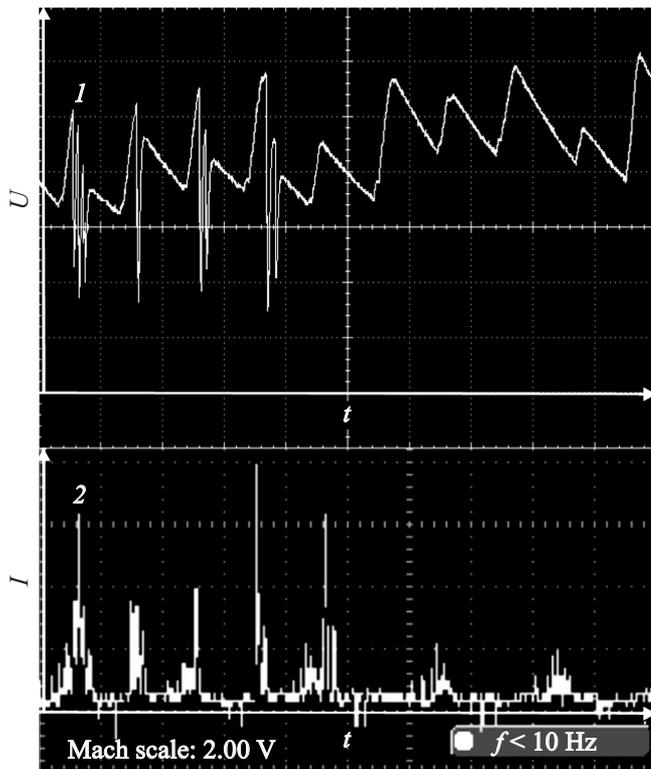


Рис. 4. Осциллограмма напряжения и тока: 1 — напряжение разряда (цена деления 13.5 kV/div, развертка 10 ms), 2 — ток разряда (цена деления 3 mA/div, развертка 10 ms).

с учетом  $E_m = E_0/\epsilon_m$  имеем, что  $\Delta \approx -1.3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ,  $\Delta p \approx -3 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}$ . Пузырек воздуха в наших условиях под действием электрического поля испытывает незначительную деформацию и сохраняет свою сферичность, а изменения давления внутри практически не происходит.

По Фрейнману [19] электрическое поле  $E$  в сферической полости жидкого диэлектрика определяется из выражения

$$E = E_m + \frac{P_0}{3\epsilon_0}, \tag{4}$$

где  $P_0$  — дипольный момент пузырька до пробоя, который можно определить по формуле [20]

$$P_0 = \epsilon_0 E (\epsilon - 1). \tag{5}$$

Окончательно для электрического поля в пузырьке имеем

$$E = 3E_m \frac{1}{4 - \epsilon} = 3E_0 \frac{1}{\epsilon(4 - \epsilon)}. \tag{6}$$

Принимая диэлектрическую проницаемость газа равной единице, для оценки электрической энергии в пузырьке до пробоя имеем

$$W_0 = \frac{2}{3} \pi \epsilon_0 r^3 E^2. \tag{7}$$

В неполярном диэлектрике часть энергии затрачивается на поляризацию диэлектрика и электрическая энергия в диэлектрике определяется из выражения [21]:

$$W_k = \frac{4}{6} \pi r^3 \epsilon_0 (\epsilon - 1) E_m^2. \tag{8}$$

Энергия, выделяющаяся в пузырьке при однократном пробое:

$$\Delta W = W_0 - W_k \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ J} \tag{9}$$

( $W_0 \approx 10^{-4} \text{ J}$ ,  $W_k \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ J}$ ).

Одиночный пузырек газа, являясь эпицентром зарождения пробоя (рис. 3), при однократном пробое выделяет очень мало энергии (9) по сравнению с пробоем самого масла (1), что незначительно изменит температуру прилегающего масла и не повлияет на механизм пробоя. При постоянно действующих напряжениях, которые значительно ниже пробивного для масла, но достаточны для пробоя газа, в промежутке наблюдаются пробои пузырька с частотой до 1 kHz, которые с течением времени также приводят к перекрытию разрядного промежутка проводящим каналом (рис. 3, b ис), очевидно, связанное с тем, что многочастотные пробои могут изменить температуру прилегающего масла и повлиять на напряжение пробоя масла.

В воздухе при  $E/p > 41 \text{ В/см} \cdot \text{Торг}$  размножение электронов превалирует над прилипанием [22], тогда из условия лавинно-стримерного перехода можно оценить минимальные значения напряженности электрического поля  $E_{\text{min}}$  для воздуха достаточного для пробоя пузырька  $r \approx 0.1 \text{ см}$

$$\alpha d > 20, \tag{10}$$

где  $\alpha$  — эффективный коэффициент размножения, который для наших условий  $\alpha > 100 \text{ см}^{-1}$ .

При вычислении эффективного коэффициента размножения ( $\alpha = \alpha_i - \alpha_a$ ) используются аппроксимации для коэффициента объемной ударной ионизации  $\alpha_i$  и коэффициента прилипания электронов  $\alpha_a$  [23]

$$\alpha_i/p = 1.3 \cdot 10^{-4} (E/p - 28)^2, \tag{11}$$

для  $35 \leq E/p < 1 \text{ В/см} \cdot \text{Па}$ ,

$$\alpha_a/p = 0.013 \left( 1 - \left( \frac{E/p - 38}{162} \right) \right), \tag{12}$$

для  $38 \leq E/p < 20 \text{ В/см} \cdot \text{Па}$ .

Оценки показывают, что в воздухе  $\alpha > 100 \text{ cm}^{-1}$  при  $E_{\min}/p > 0.62 \text{ V/cm} \cdot \text{Pa}$  или  $E_{\min} > 47 \text{ kV/cm}$ .

В элегазе размножение электронов начинает превалировать над прилипанием [24] при  $E/p > 0.94 \text{ V/cm} \cdot \text{Pa}$ , и для эффективного коэффициента размножения в наших условиях можно использовать аппроксимацию

$$\alpha/p = 2.87 \cdot 10^{-2} E/p - 2.7. \quad (13)$$

Тогда в элегазе  $\alpha > 100 \text{ cm}^{-1}$  при  $E_{\min}/p > 98 \text{ V/cm} \cdot \text{Pa}$  или  $E_{\min} > 75 \text{ kV/cm}$ .

Наличие пузырька газа  $r \approx 0.1 \text{ cm}$  в чистом и старом масле снижает напряжение пробоя, но всегда остается больше, чем необходимое напряжение пробоя пузырька с газом, что и наблюдается в эксперименте (рис. 1 и таблица). Большее снижение в старом масле связано с уменьшением напряжения пробоя самого масла из-за накопления продуктов распада, влажности, снижения химической чистоты и т. д.

Используя условие (10), аппроксимации (11–13) можно оценить и размер пузырька газа, когда не наблюдается пробой пузырька: при  $E_0 = 100 \text{ kV/cm}$  для воздуха  $r < 0.1 \text{ mm}$ , а для элегаза  $r < 0.125 \text{ mm}$ .

## Заключение

Таким образом, одиночные пузырьки электроотрицательных газов радиуса  $1 \text{ mm}$  снижают пробивное напряжение трансформаторного масла, при этом воздух больше чем элегаз. Из условия лавинно-стримерного перехода найдено необходимое минимальное значение напряженности электрического поля для пробоя пузырька, что удовлетворительно согласуется с результатами эксперимента. Так же оценен минимальный размер пузырька газа, когда пробой в пузырьке не будет наблюдаться при полях, достаточных для пробоя масла.

Авторы благодарят А.В. Недоспасова за обсуждение работы и ценные советы. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-12-01295-П.

## Список литературы

- [1] *Адамчевский И.* Электрическая проводимость жидких диэлектриков. Л.: Энергия, 1972. 295 с.
- [2] *Sharbaugh A.H., Devins J.C., Rzed S.J.* Progr. in the Field of Electric Breakdown in Dielectric Liquids. IEE Trans. Elec. Insul. 1978. Vol. 13. N 4. P. 249–276.
- [3] *Дарьян Л.А., Дрожжин А.П., Коробейников С.М., Тесленко В.С., Анискина М.А.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 17. С. 88–94.
- [4] *Сканави Г.И.* Физика диэлектриков, область сильных полей. М.: Физматгиз, 1958. 687 с.
- [5] *Ушаков В.Я., Клишкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В.* Пробой жидкостей при импульсном напряжении. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 488 с.
- [6] *Торшин Ю.В.* Физические процессы формирования пробоя конденсированных диэлектриков. М.: Энергоиздат, 2008. 212 с.
- [7] *Panov V.A., Kulikov Y.M., Son E.E., Tyuftyaev A.S., Gadzhiev M.Kh., Akimov P.L.* // High Temperature. 2014. Vol. 06. N 20. P. 770–773.
- [8] *Гаджиев М.Х., Исакаев Э.Х., Тюфтяев А.С., Акимов П.Л., Юсупов Д.И., Куликов Ю.М., Панов В.А.* // ЖТФ. 2015. № 7. С. 156–158.
- [9] *Недоспасов А.В., Исакаев Э.Х., Тюфтяев А.С., Гаджиев М.Х.* // ЖТФ. 2015. № 7. С. 142–143.
- [10] *Babaeva N.Yu., Tereshonok D.V., Naidis G.V.* // J. Phys. D-Appl. Phys. 2015. Vol. 48. N 35. P. 355201.
- [11] *Babaeva N.Yu., Tereshonok D.V., Naidis G.V., Smirnov B.M.* J. Phys. D-Appl. Phys. 2016. Vol. 49. N 2. P. 025202.
- [12] *Нагоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р.* Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. Новосибирск: Институт теплофизики, 1983. 237 с.
- [13] *Naidis G.* IEEE. Trans. Plasm Sci. 2015. Vol. 43. N 9. P. 3138.
- [14] *Низматулин Р.И.* Динамика многофазных сред в 2-х частях. М.: Наука, 1987.
- [15] *Сычев А.И.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 6. С. 31–35.
- [16] *Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V., Dontsov V.E., Markov P.G.* // Int. J. Multiphase Flow. 1990. Vol. 16. N 5. P. 741.
- [17] *Низматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. 464 с.
- [18] *Гаджиев М.Х., Тюфтяев А.С., Акимов П.Л., Демиров Н.А.* // Прикладная физика. 2016. № 5. С. 10–15.
- [19] *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике 5. Электричество и магнетизм. М.: Изд-во Мир, 1977. 306 с.
- [20] *Тамм И.Е.* Основы теории электричества. Учеб. Пособие для вузов. 11-е изд., испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 616 с.
- [21] *Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К.* Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. 8-е изд., перераб. и испр. М.: Изд-ва Оникс, Мир и Образование, 2006. 1056 с.
- [22] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский дом „Интеллект“, 2009. 736 с.
- [23] *Козлов Б.А., Соловьев В.И.* // ЖТФ. 2009. № 5. С. 18–28.
- [24] *Бойченко А.М., Ткачев А.Н., Яковленко С.И.* // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 78. Вып. 11. С. 1223–1227.