

ИЗМЕНЕНИЯ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ НА ЭЛЕКТРОДАХ ПРИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ РАЗРЯДАХ

VLADIMÍR HERMOŠ, BOHUMIL ZÍTKA, KAREL ŠOBRA

Институт технической физики ЧСАН, Прага

В работе исследовались свойства конденсированного разряда с точки зрения энергетических соотношений. Дуга разряда около обоих электродов разделяется на несколько ветвей. Количество одновременно горящих частичных пятен определяется прежде всего моментальной величиной тока разряда; плотности тока в отдельных пятнах постоянны, за исключением начального и конечного состояний, и будут порядка 10^5 а/см².

ВВЕДЕНИЕ

Задача объяснения физической сущности электроэрозионной обработки металла находится в связи с проблемой энергетических соотношений в конденсированном разряде. Сложность этого вопроса станет ясной, если принять во внимание, что до сих пор удовлетворительным образом не удалось описать даже механизм ионизации разрядов большой интенсивности. Нет сомнения, что главной причиной разногласий является недостаточность данных об энергетических соотношениях в разряде. Единственное известное средство прямого исследования разрядов — зонд Лангмюра (Langmuir) — здесь как раз неприменимо, а потому, хотя бы для первого приближенного представления, мы удовлетворяемся результатами, которые дает исследование потенциала неполяризованным зондом [1], [2]. Не смотря на это, нам постоянно не хватает каких-либо сведений о разделении тока на ионную и электронную компоненты, без которых, понятно, нельзя делать заключение об энергетических соотношениях на катоде и в плазме. Следовательно, нужно искать новые методические элементы, которые способствовали бы необходимому увеличению наших знаний. Мы обсуждали самые разные экспериментальные возможности и, наконец, пришли к тому заключению, что некоторые надежды дает исследование изменения агрегатного состояния на электродах. В предлагаемой работе мы описываем результаты некоторых ориентировочных опытов, произведенных в этом направлении.

Первоначальные наблюдения касались характера следов эрозии, возникающих на неподвижных электродах с большой поверхностью при различных геометрических пропорциях разрядника и переменной энергии разряда. Электроды были всегда расположены по отношению друг к другу и экранированы так, чтобы на исследуемый электрод не действовали струи (факелы) паров из противоположного электрода. Мы работали с низковольтными разрядами (до 500 в), зажигаемыми обстреливанием плазмы из вспомогательного разрядника. Было установлено, что разряды с малой энергией (до 20 Дж) и при достаточно больших расстояниях (приблизительно от 15 мм) оставляют на электроде с большой поверхностью несколько отдельных частичных следов. Если этим электродом является анод, то возникают небольшие, но относительно глубокие, круглые кратеры, редко рассеянные по поверхности. Напротив того большая поверхность катода повреждается на незначительную глубину, но на больших ветвевобразных поверхностях.

Изменения агрегатных состояний на электродах...

Увеличение энергии, уменьшение расстояния между электродами и ограничение их активной поверхности имеет следствием слияние отдельных следов, образующих потом сплошной кратер, на котором меньше заметен отличительный характер разных полярностей. В соответствии с собственным установлением более старого времени [3] было показано, что при конденсированных разрядах на обоих электродах возникает много пятен. С аналогичным выводом встречаемся также в работе Гусева [4], а затем

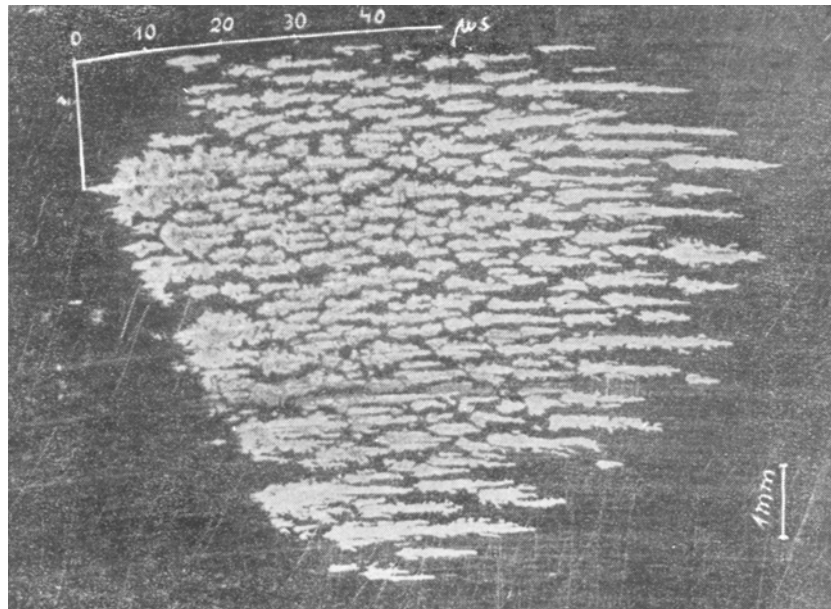


Рис. 1а.

и в работе Фрума (Froome) [5], касающейся лишь катодных пятен на ртути. Из того, что одинаковые разряды образуют всегда на аноде больше частичных следов, чем на катоде, можно заключить, что горячие пятна не относятся к самостоятельным частичным каналам, простирающимся от катода до анода, но к ответвлениям, в которые суживается общий дуговой разряд вблизи обоих электродов. Однако, из результатов не видно, возникают ли частичные пятна постепенно или, хотя бы некоторые из них, горят одновременно.

Поэтому мы попробовали потом исследовать следом временной развертки разряда при помощи дискового электрода, вращающегося с достаточной скоростью. Так как образование частичных следов в направлении вращения диска внесло бы в результаты значительную неуверенность о их последовательности во времени, то расширение дугового разряда в этом направлении было ограничено изоляционной перегородкой с узкой радиальной щелью. Устройство разрядника опять было сделано с посторонним зажиганием с целью исключить действия паров из противоположного электрода. Под серединой щели размерами $0,6 \times 7,5$ мм диск обладал линейной скоростью 120 м/сек. Разряд конденсатора емкостью

350 *mkf* и начальным напряжением 500 *v* оставлял на алюминиевом диске следы по рис. 1 (*a* — катод, *b* — анод). Таким способом развернутые следы сохраняли тот же характер что и следы на неподвижных электродах с большими поверхностями при небольших энергиях разряда и больших расстояниях. В то время как частичные анодные следы и на подвижном электроде остаются круглыми, влияние движения на катодные частичные следы проявляется удлинением их в касательном направлении. Из этого

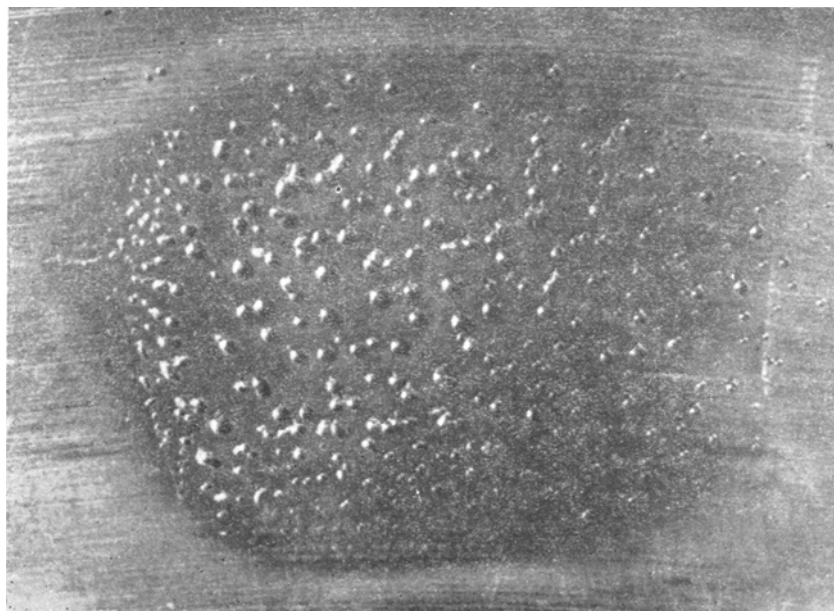


Рис. 1б.

видно, что катодные пятна движутся по поверхности, в то время как анодные разрастаются около неподвижно закрепившихся центров.

Следовательно, этот опыт снова подтверждает утверждение о сужении канала вблизи обоих электродов. Затем из фотографии видно что общая поверхность, подверженная в определенный момент действию разряда, на обоих электродах приблизительно пропорциональна мгновенному значению тока, что свидетельствовало бы вообще о константной плотности тока в пятнах.

Для исключения влияния относительного движения электродов мы произвели дальнейшие исследования на неподвижных электродах при применении оптической развертки. Вследствие того, что фотографирование пятен на поверхности массивных электродов сильно затрудняется интенсивным излучением пространственного разряда, поэтому мы применили фольговые электроды и исследовали процесс пробоя с противоположной от разряда стороны. Для регистрации образования дыр мы применили камеру с вращающейся петлей пленки, которая при плавной временной развертке регистрирует лишь изменения размеров, перпендикулярных к направлению движения. Следовательно, нужно было предпринять

дальнейшие меры, которые уменьшили бы возрастание дыры или же возникновение частичных пятен в направлении движения пленки. Самым простым удовлетворительным мероприятием оказалось ограничение активной поверхности электрода до величины узкого поперечного прямоугольника тонким изолирующим слоем. Для предотвращения разрыва фольги от действия возникающих при разряде давлений, она была приклеена к стеклянной подкладке. Разрядник, зажигаемый искрой с опережающей из импульсного генератора, был устроен как обычно, принимая

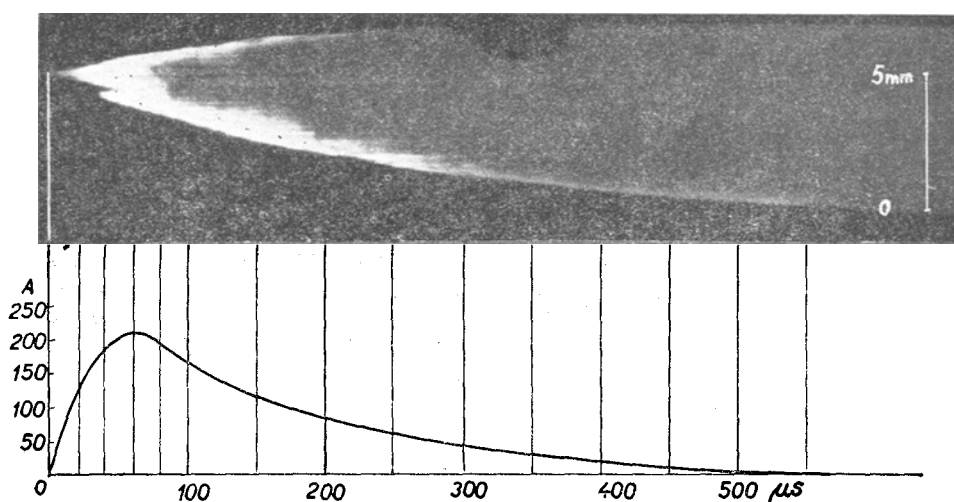


Рис. 2.

во внимание устранение влияния извержения паров из противоположного электрода.

На рис. 2 изображена временная развертка процесса пробоя анодом алюминиевой фольги толщиной 0,01 мм, разрядом с изменением тока по рис. 2б. Если принять во внимание, что существование частичного пятна проявляется интенсивно излучающим следом, то прежде всего мы находим на рисунке подтверждение прежнего утверждения о существовании многих кратковременных частичных пятен. Однако, при определенных предположениях мы можем отсюда вывести некоторые данные о плотностях тока в пятнах, так как из снимков довольно точно можно определить размеры и количество одновременно горящих частичных пятен. Об изменении тока в частичном пятне можно предполагать, что оно приблизительно аналогично изменению результирующего тока. В подтверждении этого предположения можно привести, во первых, тот факт, что на осциллограмме общего тока незаметно никаких разрывов, которые соответствовали бы зажиганию и тушению частичных разрядов, или что частичные токи возрастают непрерывно от нуля и опять непрерывно падают до нуля. Затем можно опереться и на осциллографическое установление при помощи пластинчатого электрода, где токи отдельных пластинок по своей форме соответствуют результирующему току. Поэтому максимальную величину частичного тока определим так: в определенный момент времени одновре-

менно горит p частичных каналов. Вследствие того, что отдельные частичные пятна, как видно из рисунка, возникают весьма приблизительно в одинаковых интервалах времени, то максимальная величина частичного тока будет

$$i_{d\max} = i_{ct} \frac{i_{c\max}}{\sum_1^p i_{cn}};$$

где i_{ct} — максимальная величина общего тока во время t , $i_{c\max}$ — максимум общего тока, а i_{cn} — величина общего тока в момент времени $t = n \cdot \tau_c/p$, причем τ_c — продолжительность общего тока. Принимая во внимание результаты, полученные на вращающемся электроде, анодное частичное пятно можно считать круговым, так что его поверхность в момент максимума будет $\pi b^2/4$, где b — ширина электрода. Плотность тока в частичном пятне в момент максимального частичного тока будет тогда

$$h = \frac{4i_{d\max}}{\pi b^2}.$$

Если принять в первом приближении, что частичное пятно сохраняет эту плотность в течение всего времени своего существования, о чем свидетельствует его начальное клинообразное расширение, то таким образом найденная плотность действительна для всей подверженной действию разряда поверхности в момент времени t . Конечно, на таким образом найденные величины плоскостей не могут существенно влиять некоторые отклонения при зажигании и тушении частичного пятна. Ориентировочный расчет на основании приведенных данных дал величины, которая в течение первых 200 мксек колеблется в границах $\pm 15\%$ около средней величины $1,65 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2$. Сомервилль (Somerville) и Блевэн (Blevin) [6], определяющие плотность тока из результирующей поверхности кратера у различных материалов при прямоугольных импульсах, определили, при длительности 1 мсек разряда, для катода из алюминия ту же величину $1,6 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2$. Однако, для более длительных разрядов они приводят меньшие величины, например, при 20 мсек уже только $4 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$. Это противоречие можно объяснить тем, что поверхность кратера, для которой эти авторы определяли плотность, больше поверхности, подверженной моментальному действию разряда, что допускают даже они сами.

Что касается взаимной связи между количеством удаленного материала или соответствующей величиной пробоя фольги и энергией, приведенной к электроду, представляет собой очень сложную проблему.

ПЛАВНАЯ РАЗВЕРТКА

До сих пор мы исследовали изменения агрегатных состояний у электродов по убыли твердой фазы. Однако, можно также исследовать явления в факелах для получения данных об энергетических соотношениях в разряде вблизи поверхности электродов. Используя то характеристическое свойство извержений, что они всегда происходят перпендикулярно к поверхности, подверженной действию разряда, независимо от формы поля, мы подходящим расположением электродов исключили влияние разрядного канала на извержения и на их взаимное перемешивание. Общее опытное устройство схематически обозначено на рис. 3. Исследуемый электрод E_1 ,

не пересекающийся и перпендикулярный к противоположному электроду E_2 , обладает активной поверхностью, ограниченной маской II с круглым отверстием малого диаметра. Из изображения III , полученного вспомогательным объективом O_1 , щелью S ограничена узкая полоска, фотографируемая вращающейся камерой, представленная на схеме объективом O_2 , призмой Z и петлей пленки F . При постоянной скорости вращения камеры v_k движение точки вдоль щели со скоростью V_v изобразится прямой с наклоном v_v/v_k .

Вследствие того, что факелы излучают на значительные расстояния от электрода, то их можно фотографировать прямо, без вспомогательного освещения. Пример неразрывной временной развертки осевого сектора дает рис. 4, полученный при применении оловянного электрода, снабженного маской диаметром 1 мм при разряде конденсатора 600 мкф, заряженного до 500 в. Продвижение фронтальной части извержения проявляется резким разграничением тени и света. За этим первым разграничением

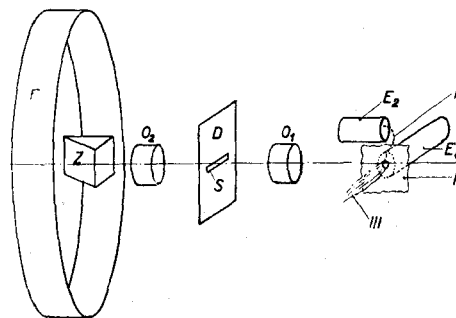


Рис. 3.

ясно видны еще дальнейшие узкие светлые полоски с большим наклоном. Кроме этих линейных следов, очевидно соответствующих скоростям извержений, на снимках появляется — при произвольной полярности электродов — рисунок, характеризующийся несколькими разграничениями, которые в общем хорошо совпадают с формой тока разряда. Этот рисунок возникает от непрерывной регистрации излучения факела переменной интенсивности, который проектируется щелью на перегородку. Пары, выходящие из электрода, подверженного действию разряда, направляются отверстием в маске и сильно излучают непосредственно возле электрода. По мере удаления от поверхности электрода плавно уменьшается интенсивность излучения паров, пока в определенной точке она опять скачком не увеличится; такой процесс повторяется несколько раз, конечно, с постоянно падающей интенсивностью и резкостью. Так как такой же рисунок на осевой полоске дают изображения истечения газов из обыкновенного отверстия, полученные по методу Тейлера (Töpler). Само собой напрашивается мысль, что и в нашем случае имеем дело с аналогичным изменением давления. Модуляция интенсивности света и здесь остается зависимой от давления, так как давлению пропорционально и количество возбуждений, которые можно считать единственным источником излучения. То обстоятельство, что здесь не сказывается окисляющее действие теплоты, было доказано сходством снимков, полученных при одинаковых разрядах в воздухе и в инертной атмосфере. Напротив того, с уменьшающимся давлением среды увеличивается скорость фронтальной части и расстояние поверхности изменения давления и скорости от электродов (проявляющиеся на нашем рисунке изменением интенсивности излучения), причем интенсивность излучения всего извержения понижается. Когда на пути извержения была поставлена плоская перегородка, то вблизи препятствия теневой рисунок делается плоским, а компрессионное пространство между волной давления и препятствием, как показывает

рис. 5, сильно излучает. Оба эти факта подтверждают высказанное предположение о зависимости интенсивности излучения от давления в извержении.

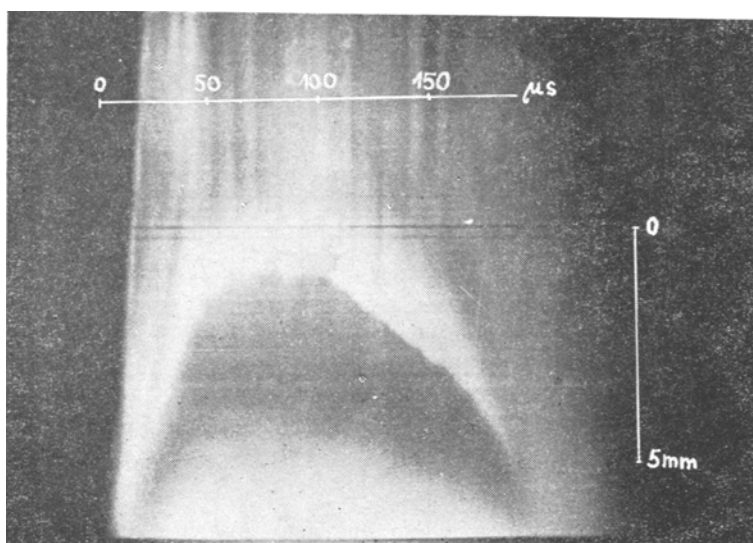


Рис. 4.

Описанным методом мы исследовали зависимость соотношений скоростей и давлений в извержении от некоторых параметров разряда. Прежде всего мы устанавливали влияние материала электродов. Остальные условия

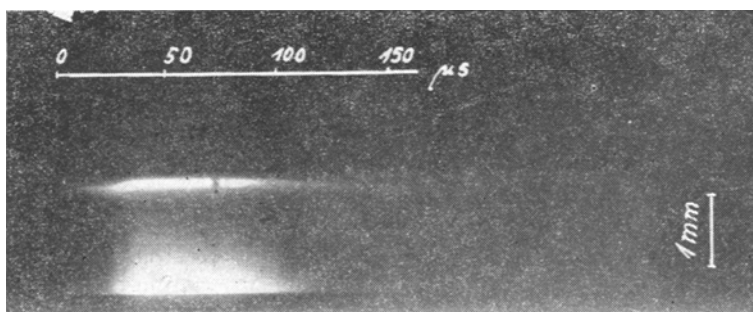


Рис. 5.

разряда сохранялись неизменными: конденсатор 600 мкф, начальное напряжение 500 в, эффективное расстояние между электродами 15 мм, разряд в воздухе, зажигание опережающей искрой из импульсного генератора, исследуемый электрод покрыт маской с отверстием диаметра 2 мм.

Определенные на аноде скорости фронтальной части извержений были порядка 10^4 см/сек, в то время как внутренние скорости были на один по-

рядок больше. Последовательность элементов, составленная в порядке возрастающих скоростей фронтальных частей, была следующая: Fe, Cu, C, Al, Sn, Zn, Pb, Cd. Самое большое расстояние поверхности изменения давления и скорости от электродов было найдено у кадмия, самое малое — у углерода. У всех элементов анодные величины больше, чем катодные. Затем было исследовано влияние диаметра отверстий маски у угольных электродов при тех же условиях разряда, как и раньше. Было установлено, что скорость фронтальной части факела с увеличивающимся отверстием в маске уменьшается. Внутренние скорости при определенном диаметре отверстия в маске в течение разряда остаются неизменными, за исключением окончательной стадии, когда проявляется определенное понижение. С увеличением диаметра отверстия в маске, начиная от определенной его величины, понижается расстояние поверхности скачка давления от электродов. Эту зависимость нельзя хорошо исследовать, потому что при больших диаметрах отверстий граница становится неясной, иногда совершенно исчезает. Зависимость от изменения подаваемой мощности была исследована при переменной емкости и константном начальном напряжении 500 в. Измерения производились на угольном электроде, снабженном маской с диаметром отверстия 1 мм. Величины скоростей фронтальных частей для емкостей от 600 до 37,5 мкф помещены в таблице 1. В то время как с увеличивающейся емкостью скорость фронтальной части понижается, расстояние поверхности изменения давления от электродов возрастает.

Следовательно, мы приходим к следующим результатам: скорости в факелах зависят от материала электрода, причем они приблизительно возрастают с уменьшающейся теплотой испарения; скорости фронтальной части увеличиваются при уменьшающейся поверхности электрода, подверженной действию разряда (при увеличивающейся специфической мощности в пятне). Расстояние поверхности изменения давления от электродов является, равным образом, функцией тепловых констант материала электродов, удельной нагрузки на электрод и крутизны импульса. Взаимную связь скоростей с теплотой испарения материала электродов можно объяснить скоростью испарения. Если бы удельная мощность в пятне была постоянной, скорости были бы прямо пропорциональны обратным величинам теплот испарения. В действительности зависимость усложняется переменными величинами как плотностей тока в пятне, так и падением напряжения на электродах. Влияние удельной нагрузки на поверхность и наклон импульса очевидно устанавливается сложными соотношениями при боковом проходе тепла в зависимости от плотности частичных пятен и при расширении частичных факелов. Расстояние поверхности скачка давления от электродов является функцией числа Маха и сечения факела. Этим самым дается ее зависимость от величин, определяющих скорости в факелах. Так как диаметр факела вообще пропорционален скорости испарения, то расстояние поверхности изменения давления от электродов приблизительно пропорционально мгновенной величине подаваемой энергии в случае константных падений на электродах и току разряда. Более точные соотношения мы продолжаем находить.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты описанных экспериментов можно резюмировать следующим образом.

В конденсированных разрядах дуга разряда вблизи обоих электродов разделяется на несколько ветвей. Количество параллельно горящих частичных пятен, постоянно возникающих и исчезающих в течение разряда, определяется прежде всего моментальной величиной тока разряда. Плотности тока в частичных пятнах остаются, кроме значений в начальном и конечном времени, постоянными в течение разряда и являются величинами порядка 10^5 A/cm^2 . Расстояние поверхности изменения давления от электродов пропорционально изменению мощностей, приводимых к электродам.

Поступило 20. 2. 1954 г.

CHANGES OF STATE ON THE ELECTRODES IN CONDENSED DISCHARGES

(Excerpt from Preceding Paper)

VLADIMÍR HERMOCH, BOHUMIL ZÍTKA, KAREL ŠOBRA
Institute of Technical Physics, Czechosl. Acad. Sci., Prague

The experiments described in the work are directed towards extension of previously known methods [1, 2] for investigating the energy relations in condensed discharges or for gaining further information about the ionization mechanism in discharges of this type. Increased attention was paid to changes of state on the electrodes.

In agreement with our previous determinations [3] and with the work of other authors [4, 5] it is observed that the resultant trace of the discharge on both electrodes is composed of a series of partial traces. The development of the partial traces was followed on a disc electrode rotating with a circumferential velocity of 120 m/s (Fig. 1) and also by means of perforations in a foil electrode, photographed by a continuous time base (Fig. 2). From the variation with time of the illumination of the holes and the current of the discharge, with certain simplifying assumptions, the current density [6] in the anode glow on aluminium was determined (Fig. 3).

By the experiment arranged according to Fig. 4 the relations in the vapours ejected from electrodes with limited active surface were determined. From the continuous time development of the axial section of the jet (Fig. 5) the forward velocity of the head of the jet, and in some cases the internal velocity, is evident. In the figures one can also see shadow images characterised by several boundaries which in general follow the shape of the current fairly well. The opinion is expressed that the intensity of radiation depends on the pressure in the jet. From Fig. 7 deformation of the image of the jet during impingement on an obstacle is evident.

The following conclusion is derived from the results obtained: the discharge channel in condensed discharges divides into several prominences in the vicinity of both electrodes. The quantity of parallel glowing spots, constantly arising and disappearing, is determined in particular by the instantaneous value of the discharge current. The current densities in the spots remain