

S. Kalandyk.

Jonizacja przy eksplozjach stałych materiałów wybuchowych.¹⁾

Sur l'ionisation pendant les explosions des substances solides.²⁾

S o m m a i r e.

Le présent travail a pour but l'étude de l'ionisation qui se produit au cours des explosions des substances explosives solides. Sur les trois modes de combustion: détonation, explosion et déflagration, les phénomènes des explosions et des déflagrations ont été observés. Les premières expériences ont eu pour but de déterminer le degré d'activité de diverses substances. On a étudié les matériaux suivants: picrates de *K*, *Cu*, *Fe* et *Ca*, l'héxylate de potassium et la nitro-cellulose; les expériences ont été effectuées au moyen d'un condensateur cylindrique présenté dans la figure 1. La charge totale a été mesurée, telle qu'elle s'accumule sur l'électrode intérieure au cours des explosions. L'explosion de la substance étudiée a été provoquée par le chauffage approprié au moyen d'un brûleur à gaz. Au tableau 1 figurent les charges obtenues pendant les explosions de 10 mgr de différentes substances, au potentiel de—150 volts sur l'armature extérieure. Dans ce même tableau figurent également les nombres analogues qui se rapportent aux explosions de 10 mgr de gaz oxydrique et de mélange de $2\text{CO} + \text{O}_2$, tirés d'un travail précédent de l'auteur.

Il résulte de ces données que les charges observées au cours des explosions des substances solides sont du même ordre de grandeur que celles produites par les mélanges gazeux. De la comparaison de ces valeurs pour

¹⁾ Praca przedstawiona na VI Zjeździe Fizyków Polskich w Warszawie, we wrześniu 1932.

²⁾ Travail présenté au VI-e Congrès des Physiciens Polonais à Varsovie, en septembre. 1932.

les différents picrates il résulte que l'ionisation ne dépend pas de la valeur du potentiel d'ionisation du métal. L'observation subjective démontre que la charge augmente avec l'intensité de l'explosion de la substance étudiée. La dépendance de la charge du voltage appliqué et de la direction du champ est donnée au tableau 2. La charge négative est environ deux fois plus grande que la charge positive. Lors de l'augmentation de la différence de potentiel, la charge augmente plus rapidement que le voltage appliqué.

La dépendance des charges obtenues des différences de potentiel a été étudiée avec la plus grande précision dans le cas de la nitro-cellulose (10 mgr) dans un condensateur plat mis en circuit de la manière figurée au dessin 2. Les charges obtenues avec les différents potentiels et les distances différentes entre les plaques du condensateur sont données au tableau 3. Afin de faciliter l'orientation, les charges sont recomptées pour l'intensité du champ de $1 \frac{\text{volt}}{\text{cm}}$ et mises dans le tableau 4. Le dessin 3 représente la charge en fonction du voltage pour la distance des plaques de 3 cm. L'augmentation rapide de la charge avec le voltage qui n'apparaît pas dans les explosions gazeuses, est due probablement au fait que la flamme des substances solides présente une forme irrégulière. A cause de la repartition inégale de la combustion entre les plaques, des différences d'intensité du champ électrique se produisent dans les diverses parties de la flamme. Les ions soumis à l'action des petites différences de potentiel peuvent se recombinaer et sont, pour cette cause, perdus pour les mesures; par contre, les ions se trouvant dans les régions du champ intense ont plus des chances d'arriver aux plaques.

Afin de déterminer le parcours du courant en fonction du temps, des expériences ont été effectuées au moyen d'un galvanomètre à corde. Les courbes obtenues pour les explosions et les déflagrations de la nitro-cellulose sont présentées dans les dessins 4 et 5. Les charges totales accumulées pendant les explosions et les déflagrations, sont identiques. La durée de la combustion est indépendante de la différence de potentiel. La charge obtenue pendant les déflagrations dépend de la disposition de la nitrocellulose sur la plaque du condensateur.

Toutes les mesures décrites ci-dessus ont été effectuées dans un espace ouvert, sous la pression atmosphérique.

Une série d'expériences a eu pour but l'examen de l'ionisation pendant les explosions se produisant dans des conditions rapprochées de celles fournies par les armes à feu. On a étudié les explosions de la poudre noire dans une chambre d'ionisation dont la forme rappelle celle d'un pistolet (dessins 6 et 7) *a* et *b* représentent deux plaques de laiton placées entre les deux moitiés d'un cylindre d'ébonite creusé et partagé en deux.

L'ouverture est recouverte d'un bout par un couvercle de metal *P* terminé par la cheminée *K* du pistolet et séparé des électrodes *a* et *b* par une plaque de mica. Au fond de la chambre a été placée la charge de poudre noire (0,3 gr), recouverte d'un tampon d'ouate; sur la cheminée était fixée une amorce fulminante. L'explosion a été provoquée par la percussion d'un marteau sur l'amorce. Les connexions électriques sont figurées dans la figure 8. La courbe caractéristique de l'explosion obtenue au moyen d'un galvanomètre à corde est représentée au dessin 9. Les calculs ont démontré que la charge accumulée dans les conditions décrites ci-dessus est environ dix fois plus grande que dans l'explosion de la nitro-cellulose, en la calculant pour la même masse et le même potentiel. La flamme qui s'échappe de la chambre montre une conductibilité négligeable en comparaison avec la conductibilité des gaz à l'intérieur de la chambre d'ionisation. Pour la comparaison on a représenté sur le dessin 10 la courbe obtenue par la déflagration de la poudre noire dans le condensateur plat en l'allumant au brûleur à gaz. La charge obtenue dans ces conditions est comparable à celle que donne la nitro-cellulose pendant l'explosion ou la combustion.

Institut de Physique Médicale de l'Université de Poznań.

Manuscrit reçu le 30 septembre 1932.

§ 1. Wstęp.

Zjawiska jonizacji, zachodzące podczas eksplozji były badane już w ubiegłym stuleciu¹⁾. W roku 1893 de H e m p t i n n e, eksplodując w szklanej rurce mieszaninę chloru z wodorem, tlenku węgla z tlenem oraz gaz piorunujący, próbował ustalić zależność pomiędzy jonizacją, a ilością reagujących cząsteczek. Jak wiadomo, ilość jonów wypada niewspółmiernie mniejsza od ilości reagujących cząsteczek. W mej pracy nad eksplozjami mieszanin gazowych²⁾ ustaliłem wykładniczą zależność pomiędzy jonizacją a bezwzględną temperaturą wybuchu, traktując jonizację, obserwowaną przy eksplozji, jako szczególny przypadek termicznej jonizacji gazów. Ten pogląd na istotę jonizacji przy eksplozjach został przyjęty w nowszych pracach nad tem zjawiskiem³⁾.

¹⁾ Zestawienie dawniejszej literatury znajduje się w pracy autora „Elektriczyskija swojstwa nagrietych gazow i parow“, Kijów 1917. Wykaz nowych prac można znaleźć w artykule Kirkby: Ionisation in gaseous explosions, J. Chem. Soc. Apr. 1931, p. 878.

²⁾ l. c., str. 27.

³⁾ Saunders & Garner, Trans. Faraday Soc. XXII, 281, 1926.

Badania nad eksplozjami były prowadzone dotychczas wyłącznie z mieszaninami gazowymi; w niniejszej pracy podano wyniki obserwacji nad jonizacją płomieni, powstających przy eksplozjach stałych materiałów wybuchowych.

Zależnie od szybkości reakcji kwalifikujemy spalanie materiału wybuchowego jako wyfukanie (powolne spalanie), eksplozję lub detonację. Przy wyfukaniu spalanie materiału odbywa się z szybkością od kilku do kilkudziesięciu $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$, szybkość rozchodzenia się detonacji do-

chodzi do 9 000 $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$. Pośrednie wartości posiada szybkość eksplozji.

Spalanie tej samej substancji może przybrać jedną z wymienionych postaci w zależności od wielu czynników, w pierwszym rzędzie jednak decyduje o spalaniu sposób pobudzania do wybuchu. Opisane dalej doświadczenia odnoszą się do eksplozji i wyfukania. Detonacje nie mogły być skuteczne w tych warunkach laboratoryjnych, jakimi dysponowałem. Jako substancje wybuchowe były użyte rozmaite związki kwasu pikrynowego, bawełna strzelnicza oraz prochy myśliwskie: czarny i bezdymny.

§ 2. Doświadczenia w przestrzeni otwartej. Zależność jonizacji od składu materiału wybuchowego.

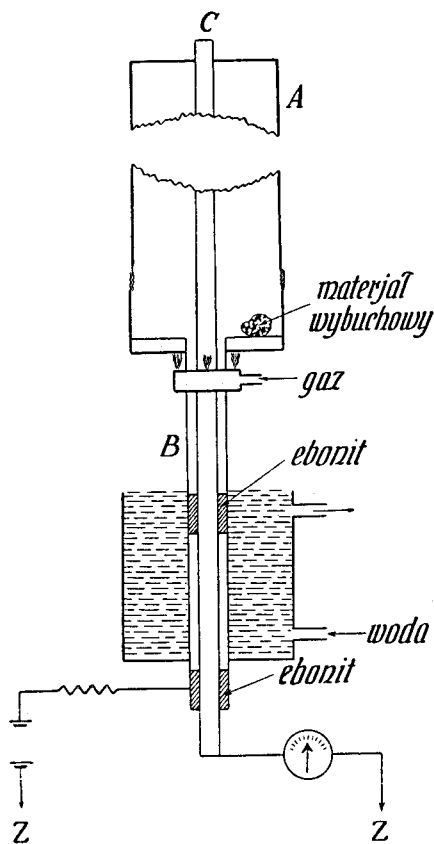
Pierwsze pomiary posiadały charakter orientacyjny i miały na celu wypróbowanie rozmaitych materiałów dla ustalenia ich aktywności. W tym kierunku zostały zbadane pikryniany potasu, miedzi, żelaza i wapnia, heksylan potasu oraz bawełna strzelnicza. Związki kwasu pikrynowego i heksylan były spreparowane w zakładzie przez Dra Tucholskiego metodą, opisaną w jego publikacji¹⁾. Bawełnę strzelniczą otrzymano z miejscowych warsztatów amunicyjnych. Zjawiska jonizacji obserwowano podczas eksplozji, do których związki doprowadzano przez ostrożne podgrzewanie na palniku aż do temperatury wybuchu.

Przyrząd stosowany do doświadczeń (rys. 1), składał się z mosiężnej rurki *A* o długości 25,5 cm i średnicy 3,3 cm, połączonej w dolnej części z węższą mosiężną rurką *B*. Wewnątrz rurki *AB* umieszczony był na ebonitowych korkach mosiężny pręt *C* o grubości 4 mm. Rurka *A* wraz z prętem *C* tworzyły cylindryczny kondensator. Substancję badaną umieszczano na krążku, łączącym rurkę *A* z *B*; krążek ten ogrzewano

¹⁾ Tucholski, Bull. de l'Académie Pol. (A), 76, 1931.

pierścieniowym palniczkiem gazowym o określonym dopływie gazu. Struga wody bieżącej oziębiała dolną część rurki *B* i nie dopuszczała do uszkodzenia izolacji. Połączenia elektryczne są zrozumiałe z rysunku. Mierzono całkowity nabój, odrzucony podczas eksplozji do elektrody wewnętrznej. Do pomiarów stosowano balistyczny galwanometr *Hartmanna* i *Brauna*, lub też elektrometr kwadrantowy w połączeniu z wzorcową pojemnością. Roztarty poprzednio w moździerzu pikrynian ogrzewany był około 1 min. słabym płomyczkiem dla usunięcia wody krystalizacyjnej, poczem intensywność ogrzewania zwiększała się i po upływie kilkudziesięciu sekund następowała eksplozja. Wysokość rurki *A* była dobrana w ten sposób, że płomień nie ukazywał się nad jej otworem.

W opisanych warunkach, dla 10 mgr substancji i przy różnicy potencjałów 150 V otrzymano następujące naboje (ujemny biegun na zewnętrznej okładce):



Rys. 1.

Tablica 1.

Heksylan potasu	2×10^{-6} Coul.
Pikrynian potasu	2,4
„ miedzi	8
Bawełna strzelnicza	15
Pikrynian żelaza	25
„ wapnia	54
$2 H_2 + O_2$	około 300
$2 CO + O_2$	około 3

Można było przypuszczać, że obecność potasu — metalu o niskim potencjale jonizacyjnym — spowoduje wybitną jonizację; przegląd po-

wyższych liczb obala jednak to przypuszczenie. Największą jonizację wytwarza pikrynian wapnia. Stwierdzić można natomiast, na podstawie subiektywnej obserwacji eksplozji, że te związki, które wybuchają energiczniej, wytwarzają również większą jonizację. Gdyby temperatury wybuchu wyszczególnionych materiałów były bliżej znane, moglibyśmy prawdopodobnie wykazać, że jonizacja podczas eksplozji uzależniona jest w pierwszym rzędzie od temperatury wybuchu danej substancji. W końcu tablicy podane są dla porównania naboje, otrzymane przy eksplozji około 10 mgr gazu piorunującego oraz mieszaniny $2CO + O_2$ w zamkniętej przestrzeni pod napięciem + 200 V¹⁾). Wielkość tych nabożów jest współmierna z wielkością nabożów, powstających przy eksplozjach stałych materiałów.

Podobnie, jak to obserwuje się w płomieniach, gdy umieścimy w nich elektrody o niejednakowych rozmiarach, nabój ujemny, zgromadzony na przecie C, jest około dwukrotnie większy od dodatniego.

Przy zwiększeniu przyłożonego napięcia nabój nie zachowuje swej wartości, lecz wzrasta wraz z napięciem niejednakowo dla nabożów dodatnich i ujemnych, jak to można osądzić z następujących liczb, odnoszących się do 10 mgr bawełny strzelniczej:

T a b l i c a 2.

Napięcie ujemne			
-10	-50	-150	-300 V
4,8	36	150	450×10^{-7} Coul.
Napięcie dodatnie			
+10	+50	+150	+300 V
3	20	105	200×10^{-7} Coul.

Naboje ujemne wzrastają prędzej od dodatnich. Eksplozje gazowe okazują²⁾ nieco odmienną zależność pomiędzy napięciem, a nabojem. Obserwujemy tam proporcjonalność pomiędzy nabojem a natężeniem pola w bardzo szerokim zakresie, poczem zaczyna się jonizacja od zderzenia, przechodząca przy dostatecznie wysokich potencjałach w łuk Volty.

Korzystając z tej okoliczności, że bawełna strzelnicza ulega reakcji przy eksplozji bez udziału tlenu powietrza, próbowałem eksplodować ją

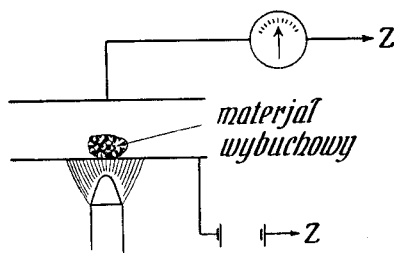
¹⁾ K a l a n d y k, l. c., str. 36.

²⁾ K a l a n d y k, l. c., str. 13.

w próżniowym kondensatorze, sądząc, że w rozrzedzonej przestrzeni łatwiej może wytworzyć się prąd nasycenia. Pomiaru wykazały, że założenie to było mylne. Brak powietrza zmienia całkowicie charakter eksplozji i naboje, uzyskane w próżni, są około 200 razy mniejsze, niż w powietrzu. Doświadczenia w próżni były wykonane z cylindrycznym kondensatorem, ustawionym poziomo. Substancję wybuchową umieszczano w środkowej części i ogrzewano z zewnątrz palnikiem. Nieznaczoną jonizację w próżni należy tłumaczyć sobie gwałtownym rozprężaniem się gazów spalinowych, które powoduje obniżenie ich temperatury.

§ 3. Zależność naboju od napięcia.

W celu ustalenia ściślejszej zależności pomiędzy nabojem, a przyłożoną różnicą potencjałów, zostały wypróbowane rozmaite typy kondensatorów, w których odbywało się spalanie substancji wybuchowej. Najbardziej dogodnym okazał się kondensator płaski, składający się z dwóch tarcz mosiężnych o średnicy 20 cm, ustawionych poziomo na określonej odległości od siebie. Badania były wykonane prawie wyłącznie nad bawełną strzelniczą ze względu na łatwość manipulowania z tą substancją oraz na lepszą powtarzalność pomiarów. Związek wybuchowy umieszczano w środku dolnej płyty i doprowadzano do eksplozji przez podgrzewanie go palnikiem (rys. 2). Pomiaru wykonywano



Rys. 2.

przy odległościach między płytami 1; 1,5; 2 i 3 cm. Przy mniejszych odległościach efekt był bardzo słaby wskutek silnego oziębiania płomienia przez metalowe płyty. Również odległości większe od 3 cm nie były stosowane, gdyż prawdopodobnie płomień w tych warunkach tylko częściowo dosięgał do górnej płyty kondensatora i naboje również wypadły niewspółmiernie małe.

Tablica 3.

Różn. potencjałów	4	10	50	150 woltów
Odległość pomiędzy płytami {				
1 cm		6,3	39	$153 \cdot 10^{-6}$ Coul.
1,5	1,3	4	29	157
2		3,2	21	130
3		2	12,6	70

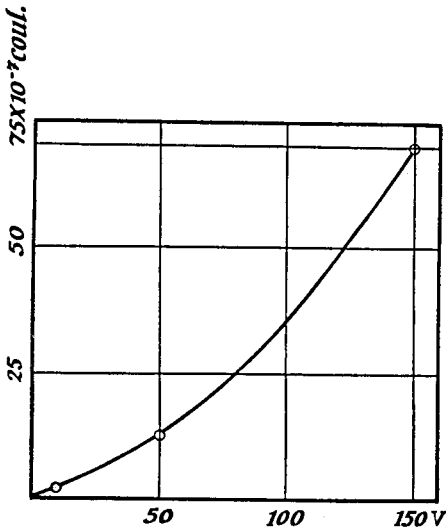
Wyniki, otrzymane przy eksplozjach 10 mgr bawelny przy różnych napięciach i odległościach, zestawione są w tablicy 3.

Pomiary dla odległości 1 i 2 cm były wykonane tylko dla naboju ujemnych, a dla odległości 1, 5 i 3 cm dla dodatnich i ujemnych, które w tych warunkach są jednakowe ze względu na symetrię kondensatora. Każdy pomiar powtarzany był 3—5 razy.

Przy przechodzeniu prądu przez płomień np. w palniku Bunsena niemal całkowity skok potencjału gromadzi się przy katodzie i odległość pomiędzy elektrodami nie wywiera wpływu na natężenie prądu. Przy zmianie różnicy potencjałów obserwujemy w płomieniu przebieg prądu ze słabo zaznaczonym stadjum nasycenia. Inaczej w tym względzie zachowują się eksplozje. Jeżeli odniesiemy naboje, podane w tabl. 3, do pola: $\tau \frac{\text{wolt}}{\text{cm}}$, to otrzymamy następujące liczby:

Tablica 4.

Różn. potencjałów	10	50	150 woltów
1 cm	0,63	0,8	1×10^{-6} Coul.
1,5	0,6	0,87	1,57
2	0,64	0,84	1,7
3	0,6	0,75	1,4



Rys. 3.

Czyli, zachowując niezmienną różnicę potencjałów, a zmieniając odległość między płytami, otrzymujemy prawie we wszystkich przypadkach proporcjonalność pomiędzy nabojem, a natężeniem pola. Jednakże, jeżeli zachowamy niezmienną odległość, a będziemy zwiększali różnicę potencjałów, to wyższym napięciom odpowiada niewspółmiernie większa ilość zgromadzonej elektryczności. Z tych dwóch zależności pomiędzy nabojem a natężeniem pola, prawdopodobnie druga lepiej odzwierciedla charakter zjawiska (rys. 3 dla $d = 3$ cm), gdyż niewątpliwie wzajemne przesuwanie

plyt kondensatora zmienia kształt i temperaturę płomienia przy eksplozji. W płaskim kondensatorze otrzymujemy więc taki sam przebieg zjawiska, jak w cylindrycznym: nabój przy zwiększaniu różnicy potencjałów wzrasta prędzej, niż wynikałoby to z prawa proporcjonalności. Trudno upatrywać przyczynę tego zjawiska w jonizacji od zderzenia, gdyż w płomieniach obserwujemy ją dopiero przy znacznie wyższych napięciach. Przyczyny zjawiska szukać należy prawdopodobnie w specyficznych właściwościach eksplozji. Płomień przy wybuchu ma kształt nieprawidłowy, wskutek tego w rozmaitych częściach płomienia panuje niejednakowe natężenie pola. W części środkowej, gdzie płomień całkowicie wypełnia przestrzeń między płytami, natężenie jest największe. U brzegów kondensatora, gdzie rozgrzane gazy tylko częściowo wypełniają przestrzeń między płytami, na płomień przypada minimalny ułamek całkowitej różnicy potencjałów. Jony, znajdujące się pod słabym napięciem, ulegają rekombinacji, względnie zamieniają się na duże jony i są dla pomiaru stracone. Im wyższa jest przyłożona różnica potencjałów, tym większe są szanse na zgromadzenie tych jonów na elektrodach.

Zależność pomiędzy nabojem a różnicą potencjałów była badana również dla 20 mgr bawelny, przyczem otrzymano następujące wyniki (średnie z pomiarów w dwóch kierunkach, $d = 3$ cm)

potencjał:	10	50	150 V
nabój:	3,6	30	$170 \cdot 10^{-7}$ coul.,

lub też w przeliczeniu na natężenie pola i $\frac{\text{volt}}{\text{cm}}$:

1,1	1,8	$3,4 \cdot 10^{-7}$ coul.
-----	-----	---------------------------

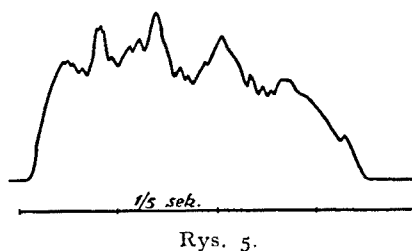
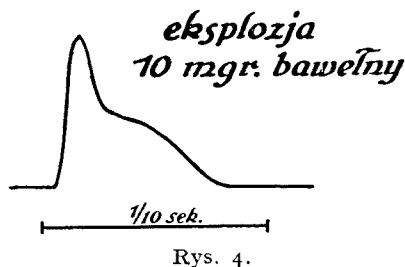
Porównyując te liczby z tablicą 4, widzimy, że nabój jest prawie dokładnie proporcjonalny do masy eksplodującego ciała i wykazuje taką samą zależność od napięcia, jak dla 10 mgr.

Oprócz bawelny strzelniczej w płaskim kondensatorze badano pikrynian żelaza. Otrzymane wyniki nie różnią się jednak od tych, które uzyskano w przypadkach cylindrycznego kondensatora.

§ 4. Badanie eksplozji i powolnych spalań bawelny strzelniczej przy pomocy galwanometru strunowego.

Galwanometr strunowy (system Hutha) zaopatrzony był w nić platynową o średnicy około 0,002 mm, którą nastawiano na aperiodyczne wychylenie przez odpowiednie uregulowanie napięcia. Bawelnę

strzelniczą badano w kondensatorze płaskim. Oznaczany był czasowy przebieg prądu przy eksplozjach i wyfukaniach. Bawełnę pobudzano do wyfukania przez podpalenie malutkim płomyczkiem gazowym, wytworzonym na końcu szklanej rureczki. Palniczek ten wprowadzano bezpośrednio pomiędzy płyty kondensatora. Palnik pod kondensatorem był oczywiście w tym wypadku nieczynny. Wychylenia nici połączonej równoległe z odpowiednim upustem fotografowano na taśmie fotograficznej, na której jednocześnie był zaznaczany czas przy pomocy chronoskopu J a q u e t a (co $\frac{1}{5}$ sek.). Wszystkie połączenia były wykonane w osłonie elektrostatycznej.



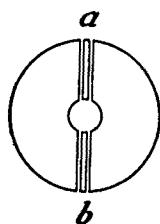
Typowe krzywe eksplozji i wyfukania wyobrażone są na rys. 4 i 5. Eksplozję cechuje gwałtowny skok prądu do pewnego maximum, po osiągnięciu którego prąd opada w wolniejszym tempie do zera. Zanikanie prądu ma widocznie bardziej zawiły charakter, niż jego wzrost, gdyż prawe ramię krzywej wykazuje wyraźne zagięcie. W pierwszej chwili prąd maleje raptownie, potem jednak opada powoli. Przechodzenie prądu podczas eksplozji trwa około 0,1 sek. Jest rzeczą możliwą, iż zagięcie krzywej spowodowane jest tem, że bawełna strzelnicza należy do dwupłomiennych materiałów wybuchowych.

Proces wyfukania jest niewspółmiernie dłuższy od eksplozji i, pomijając niewielkie wahania, daje prąd w przybliżeniu o stałym natężeniu. Całkowity nabój, wywiązany przy wyfukaniu, jest tego samego rzędu, co nabój otrzymany przy eksplozji (różnica wynosi około 30 %). Dokładne porównanie tych dwóch zjawisk jest utrudnione tem, że nabój wywiązany przy wyfukaniu zależy od rozmieszczenia bawełny na płycie. Przy luźnym rozmieszczeniu bawełna spala się prędzej, lecz daje mniejszy nabój z powodu oziębiania się o podstawę. Krzywe wyfukania, obserwowane przy różnych napięciach, wykazują, że czas spalania (dla stosowanych mas około $\frac{1}{2}$ sek.) jest niezależny od przyłożonej różnicy potencjałów.

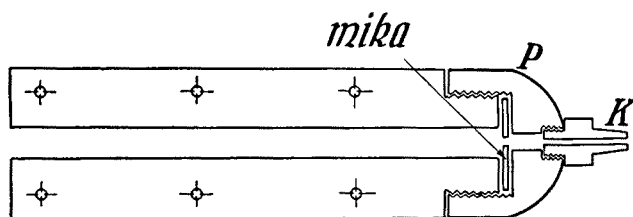
§ 5. Badania nad eksplozjami prochu czarnego w przestrzeni zamkniętej.

Wszystkie opisane dotychczas badania odnoszą się do spalania materiału wybuchowego w przestrzeni otwartej. Dalsze badania nad eksplozjami były prowadzone w zamkniętej przestrzeni, w przybliżeniu w tych warunkach, jakie mamy w broni palnej. Jako materiał do badań użyty był czarny proch myśliwski (fabryki „Lignoza“ Nr. 4), ze względu na jego znikomą małe przewodnictwo elektryczne.

W broni palnej eksplozja materiału wybuchowego zachodzi pod działaniem kapsla w przestrzeni początkowo całkowicie zamkniętej. Pod ciśnieniem wytwarzających się gazów następuje wyrzucenie pocisku, przyczem prężność gazów obniża się do atmosferycznej. Aby zbliżyć się do tych warunków, należało skonstruować komorę, w której spalanie



Rys. 6.



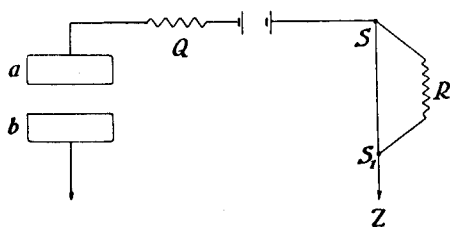
Rys. 7.

odbywałoby się w opisany sposób, oraz która byłaby zaopatrzona w elektrody do pomiarów przewodnictwa elektrycznego rozżarzonych gazów. Umieszczenie materiału wybuchowego w zamkniętej przestrzeni jest warunkiem koniecznym dla eksplozji, gdyż w przestrzeni otwartej proch czarny przy podpaleniu ulega tylko powolnemu spalaniu. Komora, stosowana do opisywanych badań, była zbudowana w następujący sposób. Klocek ebonitowy o długości 10 cm i średnicy 3 cm był przewiercony świdrem o średnicy 5 mm i rozcięty wzdłuż osi grubą piłą na dwie połowy. Na miejsce usuniętej warstwy ebonitu były umieszczone dwie podłużne płytki mosiężne *a* i *b* o grubości 2 mm, poczem klocek został skrecony wraz z płytkami przy pomocy sześciu śrub. Tę część komory dla krótkości będziemy nazywać lufą (przekrój poprzeczny na rys. 6). Jeden koniec lufy był nagwintowany i na nim nakrecono wydrążoną mosiężną nasadę *P* (rys. 7), zakończoną zwykłym pistoletowym kominkiem *K*. Nasada *P* była oddzielona od lufy płytką mikową, w której był zrobiony niewielki otwór, odpowiadający średnicy otworu kominka. Cały przyrząd był zabezpieczony od rozerwania kilkoma bandażami metalowymi i przytwierdzony do ciężkiej podstawy metalowej.

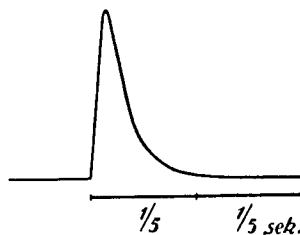
Nabijania komory dokonywano w następującej kolejności.

Na dnie lufy umieszczano określoną ilość prochu (zazwyczaj 0,3 gr), który ubijano drewnianym klockiem i przykrywano koreczkiem z waty. Po odwróceniu lufy do kominka wsypywano pewną ilość ziaren prochu, poczem na kominek nakładano kapslę. Wybuch wywoływano, uderzając młotkiem po kapsli. Dla kontroli wystrzał skierowywano do naczynia z gliną. W razie wyfukania znajdowano tam prawie cały niespalony nabój prochu, w przypadku eksplozji do gliny dochodziło trochę niespalonego węgla.

Próby wykazały, że badanie wybuchów w opisanym przyrządzie może być dokonywane tylko przy użyciu galwanometru strunowego, a nie balistycznego, a to ze względu na przewodnictwo powierzchniowe, powstające na ebonicie po eksplozji. Prąd, przechodzący przez rozżarzony gaz



Rys. 8.



Rys. 9.

w lufie, jest niewspółmiernie większy od prądu powierzchniowego, ukażującego się na ebonicie po wybuchu, dlatego też prąd powierzchniowy nie przeszkadza notowaniu prądu przy wybuchu. Natomiast całkowity nabój, wywiązany podczas eksplozji, jest tylko nieco większy od naboju, przepływającego po powierzchni w jedną sekundę; z tego powodu wychylenie galwanometru balistycznego podczas wybuchu jest zamaskowane przez stały prąd powierzchniowy. Połączenia elektryczne są zrozumiałe z rys. 8, na którym *a* i *b* wyobraża elektrody w lufie, *Q* dodatkowy opór (200 ohmów), *SS* nić galwanometru, a *R* upust. Nasada *P*, bandażę i podstawa były uziemione.

Na rys. 9 wyobrażona jest krzywa eksplozji dla 300 mgr prochu czarnego przy różnicy potencjałów 20 V między *a* i *b*. Czas eksplozji wynosi 0,13 sek, co jest w zgodzie z czasem trwania płomienia, obserwowanego fotograficznie¹⁾ (do 0,15 sek). Maksymalnemu wychyleniu struny odpowiada ogromne natężenie prądu $2,4 \cdot 10^{-2}$ amp. Całkowita ilość zgromadzonej elektryczności wynosi w przybliżeniu $1,5 \cdot 10^{-3}$ coul. Jeżeli nawet uwzględnimy, że w zamkniętej komorze panuje większe

¹⁾ Windakiewicz, Balistyka wewnętrzna, 1929.

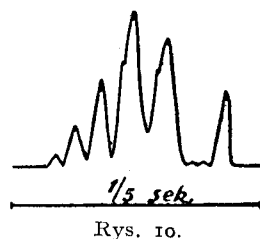
natężenie pola ($40 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$), to jednak, nabój ten będzie około 10 razy większy, niż w przypadku eksplozji bawełny strzelniczej po przeliczeniu na tę samą masę (tabl. 3).

Doświadczenia wykazały, że gazy, wylatujące z lufy, posiadają znikomo małe przewodnictwo w porównaniu z przewodnictwem gazów w lufie. Sprawdzono to w ten sposób, że wystrzał był skierowany w przestrzeń między płytami kondensatora płaskiego (rys. 2). W obwód wstawiony był galwanometr balistyczny, nastawiony na czułość 10^{-8} coul., który jednakże nie wykazał podczas wystrzału żadnego wychylenia.

Wykonano również doświadczenia sprawdzające w celu przekonania się, czy prąd pomiędzy elektrodami nie przechodzi po powierzchni ebonitu. W tym celu część kanału lufy była pokryta listkiem mikowym, wsuniętym pod płyty *a* i *b*. Próba nie wykazała żadnej zasadniczej zmiany zjawiska.

Zaznaczyć należy, że powtarzalność eksplozji w zamkniętej komorze jest gorsza, niż w przypadku bawełny strzelniczej, co prawdopodobnie spowodowane jest niejednakowym ubijaniem prochu i niejednakową intensywnością wybuchu kapsli. Wahania pomiędzy poszczególnymi eksplozjami dochodziły do 100%; okoliczność ta narazie nie pozwoliła zbadać dokładniej zależności zjawiska od masy materiału wybuchowego i od przyłożonej różnicy potencjałów.

Dla porównania, na rys. 10 wyobrażona jest krzywa powolnego spalania prochu przy podpaleniu go palniczką. Krzywa ta była otrzymana przy spalaniu kostki prochu czarnego o masie około 60 mgr, umieszczonej na szklanym sztyfciku pomiędzy płytami płaskiego kondensatora, ustawionego na odległość 3 cm. Napięcie wynosiło 20 V. Stosowano kostki zamiast drobnych ziaren, aby zmniejszyć rozpryskiwanie prochu przy spalaniu; w tym celu proch był rozcierany w moździerzach i po zwilżeniu prasowany w odpowiednich foremkach. Otrzymane kostki suszono w cieplarni. Doświadczenie wykazało, że zabieg ten nie przyniósł pożądanego rezultatu: spalanie odbywało się zupełnie bezładnie, nie wykazując tych prawidłowości, jakie obserwują się przy eksplozjach w broni palnej (spalanie według warstw równoległych). Ilość elektryczności, zgromadzonej podczas wyfukania kostki, wynosi w przybliżeniu 10^{-6} coul. Z tabl. 3 można obliczyć, że bawełna strzelnicza w tych samych warunkach dałaby $3 \cdot 10^{-6}$ coul. Jeżeli uwzględnimy, że proch z powodu rozpryskiwania nie spala się całkowicie, to możemy uważać te dwie liczby za równorzędne.



Streszczenie.

- 1) Zbadano jonizację płomieni, powstających przy eksplozjach następujących materiałów: heksylanu, potasu, bawełny strzelniczej oraz pikrynianów *K*, *Cu*, *Fe* i *Ca*.
- 2) Zgromadzony nabój uzależniony jest od przyłożonej różnicy potencjałów i wzrasta prędkiej od przyłożonego napięcia.
- 3) Zbadano przy pomocy galwanometru strunowego czasowy przebieg prądu podczas eksplozji i powolnego spalania bawełny strzelniczej. Stwierdzono, że naboje, zgromadzone w obydwu przypadkach spalania, są tego samego rzędu i przyłożona różnica potencjałów nie wpływa na czas spalania.
- 4) Opracowana została metoda badania jonizacji przy eksplozji materiałów wybuchowych w warunkach spalania zbliżonych do tych, jakie mają miejsce w broni palnej. Przy pomocy galwanometru strunowego otrzymano krzywe eksplozji i powolnego spalania prochu czarnego.

Poznań, dnia 6. VIII. 1932 r.

Zakład Fizyczny Wydziału Lekarskiego Uniwersytetu.

Rękopis otrzymany dn. 30 września 1932.
