

УДК 621.327.534.15.032.2

**М. Тарасенко, канд. техн. наук**

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **ПРИАНОДНІ ПРОЦЕСИ В ЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ ЛАМПАХ**

**Резюме.** На основі аналізу та узагальнення опублікованих і отриманих експериментальних даних викладено більш цілісну теорію фізичних процесів прианодної області ртутного дугового розряду низького тиску, який має місце при стаціонарному світінні люмінесцентної лампи. Доведено, що електрони з плазми розряду збираються всією поверхнею анода, по якому вони стікають через його мереживий кінець у зовнішнє коло. Встановлено, що основною причиною виникнення анодних релаксаційних коливань є падіння термемісійної здатності катодів, унаслідок чого зростають складові прискорюючих полів і виникає додаткова іонізація перед анодом у моменти часу, коли потрібні значення струму в лампі виявляються більшими хаотичного струму плазми.

**Ключові слова:** анод, релаксаційні коливання, люмінесцентна лампа, катодна пляма, люмінофор.

**M. Tarasenko**

## **AT ANODE PROCESSES IN FLUORESCENT LAMPS**

**The summary.** Based on the analysis and synthesis of published and the experimental data presented a more coherent theory of physical processes at anode mercury arc area of low pressure that occurs when a stationary glow of fluorescent lamps. It is shown that electrons from the plasma discharge is going all the anode surface on which they are flowing through its network end to the outside circle. Established that the main cause of anodic relaxation oscillations are falling thermo capacity cathodes, resulting in increased component accelerating fields and additional ionization occurs before the anode in those moments in time when the value of current needs in a lamp appear more chaotic current plasma.

**Key words:** anode, relaxation oscillations, fluorescent lamps, cathode spot, phosphors.

**Постановка проблеми.** Питання економії енергетичних ресурсів є найголовнішим в усіх сферах людської діяльності. В повній мірі це відноситься і до світлотехнічної галузі, яка виключно на освітлення споживає близько 19 % від всього глобального виробництва електроенергії (близько 2650 ТВт · год/рік), перевищуючи сумарне її виробництво всіма атомними електростанціями світу. Успішне вирішення вказаної проблеми пов'язано із збільшенням долі споживання вискоефективних джерел світла. Враховуючи те, що в побутовому і комерційному секторах в середньому у світі споживається близько 74 % електроенергії, від загальних споживаних освітлювальними установками об'ємів, кількість люмінесцентних ламп (ЛЛ) в цих секторах повинна помітно зростати.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** [1–8] показав, що енергія, яка виділяється в приелектродних областях ЛЛ, в основному перетворюється в теплову, що помітно знижує їх енергоефективність. Від режимів роботи електродів значною мірою залежить і середня тривалість світіння (СТС) ЛЛ. На відміну від роботи катода ЛЛ, який відповідає за забезпечення плазми певною кількістю електронів і тому для зменшення роботи виходу повинен бути окисдованим, анод відбирає електрони з позитивного стовпа розряду і тому може бути й неокисдованим. На змінному струмі, коли кожен електрод по черзі виконує функції, то катода, то анода, шукають компроміс при конструюванні щодо розмірів і виготовляють їх окисдованими. У зв'язку з тим, що саме швидкість випаровування оксиду з поверхні катода визначає СТС ЛЛ, катодним процесам завжди приділялося більше уваги, ніж анодним [1]. Насправді фізичні процеси в прианодній області відіграють не менш важливу роль не тільки в

підтриманні дугового розряду, а і в забезпеченні певних теплових режимів електродів в катодний півперіод, визначаючи СТС ЛЛ.

Саме тому **метою даної статті** і стало створення ціліснішої теорії фізичних процесів, які мають місце в прианодній області при стаціонарному світінні ЛЛ, на основі аналізу та узагальнення опублікованих і отриманих експериментальних даних.

**Дослідження.** Анодне падіння потенціалу (різниця потенціалів між анодом і позитивним стовпом розряду) відповідає за відбір електронів із плазми позитивного стовпа в такій кількості, щоб забезпечити необхідний струм в електричному колі з розрядною лампою. У зв'язку з тим, що площа анода завжди виявляється недостатньою для забезпечення нульового анодного падіння, на її поверхні виникає позитивний потенціал (від 1 до 10 В), навколо якого збирається електронна хмара товщиною до 1 мм.

У роботі [9] стверджується, що електронний струм в анодний півперіод притікає на анод в основному з боку наближеної до мережевого кінця електрода. Зовні це може і виглядає саме так, тому що мережева ділянка анода найбільш розжарена. Але вся поверхня анода знаходиться під одним і тим самим потенціалом і тому немає підстав стверджувати, що розігріта до більшої температури ділянка поглинає електрони інтенсивніше, ніж холодна. Скоріше навпаки. Аналіз фотографії анода ЛЛ, яка працює у схемі постійного струму (рис. 1а), свідчить скоріше про те, що електрони з плазми розряду збираються всією поверхнею анода, по якому вони стікають до мережевого кінця. В результаті густина струму і температура анода поступово зростають у напрямку від стартерного (С) до мережевого (М) кінця анода, завдяки чому він і стає найбільш розігрітим (рис. 1а, в).

Раніше для захисту від перегрівання вважалося що аноду, а насправді, як виявляється, лише мережевій його ділянці, до внутрішніх частин вводів приварювали нікелевий дріт, з якого формували екрани для того, щоб ті приймали на себе частину електронів в анод-ний півперіод і тим самим зменшували перегрівання анода [7]. Простіше й ефективніше це питання можна вирішити і чисто схемним шляхом, закоротивши після запалювання ЛЛ анод. У цьому випадку електрона, які він буде збирати всією своєю поверхнею, будуть розтікатися від центру електрода у двох прямо протилежних напрямках – одні до С, а другі до М ділянки анода. В результаті густини струмів в двох прямо протилежних напрямках будуть зростати від центру анода до його кінців і будуть мати вдвічі менші значення, ніж густина струму у мережевого кінця неза-короченого аноду.

Найвищі значення температур будуть мати місце на кінцях анода С і М, а найнижча температура буде посередині анода. Це добре видно на зроблених фотографіях (рис. 1б, в) закороченого анода у бактерицидній розрядній лампі потужністю 15 Вт, через яку протікає номінальний струм. Таким чином, закорочування анода призводить: по-перше, до певного вирівнювання температури по його поверхні; по-друге, до зменшення її абсолютних значень; по-третє, на змінному струмі створюються умови для роботи ЛЛ у режимі з двома катодними плямами (КП). Все це сприяє зростанню СТС ЛЛ.

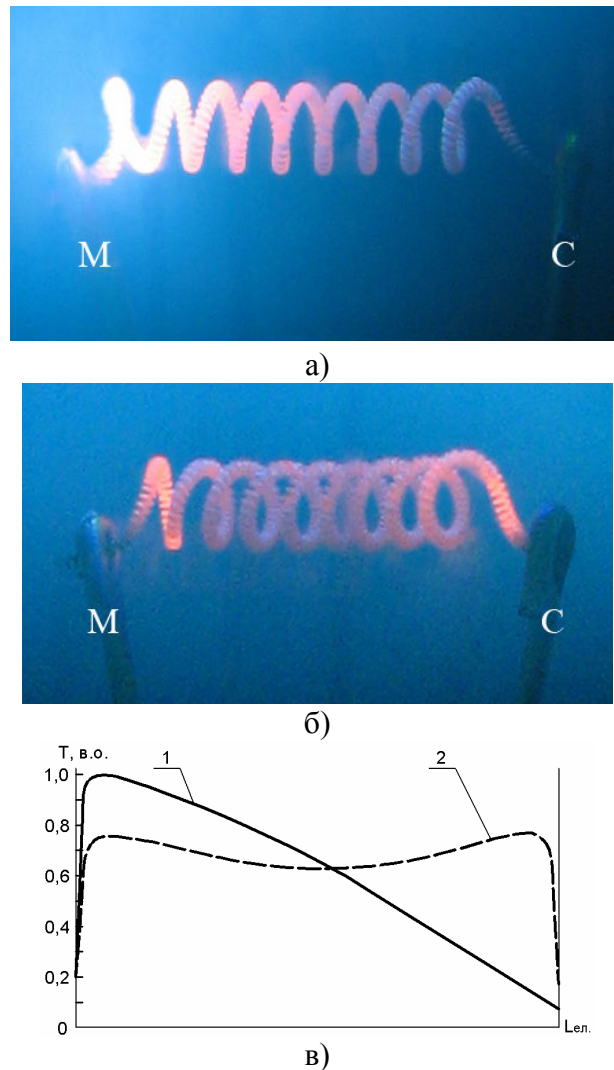
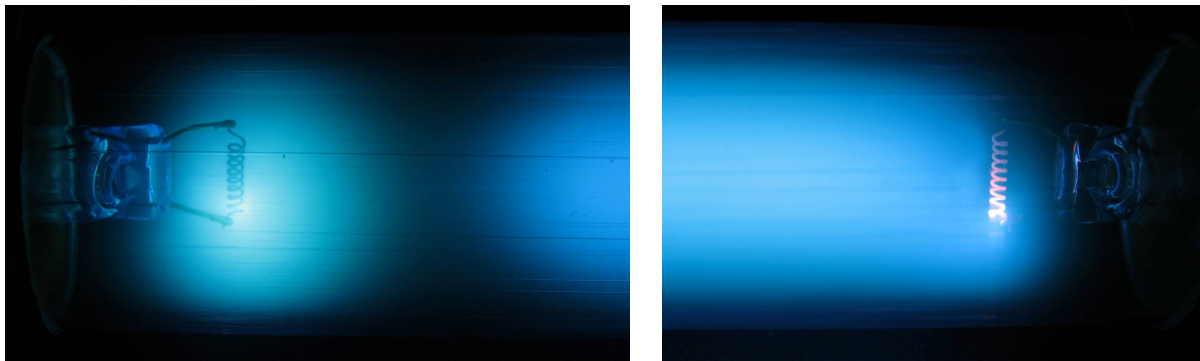


Рисунок 1. Фото анода люмінесцентної лампи, яка працює в колі однополярного пульсуючого струму, коли стартерний і мережевий кінці:  
а – розімкнені; б – замкнені, в – графіки розподілу температури по довжині анода при розімкнених (1) і замкнених (2) електродах

На постійному струмі дві КП не виникають навіть тоді, коли і катод, і анод замкнені, тому що стартерний кінець катода додатково не підігрівається, залишаючись холодним. На змінному струмі електроди міняються місцями і в анодний півперіод підігріваються як стартерний, так і мережевий кінці електродів, що сприяє утворенню двох КП.

Протягом певного проміжку часу (приблизно 1,5–3,0 тис. годин), коли струм термоемісії катода високий і КП знаходиться ближче до мережевого кінця електрода, завдяки чому місце її розташування в анодний півперіод добре підігрівається анодним струмом (рис. 2), закон розподілу інтенсивності підігрівання електродів в анодний і катодний півперіоди не зазнає значних змін. У цих умовах хаотичний електронний струм у плазмі більше необхідного анодного струму і електрони притягуються до границі анодної хмари в основному за рахунок дифузії (завдяки наявності градієнту концентрацій), і частково за рахунок електричних полів, які проникають у плазму розряду від анодної оболонки для відбору необхідної додаткової кількості електронів.

В результаті площі аноду вистачає для того, щоб анодне падіння потенціалу змінювалося за періодом аналогічно струму.



Навколокатодна

Навколоанодна

Рисунок 2. Навколоелектродні області бактерицидної лампи потужністю 15 Вт після перших ста годин світіння

Поступове зменшення термемісійної здатності катода – при незмінній площі анода, саме це основні причини, які призводять до підсилення складової прискорюючих полів і виникнення на аноді додатного потенціалу відносно плазми, в якій хаотичний електронний струм менше необхідного. Завдяки цьому енергія електронів, які падають на поверхню анода, стає достатньою для здійснення додаткової іонізації у зоні безпосередньо перед електронною хмарою. Це призводить до зростання хаотичного електронного струму (густини плазми) до таких значень, при яких анод у змозі збирати необхідний електронний струм без подальшого зростання позитивного анодного падіння потенціалу. Зайві електрони повинні бути відкинуті назад у плазму. Саме тому анодне падіння різко зменшується і додаткова іонізація припиняється. Припинення додаткової іонізації призводить до інтенсивного падіння хаотичного електронного струму в плазмі (густини плазми) перед електронною хмарою до критичного значення, при якому площі анода знову стає недостатньо для відбору необхідної кількості електронів із плазми розряду при нульовому анодному падінні потенціалу. Тому на його поверхні знову виникає позитивний потенціал, який активізує процес виникнення додаткової іонізації.

Такі «релаксаційні коливання» анодного падіння потенціалу характеризуються пилоподібними змінами напруги в часі. На осцилограмах напруг на аноді і лампі це проявляється у вигляді виникнення анодних коливань – упадин глибиною до 10 В і частотою від 1 до 8 кГц. Характер коливань напруги на аноді ЛЛ і на затискачах лампи зображено на рис. 3. Вони спостерігаються у ЛЛ усіх потужностей і залежать від діаметра колби ламп. Зі зростанням діаметра колби частота анодних коливань зменшується у зв'язку зі зменшенням швидкості амбіполярної дифузії. Ці коливання не постійні. В початковий момент після виникнення дугового розряду в ЛЛ їх частота, як правило, нижча і вони нестабільні (рис. 3а). У міру прогрівання ЛЛ (через 3–5 хвилин після виникнення розряду) частота анодних коливань зростає і вони стабілізуються (рис. 3б). Це зумовлено тим, що в процесі розгорання ЛЛ змінюються (на 5–10 %) її основні електричні характеристики – падає напруга, струм і потужність зростають. Збільшується як інтегральна, так і в зоні катодної плями (КП) температура анода.

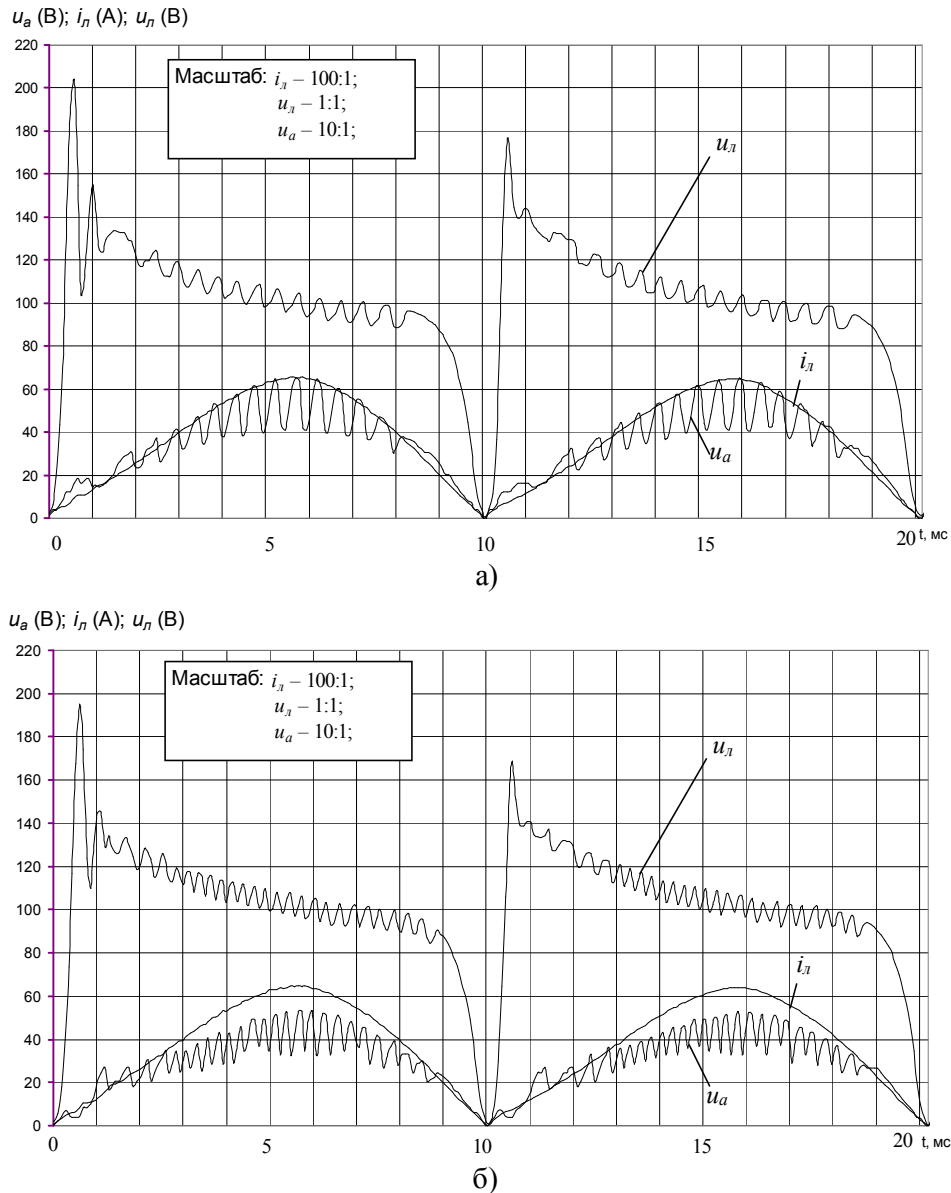


Рисунок 3. Осцилограми струму ( $i_n$ ) та напруг на аноді ( $u_a$ ) та на затискачах ЛЛ ( $u_n$ ) потужністю 40 Вт (ЛБ40), працюючої в колі однополярного пульсуючого струму і в схемі з двопівперодним випрямлячем: а – в перший момент після ввімкнення лампи; б – через 15 хв. після ввімкнення ЛЛ

Твердження, висловлене в [1, 6], про відсутність будь-якої додаткової іонізації у зоні перед анодом для забезпечення необхідних значень струму ЛЛ, не відповідає дійсності. Якби основною причиною виникнення навколоелектродних коливань була «раптова» зміна закону розподілу інтенсивності підігрівання електродів в анодний і катодний півперіоди, як про це стверджується в [6], то анодні коливання в ЛЛ, при їх роботі в колі постійного струму, не виникали б. Але як показали наші дослідження, анодні коливання виникають і в колі постійного струму, коли температурний взаємовплив анода й катода відсутній, і при зміні стартерних і мережевих кінців електродів, коли КП знову опиняється на початку мережевого кінця катода. На постійному струмі анодні коливання однакові як за амплітудою, так і за частотою.

По мірі старіння лампи в процесі світіння частота анодних коливань має тенденцію до зменшення. Це пояснюється тим, що емісійна здатність катода падає і хаотичний струм у плазмі зменшується, що призводить до затягування процесів іонізації й відбору анодом необхідної кількості електронів. Амплітуда і частота коливань на півперіоді, як бачимо з рис. 3, не залишаються постійними. На

початку, після імпульсу перезапалювання, коли миттєві значення струму малі, амплітуда не перевищує 6–8 В, а частота приблизно вдвічі менша, ніж у середині півперіоду.

Це пояснюється тим, що при збільшенні розрядного струму зростає кількість електронів, які підлітають до поверхні анода і призводять до зростання об'ємного від'ємного заряду, а, отже, і анодного падіння потенціалу. Саме тому в середині півперіоду, коли миттєві значення струму близькі до амплітудних, виникає потреба у вищому ступені іонізації плазми і в інтенсивнішому відборі анодом необхідної кількості електронів, зростає не тільки амплітуда анодних коливань до 8–10 В, а й їх частота.

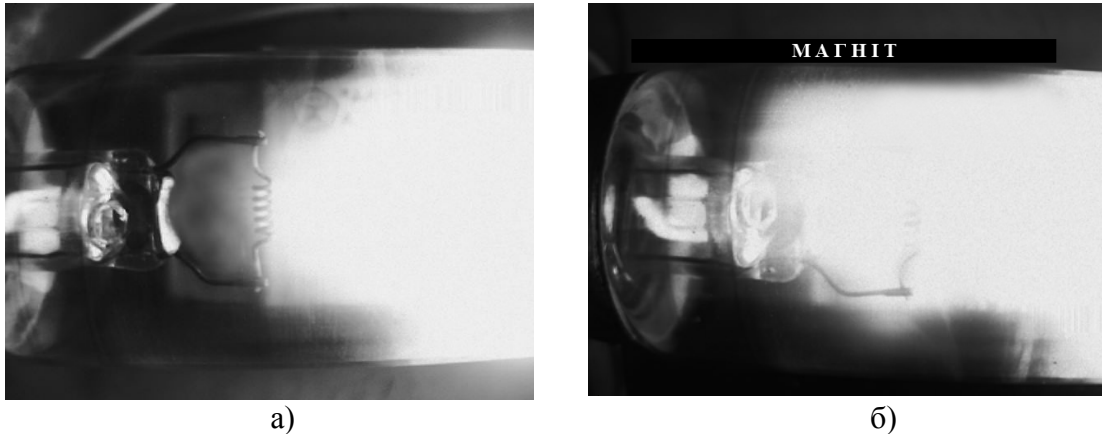


Рисунок 4. Фотографія навколоанодних областей дугового розряду ЛЛ у колі з двопівперіодним випрямленим струмом: а – природна картина, коли до фронтальної поверхні анода примикає позитивний стовп розряду і заанодна область плазмою не заповнена; б – штучна картина, коли плазма розряду силоміць затягнена магнітом за фронтальну поверхню електрода аж до гребінцевої ніжки. Магніт знаходиться зверху, тому нижня частина заанодної області не заповнена плазмою розряду

Якщо до анода ЛЛ, працюючої на постійному пульсуючому струмі, наблизити постійний магніт і, змінюючи його положення, домогтися того, щоб плазма розряду заповнила заанодну область, як зображено на рис. 4б, то амплітуда і частота анодних коливань помітно зменшаться (в окремих випадках аж до нуля). Порівняємо рис. 3б та рис. 5а. Це можна пояснити зростанням ефективної площі відбору електронного струму анодом, який виявився майже повністю зануреним у плазму розряду як за рахунок дифузії, так і за рахунок електричних полів.

Наближення постійного магніту до катода ніяк на розряд не впливає. Порівняємо осцилограми рис. 3б і рис. 5б. На наш погляд, це пояснюється тим, що катод із самого початку був занурений у плазму розряду (від'ємного свічення) і вторгнення постійного магнітного поля не призвело до зміни умови його роботи.

Хоча заанодна область, на відміну від закатодної, плазмою не заповнена, анодний кінець ЛЛ, покритої люмінофором, виглядає в колі постійного струму помітно яскравішим, ніж катодний.

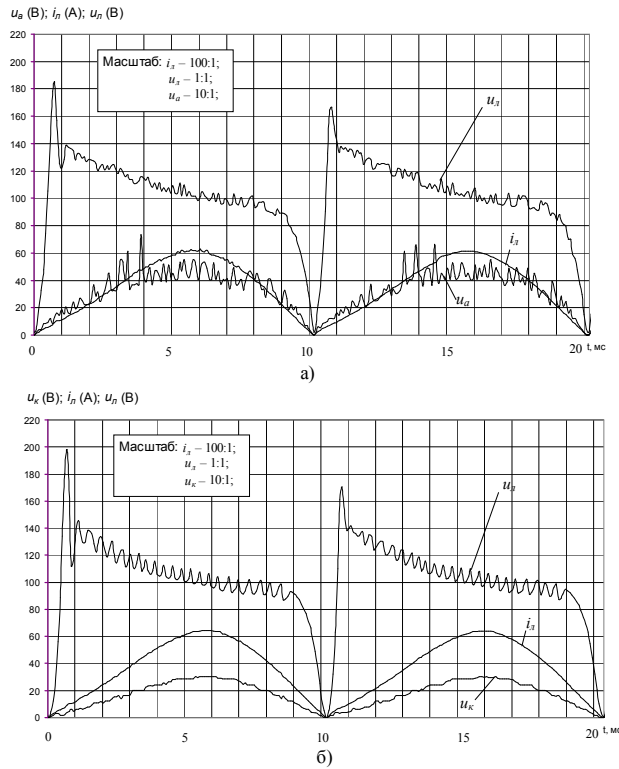


Рисунок 5. Осцилограми струму ( $i_a$ ) та напруг на затискачах ( $u_a$ ), на аноді ( $u_a$ ) та катоді ( $u_k$ ) ЛЛ потужністю 40 Вт (ЛБ40), що працює в колі з однополярним пульсуючим струмом при розміщенні постійного магніту з зовнішнього боку колби ЛЛ: а – в області розташування анода; б – в області розташування катода

Це пояснюється тим, що в позитивному стовпі розряду, який тісно примикає до фронтальної поверхні анода, переважаюча частина електричної енергії (до 65%), яка надходить у плазму, витрачається на збудження резонансних ліній ртуті з  $\lambda_{Hg}=253,65$  нм. Люмінофор перетворює це випромінювання у видиме світло. В катодній області яскраве на вигляд синювато-зелене від'ємне свічення, в яке, до того ж, майже повністю занурений катод, практично зовсім не продукує резонансного випромінювання з  $\lambda_{Hg}=253,65$  нм. Тому саме в цій області не відбувається збудження люмінофору, а, отже, і випромінювання видимого світла. До того ж, безпосередньо до від'ємного катодного свічення примикає Фарадеевий темний простір. Саме з цих причин катодний кінець лампи, який у колбі без люмінофору виглядає яскравішим, ніж анодний, при нанесенні люмінофору стає темнішим за анодний.

При переході на змінний струм промислової частоти розряд аналогічний розряду на постійному пульсуючому струмі, в якому катод і анод періодично міняються місцями. Відмінність полягає лише в зміні розподілу температури вздовж електродів в анодний і катодний півперіоди та в дещо вищому ступені іонізації приелектродних областей на початку кожного півперіоду за рахунок процесів, які мали місце в попередньому півперіоді. Заанодна область, при виникненні анодних коливань періодично частково заповнюється плазмою розряду, що призводить до видимих пульсацій світлового потоку. В цих умовах безрезонансне випромінювання від'ємного катодного свічення, що безпосередньо контактує з Фарадеевим темним простором, з одного кінця, і періодичне імпульсивне заповнення заанодної області плазмою розряду – з другого кінця ЛЛ, призводять до виникнення навколоелектродних пульсацій світлового потоку, до яких особливо чутливий периферійний зір людини.

При поступовому збільшенні частоти напруги живлення як заанодна, так і закатодна області розряду поступово заповнюються плазмою розряду й різниця в яскравості навколоелектродних областей суттєво зменшується, але повністю не зникає.

Навколоелектродні області розряду у ЛЛ не покритих люмінофором, також виглядають темнішими, ніж позитивний стовп розряду (рис. 6), але їх пульсація оком не сприймається. Нанесення люмінофору на внутрішню поверхню вирівнює нерівномірність яскравості в навколоелектродних областях, завдяки чому ЛЛ виглядає по довжині рівнояскравою.

Заповнення заанодної області плазмою розряду пояснюється інерційністю процесів у плазмі і тим, що густина електронів у від'ємному катодному свіченні значно перевищує (за даними [4] в 10 разів) густину електронів у позитивному стовпі розряду. При зміні полярності, в момент переходу струму через нуль у кінці катодного півперіоду, густина плазми, яка мала місце в області від'ємного свічення під час катодного півперіоду, не може миттєво впасти до рівня густини в позитивному стовпі. Для цього потрібен певний час, який визначається (сталою) швидкістю амбіполярної дифузії, тобто долями мілісекунд. На низьких частотах, коли тривалість півперіоду велика (на частоті 50 Гц – це 10 мс), цей процес встигає відбутися на самому початку півперіоду (приблизно за 0,5 мс) і анодне падіння потенціалу ( $u_a$ ) вимушене змінюватися таким чином (періодично зростаючи і падаючи так, як це показано на рис. 3), щоб міг відбуватися ефективний відбір електронів з плазми розряду низької густини.

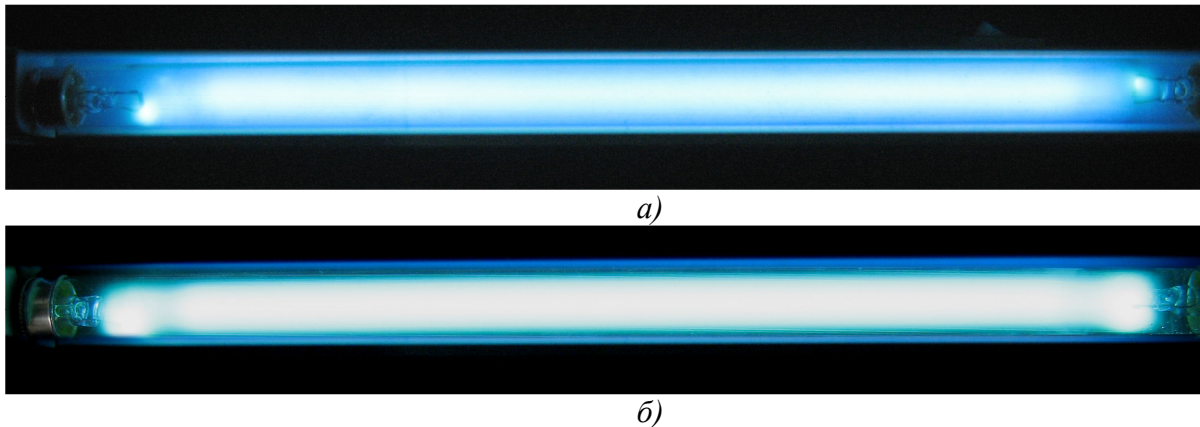


Рисунок 6. Фото бактерицидної розрядної лампи низького тиску, що працює в електричному колі змінного струму з частотою: а – 50 Гц; б – 15000 Гц

При живленні ЛЛ напругою низької частоти (50 Гц) струм у колі виникає тільки після того, як напруга на лампі ( $u_l$ ) стане достатньою для пробоя міжелектродного проміжку ( $u_l \geq u_z$ , де  $u_z$  – напруга запалювання ЛЛ) (рис. 7). Після виникнення розряду напруга на лампі спочатку швидко спадає, що призводить до утворення імпульсу запалювання (перезапалювання). Надалі, з плином часу,  $u_l$  з накладеними на неї анодними коливаннями слабо спадає на фоні постійної зміни струму лампи. В момент, коли миттєве значення напруги на лампі дорівнює напрузі згасання розряду ( $u_l = u_n$ ), розряд гасне і струм спадає до нуля. Як бачимо з рис. 7, форма напруги на лампі помітно відрізняється від форми струму, що призводить до утворення петлі гістерезису на динамічній вольт-амперній характеристиці (ВАХ) ЛЛ.

При плавному збільшенні частоти напруги живлення тривалість півперіоду поступово зменшується, зникають імпульси запалювання (перезапалювання) розряду в лампі. Осцилограми напруги і струму ЛЛ стають близькими за формою. Площа петлі гістерезису на динамічній вольт-амперній характеристиці ЛЛ стає мінімальною. Доля плазми високої густини від'ємного катодного свічення все більше й більше трансформується в анодний півперіод. При цьому густина електронів в області від'ємного свічення поступово зменшується, а в анодній області і в позитивному стовпі розряду збільшується, що призводить до збільшення провідності плазми й зменшення як анодно-катодного падіння потенціалу, так і градієнта потенціалу позитивного стовпа.



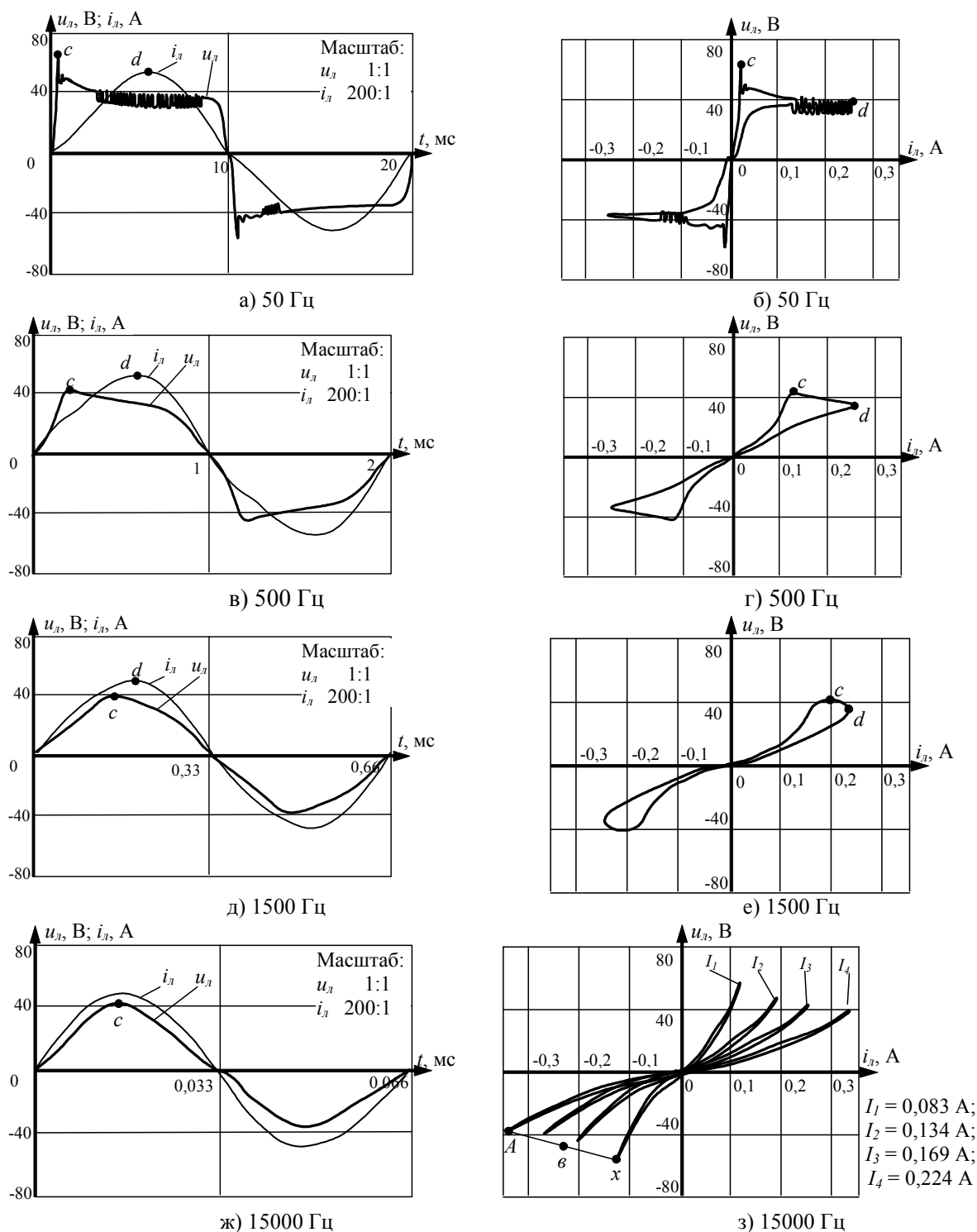


Рисунок 7. Осцилограми струмів і напруг (зліва) та динамічні ВАХ ЛЛ потужністю 6 Вт (справа) в схемі з дроселем при номінальних струмах лампи і різних частотах напруги живлення.  $oc$  і  $cd0$  – зростаюча і спадаюча ділянки динамічних ВАХ ЛЛ відповідно.  $Aex$  – лінійна апроксимація статичної ВАХ прямою дотичною до вершин динамічних ВАХ ЛЛ

Анодно-катодне падіння потенціалу зменшується спочатку повільно (в межах частот 50 – 300 Гц), потім стрімко (у межах частот 300 – 1000 Гц) із подальшим поступовим переходом до мінімального значення на граничній частоті. Анод виявляється повністю зануреним у плазму розряду високої густини і в змозі відбирати електронний струм при нульовому (а іноді і від'ємному) анодному падінні потенціалу. Завдяки цьому анодні коливання повністю зникають.

Форми напруги на лампі й струму через лампу стають близькими до синусоїдних, а зростаюча і спадаюча ділянки динамічних ВАХ починають змінюватися

за параболічним, а не за лінійним, як про це стверджується в [1, 4], законом. Подальше зростання частоти мало впливає на форму  $u_n$ ,  $i_n$  і динамічні ВАХ ЛЛ [4].

### **Висновки**

1. Експериментально доведено, що струм в анодний півперіод збирається всією поверхнею анода й стікає від стартерного до мережевого кінця електрода, зумовлюючи нерівномірне нагрівання анода з максимумом на мережевому і мінімумом на стартерному кінцях анода.

2. Закорочування нікелевих виводів електродів після запалювання ЛЛ призводить до: а) вирівнювання потенціалів стартерного і мережевого кінців електродів з переходом на змінному струмі в режим світіння з двома катодними плямами; б) помітного вирівнювання і зниження температури анода; в) створення умов для роботи ЛЛ у режимі з двома катодними плямами. Все це сприяє зростанню середньої тривалості світіння ЛЛ.

3. Встановлено, що основною причиною виникнення анодних релаксаційних коливань є падіння термоемісійної здатності катодів, унаслідок чого зростають складові прискорюючих полів і виникає додаткова іонізація перед анодом у моменти часу, коли потрібні значення струму в лампі виявляються більшими хаотичного струму плазми.

4. Отримані дані можуть бути використані при конструюванні пускорегулювальних апаратів для підвищення середньої тривалості світіння ЛЛ.

### **Література**

1. Рохлин, Г.Н. Разрядные источники света [Текст]. – 2-е изд., перераб. и доп. / Г.Н. Рохлин. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 720 с.
2. К вопросу о механизме пусковых процессов на электродах люминесцентных ламп [Текст] / В.С. Литвинов, С.П. Решенов, В.И. Лебедев, Е.В. Роцин // Светотехника. – 1968. – № 6. – С. 1–6.
3. Прудников, В.И. О комплексном подходе к анализу неустойчивости световых параметров люминесцентных ламп [Текст] / В.И. Прудников // Труды ВНИИИС. – 1976. – Вып. 8. – С. 151–155.
4. Уэймаус, Д. Газоразрядные лампы [Текст]; перевод с англ. под ред. Рохлина Г.Н. и Фугенфирова М.И. – М.: Энергия. – 1977. – 344 с.
5. Майоров, М.И. Исследование температуры катодного пятна люминесцентных ламп низкого давления по инфракрасному излучению [Текст] / М.И. Майоров, Н.В. Самородова, Г.Т. Тимкаева // Светотехника. – 1979. – № 6. – С. 11–12.
6. Майоров, М.И. Влияние электродного фактора на изменение характеристик люминесцентных ламп в течение срока службы [Текст] / М.И. Майоров, Н.В. Самородова, Г.Т. Тимкаева // Труды ВНИИИС. – 1982. – Вып. 13. – С. 86–90.
7. Федоров, В.В. Производство люминесцентных ламп [Текст] / В.В. Федоров. – М.: Энергия. – 1969. – 244 с.
8. Майоров, М.И. Исследование некоторых электродных характеристик люминесцентных ламп низкого давления на моделях, имитирующих начало и конец срока службы [Текст] / М.И. Майоров, Н.В. Самородова, Г.Т. Тимкаева // Светотехника. – 1983. – № 1. – С. 21.
9. Горюнов, В.А. Модуляция проводимости прианодной области в разряде низкого давления [Текст] / В.А. Горюнов, А.М. Майоров, М.И. Майоров // Светотехника. – 2007. – № 2. – С. 8–12.
10. Фугенфиров М.И. Электрические схемы с газоразрядными лампами [Текст] / М.И. Фугенфиров. – М.: Энергия, 1973. – 363 с.

*Отримано 25.04.2011*