



ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ В ГАЗІ ФІЗИКА — розділ фізики, що вивчає проходження електричного струму через газове середовище під впливом електричного поля. Засади Е. р. в г. ф. закладено у 19 ст. На основі результатів експерим. дослідж. електрич. розрядів у газах (ЕРГ) створ. [атомну фізику](#). У звичай. умовах газ є ізолятором, що дозволяє передавати електричну енергію на великі відстані повітр. лініями електропередач. Проте навіть в атмосфері на рівні моря під впливом косміч. променів чи природ. радіоактивності щосекунди іонізується (та рекомбінує) 1-10 частинок в 1 см^3 , що зумовлює концентрацію зарядів у повітрі бл. 10^3 см^3 . Їх можна виявити у т. зв. газорозряд. трубках (зазвичай скляні діаметром $\sim 1\text{ см}$), у які вварено метал. електроди (катод та анод) на відстані $d \sim 1-10\text{ см}$ між собою, а об'єм наповнено газом при заданому тиску. За напруги на електродах U кілька десятків вольт струм є виключно слабким $I \sim 10^{-15}\text{ А/см}^2$. Це т. зв. тихий розряд у несамостійному режимі, де струм визначає зовн. іонізатор, що дає змогу використовувати його для вимірювання потоків іонізуючого агента (напр., рівня радіоактивності) або ж фіксувати появу в міжелектрод. проміжку зарядж. частинок, напр., під впливом лазер. випромінювання з частотою, характер. для конкрет. атомів, та ідентифікувати навіть одиничні з них. При підвищенні U струм I тихого розряду спершу теж зростає, бо щоразу більшість зарядж. частинок вдається витягнути на електроди до того, як вони встигнуть рекомбінувати. Лише ця вузька область параметрів відповідає ліній. залежності струму від напруги (закону Ома), властивій металам. При подальшому збільшенні U струм спершу насичується, повільно збираючи на електродах усі зарядж. частинки, які виникають (це відповідає повному збиранню на електродах усіх зарядж. частинок, викликаних дією іонізатора), а потім знову зростає — це стадія електрич. пробою газу. Пробій спричиняють електрони в умовах несамостійного розряду, але при достат. величині електрич. поля E електрони розмножуються лавиноподібно і розряд стає самостійним, не маючи більше потреби підтримки іонізатором. Протікає лавинна стадія дуже швидко: за $10^{-7}-10^{-3}\text{ сек.}$ газ іонізується й електрич. струм зростає на порядки. Власне, цей процес дав назву явищу ЕРГ, яке пов'яз. з розрядом конденсатора через газ між електродами. При високій напрузі унаслідок пробою він стає провідником і конденсатор розряджається. Згодом розрядом почали називати будь-який процес протікання електрич. струму через іоніз. газ, а оскільки він зазвичай супроводжується випромінюванням, стали говорити: «розряд запалюється, горить, гасне». При $d = 1\text{ см}$ і тиску р

$\sim 10^{-3}\text{ атм}$ напруга пробою (або запалювання) становить $\geq 100\text{ В}$ залежно від сорту газу, а для повітря при $p = 1\text{ атм}$ — понад 30 кВ. У однорід. полі вона залежить від газу й від добутку величин pd та описується т. зв. законом Пашена (1889). Його характерна особливість — мін. значення напруги запалювання при певному значенні $(pd)_{\min}$, (для більшості газів становить $\geq 0,5\text{ Тор}\cdot\text{см}$), що відповідає оптим. умовам іонізації газу як компромісу щодо довжини вільного пробігу електронів, яка повинна бути не надто малою, щоб електрони встигали набрати достатню енергію в електрич. полі, та не надто великою, щоб вони не «проковзували» розряд. проміжок без зіткнень. Попри те, що після пробою газ. проміжок стає провідником, фіз. процеси, які супроводжують протікання струму, тут набагато складніші, ніж у метал. провідниках. У металах електрони, рухаючись під впливом поля E , зазнають зіткнень з іонами кристал. ґратки та збуджують її коливання, які перетворюються на тепло — це й визначає електрич. опір провідника. У розряді ж утворюється плазма — іоніз. газ, в якому ступ. іонізації є достат., щоб електричні сили притягання, що діють між зарядами, перешкоджали їх поміт. розділенню, тобто плазма є електрично нейтрал. у кожному малому об'ємі (див. *Низькотемпературної плазми фізика*). Іони в плазмі є рухомими, тому вони можуть накопичуватися у певних зонах розряду та створювати позитив. простор. заряд так, що напруженість E уздовж розряду перестає бути постій., як у металах, і може навіть змінювати знак. Оскільки маса іона M є набагато більшою, ніж електрона m (навіть для найлегшого іона водню $M/m = 1836,5$), то електрони після кожного зіткнення значно легше набирають швидкість. Крім того, здатність частинок обмінюватися енергією в пруж. зіткненнях з атомами визначається т. зв. коефіцієнтом акомодатії, який складає для електронів $\alpha = 2m/M$, а для іонів ~ 1 . Отже, електрони ще й відносно слабо втрачають набуту за рахунок поля E тепл. енергію. Тому при малих тисках іони та атоми мають близьку до кімнат. температуру, а електрони — понад 10^4 К і, як правило, визначають електро- та теплопровідність плазми. Оскільки загалом збільшенню струму в розряді відповідає зростання концентрації зарядів (тобто електрич. опір стає меншим), то залежність $I = f(U)$ є нелінійною, а в певних режимах розрядів демонструє спад. характер. Непружні зіткнення у плазмі електронів з атомами зумовлюють їх збудження та іонізацію, активацію випромінювання, яке натомість може поглинатися в ін. областях плазми, що може істотно впливати на енергетику процесів в ЕРГ. Згідно з квант. теорією, атом може перебувати в одному з дискрет. енергет. станів, у результаті непруж. зіткнень з

електронами за умови їх достат. швидкості він може бути збудж. до одного з дискрет. енергет. станів (чи може змінити цей стан) або ж іонізованим. Цей процес є статич. і за певних умов рівноважним щодо розподілу концентрації атомів за станами збудження подібно до того, як на макрорівні експоненційно розподілені молекули повітря уздовж висоти атмосфери. Проте встановленню рівноваги найчастіше заважає випромінювання: атом зі збудж. стану спонтанно повертається в осн. стан за $t_v \sim 10^{-8}$ сек., порушуючи тенденцію до рівноваги, яка можлива у щільній плазмі, де заселення енергет. станів атомів унаслідок зіткнень переважає над випромінювальним і, крім того, мін. є дифузійні втрати зарядів на стінках, що порушують іонізац. рівновагу. Найважче досягти рівноваж. заселення атомів у резонанс. стані, інтенсивність випромінювання якого є найбільшою. Вважають, що рівноваж. стану відповідає щільна плазма електрич. дуги при атмосфер. тиску. Окрему роль в ЕРГ відіграють т. зв. метастабіл. енергет. стани, для яких $t_v \sim 0,1$ сек. Маючи значну енергію збудження, що наближається до резонанс. стану, вони здатні, напр., іонізувати в суміші газів домішк. компоненту, потенціал іонізації якої є меншим, ніж енергія збудження метастабіл. стану. Це дозволяє зменшити напругу запалювання розряду в осн. газі (ефект Ф. Пенінга, 1928).

Однією з ключових для підтримання ЕРГ є проблема замикання струму на електроди, особливо на катод, бо малорухомі іони не спроможні забезпечити паритет розряд. струму з плазми на цей електрод. Разом із проблемою іонізації газу в розряд. проміжку вони визначають осн. типи ЕРГ, які демонструють розмаїття конкрет. форм та супут. ефектів залежно від тиску, напруги, геометрії розряд. проміжку та ін. умов. За малих $p \sim 10^{-3}-10^{-2}$ атм і великого зовн. опору електрич. кола, який обмежує наростання струму, в результаті пробою запалюється т. зв. жевріючий розряд (ЖР) — один із найпоширеніших типів ЕРГ, для якого характерні невелика густина струму ($10^{-6}-10^{-1}$ А/см²) і досить висока напруга (на рівні пробійної — 10^2-10^3 В). При не надто малих $d \sim 10$ см у трубці утворюється світний стовп, колір якого залежить від роду газу (в неоні — червоний, у азоті — синій, що активно використовують у реклам. технологіях). Унаслідок накопичення позитив. простор. заряду у більшій частині розряд. проміжку в його прикатод. області локалізується осн. частина U та формується сильне поле E , де іони рухаються до катода та вибивають з його поверхні електрони. Цьому процесу т. зв. вторин. електрон. емісії сприяють також фотони і метастабіл. атоми з плазми. Вторинні електрони, прискорюючись у цьому ж полі, іонізують атоми газу і знову утворюють іони та електрони, які продовжують процес, — отже, він є самостійним. Здебільшого у такому розряді світиться лише частина поверхні катода, при збільшенні струму I ця частина розширюється, густина струму та U при цьому не змінюються. Такий розряд є

норм. ЖР, який забезпечує ефект стабілізації напруги в електрон. техніці. Коли вся поверхня катода починає брати участь у розряді, то збільшення I супроводжується підвищенням U (аномал. ЖР), — таку форму розряду застосовують у технологіях модифікації поверхні констр. матеріалів, напр., їх азотування (якщо виріб має складну форму, то при використанні його у ролі катода вдається максимально рівномірно локалізувати аномал. ЖР в азоті на поверхні виробу). Осн. ж область ЖР — це т. зв. позитив. стовп, у якому утворюється неізотермічна та нерівноважна (ступ. іонізації $\sim 10^{-8}-10^{-6}$) плазма, де поле E слабке, хаотич. рух частинок переважає над направленим. За умови балансу зарядж. частинок у розряді (іонізація — електрон. ударом атома, рекомбінація — у дифузій. процесі на стінках) легко визначити температуру електронів. Проте концентрація зарядж. частинок випадає з балансу, тому її важко розрахувати. При зростанні тиску позитив. стовп стягується у вузький шнур (т. зв. контракція) унаслідок зростання ролі об'єм. рекомбінації. Струм на анод замикається хаотич. потоком електронів із плазми, і якщо він перевищує або, навпаки, є недостат. для замикання розряд. струму, то перед ним формується поле E відповід. знаку, яке частково гальмує або ж сприяє додатк. генерації потоку електронів на анод (т. зв. анодне падіння потенціалу). Цей тип розряду відкрив 1831-35 англ. фізик М. Фарадей, працюючи з трубками, що відкачувалися до $p \sim 10^{-3}-10^{-2}$ атм при напрузі не більше 10^3 В, і установив його шарувату структуру: між катодом та позитив. стовпом є світлі й темні зони, що чергуються, цей склад. розподіл світіння зумовл. неоднак. характером руху електронів у різних областях розряду — проте цей висновок став можливим після встановлення природи перенесення електрики в газах, досліджув. на основі явища т. зв. катод. променів (КП) у ЖР при $p \sim 10^{-5}$ атм. Нім. фізик Й.-В. Гітторф 1869 встановив, що КП відхиляються магніт. полем, а англ. фізик і хімік В. Крукс 1874 передбачив, що КП є елементар. частинками атомів. Знач. внесок у вивчення ЖР та розвиток експерим. техніки для досліджень ЕРГ зробив 1880-82 І. Пуллой, котрий здійснив ретельні дослідж. КП, критично аналізував роботи попередників та довів — у супереч пошир. тоді дуаліст. теорії електрич. струму, — що всі ефекти в ЖР можуть бути пояснені на основі існування «єдиної рухомої рідини» (електрони на той час ще не були відкриті); також стверджував, що електричні явища є фактором взаємодії небес. тіл у косміч. масштабах подібно до гравітації, випромінювання світла і тепла. Великий досвід експерим. дослідж. ЕРГ і вакуум. електроніки дав змогу І. Пулюю вже за 2 міс. після доповіді В. Рентгена 1895 про відкриття Х-променів опублікувати найвищої якості рентгенів. знімки, зокрема мед., а також показати іонізуючі властивості цих променів. У 1-й пол. 20 ст. британ. фізик Дж. Таунсенд, нім. А. Енгель та М. Штеенбек розвинули класичну

теорію ЖР, яка доволі прозоро описала процеси, що його супроводжують, та практично співпала з експерим. результатами. Проте при малих тисках важко врахувати вплив поля E на ефективність іонізації електронами нейтрал. частинок, оскільки їх однозначна відповідність є можливою, якщо величина E залишається практично незмінною на відстані багатьох вільних пробігів електрона, тому в цьому випадку катодне падіння та U є фактично меншими, ніж розрахункові. Ці т. зв. нелокал. ефекти нині є предметом актив. дослідж. вчених світу на основі методів чисел. моделювання. В Україні властивості ЖР у зв'язку з його технол. застосуваннями вивчають в Інституті газу НАНУ (В. Жовтянський, Ю. Лелюх, В. Назаренко, В. Хомич), Нац. тех. університеті України «Київ. політех. інститут» (С. Денбновецький, А. Кузьмичов, І. Мельник) та Хмельн. університеті (В. Каплун, І. Пастух).

Якщо тиск газу високий ($p \sim 1$ атм), а опір зовн. кола малий настільки, що може пропустити сильний струм, то після пробою запалюється дуговий розряд (ДР), який є основою багатьох енерготехнол. застосувань плазми (див. *Плазмові технології*). ДР відкрив 1802 рос. фізик В. Петров при зведенні й наступ. розведенні вугіл. електродів, приєдн. до електрич. батареї. Пізніше дугу в повітрі незалежно досліджував англ. хімік Г. Деві (1810). ДР має характерну дугоподібну форму, якої набуває при горизонт. розміщенні електродів в атмосфері, що відповідає умовам оптим. відведення тепла від розряд. каналу під впливом конвектив. потоку, зумовл. спливанням нагрітого в розряді повітря: нижня частина розряду, яка омивається холод. повітрям, зменшує свою поверхню, через яку здійснюється тепловіддача, а верхня, контактуючи з нагрітим повітрям, збільшує, набуваючи форми дуги. Сліпучий канал між електродом і металом під час електродуг. зварювання — приклад ДР в атмосфері. У ДР катодне падіння потенціалу є невеликим, бл. до потенціалу іонізації атомів (~ 10 В), а струми — значні ($\sim 1\text{--}10^5$ А). На катоді в умовах сильного локал. нагрівання з'являються т. зв. катодні плями, де густина струму складає $10^5\text{--}10^7$ А/см², і електрони ніби випаровуються з його поверхні, — відбувається їх емісія з еродов. матеріалу катода. Отже, струм з катода замикається безпосередньо електронами. Властивість ерозії електродів дає змогу генерувати плазмотвірне середовище у т. зв. вакуум. дугах, які широко застосовують для нанесення покриттів у технологіях модифікації поверхні. Фіз. дослідж. цих дуг та тех. розробки на їх основі провадять у ННЦ «Харків. фіз.-тех. інститут» (І. Аксьонов, В. Білоус, В. Падалка, С. Саблев, В. Толок, В. Хороших та ін.) й Інституті ядер. досліджень (В. Саєнко) НАНУ. Позитив. стовп (або канал) ДР — щільна, наблж. до рівноваж. та ізотерміч. стану плазма з T -рою $\sim 10^4$ К, якій відповідає ступ. іонізації $\sim 10^{-3}\text{--}10^{-2}$. У практич. застосуваннях ДР можуть споживати потужність ~ 1 МВт, отож актуал. є проблема підвищен-

ня енергоефективності, один зі шляхів вирішення якої — використання нерівноваж. ефектів плазми ДР, зумовл. перенесенням випромінювання з осьової, найбільш гарячої області каналу дуги, на її периферію, що спричиняє перенаселення резонанс. стану плазмотвір. атомів. Це можна трактувати як зменшення ефектив. потенціалу іонізації атомів, що відповідає зменшенню електрич. опору каналу ДР — він ніби «просвітлюється» для пропускання струму. Процеси, властиві рівноваж. плазмі ДР, успішно моделюють в Інституті електрозварювання (В. Гвоздецький, І. Кривцун) та Інституті ядер. досліджень (П. Порицький) НАНУ, а нерівноважні властивості плазми ДР вивчають в Інституті газу НАНУ (В. Жовтянський, Ю. Лелюх). Функціонування ДР вимагає відведення знач. теплових потоків; послідовне вирішення цієї проблеми привело до створення плазмотронів — пристроїв, які формують плазм. струмись у потоці газу, що обдуває дугу. Їх потужність може сягати 10 МВт, і нині вони є основою багатьох плазм. технологій. Більшість вітчизн. плазмотронів розроблено в Інститутах газу (М. Грінченко, І. Карп, С. Петров) та електрозварювання (Е. Есибян та ін.) НАНУ і Сх.-укр. університеті (В. Дзюба). До ДР належать також ЕРГ низького тиску з катодом, що розжарюється від стороннього джерела, який є зруч. об'єктом для вивчення властивостей низькотемператур. плазми. Здатність електрода здійснювати емісію електронів характеризує робота виходу: якщо вона для катода є більшою, ніж анода, то можна спричинити від'ємну повну напругу на такому ДР, тобто він стане джерелом електрич. енергії, отримув. на основі тепл. енергії катода, — на цьому ґрунтується метод прямого термоемісій. перетворення тепл. енергії в електричну. Його активно розробляли у варіанті короткого діода з вольфрам. термокатодом у присутності парів цезію при дослідж. сукупності фіз. процесів, пов'яз. з явищами на катоді (емісійні, катодне розпорошення, поверхнева іонізація атомів), під керівництвом засн. київ. наук. школи фіз. електроніки Н. Моргуліса в Інституті фізики НАНУ (М. Гуртовий, В. Коваленко, А. Наумовець) та Київ. університеті (Д. Городецький, Ю. Корчевой, М. Находкін). Вагомі дослідж. ЕРГ низького тиску виконано у Інституті вугіл. енерготехнологій НАНУ (Ю. Корчевой, В. Лукашенко, В. Макачук). Знач. технол. проривом стало використання як джерела зарядж. частинок плазм. катодів на основі допоміж. розряду зі щільною плазмою, яка може проникати через спец. діафрагму у вакуум чи міжелектрод. проміжок осн. розряду, запропонов., а потім експериментально і теоретично розвинене в Інституті фізики НАНУ (М. Габович, І. Солошенко, А. Щедрін) як екон. джерело інтенсив. протон. пучків та негатив. іонів водню. Значні переваги мають порожнинні катоди, в яких емісія відбувається з поверхні порожнини, що охоплює розряд. об'єм (напр., довгого отвору): зазвичай, струм розряду з порожнин. катодом є значно більшим, ніж із плоским катодом.

Ефект зумовл. більш ефектив. використанням у замкненому просторі порожнин. катоду високоенергет. електронів у випадку ЖР та іон. компоненти у випадку ДР. У тому ж Інституті розроблено ефективні плазмооптичні системи для фокусування інтенсив. іонних пучків на основі розрядів у схрещених електрич. і магніт. полях (О. Гончаров) та систему для плазм. стерилізації біол. об'єктів на основі ЖР з порожнин. катодом (І. Солошенко). Особл. формою ЕРГ є розряд у рідині, де плазма утворюється в її паровій фазі, що застосовний у технологіях оброблення металів (у варіанті з іскровим розрядом, ІР) та підвод. зварювання, а остан. часом — також для знешкодження рідин зі шкідл. домішками орган. походження (в обох випадках — ДР). Знач. внесок у їх дослідж. зробили вчені Інститутів електрозварювання (К. Хрєнов), імпульс. процесів і технологій (Г. Гулий, О. Вовченко) та ядер. досліджень (Л. Пасічник, П. Старчик) НАНУ; у Київ. університеті (В. Черняк) проводять дослідж. маловивч. донині ЕРГ між твердим та рідин. електродами, орієнтовані на використання нерівноваж. ефектів у плазмі такого розряду в технологіях конверсії палив, при цьому використовують несамостійний розряд, який підтримується додатк. плазм. потоком.

Крім стаціонар. ЕРГ, осн. характеристики яких не залежать від часу, є широкий клас нестаціонар. (імпульс.) розрядів як за природою свого походження, так і створ. спеціально в дослідниц. чи технол. цілях. Напр., ЖР і ДР можуть формуватися в імпульс. режимі, що дає змогу досягнути екстрем. параметрів розряду навіть в умовах обмеж. енергет. чи технол. можливостей, а з ін. боку — розділити у часі ефекти, які принципово не можуть бути розділ. у стаціонар. процесі (це є виключною перевагою у фіз. дослідж. ЕРГ). Вагомий досвід таких дослідж. отримали учені Київ. університету (В. Жовтянський, О. Новик, Ю. Чутов) та ННЦ «Харків. фіз.-тех. інститут» НАНУ (Я. Волков, І. Гаркуша, О. Павличенко, В. Терешин, О. Царенко). Імпульсні розряди мають виключні переваги для формування актив. середовища у лазерах, якому характерне значне перенаселення верх. збудж. стану лазер. переходу відносно нижнього (т. зв. інверсна заселеність). В розрядах у парах металів цим умовам часто відповідає перехід між резонанс. та метастабіл. станами, який на початк. стадіях імпульс. розряду взагалі є незаселеним. Цикли дослідж. ЕРГ для лазерів виконали науковці Ужгород. університету (І. Запісочний, О. Малінін, І. Опачко, В. Шевера, Л. Шимон, О. Шуайбов) та Інституту електрон. фізики НАНУ (В. Кельман). Принципово нестаціонар. є іскровий (ІР) та коронний (КР) розряди, пов'яз. з фазою пробою газу при $p \geq 1$ атм і $d \geq 1$ см. Характерні особливості ІР — відсутність залежності напруги пробою від матеріалу катода та швидкий розвиток пробою, час якого є на два порядки менший, ніж тривалість проходження іонами розряду. проміжку. Ці явища пояснює механізм формування ІР на

основі стримера — іоніз. тонкого каналу після проходження первин. електрон. лавини, який потім проростає до одного чи обох електродів. Визначал. у формуванні стримера є роль фотоіонізації та вплив позитив. об'єм. заряду, який втягує у цей же канал вторинні лавини, що формуються внаслідок фотоіонізації — так росте стример; після досягнення електродів він відкриває можливість різкого підсилення іонізації та струму — тобто власне ІР. Оскільки фотони вилітають і поглинаються хаотично, то можливі ситуації, коли виникає новий переваж. напрямок, що пояснює зигзагоподібну структуру ІР. Цей механізм дає змогу доволі точно визначити напругу пробою для атмосфер. повітря. Різновидом ІР є блискавка, макс. сила струму якої може сягати сотень тисяч ампер. Проходження осн. струму через канали супроводжується знач. іонізацією, виділенням тепла, зростанням тиску в каналі та формуванням удар. хвиль, що пояснює тріск ІР або ж утворення грому від блискавки. Вважають, що стадія існування ІР визначається швидким (у межах 10^{-3} сек.) падінням напруги на розряд. проміжку нижче величини погасання розряду, в ін. випадку він переходить у ДР. Процеси формування стримерів досліджують у ННЦ «Харків. фіз.-тех. інститут» НАНУ (В. Карась). КР виникає при знач. неоднорідності поля Е біля одного з електродів, напр., вістря, внаслідок його великої кривини, тому запалювання розряду можливе лише на обмеж. відстані від провідника до поля області, де Е вже недостатнє для його підтримки. КР є багаторазово повторюв. процесом запалювання як незаверш. перехід. етап до ІР. При підвищенні напруги U КР переходить у китичний — велику кількість світних каналів, які не досягають другого електрода (цей вид КР відомий також як вогні Ельма; назва походить від церкви св. Ельма, на вежах якої вони часто виникали; спостерігаються також на мачтах, одиноких деревах, гострих вершинах скель). Подальше підвищення U призводить до виникнення ІР. Цикл дослідж. КР виконано в Нац. університеті «Львівська політехніка» (В. Чигінь). Принципово нестаціонар. є також бар'єр. розряд, що виникає у газ. проміжку в умовах, коли принаймні один із електродів є діелектриком, при накладанні на нього змін. напруги не надто високої частоти, достат. для пробою цього проміжку. В останні роки цей процес застосовують для очищення газів пром. походження від оксидів азоту та модифікації поверхні полімер. матеріалів. У бар'єр. розряді внаслідок кожного пробою розряд. проміжку на електродах осідають заряди з плазми, які компенсують зовн. напругу, а роль фотоелектрон. та вторин. іонно-електрон. емісії є визначал. щодо властивостей нестаціонар. розряду. Грунт. дослідж. цих розрядів при $p = 10^{-2}$ – 10^{-1} атм виконані у Київ. (Ю. Чутов) та Ужгород. (О. Шуайбов) університетах, а при $p = 1$ атм — в Інституті фізики НАНУ (І. Солошенко, А. Щедрін).

В ЕРГ високої частоти $\geq 10^5$ Гц (ВЧ) визначал. роль катод. процесів втрачається — вони можуть існувати і

без електродів. Уперше ВЧ розряд спостерігав 1891 серб.-амер. винахідник Н. Тесла. Такі розряди за своїми властивостями часто схожі на ЕРГ постій. струму і теж мають кілька модифікацій: ДР, ІР, факельний — різновид ВЧ КР при частоті понад 1 МГц і при $p \geq 1$ атм, що має форму, подібну до полум'я свічки. Безелектродні ВЧ ЕРГ поділяють на Е-розряди, у яких поле аналог. полю конденсатора створюється прикладенням ВЧ потенціалу до електродів за межами розряду, і Н-розряди — у змін. магніт. полі, що створює вихр. електричне поле, де поле генерується зовн. ВЧ струмами. Прикладом останнього є, зокрема, гелікон. розряд, що генерується в умовах резонатора — індукц. котушки всередині циліндр. екрана зі збудженням плазм. хвиль (геліконів) антенами в діелектрич. камері з магніт. полем. Досить розвинені дослідж. ін. варіанта цього розряду — у торі, поміщ. у змінне магнітне поле, силові лінії якого спрямов. по осі тора, що став основою для розвитку методів керов. термоядер. синтезу. Розроблені також ВЧ плазмотрони на розрядах обох типів.

При малих p і, відповідно, невеликих концентраціях зарядів та їх високій T -рі роль зіткнень частинок у плазмі стає незначною, натомість важливо враховувати їх взаємодію з електромагніт. хвилями. Ці процеси особливо актуал. для керов. термоядер. синтезу та є предметом дослідж. *фізики плазми*. Вони проявляються також у плазм.-пучк. розряді — різновиді ЕРГ, у між-електрод. простір якого вводять прискор. електрон. пучок і плазма розігрівається гол. чином унаслідок передачі енергії пучка через розкачування ВЧ коливаний електронами плазми. Важливою при цьому є роль магніт. полів, які утримують зарядж. частинки розрідж. плазми від втрат на стінках розряд. камери. Напр., для підтримання ЖР при дуже малих p на нього накладають повздовжнє магнітне поле (т. зв. розряд Ф. Пенінга, 1937), що закручує електрони уздовж спірал. траєкторій навколо силових ліній магніт. поля та ефективно зменшує «проковзування» ними розряд. проміжку. Заг. властивості ВЧ та плазм.-пучк. розрядів дослідж. у Київ. університеті (І. Анисимов, С. Левитський, І. Шашурін). Значні цикли дослідж. фіз. властивостей ВЧ та замагніч. розрядів виконали співроб. Інституту ядер. досліджень НАНУ: особливостей дифузій. процесів (Л. Пасічник, В. Ягола), релаксації іон. пучків у плазмі ВЧ розряду (Г. Кириченко), механізмів поглинання ВЧ потужності в плазмі гелікон. розряду (К. Шамрай). Активно функціонує харків. наук. школа фізики плазми, яка досліджує ВЧ та замагніч. розряди з метою вирішення фундам. проблеми керов. термоядер. синтезу (К. Степанов та ін.), ґрунт. дослідж. здійснено і в Інститутах теор. фізики (А. Загородній, В. Засенко, О. Ситенко) та ядер. досліджень (Я. Колесниченко) НАНУ. За цикл дослідж. щодо проникнення електромагніт. хвиль крізь плазм. бар'єри в неоднорід. плазмі розряду Пенінга укр. вчені відзнач. 1979 Державною премією УРСР в галузі науки і техніки — О. Водяницький, М.

Єрохін, В. Лісітченко, С. Мойсєєв, В. Муратов, В. Ораєвський, Л. Романюк, М. Савальний, В. Усталов, В. Філіпенко. Завдяки розвитку ідей, пов'яз. з організацією взаємодії електромагніт. полів зі щільною плазмою ЕРГ, створ. плазм. прискорювачі та плазм. реактивні двигуни, швидкість потоку в яких істотно перевищує тепл. швидкість, характерну для хім. двигунів. У ННЦ «Харків. фіз.-тех. інститут» НАНУ розробили та досліджують т. зв. квазістаціонарні плазм. прискорювачі, перевагою яких є генерація потоків високо-енергет. щільної плазми упродовж тривалого періоду, що дало змогу використовувати їх для модифікації поверхні матеріалів та створення джерел випромінювання з високою T -рою (І. Гаркуша, В. Таран, В. Терешин, В. Чеботарьов). Тривалий час досліджують та удосконалюють плазм. реактивні двигуни у Дніпроп. університеті (О. Петренко, І. Стаценко) та Нац. аерокосміч. університеті «Харків. авіац. інститут» (М. Білан). За своєю глибин. природою до ЕРГ близькі також оптичні розряди, які підтримуються випромінюванням потуж. лазерів. Цей напрям дослідж. ЕРГ розвивається кілька десятиріч, проте вже знаходить практичне застосування. Так, в Інституті електрозварювання НАНУ досліджують комбінов. лазерно-дугові процеси та розвивають їх практичне застосування для зварювання й модифікації поверхні матеріалів (І. Кривцун). Публікації з питань Е. р. в г. ф. в Україні друкують у ж. «Український фізичний журнал», «Автоматическая сварка», «Вопросы атомной науки и техники»; відбуваються міжнар. наук. конф. у галузях фізики низькотемператур. плазми, фізики плазми і керов. термоядер. синтезу та ін., що включають ці питання.

Рекомендована література

1. Капцов Н. А. Физические явления в вакууме и разреженных газах. Москва; Ленинград, 1933;
2. 1937;
3. Энгель А., Штенбек М. Физика и техника электрического разряда в газах / Пер. с нем. Т. 1-2. Москва; Ленинград, 1935-36;
4. Москва, 1996;
5. Рожанский Д. А. Физика газового разряда. Москва; Ленинград, 1937;
6. Хренов К. К. Электрическая сварочная дуга. К.; Москва, 1949;
7. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Т. 1-2. Москва, 1952-71;
8. Финкельнбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма / Пер. с нем. Москва, 1961;
9. Моргулис Н. Д. Термоэлектронный (плазменный) преобразователь энергии. Москва, 1961;
10. Даутов Г. Ю., Дзюба В. Л., Карп И. Н. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами. К., 1984;

11. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Москва, 1987;
12. Пулюй І. Збірник праць. К., 1996;
13. Жовтянський В. А. Вплив факторів нерівноважності на розпад електродугової плазми // УФЖ. 1999. Т. 44, № 11;
14. 2000. Т. 45, № 1-2;
15. Його ж. Плазмохімічні ефекти і деякі фундаментальні проблеми фізики газового розряду // Там само. 2008. Т. 53, № 5.

В. А. Жовтянський

Бібліографічний опис:

Електричного розряду в газі фізика / В. А. Жовтянський // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. — К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2009. — Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-18861>

2001-2025 © Ця енциклопедична стаття захищена авторським правом згідно з чинним законодавством України ([докладніше](#)).