

Ғылыми мақала
GTAMP 29.05.33

<https://doi.org/10.55956/AKOP7432>

Р.Ж.Наметкулова* 

Магистр, аға оқытушы
М.Х.Дулати атындағы Тараз университеті,
Тараз, Қазақстан
rzh.nametkulova@dulaty.kz

А.К.Кадирибетова 

Магистр, аға оқытушы
М.Х.Дулати атындағы Тараз университеті,
Тараз, Қазақстан
ak.kadirimbetova@dulaty.kz

Н.Әбдрасил

6B05311-«Физика» ББ студенті
М.Х.Дулати атындағы Тараз университеті,
Тараз, Қазақстан

СҰЙЫҚ ДИЭЛЕКТРИКТЕГІ КӨПІРШІКТІҢ СЫРТҚЫ ЭЛЕКТР ӨРІСІНДЕГІ ТҰРАҚСЫЗДЫҒЫ

Аңдатпа. Мақалада күшті электр өрісіндегі сұйық диэлектрик ортадағы көпіршіктің бөлініп, ыдырауы теориялық тұрғыда қарастырылды және оның дисперсиялану заңдылықтары зерттелді. Көпіршіктің ыдырауы нәтижесінде беттік керілу күштерінің энергиясының, көпіршіктің өзінің электростатикалық энергиясының, олардың электростатикалық энергияларының өзгерістерінен, сондай ақ екінші реттік көпіршіктердің шығарылуы кезіндегі электрлік және лаплас қысымдарының пропорционалды емес өзгерістерінің әсерінен болатын көпіршіктердің сығылу және кеңею жұмыстарынан тұратын жүйенің потенциалдық энергиясының өзгерісінің өрнегі анықталып, талдау жасалды.

Тірек сөздер: электр өрісі, диэлектрик, деформация, потенциал, электр өрісінің энергиясы, поляризация, рекомбинация.

Кіріспе. Күшті электр өрісінде орналасқан диэлектрлік сұйықтардағы көпіршіктердің тұрақсыздығы туралы мәселе техникалық физика бөлімдерінде, дербес жағдайда сұйық диэлектрліктердің ыдырау теориясында қызығушылық туғызады. Сұйық диэлектриктердің электрлік тесілу

(бұзылу) құбылысы тәжірибе жүзінде толық зерттелген. Бақылаулар бойынша тесілу (бұзылу) алдында катодтың маңайында бу мен газдан тұратын микрокөпіршік пайда болып, өсе бастайды. Біртекті сыртқы электр өрісінде көпіршік өріс бағыты бойымен созыла отырып, өзінің сфералық

пішінінен айырылып, созылған сфероид тәрізді пішінге ие болады [1,2]. Жеткілікті күшті өрісте сфероид тәрізді көпіршік тұрақсыздыққа ұшырайды: оның ұштарында эмиссиялық төбелер пайда болады да, одан артық зарядты өзімен бірге алып кететін қосымша майда көпіршіктер шығарыла бастайды [3].

Күшті электр өрісіндегі көпіршіктің ыдырау құбылысы теориялық тұрғыдан өте әлсіз зерттелген. Осыған байланысты сыртқы электр өрісіндегі сұйық диэлектриктегі көпіршіктің дисперсиялану заңдылықтарын теориялық зерттеудің жеткілікті өзекті болып табылады. Мақалада осы мәселе қарастырылады.

Зерттеу шарттары мен әдістері.

Сұйық диэлектрикте, электрлік тесілу кезінде пайда болған және разрядтық плазмамен толтырылған радиусы R_0 сфералық көпіршікті қарастырамыз. Сұйықтың жылусыйымдылығы үлкен және кернеулігі $\vec{E}/\varepsilon$ біртекті электростатикалық өрісте орналасқан делік, мұндағы ε – сұйықтың диэлектрлік өтімділігі. Сыртқы электр өрісінің әсерінен көпіршік $\vec{E}$ векторы бағытында созылып, сфероидқа айналады. Осы кезде ол өзінің көлемін арттырады. Бастапқы уақыт мезетінде көпіршікті толтырып тұрған плазманың әр аттас зарядтары жартылай рекомбинацияланады, ал қалған бөлігі көпіршіктің қабырғаларына орнығады, яғни көпіршік $\vec{E}$ бағытында поляризацияланады. Электростатикалық өрістің көпіршіктің бетіне жанама бойымен бағытталған құраушыларының әсерінен оның қабырғасында орналасқан зарядтар көпіршіктің сфероидтық деформациясы кезінде оның шыңдарындағы зарядтардың концентрациясының артуына байланысты қайта таралатын болады.

Көпіршік бетіндегі электрлік потенциалдың сипаттамалық теңесу уақыты

$$\tau_q = \frac{\varepsilon R}{\chi E},$$

өрнегімен анықталады, ал оның тұрақсыздығының сипаттамалық даму уақытының формуласы:

$$\tau_u = \sqrt{\frac{\rho R^3}{\sigma(1 - w/(16\pi))}}.$$

Соңғы өрнектегі

$$w = \frac{E^2 R}{\varepsilon \sigma}$$

поляризациялық зарядқа қатысты көпіршіктің тұрақтылығын сипаттайтын Тейлор параметрі [4,5]; χ – орталар арасындағы шекарадағы заряд тасымалдаушылардың беттік қозғалғыштығы; ρ – сұйықтың тығыздығы; σ – сұйық-газ шекарасындағы беттік керілу коэффициенті.

Егер χ шамасы кіші және тұрақсыздықтың τ_u сипаттамалық даму уақыты электрлік потенциалдың сипаттамалық τ_q теңесу уақытынан көп кіші болса: $\tau_u \ll \tau_q$, онда тұрақсыздықтың жүзеге асырылу процесі кезінде көпіршіктің бетін өткізбейтін, ал заряд бетте қатырылған деп есептеуге болады. Мұндай көпіршіктің оның бетінде жинақталған поляризациялық зарядқа қатысты тұрақсыздығын жүзеге асыру кезінде ол екі зарядтары бірдей екінші реттік көпіршіктерге бөлінеді. Ал егер χ шамасы, беттік зарядқа қатысты көпіршіктің тұрақсыздығын жүзеге асырудың сипаттамалық уақыты τ_q көпіршік бетіндегі электрлік потенциалдың τ_u теңесу уақытынан көп үлкен болатындай: $\tau_q \ll \tau_u$, жоғары мәнге ие болса, онда соңғысын идеал өткізгіш беп қабылдауға болады.

Дербес жағдайды қарастырамыз. Гександағы радиусы $R = 10^{-3} \text{ см}$ көпіршік үшін сипаттамалық τ_q және τ_u уақыттарын бағалаймыз, бұл кезде $\rho = 0,66 \text{ г/см}^3$, $\sigma = 18,42 \frac{\text{дин}}{\text{см}}$, $\varepsilon = 1,88$, электростатикалық өріс кернеулігі $E = 670 \text{ В/м}$, заряд тасымалдаушылардың беттік қозғалғыштығы $\chi = 1 \text{ см}^{3/2} / \text{г}^{1/2}$. Сонда тұрақсыздықтың дамуының сипаттамалық уақыты $\tau_u = 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, көпіршіктің бетіндегі электрлік потенциалдың теңесуінің сипаттамалық уақыты $\tau_q = 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ және $\tau_q \gg \tau_u$.

Көпіршіктің сфероидка созылуы және электр өрісінің қысымының әсерінен көлемінің өзгеруі кезіндегі потенциалдық энергиясының өзгерісін бастапқы көпіршіктің эксцентритетінің квадраты бойынша сызықтық жуықтауда келесі түрде жазуға болады:

$$\Delta U = 4\pi\sigma R^2 \left(1 + \frac{2}{45} e^4\right) - \frac{E^2 R^3}{2\varepsilon} \left(1 + \frac{2}{5} e^2 + \frac{58}{175} e^4\right) - PV \ln \frac{V}{V_0} + P_{at}(V - V_0) - 4\pi\sigma R_0^2 + \frac{E^2 R_0^3}{2\varepsilon}, \quad (1)$$

мұндағы V_0 және V — көпіршіктің бастапқы және соңғы көлемі, P және P_{at} — көпіршіктегі бу мен газдың қоспасының қысымы және атмосфералық қысым.

Көпіршіктің теңгерілген күйіне потенциалдық энергияның минимумы сәйкес келетіндіктен, бұл күй үшін (1)-функцияның e^2 және R тәуелсіз айнымалылары бойынша туындысын нольге теңестіреміз. Сонда өрістегі сфероидалық газ көпіршігінің тұрақсыздығының кризистік шартын анықтайтын, e^2 бойынша сызықтық жуықтауындағы екі теңдеуді аламыз:

$$e^2 = \frac{9}{16\pi} w, \quad \frac{(P - P_{at})R}{2\sigma} \equiv \beta = 1 - \frac{3}{16\pi} w. \quad (2)$$

(2)-өрнек бойынша біртекті $\vec{E}$ электр өрісіндегі сұйық тамшысынан

ерекшелігі $\vec{E}$ өрісіндегі газ көпіршігінің тұрақсыздығының кризистік шарты өлшемсіз β параметрмен анықталатын газдың қысымына тәуелді.

Электр өрісіндегі көпіршікті сфероидка созғанда оның шыңдарындағы зарядтың концентрациясы электр өрісіндегі сұйық тамшысындағыдай артуы мүмкін, көпіршіктің бетінде жоғары капиллярлық толқындардың модаларының тұрақсыздығы пайда болады, ал олардың суперпозициясы олардың шыңдарында, артық поляризациялық зарядты алып кететін, эмиссиялаушы төбешіктердің қалыптасуына алып келеді. Екінші реттік көпіршіктердің кинетикалық энергияларының тұтқыр диссипациясы мен бұрынырақ эмиссияланған аттас зарядталған көпіршіктердің электр өрісінің тежегіштік әсерінен екінші реттік көпіршіктер тоқтайды. Нәтижесінде бастапқы көпіршіктердің шыңдарынан $L = ma$ қашықтықтағы (a — бастапқы көпіршіктің үлкен жарты осі, m — сандық параметр) сфероидтың шыңдарының маңайында екінші реттік көпіршіктердің жиынтығы пайда болады [3].

Бастапқы көпіршіктің қарама-қарсы шыңдарынан n -ші реттік эмиссияның нәтижесінде шамасы бойынша бірдей, бірақ таңбалары бойынша қарама-қарсы q_n зарядталған ($q_n \ll ER^2$) және радиустары r_n ($r_n \ll R$) екі қосымша көпіршіктер шығарылады. Сыртқы көздер және бастапқы көпіршіктің поляризациялық заряды жасайтын қорытынды электр өрісінде орналасқан n -ші екінші реттік көпіршік те эксцентритеті e_n созылған сфероид пішінінде болады.

Зерттеу нәтижелері. Бастапқы көпіршіктің ыдырауы нәтижесінде беттік керілу күштерінің энергиясының,

көпіршіктің өзінің электростатикалық энергиясының, олардың электростатикалық энергияларының өзгерістерінен, сондай ақ екінші реттік көпіршіктердің шығарылуы кезіндегі электрлік және лаплас қысымдарының пропорционалды емес өзгерістерінің әсерінен болатын көпіршіктердің сығылу және кеңею жұмыстарынан тұратын жүйенің потенциалдық энергиясы өзгереді.

Екінші реттік көпіршікте қысымы P_n газ бар делік. Жүйенің температурасын тұрақты деп есептеп, n -ші реттік ыдырау нәтижесінде жүйенің потенциалдық энергиясы қалай өзгередінін табу қиын емес. Кіші шамалар (екінші реттік көпіршіктің радиусы r_n және заряды q_n) бойынша сызықтық жуықтаумен келесі өрнекті аламыз:

$$\Delta U_n = 8\pi\sigma_n^2 A(e_n) + q_n^2 \frac{B(e_n)}{\varepsilon r_n} + 2q_n \frac{ER\Omega(v_n)}{\varepsilon} + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{q_i}{\varepsilon L} - 2P_n V_n \ln \left[\frac{V_n}{V_n^0} \right] + 2P_{at} [V_n - V_n^0], \quad (3)$$

$$A(e_n) = \frac{1}{2} \left((1 - e_n^2)^{1/2} + \frac{\arcsin e_n}{e_n} \right) (1 - e_n^2)^{-1/6}, \quad (3a)$$

$$B(e_n) = \frac{(1 - e_n^2)^{1/3}}{e_n} \operatorname{arth}(e_n), \quad v_n = \left(1 + \frac{\xi_n}{a_n^2} \right)^{1/2}, \quad (36)$$

$$\Omega(v_n) = \frac{e(v_n - 1) - v_n \operatorname{arth}[e(v_n - 1)](v_n - e^2)^{-1}}{(1 - e_n^2)^{1/3} (\operatorname{arth} e - e)},$$

мұндағы v_n — алғашқы көпіршіктің үлкен жарты осьтерінде өлшенген бастапқы және екінші реттік көпіршіктердің центрлері арасындағы қашықтық; ξ_n — n -ші екінші реттік көпіршіктің сфероидтық координатасы; V_n^0 және V_n — екінші реттік көпіршіктің өзгеріске дейінгі және одан кейінгі көлемдері [5].

(3)-өрнектегі алғашқы қосылғыш екі екінші реттік көпіршіктердің беттік энергиясын, екіншісі — олардың меншікті электрлік энергиясын, үшіншісі — екінші реттік көпіршіктердің бастапқы көпіршікпен өзара әсерлесу энергиясын, төртіншісі — көпіршіктердің n -ші көпіршікке жиналуының өзара әсерлесу энергиясын, бесінші және

алтыншысы — екінші реттік көпіршіктердің көлемдерінің изотермиялық өзгерісі кезіндегі газдың жұмысын сипаттайды.

Эмиссия үрдісі екінші реттік көпіршікті бөліп алатын кулондық күш оны ұстап тұратын $2\pi\sigma_n^*$ — лаплас күшінен артық болғанша жалғасады (r_n^* — n -ші екінші реттік көпіршікті бастапқы көпіршікпен байланыстыратын тарылу радиусы). Үзілу нүктесіндегі өріс кернеулігі бастапқы көпіршіктің және бұрынырақ үзілген екінші реттік көпіршіктердің өрістерімен анықталатынын ескеріп, екінші реттік көпіршіктердің бастапқыдан үзілу шартын алуға болады [9]:

$$\frac{\alpha_n X_n (1 - e_n^2)^{-1/6}}{8} \leq \frac{w}{16} Y_n \left\{ T(v_n) - \frac{(1 - e_n^2)^{2/3}}{m^2} \sum_{i=1}^{n-1} Y_i \right\}, \quad (4)$$

$$T(v_n) = 1 - \frac{\operatorname{arth}(ev_n^{-1}) - ev_n(v_n^2 - e^2)^{-1}}{\operatorname{arth} e - e}, \quad (4a)$$

$$Y_n = \frac{q_n}{ER^2}, \quad X_n = \frac{r_n}{R}, \quad \alpha_n = \frac{r_n^*}{b_n}, \quad (46)$$

Y_n және X_n — өлшемсіз заряд және n -ші екінші реттік көпіршіктің радиусы, b_n — n -ші екінші реттік көпіршіктің кіші жарты осі.

(4)-тендеудегі фигуралық жақшаның ішіндегі бірінші мүше бастапқы (3a) көпіршіктің n -ші екінші реттік көпіршіктің үзілу нүктесінде туғызатын электр өрісінің кернеулігін, ал екінші мүше бұрынырақ эмиссияланған n -ші екінші реттік көпіршіктер жинағының электр өрісін сипаттайды.

Енді келесі дербес жағдайды қарастырайық.

$e^2 = 0,7$; $\eta_n = \eta = 0,6$; $\beta = 0,75$ боғанда w, α_n, m параметрлерінің әртүрлі мәндері үшін (4) – (6) тендеулер жүйесінен екінші реттік көпіршіктердің өлшемсіз радиустары мен зарядтарын есептеуге болады. Есептеулер нәтижесінде күшті зарядталған тамшылардың тұрақсыздығы жағдайындағыдай екінші реттік көпіршіктердің радиусы мен зарядтары олардың реттік номерлерінің артуымен өседі.

Қорытынды. Сыртқы электростатикалық өрістегі сұйық диэлектрикте көпіршіктің тұрақсыздығы кезінде ол бірнеше ондаған майда күшті зарядталған екінші реттік көпіршіктерді шығарады. Олар бастапқы көпіршіктің шыңдарының маңайындағы екі эмиссиялық төбешікте жинақталады. Бастапқы көпіршіктің бетінен

бұрынырақ эмиссияланған көпіршіктерінің жинақталу орнына дейінгі қашықтықтың бір ретке артуы екінші реттік көпіршіктердің мөлшерінің артуына алып келеді. Бастапқы көпіршік үшін Тейлор параметрінің артуы эмиссияланған екінші реттік көпіршіктерінің артуына алып келеді.

Әдебиеттер тізімі

1. Матвеев, А. Н. Электричество и магнетизм [Текст] / А. Н. Матвеев. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 656 с.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики. Том 3. [Текст] / И.В. Савельев. - Электродинамика и волны, СПб.: Лань, 2022, – 352 с.
3. Глазков, В. Сферический пузырек в жидком диэлектрике при наличии электрического поля [Текст] / В. Глазков, О.А. Синкевич, П.В. Смирнов // Теплофизика высоких температур, - 1991, том 29, выпуск 6, стр. 1095–1102
4. Пылаева, И.В. Численный анализ динамики сферического пузырька в жидком диэлектрике при наличии электрического поля [Текст] / И. В. Пылаева, О. А. Синкевич, П. В. Смирнов // Теплофизика высоких температур, - 1992. - 30, выпуск 2, стр. 367–371.
5. Grigor'ev, A.I. Estimate of the electromagnetic radiation intensity of ball lightning / Grigor'ev, A.I., Shiryayeva, S.O. // Журнал Технической физики. - 2019, №1 (89), - стр. 22–26

Р.Ж.Наметкулова*, А.К.Кадириμβетова, Н.Абдрасил

Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан

Аннотация. В статье теоретически рассматривалось разделение и распад пузырька в жидкой диэлектрической среде в сильном электрическом поле и изучались закономерности его диспергирования. Выявлена и проанализирована картина изменения потенциальной энергии системы, состоящая из изменений энергии сил поверхностного натяжения в результате распада пузыря, электростатической энергии самого пузыря, их электростатической энергии, а также операций сжатия и расширения пузырьков, вызванных непропорциональными изменениями электрических и лапласовых давлений при выбросе вторичных пузырьков.

Ключевые слова: электрическое поле, диэлектрик, деформация, потенциал, энергия электрического поля, поляризация, рекомбинация.

R. Zh. Nametkulova*, A. K. Kadirimbetova, N. Abdrasil

M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan

Abstract. In the article, the separation and decomposition of a bubble in a liquid dielectric medium in a strong electric field was theoretically considered and the laws of its dispersion were studied. The expression of the change in the potential energy of the system, consisting in the work of compression and expansion of bubbles caused by changes in the

energy of the surface tension forces as a result of the decomposition of the bubble, the electrostatic energy of the bubble itself, their electrostatic energies, as well as disproportionate changes in Electrical and Laplace pressures during the ejection of secondary Bubbles, was determined and analyzed.

Key words: electric field, dielectric, deformation, potential, electric field energy, polarization, recombination.

References

1. Matveev, A. N. Elektrichestvo i magnetizm [Electricity and magnetism] [Text] / A. N. Matveev. Saint Petersburg: Lan Publ., 2010. 656 p.
2. Saveliev, I.V. Kurs obshchej fiziki. Tom 3. [Course of general physics. Volume 3.] [Text] / I.V. Savelyev. - Electrodynamics and Waves, St. Petersburg: Lan, 2022, 352 p.
3. Glazkov, V. Sfericheskiy puzyrek v zhidkom dielektrike pri nalichii elektricheskogo polya [Spherical bubble in a liquid dielectric in the presence of an electric field] [Text] / V. Glazkov, O.A. Sinkevich, P.V. Smirnov // High Temperature Thermophysics, 1991, volume 29, issue 6, pp. 1095-1102
4. Pylaeva, I.V. Chislennyj analiz dinamiki sfericheskogo puzyr'ka v zhidkom dielektrike pri nalichii elektricheskogo polya [Numerical analysis of the dynamics of a spherical bubble in a liquid dielectric in the presence of an electric field] / I. V. Pylaeva, O. A. Sinkevich, P. V. Smirnov // Thermophysics of High temperatures, 1992. 30, issue 2, pp. 367-371.
5. Grigor'ev, A.I. Estimate of the electromagnetic radiation intensity of ball lightning / Grigor'ev, A.I., Shiryayeva, S.O. // Journal of Technical Physics. - 2019, №1 (89), - pp. 22-26

20.03.25. ж. баспаға түсті.

9.06.25. ж. түзетулермен түсті.

25.06.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

Мақалаға сілтеме:

Наметкулова, Р.Ж. Сұйық диэлектриктегі көпіршіктің сыртқы электр өрісіндегі тұрақсыздығы [Мәтін] / Р.Ж. Наметкулова, А.К. Кадириббетова, Н. Әбдрасил // Dulaty University Хабаршысы. – 2025. – №2. – Б. 155-160 <https://doi.org/10.55956/AKOP7432>



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).