

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ВЛАГИ И ОБРАЗОВАНИЯ ГОЛОЛЕДА НА ПРОВОДАХ ПРИ ПОМОЩИ КОРОННОГО РАЗРЯДА

А. А. ВОРОБЬЕВ и Н. Б. БОГДАНОВА

Введение

Известно, что твердые и жидкие частицы, находящиеся во взвешенном состоянии вблизи коронирующего провода, адсорбируют ионы и, зарядившись одноименными с проводом зарядами, отталкиваются от его поверхности. Скорость перемещения таких заряженных частиц к противоположному электроду определяется величиной максимального заряда q_{max} (частица радиуса ρ с диэлектрическим коэффициентом ϵ в поле напряженностью E) [4, 5].

$$q_{max} = \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) E \rho^2.$$

Если коронирование провода происходит в атмосфере тумана, дождя, снега, то, возможно, что и капли воды, частицы тумана, кристаллики льда будут заряжаться и взаимодействовать с коронирующим проводом. В таком случае частица тумана (воды, снега) будет двигаться в направлении к противоположному электроду и на коронирующий провод уже не попадет. Вследствие этого характер покрытия осадками коронирующих проводов может быть иным, чем проводов, некоронирующих или совсем не находящихся под напряжением: корона на проводе может препятствовать осаждению на нем влаги и образованию гололеда.

Экспериментальные установки

Исследование осаждения влаги на коронирующих проводах было произведено нами на установках: 1) коронирующий провод внутри коаксиального ему цилиндра (длина цилиндра 30 см, диаметр 8 см, диаметр провода 2 мм, менялся от 0.1 до 4.95 мм, по концам к цилиндру примыкали кольца длиной по 4 см, выполнявшие роль охранных);

2) коронирующий провод, расположенный против параллельной ему заземленной плоскости (длина плоскости 110 см, расстояние до провода менялось от 10 до 20 см, диаметр провода изменялся от 0.1 до 2.5 мм, края плоскости были сделаны закругленными);

3) два параллельных коронирующих провода (длина проводов 170 см, расстояние между ними менялось от 10 до 20 см, диаметр провода—от 0.1 до 2.5 мм, по концам провода заделывались в полусферы).

Исследование обледенения коронирующих проводов было произведено на тех же установках, но при температуре воздуха ниже 0°C, а также при искусственном охлаждении в специальных холодильных камерах. Схе-

матическое изображение одной из таких камер приведено на рис. 1, где a и c жестяные ящики, впаянные один в другой; пространство между ними заполнялось охлаждающей смесью. Внутри камеры вставлена стеклянная, обернутая в фольгу труба f (диаметр ее 35 мм); коронирующий электрод—цилиндрический стержень с шариком на конце вставлялся на пробке в трубу (диаметр стержня—4.95 мм). Ввод a —для термометра; стабильная температура внутри камеры поддерживалась—5°C.

Опыты производились и на постоянном и на переменном токах. Критическое напряжение короны в опытах на постоянном токе определялось из редуцированных характеристик. Напряжение измерялось с помощью шаровых разрядников, ток—гальванометром, включенным в заземляющий провод. Электрическая схема установки для опытов на постоянном токе приведена на рис. 2, где T —трансформатор на 80 кВ, K —кенотрон, коронирующие провода (или провод), G —гальванометр с чувствительностью

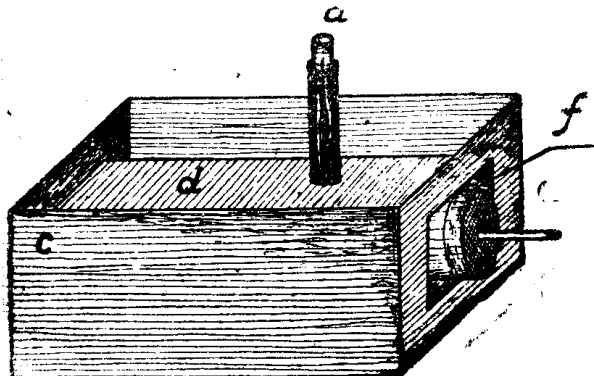


Рис. 1. Холодильная камера.

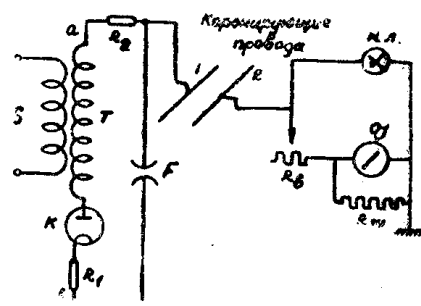


Рис. 2. Электрическая схема установки.

1.7 μ А/дел, регистрирующий ток короны. Параллельно к гальванометру подключалась система шунтов $R_{ш}$ (10 Ω , 5 Ω , 3 Ω), позволявшая менять чувствительность гальванометра в широких пределах, неоновая лампа Н. Л., включавшаяся параллельно сопротивлению R_2 и гальванометру G , служила для защиты гальванометра от большого тока при возможных пробоях между электродами; $R_1 = R_2 = 10^5 \Omega$ —охранные сопротивления, F —шаровой разрядник. Часть опытов производилась с приключенной параллельно электродам емкостью $C = 0.01 \mu F$.

В опытах с коронированием на переменном токе источником напряжения служил тот же трансформатор T . Измерение тока велось при помощи гальванометра G , причем использовалось выпрямляющее действие самой короны [6, 1].

Искусственный дождь создавался с помощью пульверизаторов, наполняемых дистиллированной водой и дававших максимальную силу дождя 1 мм/мин. При пульверизации создавался равномерно падающий вертикальный дождь, охватывающий коронирующие провода. В опытах с коаксиальными цилиндрами струя пульверизируемой воды направлялась вдоль провода.

Описание опытов и их результаты

За поверхностью коронирующих проводов велись наблюдения в зрительную трубу, при этом фиксировалось количество капель, осаждающихся на участке провода, расположенном в поле зрения трубы, и строилась зависимость этого количества от величины приложенного напряжения.

В опытах с обледенением лед, образующийся на проводе при данном напряжении, скалывался и взвешивался; определялось изменение этого количества в зависимости от величины приложенного напряжения. В интересных случаях делались зарисовки и фотосъемка. Параллельно всем этим наблюдениям снимались вольтамперные характеристики коронного разряда на проводах, находящихся в нормальных условиях ($I_0 = f(U)$) и под дождем или в условиях обледенения ($I = f(U)$). Вольтамперные характеристики короны в этих условиях имеют для нас самостоятельный интерес [2]. Их анализ позволит также сделать заключение, препятствует ли корона осаждению влаги на проводах. Опыты показали, что ток короны I , измеряемый при наличии осадков на проводах, больше тока короны I_0 , измеряемого в нормальных условиях; если корона препятствует покрытию проводов осадками, то с увеличением напряжения U над критическим напряжением коронирования $U_{кр}$ ток I должен стремиться к значениям тока I_0 .

В результате наших исследований можно было констатировать, что по мере увеличения напряжения над критическим напряжением короны $U_{кр}$ влага на проводах осаждается все в меньших количествах и при некотором напряжении U_c коронирующие провода остаются сухими, находясь под дождем, и не обледеневают при низкой температуре.

Приведем результаты визуальных наблюдений за поверхностью коронирующего провода для случая, когда провод расположен против параллельной ему плоскости. Зрительная труба устанавливалась напротив провода, и какой-либо его участок сильно освещался. Каждая сажающаяся на этом участке капля была отчетливо видна в трубу. По мере увеличения приложенного напряжения число капель в поле зрения трубы уменьшалось. Рис. 3 показывает эту зависимость. Здесь по оси абсцисс отложено напряжение U в kV , по оси ординат — число капель n в поле зрения трубы ($l = 5 \text{ см}$), размеры провода и расстояние его до вертикальной плоскости указаны на рисунке; напряжение было постоянным, провод находился при отрицательной полярности.

При данном напряжении и постоянной силе дождя количество капель на проводе довольно постоянно; точно так же это количество мало меняется с течением времени: первые 1—2 минуты после начала пульверизации оно увеличивается, а затем остается неизменным. Равновесие это динамическое: некоторые капли слетают, другие оседают вновь. Слетающие капли не покидают провода целиком, а постепенно фонтанируя, высыхают. Когда одна капля слетает, то садится другая. С увеличением напряжения устанавливается новый, равновесный режим при другом, меньшем числе капель. Наконец, при некотором напряжении капли совсем не осаждаются на проводе. На плоскости, горизонтально расположенной под параллельным ей проводом, при напряжении $U > U_{кр}$ отчетливо видна сухая дорожка, на которую капли не попадали. Эта дорожка располагалась вдоль всей длины провода, и на ней как бы замыкалась поднимающаяся над проводом завеса из дождевых капель (внутри которой попадали лишь отдельные капли). Для того, чтобы сделать эту дорожку отчетливо видной, мы окрашивали распыляемую воду, а на плоскость подкладывали бумагу. Получался отпечаток, фотография которого приведена на рис. 4

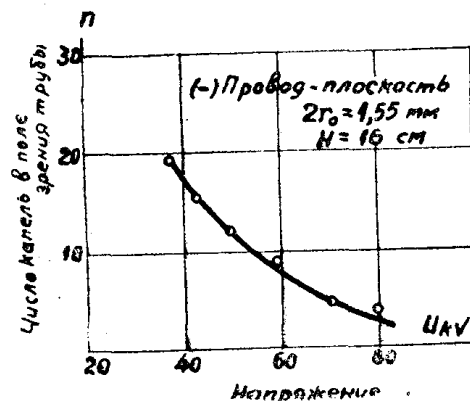


Рис. 3. Зависимость количества капель, осаждающихся на проводе, от напряжения.

(диаметр провода $2r_0 = 0.2$ мм, расстояние до плоскости $H = 9.0$ см, $U = 22$ кВ, ширина дорожки 3 см. Примерно такую же картину осаждения влаги мы наблюдали и на других установках; с увеличением величины приложенного напряжения U капли все в меньшем количестве осаждались на проводах.

Наблюдением за поверхностью коронирующих проводов установлено, что увеличение напряжения выше критического соответствует уменьшению образовавшегося количества льда. На рис. 5 и 6 представлены фотографии провода ($2r_0 = 0.75$ мм), над которым в продолжение полу-

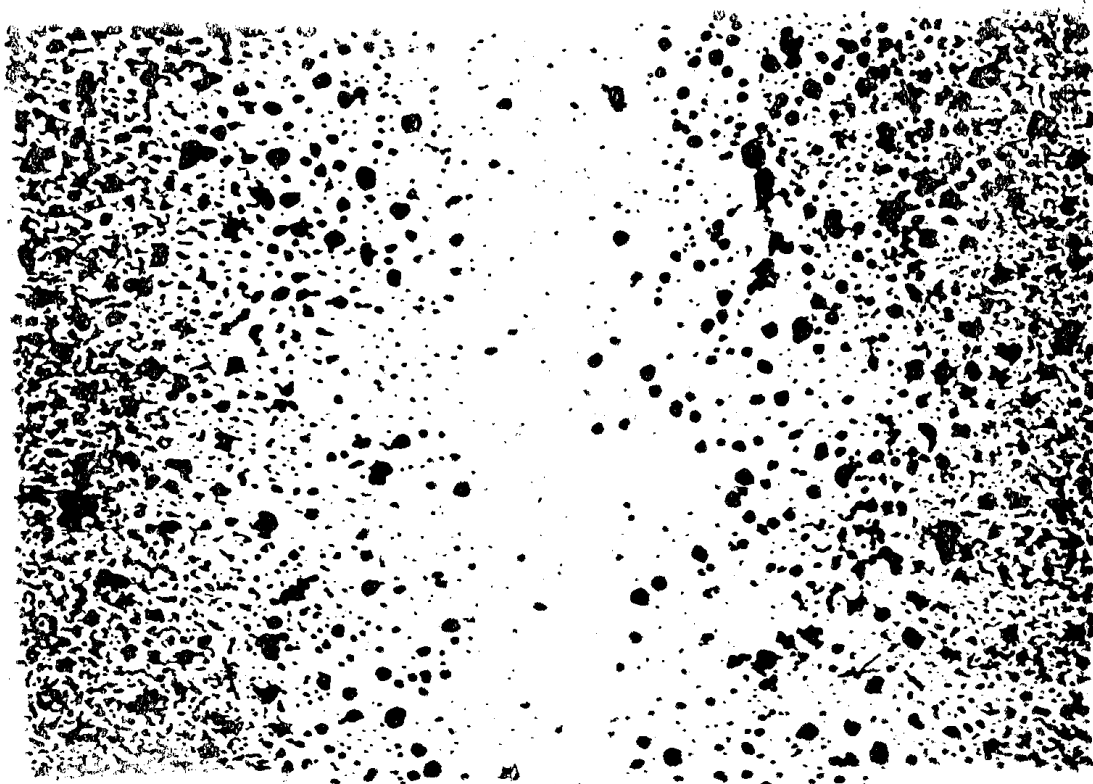


Рис. 4. „Дорожка“ под коронирующим проводом

часа pulverизировалась вода при температуре воздуха $t = -8^\circ\text{C}$. Провод находился внутри коаксиального ему цилиндра (последний открыт для удобства фотосъемки). На рис. 5 видно, что провод в отсутствии напряжения ($U = 0$) покрылся льдом вдоль всей длины, толщина слоя льда убывает по мере удаления от pulverизатора (последний находится справа), наибольшая толщина слоя льда достигает 2—2.5 мм. Результаты повторения этого же опыта в случае, когда провод находился под постоянным напряжением $U = 18$ кВ, видны на рис. 6. На проводе, проходящем внутри цилиндра и кольца, льда нет совсем; лед покрыл только ту часть провода, которая выступала из кольца, т. е. на которой не было короны. Критическое напряжение короны $U_{кр}$ для этого случая—14 кВ, провод находился при отрицательной полярности.

Строилась зависимость количества осевшего на проводе льда Q от напряжения U . Для случая провода, коронирующего против параллельной ему плоскости при постоянном напряжении, результаты приведены на рис. 7. Здесь по оси абсцисс отложена величина приложенного напряжения U , а по оси ординат—количество образовавшегося при 10-минутной экспозиции льда Q в мг. Интересно отметить то обстоятельство, что ос-

мовной спад кривой начинается при напряжении меньше критического, определенного из редуцированных характеристик разряда для сухого про-

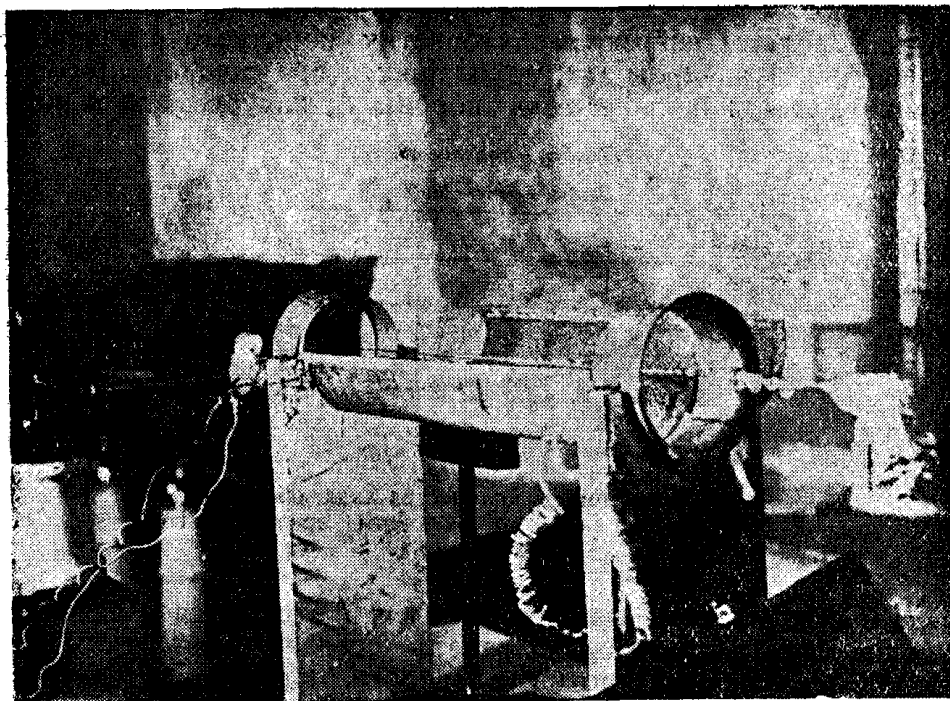


Рис. 5. Обледенение прохода, находящегося внутри цилиндра, в отсутствии напряжения ($U = 0$).

вода. Видимо, здесь эффект имеет место за счет ранней короны с неоднородностей провода. На проводе, диаметром $2r_0 = 1.55$ мм, также рас-

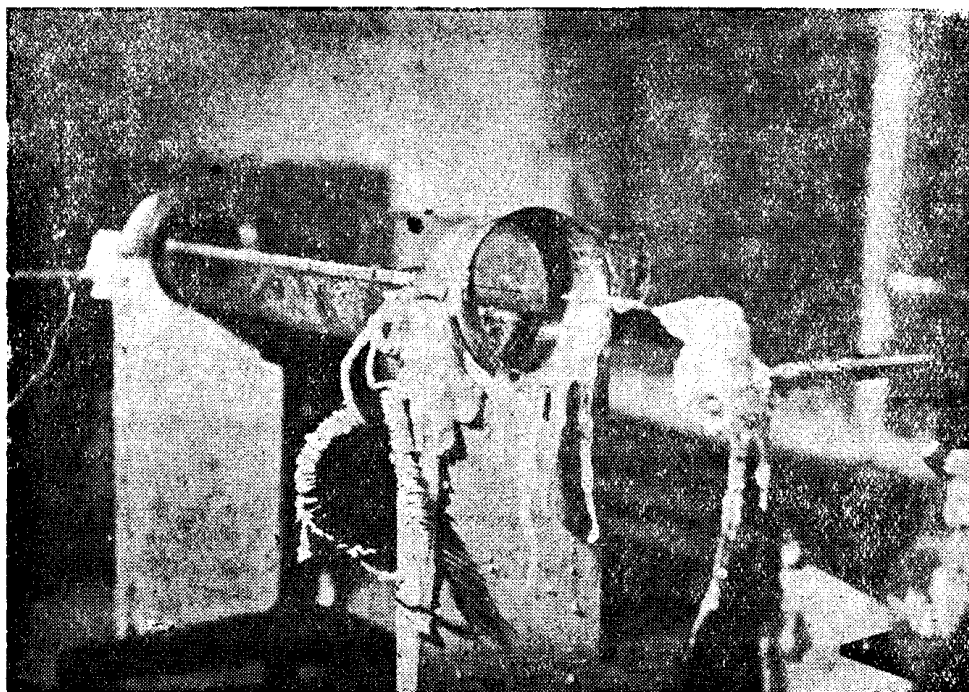


Рис. 6. Обледенение коронирующего провода ($U = 18$ кВ).

положенном против плоскости на расстоянии $H=10$ см, в отсутствие напряжения образовалось 210 мг льда, при напряжении $\sim U_{кр}=30$ кВ количество льда оказалось равным только 10 мг, а $Q=0$ достигалось лишь при $U=55$ кВ.

Изучение вольтамперных характеристик коронного разряда показало, что ток короны I на проводах, находящихся под дождем при небольших напряжениях, всегда больше тока короны I_0 , измеряемого в нормальных

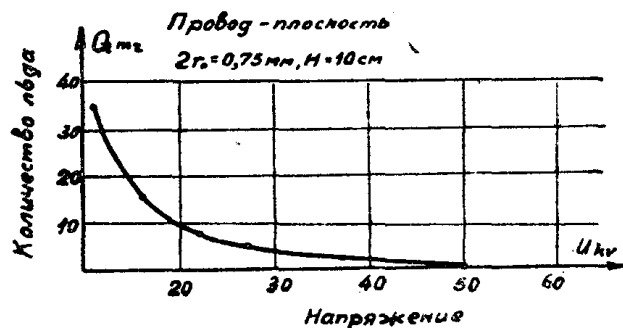


Рис. 7. Зависимость количества льда, образующегося на проводе, от величины приложенного напряжения.

условиях. С увеличением напряжения ток I стремился к значениям тока I_0 (с увеличением напряжения U капля оседает меньше). На установках: провод, помещенный против плоскости, и два параллельных коронирующих провода, при напряжении $U \geq U_c$ (когда на проводе влага больше

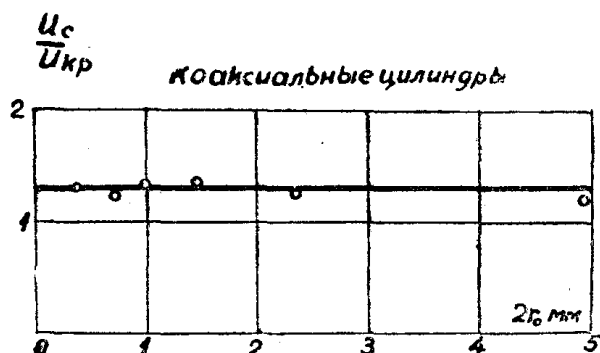


Рис. 8. Зависимость отношения $\frac{U_c}{U_{кр}}$ от диаметра провода $2r_0$ для случая провода, коронирующего внутри коаксиального ему цилиндра.

не осаждалась) $I \approx I_0$; в коаксиальных цилиндрах при $U \geq U_c$, ток I оказывался неизменно меньше I_0 .

Из вольтамперных характеристик и из визуальных наблюдений были определены значения того напряжения U_c , при котором коронирующие провода уже не покрываются осадками. Отношение $\frac{U_c}{U_{кр}}$ оказалось различным для всех трех рассмотренных конструкций и для каждой данной конструкции мало меняющимся с изменением диаметра проводов. На рис. 8 приведена зависимость $\frac{U_c}{U_{кр}}$ от диаметра коронирующего провода

для случая провода, помещенного внутри коаксиального ему цилиндра (напряжение постоянное, провод находится при отрицательной полярнос-

ти). Как видно, $\frac{U_c}{U_{кр}}$ равно 1.3 и не зависит от r_0 . Подключение емкости, сглаживающей пульсации напряжения, снижает эту величину до 1.1—1.2. При положительной полярности провода получено $\frac{U_c}{U_{кр}} = 1.7$. Примерно такое же значение величины $\frac{U_c}{U_{кр}}$ и даже несколько более высокое получается при действии переменного напряжения. Для случая провода, помещенного против плоскости при отрицательной полярности провода $\frac{U_c}{U_{кр}} = 1.6$, при положительной $\frac{U_c}{U_{кр}} = 1.8$ и, наконец, для двух параллельных проводов при действии постоянного напряжения $\frac{U_c}{U_{кр}}$, оказалось несколько больше 2.

Количество капель, осаждающихся на проводе при данном напряжении, зависит от силы дождя, хотя зависимость эта не резкая. Величина же U_c почти не менялась с изменением силы дождя по крайней мере в тех пределах изменения этой величины, которым мы располагали (от долей до 1 мм/мин).

Заключение

Таким образом, корона на проводе препятствует покрытию его осадками. Напряжение U_c , при котором коронирующий провод не покрывается осадками, оказалось наименьшим в случае униполярной короны, при отрицательной полярности коронирующего провода.

Картина поведения капель вблизи поверхности коронирующего провода нам представляется в следующем виде. Коронирующий провод окружен коронным чехлом, за пределами которого локализуется пространственный заряд того же знака, что и знак коронирующего провода. Капля воды, попав в зону такого заряда, ведет себя так же, как частица пыли в ионном токе электрофилтра: нейтральная капля зарядится; если капля предварительно имела заряд одноименный с пространственным зарядом внешней области, то величина его возрастет; если капля предварительно обладала зарядом по знаку противоположным пространственному заряду внешней области, она перезарядится [3]. Помимо того на каплю действует электрический ветер.

Все те явления, которые мы наблюдали: „завеса“ из капель над коронирующим проводом; сухая дорожка под проводом, на которую не попадают капли; очистка воздуха от капель в коаксиальных цилиндрах; наконец, тот факт, что при $U > U_c$ провода остаются сухими под дождем и не обледеневают при низкой температуре—результат совокупного действия указанных эффектов.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Пик—Диэлектрические явления в технике высоких напряжений, ОНТИ, 1934.
2. Н. Б. Богданова—Известия ТПИ, 1948.
3. Н. Н. Туницкий, Н. В. Тихомиров и И. В. Петрянов—ЖТФ, т. 10, в. 20, 1940.
4. H. Rohman—Z. f. Phys. 17, 253, 1923.
5. Pautenier et M. Hannot—Journ. d. Phys. et le Rad, 3, № 12, 590, 1932.
6. W. G. Hoover—El. Eng. 55, № 5, 1936.