Marja Pietruszyńska.

O zanikaniu świecenia opóźnionego w powietrzu.

Sur l'extinction de la luminescence retardée dans l'air.

Sommaire.

Dans certaines conditions l'air, excité à l'émission par les décharges électriques, continue à émettre la lumière après l'interruption du courant. La durée de cette luminescence retardée peut atteindre suivant les conditions jusqu'à 20 secondes.

Les plus importants de multiples travaux, concernant cette question, sont énumerés en bas de la page 65 du texte polonais (v. les renvois 2, 3, 4, et 5).

Dans le travail de M. S. Pieńkowski [1]) nous trouvons en outre des remarques théoriques sur l'extinction de la luminescence en question. Il-y-a sur ce sujet une étude expérimentale [2]) dont les conclusions sont difficiles à expliquer et il est probable qu'elles concernent un cas dans de conditions particulières d'expérience.

Dans le travail présent l'auteur a étudié l'extinction de la luminescence retardée dans l'air.

Après de multiples essais on s'était arrêté au dispositif, indiqué schématiquement dans la fig. 1 *a*, *b* (p. 66).

Le tube en verre R_1, dans lequel passaient les décharges électriques, était réuni d'un côté au ballon B_1 et aux récipients-laveurs. De l'autre côté le tube R_1 était réuni au tube d'observation R_2 et celui-ci au système des pompes par l'intermédiaire d'un ballon B_2. Par le jeu des robinets et l'aspiration par la pompe en marche on pouvait faire passer par l'appareil un courant d'air de vitesse constante; dans nos expériences elle était de 30 cm/sec, comme ont montré des mesures spéciales. Le tube R_1 était muni

[1]) V. p. 65, le renvoi 5.
[2]) V. p. 65, le renvoi 6.

de deux électrodes en aluminium réunies aux bornes du secondaire d'une bobine d'induction C, dont le primaire contenait la source de 110 V ainsi que l'interrupteur mécanique P. L'intensité du courant des décharges était mesurée à l'aide d'une croix thermoélectrique T, et la température du gaz au moyen d'un couple thermoélectrique TI.

Pendant la décharge dans le tube R_1, contenant l'air sous pression d'environ 1 mm de mercure, le tube R_2 se remplissait d'une luminescence verdâtre qui, en s'éteignant graduellement, s'étendait jusqu'à 1—1,5 m de la ligne des décharges.

La méthode du travail consistait à photographier la luminescence de l'air en repos ou en mouvement dans le tube R_2 et cela pour des courants d'intensité différente.

Afin d'avoir les conditions d'expérience les plus simples, il était nécessaire de photographier le gaz luminescent à l'état stationnaire. Par conséquent, l'objectif de l'appareil photographique a dû être ouvert un certain temps après la fermeture du courant et on le fermait avant l'arrêt des décharges. Au moment même de l'ouverture du courant on voyait se propager dans le tube R_2 une sorte d'onde plus claire de la luminescence.

Étant donné la faible intensité de la luminescence en question, les soins spéciaux ont dû être apportés afin d'écarter toutes traces de la lumière des décharges diffusée eventuellement par les parois du tube.

La figure 4, p. 70 représente une des plaques donnant les photographies du gaz luminescent. Elles correspondent depuis I jusqu' au V au courant des décharges variant de 27 mA à 7,9 mA. Le temps de pose était de 4 minutes. Sur la même figure sont reproduites les marques d'intensité, obtenues à l'aide de la lumière de couleur se rapprochant à celle de la luminescence en question.

Les photographies ainsi obtenues étaient soumises aux mesures photométriques au moyen d'un microphotomètre thermoélectrique enregistreur de M o l l. La figure 3, p. 69, représente une courbe, ainsi obtenue, de l'opacité de la plaque de l'image de la luminescence (A), ainsi que celles des marques d'intensité (1,2..., 10).

Les courbes photométriques permettent de calculer le noircissement de la plaque en différents points de l'image. D'autre part les courbes analogues, se rapportant aux marques d'intensité donnent la relation entre le noircissement et l'intensité de la lumière, ce qui permet de tracer la courbe de distribution de l'intensité de la luminescence retardée en fonction de la distance de la ligne des décharges. Ces courbes sont représentées dans les fig. 5, 6 et 7 (p. 71 et 72). Sur l'axe des abscisses sont portées les distances de la ligne des décharges et sur l'axe des ordonnées les log d'intensité de la luminescence. Nous voyons que

la relation entre ces grandeurs est linéaire. Par conséquent, l'extinction graduelle de la luminescence est représentée par une formule exponentielle.

Les données concernant les courbes de la fig. 5, p. 71, à savoir l'intensité du courant (colonne 2) et la température du gaz dans le tube (colonne 3), sont réunies dans le tableau *I*, p. 71, du texte polonais. De toutes ces données nous voyons que la luminescence près de la ligne des décharges augmente d'intensité avec l'intensité du courant électrique, mais son étendue diminue.

La courbe *II* de la fig. 7, p. 72, se rapporte à l'extinction de la luminescence dans l'air en mouvement, tandis que la courbe *III* de la même figure correspond au cas de l'air en repos. L'intensité du courant dans les deux cas était de 20 m*A*. La comparaison de ces deux courbes nous montre que dans le premier cas l'étendue de la luminescence est plus grande et son intensité est beaucoup plus forte.

L'extinction de la luminescence est étroitement liée à la question du transport des molécules déformées dans la décharge et qui revenant en chemin à l'état normal, ou bien en passant dans un autre état, donnent la luminescence observée.

Si nous admettons l'hypothèse de la diffusion des molécules déformées dans la décharge et supposons que le nombre dN des molécules émettant la luminescence soit proportionnel au nombre des molécules présentes, $dN = -\lambda N dt$, alors la distribution de l'intensité de la luminescence dans l'espace à l'état stationnaire est donnée par la formule:

$$I = I_0 e^{-\left(\sqrt{\frac{v^2}{4D^2}+\frac{\lambda}{D}}-\frac{v}{2D}\right)x}$$

où D est le coefficient de diffusion des molécules déformées, v—la vitesse du courant d'air passant par l'appareil et x — la distance de la ligne des décharges.

La discussion de cette formule montre qu'elle rend compte, qualitativement au moins, des résultats d'expérience présentés ici.

Acceptant l'hypothèse de Strutt[1]) il faut admettre que la luminescence retardée dans l'air est une chimiluminescence, ayant pour origine la réaction d'oxydation de NO par O_3, aboutissant à la formation du NO_2.

Cependant, la constatation du fait de l'extinction exponentielle de cette luminescence nous amène à la conclusion que seulement une réaction monomoléculaire peut être responsable de son excitation. Il se peut évidemment que nous avons à faire ici avec deux réactions successives dont une est très rapide, tandis que par la luminescence nous n'observons que la réaction suivante, beaucoup plus lente et qui se passerait comme une réaction monomoléculaire. Ce dernier caractère ne paraît pas confirmer l'hypothèse de Strutt sous sa forme la plus simple.

[1]) V. p. 74, le renvoi 2.

On pourrait encore admettre, que dans le tube à décharge a lieu la formation de NO_2, mais que l'énergie libérée sert à déformer des molécules étrangères de la même espèce et ces dernières en revenant à son état normal, émettraient la luminescence retardée en question.

Remarquons de plus que pour obtenir la luminescence décrite ci-dessus il ne suffit pas de régler convenablement la pression du gaz et l'intensité du courant électrique; il est nécessaire de „former" le tube employé et cela pendant le temps plus ou moins long, selon les conditions du travail. Les opérations de la „formation" consistent à faire passer par le tube d'observation, pendant les décharges dans le tube R_1, un courant d'air en maintenant la pression d'environ 1 mm. de mercure. Les expériences multiples faites dans le but d'éclaircir ce fait étrange ont montré qu'il s'agit ici de former sur les parois du tube un dépôt, dont la nature n'est pas encore bien déterminée. Il est probable que ce soit N_2O_5 à l'état solide — une substance bien instable qui se produit par l'oxydation de NO par O_3 [1]). Si par un chauffage local d'un tube „formé" on vaporise ce dépôt, la luminescence s'arrête à la région chauffée et ne progresse plus loin que peu à peu.

La différence entre le tube „formé" et le tube „non formé" se manifeste non seulement dans l'apparition d'une luminescence relativement stable et dense, mais également dans la marche de l'extinction de la luminescence après l'ouverture du circuit des décharges.

D'après les considérations de M. S. Pieńkowski on devrait voir après l'ouverture du circuit la marche de la limite visible s'effectuer des points plus éloignés vers les points plus proches de la ligne des décharges. Or c'est le contraire qui se produit. Mais on a constaté que cela a lieu seulement dans les tubes „formés". Dans les tubes „non formés", dans lesquels la luminescence retardée est encore très faible et dont la durée est très courte, la marche de l'extinction de la luminescence après l'ouverture du circuit des décharges se produit des points plus éloignés vers les points plus proches de la ligne des décharges; ce fait est donc conforme aux prévisions théoliques, si on admet l'hypothèse de la diffusion des molécules déformées dans le tube à décharge. Il faut supposer que les conditions d'expériences dans les tubes „non formés" sont plus simples.

Dans les tubes „formés" et à l'état stationnaire l'extinction graduelle de la luminescence retardée dans l'air suit la loi exponentielle aussi bien dans le gaz en repos, que dans le gaz en mouvement.

Institut de Physique Expérimentale de l'Université de Varsovie.

Manuscrit reçu le 23 mars 1927.

[1]) V. p. 77, le renvoi 2.

1. Wstęp.

W rurkach próżniowych, zawierających powietrze pod ciśnieniem około 1 mm rtęci, występuje po przerwaniu wyładowań silne świecenie barwy mleczno-zielonej. Jest to świecenie opóźnione, trwające nieraz do 20 sekund po usunięciu wzbudzającego je czynnika, i rozprzestrzeniające się znacznie poza linję wyładowań.

Zjawisku temu, zauważonemu już w połowie XIX-go wieku [1]), poświęcono wiele prac doświadczalnych, z których najważniejszemi są prace Strutta [2]), Comte'a [3]), Königa i Elöda [4]) oraz p. S. Pieńkowskiego [5]).

Zajmującą kwestją jest zanikanie tego świecenia w czasie. Rozważania na ten temat znajdujemy w wymienionej wyżej pracy p. S. Pieńkowskiego. Z prac doświadczalnych tylko jedna, p. W. Bernhardta [6]), dotyczyła tej sprawy. Wyniki jej były trudne do wytłumaczenia i nasuwało się pytanie, czy pomiary te nie odpowiadają jakiemuś szczególnemu przypadkowi, związanemu z bardzo specjalnemi warunkami doświadczenia.

W toku badań widmowych nad świeceniem opóźnionem w powietrzu [7]), uwidocznił się pewien zajmujący fakt, związany właśnie z kwestją jego zanikania. Zauważono mianowicie, że przy prądach wzbudzających rzędu 20—30 mA., rozciągłość świecenia wzdłuż rury, począwszy od linji wyładowań, jest mniejsza, a spadek jego natężenia ze wzrostem odległości od linji wyładowań bardziej nagły, niż dla prądów 10—15 mA. W związku z tem wyłoniła się zajmująca sprawa zbadania zaniku świecenia przy prądach wzbudzających o natężeniach od 5 do 30 mA.

Zastosowano z pewnemi zmianami metodę analogiczną do używanej przez p. Bernhardta, a mianowicie metodę fotograficznego wyznaczania rozkładu natężenia świecenia, zanikającego w przestrzeni.

2. Opis aparatury.

Badane świecenie otrzymywano w szklanej rurze (rys. 1 *a*), składającej się z rurki wyładowań R_1 i rurki obserwacyjnej R_2, o średnicy wewnętrznej 15 mm i długości przeszło 1 m. Aby mieć określone warunki i możność łatwiejszego ujęcia ilościowego zaniku, zachodziła konieczność badania

[1]) Świecenie opóźnione w rurkach próżniowych, zawierających azot z domieszką tlenu obserwował już w r. 1865 A. Morren (Ann. d. Chim. Phys. 293, 1865).

[2]) R. J. Strutt, Proc. Phys. Soc. London *23*, 66 (1910); Proc. Roy. Soc. London *85*, 533 (1911); *86*, 56 (1911); Phys. ZS. *15*, 274 (1914).

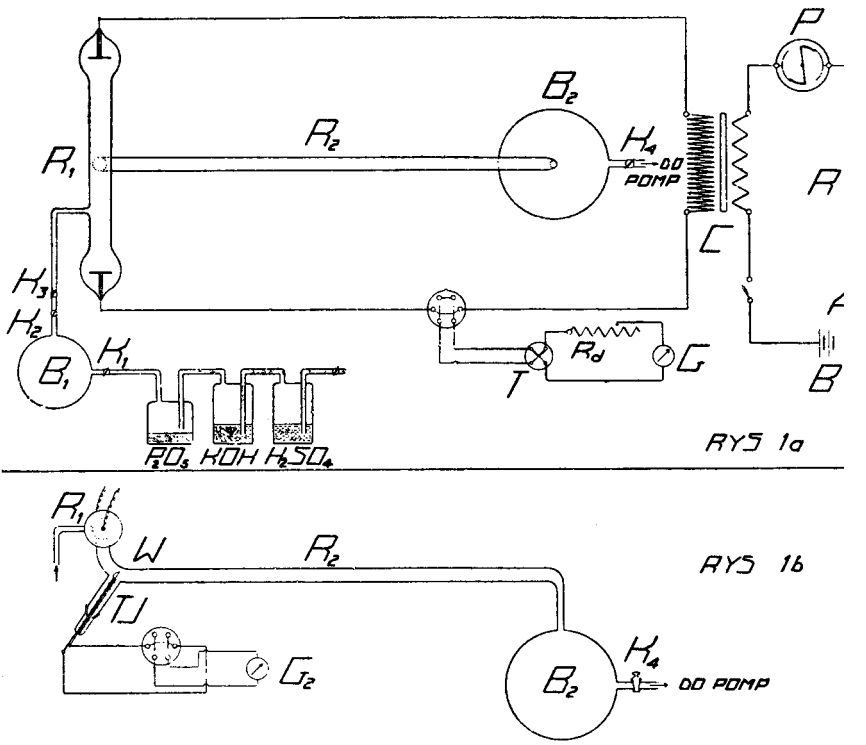
[3]) F. Comte, Phys. ZS. *14*, 74 (1913).

[4]) A. König u. E. Elöd, Phys. ZS. *14*, 165 (1913).

[5]) S. Pieńkowski, Bull. Acad. Pol. d. Sc. et d. L. (Cracovie), Série A, 287 (1924).

[6]) W. Bernhardt, Sprawozdania i Prace P. T. F., *V*, 25 (1925).

[7]) Praca w tym kierunku trwa.



Rys. 1.

świecenia w stanie statecznym, a zatem należało je badać podczas t wyładowań w gazie. To jednak pociągało za sobą możliwość istnienia v obserwacyjnej, głównie w miejscach zbliżonych do rurki wyładowa blasków, pochodzących od silnie świecącej tam zorzy dodatniej. O takie mogłyby w znacznym stopniu zniekształcić otrzymywane r fotograficzną krzywe zaniku świecenia, a więc koniecznem było je u Z licznych sposobów, stosowanych w tym celu, najdogodniejsze okaz użycie rurki obserwacyjnej, kształtu wskazanego na rys. 1 *b*. Ru posiadała dość łagodne (aby nie zniekształcić rozkładu świecenia rury) wygięcie *W*, które osłaniano szczelnie czarnem suknem. Osł też rurkę wyładowań. Jak to wykazały specjalne doświadczenia wid żadne odblaski świecenia zorzy nie dochodziły na odległość kilku cr wygięcie rurki obserwacyjnej.

Powietrze doprowadzano przez płuczkę z wodorotlenkiem oraz suszki z kwasem siarkowym i pięciotlenkiem fosforu (rys. 1 *a*) lonu B_1, a stamtąd do rurki wyładowań, oddzielonej dwoma kurkam niowemi K_2 i K_3, umieszczonemi blisko siebie; urządzenie to po wpuszczać gaz drobnemi „kroplami". Rurka obserwacyjna połączor

z balonem B_2, celem zmniejszenia wahań ciśnienia, powodowanych ewentualnemi zmianami temperatury, powstającemi na skutek wyładowań. Balon ten połączony był z pompami dyfuzyjną Langmuira i rotacyjną olejową. Przy takiem urządzeniu aparatury można było badać świecenie tak przy stałym przepływie powietrza przez rurę, regulując odpowiednio kurki K_2 i K_3, jak również bez przepływu. Stały przepływ powietrza otrzymywano przez ssanie go zapomocą pompy olejowej, podtrzymując w rurce wyładowań ciśnienie około 1 mm rtęci.

Wyładowania wzbudzano prądem z cewki C, z gazowo-rtęciowym przerywaczem P w obwodzie pierwotnym. Natężenie prądu wzbudzającego mierzono przy pomocy termokrzyża T, włączonego w obwód galwanometru G; krzyż ten był cechowany prądem stałym. Pomiary natężenia prądu robiono dwukrotnie na początku i na końcu każdej ekspozycji.

Mierzono również temperaturę gazu w rurce obserwacyjnej, zapomocą termoigły TI, umocowanej na szczelnie dotartych stożkach szklanych i włączonej w obwód galwanometru G_2.

Masa świecącego gazu wypełniała całkowicie rurkę obserwacyjną, a nawet przechodziła do balonu B_2, to znaczy sięgała na odległość 1—1,5 m od linji wyładowań.

Świecący gaz fotografowano na kliszach ortochromatycznych S. E. Lumière-Jougla i Color Platten Westendorpa, używając objektywu Zeissa Tessar F: 4,5.

3. Wykonanie doświadczalne.

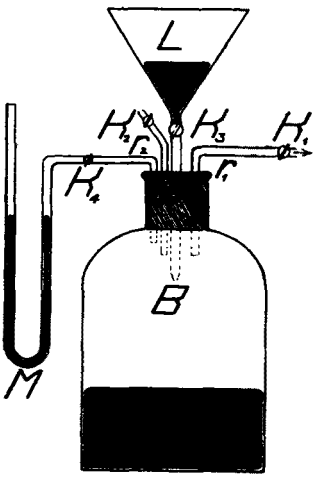
Metoda pracy była następująca:

Świecenie gazu w rurce obserwacyjnej fotografowano, poczem otrzymane klisze fotometrowano wzdłuż osi obrazu rurki.

Z otrzymywanych w ten sposób krzywych przezroczystości kliszy obliczano zaczernienia, odpowiadające poszczególnym punktom rury, a z zaczernień wyznaczano rozkład natężeń świecenia wzdłuż rury, czyli krzywe jego zaniku, opierając się na prawie Schwarzschilda, wyrażającem zależność zaczernienia, w pewnych granicach jego wielkości, od natężenia wywołującego je światła.

Otrzymane wyniki poddawano analizie i wyciągano stąd wnioski o sposobie zanikania świecenia.

Ponieważ pracowano częściowo przy stałym przepływie powietrza przez aparaturę, należało wyznaczyć prędkość przepływającego gazu. Z wielu bardzo sposobów, stosowanych w tym celu, okazało się najlepszem użycie przyrządu, wskazanego na rys. 2. Balon B, objętości 1 litra, łączono rurką r_1 z rurą obserwacyjną; był on prócz tego połączony z mano-



Rys. 2.

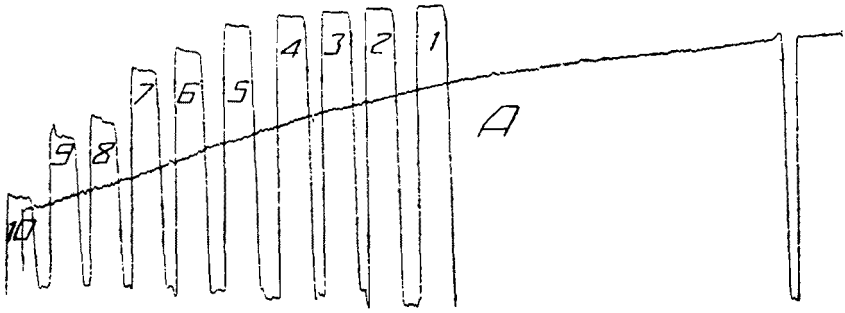
metrem otwartym M i zapomocą rurki r_2 z atmosferą zewnętrzną. Przez lejek L, opatrzony na końcu małym otworkiem, wprowadzano do balonu strumień rtęci. Wszystkie rurki, przechodzące przez korek w szyjce balonu, były uszczelnione zapomocą piceiny, co zapewniało zupełną szczelność przyrządu. Pomiar prędkości gazu wykonywano jak następuje: po ustaleniu przepływu, przy otwartych kurkach K_1 i K_2, zamykano ten ostatni, uchylając jednocześnie K_3. Na miejsce ssanego przez pompę powietrza, wchodziła wówczas do balonu rtęć; baczono przytem pilnie, by ciśnienie powietrza w nim stale równało się ciśnieniu zewnętrznemu. Z objętości rtęci, w ten sposób wprowadzonej do balonu w przeciągu zmierzonego okresu czasu, wnioskowano o objętości powietrza pod ciśnieniem atmosferycznem, które przeszło w tymże czasie przez aparaturę; prosty rachunek dawał objętość powietrza pod ciśnieniem, panującem w rurce. Pomiary, wykonywane dla okresów czasu 1—1,5 godz., dały wartość prędkości przepływu 30 cm/sek. (dokładność 10%).

Doświadczenia przy stałym przepływie powietrza posiadają wiele cech dodatnich. Przedewszystkiem można uniknąć w ten sposób zbyt silnych lokalnych podwyższeń temperatury, które dla prądów silniejszych mogłyby być znaczne; mamy też wtedy możność uzyskania większego natężenia świecenia, oraz znaczniejszego rozciągnięcia go wzdłuż rury.

Fotografje rury przy różnych natężeniach prądu wzbudzającego i stałej prędkości przepływu gazu, wykonywano na jednej kliszy, stosując jednakowy czas i jednakowe warunki ekspozycji (stały przepływ gazu przez rurę, jednakowy czas częściowych naświetlań i przerw, to samo ustawienie aparatu fotograficznego).

Jak już zaznaczono, należało fotografować świecący gaz w stanie statecznym, konieczne było zatem: 1) odsłaniać objektyw aparatu po zamknięciu prądu, a więc ustaleniu się tego stanu statecznego i 2) zasłaniać go jeszcze podczas trwania świecenia, gdyż prąd otwarcia daje jaśniejszą, przebiegającą wyraźnie wzdłuż rury, jak gdyby „falę" silniej świecącego gazu. Ze względu na ogrzewanie się elektrod oraz rurki wyładowań naświetlano kliszę z przerwami: po każdem 15-sekundowem naświetleniu następowała 1-minutowa przerwa. Łączny czas naświetlań wynosił 4 do 10 minut. Przykład tak otrzymywanych fotografij świecącej rury mamy na rysunku 4 str. 70.

Fotografje takie fotometrowano zapomocą mikrofotometru samopisz-ącego M o l l a. Otrzymywano więc krzywe przezroczystości kliszy i na ich podstawie obliczano zaczernienia dla poszczególnych punktów obrazu rury. Przykład takiej krzywej przezroczystości daje rys. 3 (krzywa A). Od za-



Rys. 3.

czernień należało przejść do natężeń świecenia w danych punktach rury.

Jak wiadomo, zależność zaczernienia Z kliszy od natężenia światła padającego I oraz czasu t jego działania jest dana przez wzór S c h w a r z s c h i l d a:

$$Z = \log \frac{I^{\gamma} t^{p}}{A} \qquad (1)$$

gdzie γ, p i A są to stałe dla każdej kliszy, zależne od długości fali światła padającego na nią, oraz od sposobu wywoływania.

Ponieważ dla wszystkich punktów danej kliszy $t = \text{const.}$, możemy wzór (1) napisać w postaci:

$$Z = \gamma \log I + B$$

Jak wiadomo, wzór ten może być stosowany tylko dla wartości zaczernień, zawartych w pewnych granicach, które winny być wyznaczane dla każdej badanej kliszy. W tym celu na każdej kliszy fotografowano „znaczki świetlne" o wiadomym stosunku natężeń. Zmianę ich natężenia otrzymywano przez zmienianie odległości źródła światła od ekranu, przesuwając to źródło na ławie optycznej. Znaczki takie widzimy na rysunku 4 str. 70. Ponieważ wartość stałej γ zależy od długości fali światła padającego, przeto znaczki robiono światłem tej barwy, co światło powietrza, pobudzonego do świecenia opóźnionego. Uzyskiwano to przez użycie odpowiednich filtrów.

Wyznaczenie drogą fotometryczną zaczernień Z tych znaczków, pozwalało wykreślić krzywą zależności Z od log natężenia światła, czyli tak zwaną krzywą czułości kliszy.

Znając zaczernienia kliszy dla poszczególnych punktów rury, odczytywano wprost z krzywej czułości odpowiadające im log natężenia świecenia. Korzystano przytem ze wspomnianej krzywej w całej jej rozciągłości, aby

otrzymać natężenie świecenia opóźnionego w tych miejscach rury, gdzie występuje wyraźne jego gaśnięcie.

Znając log natężenia świecenia w różnych punktach rury, wykreślano krzywe zaniku świecenia. Przykład takich krzywych mamy na rys. 5, str. 71; na osi rzędnych odmierzano log natężenia świecenia, na osi odciętych odległości od linji wyładowań. Widzimy, że są to regularne proste.

W celu porównania krzywych zaniku świecenia w gazie bez stosowania przepływu, z krzywemi otrzymanemi poprzednio, zrobiono szereg fotografij świecącego gazu, nie przepompowując go. Metoda była identyczna z uprzednio opisaną. Czas naświetlania kliszy musiał tu być zwiększony do 10—25 min., na fotografjach otrzymywano przytem słabiej rozwinięte świecenie. Krzywe zaniku okazały się co do kształtu identyczne z otrzymanemi w opisanych wyżej doświadczeniach. Krzywe takie widzimy na rys. 6 i 7 (krzywe *II* i *III*) str. 72.

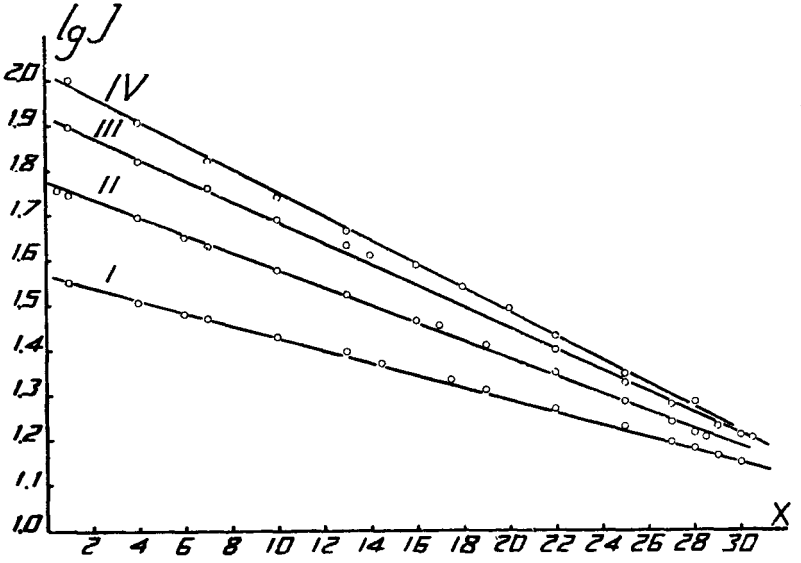
Aby przekonać się, czy przy prądach o wysokiem natężeniu wzrost temperatury gazu w rurze, prawdopodobnie znaczny, nie ma wpływu na zanikanie świecenia, oraz aby móc ewentualnie ten wpływ uwzględnić, wykonano pomiary temperatury gazu przy różnych natężeniach prądu wzbudzającego. Do tego celu służyło termoogniwo *TI* (rys. 1 *b*, str. 66), znajdujące się w obwodzie galwanometru G_2. Galwanometr ten ustawiono na podstawkach bursztynowych, aby uniknąć możliwego spływania prądu rozgałęzionego od rury do ziemi; sprawdzano to zapomocą elektrometru strunowego, dołączonego do poprzedniego obwodu. Zmierzone temperatury sięgały 80° C przy 30 m*A*, począwszy od 30° C przy 8 m*A*. Są to dane dla stałego przepływu gazu przez rurę. Pomiary te wykonywane były zawsze po upływie jednakowego czasu od chwili włączenia prądu wzbudzającego. Ten okres czasu odpowiadał czasowi trwania jednorazowej częściowej ekspozycji.

Rys. 4.

4. Wyniki.

Rysunek 4 przedstawia fotografje świecącej rury dla prądów wzbudzających o różnych natężeniach. Czas naświetlania wynosił 4 min. Z fot. *V* dla prądu o natężeniu 7,9 m*A* widzimy, że rozciągłość świecenia jest znaczna — długość obrazu odpowiada 40 cm na rurze — natężenie zaś jego spada ła-

godnie. Silniejsze natężenie i większą rozciągłość mamy na fotografji *IV* dla 11,1 m*A* i na *III* dla 17,6 m*A*. Z następnej fotografji *II* przy 22 m*A* widać już nieco mniejsze rozciągnięcie świecenia, co występuje bardzo wyraźnie na fotografji *I* odpowiadającej prądowi wzbudzającemu 27 m*A*. Powyżej, na fotografji *VI*, widać na odbitce słaby — na kliszy jednak dobrze widoczny — ślad; jest to fotografja rurki świecącej bez przepływu, eksponowanej w ciągu tego samego czasu, co poprzednie. Natężenie prądu wzbudzającego było tu takież jak dla fotografji *III*. Widać stąd, jak znaczna jest różnica natężeń świecenia przy przepływie i bez.



Rys. 5.

Na rys. 5 widzimy krzywe zaniku świecenia. Na osi odciętych odłożone są odległości od linji wyładowań, na osi rzędnych zaś log natężenia świecenia. Otrzymane punkty wskazują, że zależność między temi wielkościami jest linjowa, to znaczy, iż krzywe zaniku są wykładnicze.

Proste *I*, *II*, *III* i *IV* odpowiadają fotografjom rury świecącej przy różnych natężeniach prądu wzbudzającego, a więc i różnej temperaturze gazu. Dane dotyczące tych krzywych mamy w tabliczce 1.

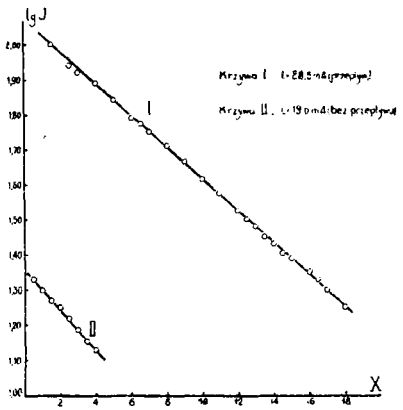
Tablica 1.

Krzywa	Natęż. prądu wzbudz.	Temp. gazu w rurze
I	7,9 m*A*	30° C
II	11,1 m*A*	33° C
III	16,7 m*A*	43° C
IV	22,0 m*A*	56° C

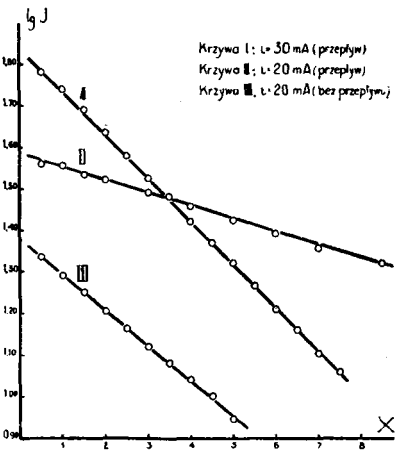
Widać, że wraz ze wzrostem natężenia prądu, wzrasta log natężenia świecenia w pobliżu linji wyładowań, zwiększa się również i kąt nachylenia tych prostych do osi odciętych, co wskazuje, iż przy większych natężeniach prądu wzbudzającego, zanikanie świecenia jest prędsze. Proste *III* i *IV* wykazują wyraźnie, że przy wysokich natężeniach prądu rozciągłość świecenia maleje. Widocznem to było jeszcze wyraźniej z fotografji *I*, rys. 4, str. 70, dla prądu o natężeniu 27 m*A*. Zrobiono więc dla prądów o większych natężeniach szereg fotografij, z których otrzymano krzywe zaniku. Mamy je na rys. 6 i 7. Krzywa *I* rys. 6 odpowiada prądowi 28,5 m*A*; na rys. 7 widzimy krzywą *I*, odpowiadającą 30 m*A*. Krzywa *II* rys. 7 przedstawia zanik świecenia dla 20 m*A*.

Jak widać, nachylenie do osi *X* krzywej *II* jest mniejsze niż *I* (rys. 7); dla *I* mamy zatem znacznie bardziej stromy spadek natężenia świecenia ze wzrostem odległości od linji wyładowań. Z powyższych krzywych nie możemy jednak wyciągnąć wniosków co do stosunku natężeń świecenia w tych dwu przypadkach, ponieważ odpowiadające im fotografje robiono przy zadiafragmowanym w różnym stopniu objektywie aparatu. Postępowano w ten sposób dlatego, że na tejże kliszy robiono fotografje świecenia gazu bez przepływu, co wymagało tak długiego czasu ekspozycji, iż fotografje rury przy przepływie byłyby przeeksponowane.

Z omówionych krzywych widzimy, że dla prądów wzbudzających o natężeniu do 30 m*A*, krzywe zaniku świecenia opóźnionego w powietrzu są wykładnicze.



Rys. 6.



Rys. 7.

Przechodząc do krzywych zaniku świecenia opóźnionego bez przepływu gazu, widzimy, że charakter ich nie ulega zmianie, co wykazują krzywe *II*

i *III* z rys. 6 i 7. Krzywa *II* rys. 6 przedstawia zanik dla prądu o natężeniu 19 m*A*, krzywa zaś *III* rys. 7 odpowiada prądowi 20 m*A*. Z porównania nachyleń do osi *X* krzywych *II* i *III* rys. 7 wynika, że przy tem samem natężeniu prądu wzbudzającego rozciągnięcie świecenia bez przepływu gazu jest znacznie mniejsze.

Zbierając otrzymane wyniki powiemy, że krzywe zaniku świecenia opóźnionego w powietrzu są wykładnicze.

Ze sposobem zanikania świecenia opóźnionego w powietrzu wiąże się ściśle sprawa rozchodzenia się odkształconych cząsteczek, dających badane świecenie. Czynnikiem, powodującym występowanie świecenia, jest wyładowanie elektryczne. Atomy czy cząsteczki gazu zostają na linji wyładowań odkształcone, poczem wracają do stanu normalnego bądź bezpośrednio, bądź przechodząc przez pewne stany pośrednie. Powrót ich do stanu normalnego lub przejście do innego, może być związane bezposrednio albo ubocznie z promieniowaniem w postaci świecenia opóźnionego. Przejścia takie zachodzić mogą poza linją wyładowań; cząsteczki względnie atomy odkształcone wędrują do dalszych części rury i w drodze dają badane świecenie. Wyłania się zatem kwestja sposobu rozchodzenia się tych cząsteczek w gazie od miejsca pobudzenia do miejsc dalszych.

Z rozważań p. S. Pieńkowskiego [1]) w pracy nad świeceniem opóźnionem w powietrzu wynika, że w obecnym stanie naszych wiadomości najbardziej uzasadnioną wydaje się być hipoteza dyfuzji w masie gazu cząsteczek, odkształconych w wyładowaniu. Uogólniamy te rozważania na przypadek rozchodzenia się świecenia w poruszającej się masie gazu.

Jeśli przyjmiemy, iż rozchodzenie się świecenia w przestrzeni jest związane ze zjawiskiem dyfuzji i że liczba cząsteczek, przechodzących z pewnego stanu *a* do innego *b*, dających przy tem świecenie, jest proporcjonalna do ogólnej liczby cząsteczek, znajdujących się w stanie *a*, t. j. $dN = -\lambda N dt$, to przy uwzględnieniu jednoczesnego stałego przepływu gazu przez rurę, otrzymamy równanie:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} - v\frac{\partial N}{\partial x} - \lambda N$$

gdzie N jest to liczba cząsteczek odkształconych w jednostce objętości, λ — współczynnik, określający liczbę cząsteczek, przechodzących w jednostce czasu ze stanu *a* do stanu *b*, D — współczynnik dyfuzji tych cząsteczek, a v — prędkość przepływu gazu; x oznacza odległość od miejsca wyładowań.

Ponieważ doświadczenia nasze odpowiadały stanowi stacznemu gazu, więc równanie powyższe uprości się i otrzymamy:

$$D\frac{d^2N}{dx^2} - v\frac{dN}{dx} - \lambda N = 0$$

[1]) S. Pieńkowski, l. c.

Jako całkę tego równania przy uwzględnieniu warunków początkowych otrzymamy funkcję:

$$N = N_0 e^{-\left(\sqrt{\frac{v^2}{4D^2}+\frac{\lambda}{D}}-\frac{v}{2D}\right)x}$$

N_0 oznacza tu liczbę cząsteczek odkształconych na linji wyładowań, przypadającą na jednostkę objętości. Zakładając, że natężenie świecenia I jest proporcjonalne do liczby N cząsteczek, zanikających skutkiem przejścia ze stanu a do b w jednostce czasu, otrzymamy:

$$I = I_0 e^{-\left(\sqrt{\frac{v^2}{4D^2}+\frac{\lambda}{D}}-\frac{v}{2D}\right)x} \qquad (1)$$

Jeśli przyjmiemy $v = 0$, — przypadek świecenia opóźnionego bez przepływu, — otrzymamy analogicznie do wyników wyżej wspomnianych rozważań p. S. Pieńkowskiego:

$$I = I_0 e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}}x} \qquad (2)$$

Przyjąwszy więc powyższą hipotezę, otrzymujemy wykładniczy zanik świecenia w miarę wzrostu odległości od linji wyładowań.

Z porównania wyrażeń (1) i (2), dochodzimy do wniosku, że przy przepływie zanik świecenia powinien być powolniejszy, świecenie bardziej rozciągnięte, niż bez przepływu. Prócz tego powinno ono być silniejsze w tych warunkach, gdyż prąd przepływającego gazu przenosi cząsteczki odkształcone z rurki wyładowań do rury obserwacyjnej, w której będzie ich wtedy większa liczba.

Dane doświadczalne potwierdzają te wnioski (patrz krzywe *II* i *III* rys. 7).

O ile świecenie wzbudzamy prądem o większem natężeniu, to przedewszystkiem N_0, czyli zagęszczenie cząsteczek odkształconych na linji wyładowań, a co zatem idzie i I_0, jest większe, a następnie skutkiem wzrostu temperatury w rurze zwiększa się współczynnik dyfuzji D [1]). Prócz tego, jeśli przyjmiemy pogląd Strutta [2]), który uważa badane świecenie za luminescencję, towarzyszącą reakcji łączenia się NO i O_3, tworzących się w wyładowaniu, na NO_2, to musimy jeszcze uwzględnić, iż skutkiem wzrostu temperatury zwiększa się i prędkość wspomnianej reakcji. Z powyższego wynika, że przy prądach wzbudzających o coraz wyższych natężeniach powinno występować świecenie o coraz większem natężeniu w pobliżu miejsca wyładowań, ale jednocześnie spadek jego natężenia wzdłuż rury winien być

[1]) Wartość stosunku współczynników dyfuzji dla krańcowych temperatur, z jakiemi miałam do czynienia w tej pracy (80° C i 30° C) wynosi 1,2.

[2]) R. J. Strutt, Phys. ZS. *15*, 274 (1914).

bardziej nagły. I tu mamy zupełną zgodność z doświadczeniem (patrz krzywe z rys. 5).

Jasnem więc jest, że dyfuzyjne ujęcie rozchodzenia się cząsteczek, dających świecenie, ma ugruntowanie doświadczalne.

Opierając się na hipotezie Strutta, która wydaje się z wielu względów przekonywającą [1]), to jest uważając, że źródłem wzbudzenia świecenia jest reakcja między NO i O_3, należałoby przyjąć proporcjonalność liczby zanikających dzięki reakcji cząsteczek do iloczynu stężeń cząsteczek obu rodzajów. Takie założenie doprowadza jednak do bardzo skomplikowanego równania, nie dającego wykładniczego rozwiązania dla krzywych zaniku. Z wielu prób, czynionych przy różnych założeniach, wiążących świecenie z reakcjami chemicznemi, żadna nie dała wyników zgodnych z doświadczeniem. Miałoby to miejsce jedynie w przypadku reakcji jednocząsteczkowej, co nie zgadza się z zapatrywaniami Strutta. Możnaby tu jeszcze przyjąć hipotezę np. dwu kolejno po sobie następujących reakcyj, z których jedna przebiegałaby bardzo szybko, prędkość zaś drugiej, już jednocząsteczkowej, byłaby nieznaczna. W rezultacie dostępną badaniom za pośrednictwem świecenia byłaby tylko ta druga reakcja, a więc otrzymałoby się zanik wykładniczy.

Należy zatem przypuścić, że aczkolwiek świecenie mogłoby być związane z reakcją między NO i O_3, to jednak promieniowałyby jakieś cząsteczki jednego rodzaju, które mogłyby być pobudzone jedynie kosztem tej egzotermicznej reakcji [2]); trzebaby jednak przyjąć, iż pobudzenie to zachodzi w rurce wyładowań. Przy takiem założeniu zanik świecenia byłby wykładniczy.

Omówione wyżej wyniki niniejszej pracy są zgodne z hipotezą p. S. Pieńkowskiego, dotyczącą rozchodzenia się cząsteczek, dających świecenie opóźnione w powietrzu.

5. „Hodowanie" rur.

Doświadczenia powyższe odnosiły się jednak tylko do t. zw. rur „wyhodowanych", w których po kłopotliwych i nieraz długo trwających zabiegach, nazwanych „hodowaniem rury", otrzymywano świecenie o znacznem natężeniu oraz długotrwałem opóźnieniu, dosięgającem w masie gazu 20 sek.

By więc otrzymać silnie rozwinięte świecenie opóźnione, nie wystarcza uregulować odpowiednio ciśnienie i zastosować dość intensywne pobudzenie,

[1]) W niniejszej pracy otrzymano również fakt, przemawiający za koniecznością obecności ozonu dla otrzymania świecenia. Mianowicie w drodze świecenia wyłożono ścianki rurki folją srebrną, co zgasiło je zupełnie, folja zaś pokryła się nalotem tlenku srebra. Wiadomo, że ozon działa silnie utleniająco na srebro, przyczem sam rozpada się. Jeżeli więc zniszczyć ozon, świecenie opóźnione znika.

[2]) Por. H. Kautsky u. O. Neitske, ZS. f. Phys. *31*, 60 (1925).

— należy jak już wspomniano, „wyhodować" rurę. Hodowanie to polega na przepompowywaniu przez nią powietrza przy ciśnieniu, odpowiadającem występowaniu świecenia i na jednoczesnem przepuszczaniu wyładowań. Podczas takiego „hodowania" rury zauważono znaczne zmniejszenie się prędkości rozchodzenia się świecącej masy gazu wzdłuż rurki obserwacyjnej, jeżeli zamykamy obwód rurki wyładowań po dłuższej przerwie przy ciągłym przepływie powietrza. Ze wzrostem czasu przerwy prędkość rozchodzenia się świecenia maleje, co widać wyraźnie z tabliczki 2.

Tablica 2.

Czas przerwy między przepuszczeniem wyładowań w gazie	Czas przejścia przez świecącą masę gazu drogi 52 cm.
10 min.	3,5 sek.
15 min.	9,7 sek.
20 min.	14,7 sek.
25 min.	18,3 sek.
30 min.	27,1 sek.

Czas przejścia określonej drogi w rurze przez masę świecącego gazu mierzono przy pomocy sekundomierza. Prędkość tego ruchu dochodziła do wartości 2 cm/sek. Dawało się zauważyć, że świecenie, które doszło do pewnego miejsca rury, zatrzymywane tam przez nagłe przerwanie wyładowań, po natychmiastowem zamknięciu obwodu dobiega do tegoż miejsca bardzo szybko (prędkości tej nie można zmierzyć posługując się sekundomierzem), poczem dalej rozchodzi się znacznie wolniej. Trudno przypuścić, by wyładowania w rurce przy pierwszym i następnych jej włączeniach różniły się między sobą, powodując tak różne rozchodzenie się świecenia; należy raczej przypuścić, że przy pierwszem włączeniu prądu świecenie jest podczas rozchodzenia się niszczone w pewien sposób, np. niejako pochłaniane przez ścianki rurki. To rozchodzenie się świecenia odbywa się tak, jak gdyby pierwsza jego „fala" musiała „torować" sobie drogę w rurce.

Do wytłumaczenia tego zjawiska nasuwały się dwie hipotezy: 1) gaz, dający świecenie, rozchodząc się w rurce, odkłada coś na jej ściankach — stały przepływ powietrza przez rurę może ten nieznany osad niszczyć, a więc przeszkadzałoby to rozchodzeniu się pierwszej „fali" świecenia — i 2) gaz świecący musi zniszczyć jakieś warstewki zaabsorbowane na ściankach rury podczas przepływu powietrza przez nią.

Aby rozstrzygnąć, która z tych hipotez jest słuszna, wykonano następujące doświadczenie:

Na rurkę obserwacyjną nawinięto piecyk z drutu nikielinowego, owiniętego sznurkiem azbestowym. Dla zorjentowania się co do temperatury,

jaką pozwala on osiągnąć, otworzono okienko rurki obserwacyjnej [1]) i wsunięto doń termometr w tem miejscu, gdzie nawinięty był piecyk. Okazało się, że przy natężeniu prądu w nim, wynoszącem 3,5 amp., temperatura ścianek rurki dosięgała 290° C. Z wykonanych doświadczeń wynika, że im dłużej oraz im do wyższej temperatury ogrzewamy ścianki rurki, tem prędkość rozchodzenia się świecenia maleje — trudniej mu „utorować" sobie drogę. Ilustruje to tablica 3.

Tablica 3.

Natęż. prądu w p ecyku	Przybliżona temp. ścianek	Czas ogrzewania rury	Czas przerwy	Czas rozejścia się świecenia na określoną odległość
0 amp.	temp. pokoj.	0 min.	30 min.	1,8 sek.
3,5 amp.	290° C	5 min.	25 min.	5,3 sek.
3,5 amp.	290° C	10 min.	20 min.	8,6 sek.
3,5 amp.	290° C	15 min.	15 min.	9,5 sek.
3,5 amp.	290° C	20 min.	10 min.	10,4 sek.
3,5 amp.	temp. pokoj.	0 min.	30 min.	1,9 sek.

Z powyższego wynika słuszność hipotezy pierwszej, to znaczy, że „hodowanie" rurki jest związane z pokrywaniem się jej ścianek warstewką bliżej jeszcze nieznanej substancji.

Charakter tego czynnika nie został określony. Można powiedzieć tylko, iż nie są to cząsteczki NO_2, gdyż rurę wypełnioną tym gazem, trzeba również „hodować", by otrzymać w niej świecenie opóźnione. Jest ono w takiej rurze identyczne z występującem w powietrzu, co stwierdzono badaniami widmowemi. Trudno również przypuścić, iż wchodzą tu w grę cząsteczki NO lub O_3, tak bardzo nietrwałe w warunkach naszych doświadczeń. Najprawdopodobniejszem wydaje się być osadzanie się na ściankach rury stałego N_2O_5 [2]), który powstaje jako produkt utlenienia NO ozonem. Jest to związek bardzo nietrwały, rozkładający się samorzutnie i stały tylko w temperaturach poniżej 30° C. Nadmiar ozonu powoduje jego rozkład na niższe tlenki, przedewszystkiem NO. Jest więc rzeczą bardzo możliwą, że „hodowanie" rury polega na pokrywaniu się jej ścianek warstewką stałego N_2O_5.

Za hipotezą pokrywania się ścianek rury nalotem przemawia również fakt, iż zwiększenie w niej powierzchni szkła wpływa ujemnie na przebieg „hodowania" i na prędkość rozchodzenia się pierwszej fali świecenia. Doświadczenie, które to wykazało, wykonano w sposób następujący: użyto

[1]) Rurka w tym przypadku posiadała nieco inny kształt niż poprzednio; zaopatrzona była bowiem na końcu w płasko-równoległe okienko szklane, umocowane piceiną.

[2]) E. Fonrobert, Das Ozon. 1916, str. 100.

rury, składającej się z dwu części: *a* i *b*. Część *b* była to dość szeroka rurka, w której ułożone były bardzo wąskie i cienkościenne rurki. Rurka *a* miała przekrój znacznie mniejszy. Powierzchnia przekroju wewnętrznego tej części *a* była równa powierzchni wolnej dla przepływającego gazu w części *b*. Okazało się, że część *b* wymagała znacznie dłużej trwającego „hodowania" oraz że prędkość rozchodzenia się świecącego gazu przy pierwszem zamknięciu prądu po dłuższej przerwie jest znacznie mniejsza w części *b*, niż w *a*.

„Hodowanie" rurki jest zjawiskiem bardzo zagadkowem i trudnem do wytłumaczenia, tak doświadczalnie, jak i teoretycznie. Prawdopodobną wydaje się tu hipoteza tworzenia się nalotu stałego N_2O_5.

Różnica między rurką „wyhodowaną" i „niewyhodowaną" przejawia się wyraźnie w przebiegu gaśnięcia świecenia po przerwaniu wyładowań. Według rozważań p. S. Pieńkowskiego powinno ono zaczynać się w miejscach odległych od linji wyładowań i posuwać ku położonym bliżej. Tymczasem doświadczenie daje gaśnięcie w kierunku przeciwnym; dzieje się to jednak tylko w rurze „wyhodowanej". W rurze „niewyhodowanej", w której zaczyna się dopiero pojawiać świecenie, zwykle o bardzo słabem natężeniu i krótkotrwałem opóźnieniu[1]), gaśnięcie po otwarciu prądu odbywa się zgodnie z hipotezą dyfundujących cząsteczek, to znaczy od miejsc położonych dalej od linji wyładowań ku miejscom bliższym.

6. Streszczenie wyników.

a) Opracowano metodę, pozwalającą wyznaczać zmiany natężenia świecenia opóźnionego w prądzie wzbudzanego gazu, w zależności od odległości od linji wyładowań.

b) Wykazano, iż natężenie świecenia opóźnionego w powietrzu jest wykładniczą funkcją odległości od linji wyładowań, tak w prądzie przepływającego gazu, jak i w gazie w spoczynku, co przy założeniu, że odpowiedzialna za wzbudzenie świecenia jest pewna reakcja chemiczna, może być wyjaśnione jedynie reakcją jednocząsteczkową.

c) Konieczność „hodowania" rury jest związana z wytwarzaniem się na jej ściankach warstewki nalotu; prawdopodobnie wchodzi tu w grę stały N_2O_5.

Praca niniejsza została wykonana w Zakładzie Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego.

Kierownikowi Zakładu, Panu Profesorowi Dr. Stefanowi Pieńkowskiemu, który z wielką życzliwością udzielał mi swych wysoce cennych rad i wskazówek, składam serdeczne podziękowanie.

Zakład Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego.

Rękopis otrzymany dn. 23 marca 1927.

[1]) Czas ten odpowiada czasowi opóźnienia, wyznaczonemu przez p. S. Pieńkowskiego, l. c., dla świecenia występującego w rurkach próżniowych i w aureoli iskry.