# Характеристики пробоя длинного воздушного промежутка в двухэлектродной разрядной системе «стержень-плоскость» высоким переменным напряжением повышенной частоты

**М. И. Баранов**

*Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, 61013, Украина, e-mail: mixail2901mixail@gmail.com*

Поступила в редакцию 21.11.2025
После доработки 31.03.2026
Принята к публикации 07.04.2026

Приведены результаты расчетного определения основных характеристик электрического пробоя длинного воздушного промежутка в двухэлектродной разрядной системе (ДЭРС) «стержень-плоскость» высоким (сверхвысоким) переменным напряжением $U_{12}(t)$ повышенной частоты $f_0$ с диапазона 10 кГц ≤ $f_0$ ≤ 1 МГц. Получены расчетные соотношения для нахождения среднеквадратичного значения разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ и усредненной по минимальной длине $l_{min}$ ≥ 1 м этого промежутка пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ сильного электрического поля для исследуемой ДЭРС. Предложенный инженерный подход для определения значений $U_{dm}(f_0)$ и $E_{dm}(f_0)$ базируется на известных результатах приближенного расчета в длинном воздушном промежутке ДЭРС «стержень-плоскость» с резко неоднородным сильным электрическим полем напряжения появления $U_L$ лидера вблизи нижнего края с радиусом закругления $r_c$ ее стержня и введении нами в формулу для $U_L$ коэффициента $k_f$, учитывающего влияние частоты $f_0$ на электроразрядные процессы в ДЭРС. Выполненное сравнение полученных расчетных результатов для численных значений разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ с их известными экспериментальными данными для указанного диапазона изменения частоты $f_0$ напряжения $U_{12}(t)$ на электродах данной ДЭРС подтверждает работоспособность предложенного подхода для нахождения в ней разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ и пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля.

*Ключевые слова*: длинный воздушный промежуток, переменное напряжение повышенной частоты, электрический пробой промежутка, разрядное напряжение, пробивная напряженность электрического поля, расчет

**УДК** 621.3.022: 621.396.6: 533.93
*https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.2.37*

## ВВЕДЕНИЕ

Задачи электротехнической инженерии, связанные с обеспечением электрической прочности воздушной изоляции разнообразного высоковольтного силового электроэнергетического и электротехнического оборудования, были и остаются актуальными в мире и сегодня. Поэтому в области техники высоких напряжений (ТВН), высоковольтной импульсной техники (ВИТ) и высоковольтной высокочастотной техники (ВВТ) вопросам выбора разрядных (пробивных) напряжений $U_{dm}$ для длинных воздушных промежутков минимальной длиной $l_{min}$≥1 м и усредненных по их указанной длине $l_{min}$ пробивных напряженностей $E_{dm}$ сильного электрического поля уделялось и уделяется повышенное внимание ученых-электротехников ведущих стран мира [1–7]. Как известно, электрофизика длинных электрических искровых разрядов в атмосферном воздухе, используемом в качестве длинномерной изоляции высоковольтных устройств в области ТВН, ВИТ и ВВТ, является одной из самых сложных проблемных научных задач в области газового разряда [8, 9]. Углубление электрофизических основ длинных электрических разрядов в атмосферном воздухе будет способствовать решению таких важных прикладных задач, как молниезащита и электробезопасность работы силового промышленного и технологического электрооборудования (например, стратегических объектов электроэнергетики и высоковольтных установок электротехнологического применения [5, 7, 10–15]). Отметим, что в современных областях ТВН, ВИТ и ВВТ широко используются мощные источники высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ с частотой $f_0$ его изменения во времени $t$ от 50 Гц до десятков мегагерц [4–11,16].

На данное время малоизученными задачами в области физики длинных искровых разрядов остаются те, которые связаны с электрофизическими механизмами электрического пробоя длинных воздушных промежутков высоким (сверхвысоким) переменным напряжением $U_{12}(t)$ повышенной частоты $f_0$, относящейся к диапазону 10 кГц $\le f_0 \le$ 1 МГц, и особенно с расчетным определением основных характеристик их электрического пробоя при воздействии на них такого переменного напряжения $U_{12}(t)$. Имеется ряд экспериментальных данных для указанного частотного диапазона 10 кГц $\le f_0 \le$ 1 МГц, характеризующих электрическую прочность воздушных промежутков в двухэлектродной разрядной системе (ДЭРС) «стержень-плоскость», минимальная длина $l_{min}$ которых составляет $l_{min} \le 1$ м [4, 7, 9]. Кстати, указанная высоковольтная ДЭРС «стержень-плоскость», имеющая как при $f_0$ = 50 Гц, так и при повышенных частотах $f_0 >>$ 50 Гц напряжения $U_{12}(t)$ наименьшую электрическую прочность ее воздушной изоляции по сравнению с иными геометрическими формами электродов ДЭРС, является базовой электродной системой в области современных ТВН, ВИТ и ВВТ с ее резко неоднородным сильным электрическим полем. С помощью такой ДЭРС осуществляется инженерный выбор рабочей длинномерной воздушной изоляции в их силовых электроустройствах [2, 3, 5, 7, 9]. При этом для данного выбора минимальных значений длины $l_{min}$ в ДЭРС в области ТВН и ВИТ применяется стандартный коммутационный апериодический импульс высокого напряжения $U_{12}(t)$ положительной полярности временной формы $T_m/T_p \approx$ (250±50) мкс/(2500±750) мкс ($T_m$, $T_p$ – время, которое отвечает соответственно амплитуде $U_{12m}$ и длительности импульса напряжения $U_{12}(t)$ на уровне $0{,}5U_{12m}$) [7, 17, 18], а в области ВВТ – высокое переменное напряжение $U_{12}(t)$ соответствующей частоты $f_0 >>$ 50 Гц [1, 7, 8, 16].

Цель статьи – расчетное определение основных усредненных характеристик электрического пробоя – разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ и пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля для длинного воздушного промежутка в ДЭРС «стержень-плоскость» при воздействии на ее электроды высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ повышенной частоты $f_0$ с диапазона 10 кГц $\le f_0 \le$ 1 МГц.

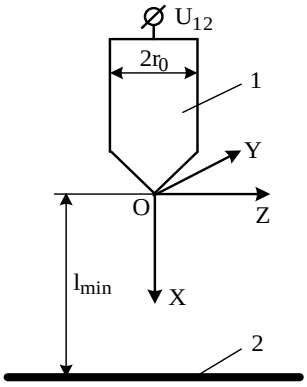
## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим рисунок, на котором представлен общий вид высоковольтной ДЭРС «стержень-плоскость», которая содержит вертикально размещенный потенциальный электрод в виде металлического круглого стержня *1* радиусом $r_0$ с заостренным нижним краем с радиусом $r_c << r_0$ его полусферического закругления и заземленный плоский электрод в виде горизонтально расположенной металлической плоскости *2*, габаритные размеры которой существенно превышают минимальную длину $l_{min}$ ее воздушного промежутка. Принимаем, что в этой ДЭРС электрические потенциалы электродов *1* и *2* равны соответственно $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2 \approx 0$, а между ними в межэлектродном разрядном газовом промежутке минимальной длиной $l_{min}$, равной длине прямой, проведенной от острого края потенциального электрода *1* по нормали к плоской поверхности заземленного электрода *2*, размещен атмосферный воздух при следующих нормальных условиях [19]: давление газа – $P_a \approx (1{,}013\pm0{,}03)\times10^5$ Па; абсолютная температура газа – $T_a \approx$ (293,15±10) К; относительная влажность газа – $\gamma_a \approx$ (45±30)%. Считаем, что на исследуемую ДЭРС воздействует высокое переменное напряжение $U_{12}(t) \approx \varphi_1(t) \approx U_{12m}\cos(2\pi f_0 t)$ повышенной частоты колебаний $f_0$ с диапазона 10 кГц $\le f_0 \le$ 1 МГц, которое может формироваться на электродах рассматриваемой воздушной ДЭРС с помощью специальных высоковольтных высокочастотных генераторов [1, 4, 7, 16, 20, 21].

Отметим, что согласно известным опытным данным в исследуемой воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» ($l_{min} \ge 1$ м) с частот $f_0 \ge$ 10 кГц изменения принятого нами переменного напряжения $U_{12}(t)$ начинается резкое уменьшение ее среднеквадратичного (действующего) разрядного напряжения $U_{dm}(f_0) \le U_{12m}/(2)^{1/2}$ [7, 9]. При изменении в данной ДЭРС частоты $f_0$ переменного напряжения $U_{12}(t)$ с амплитудой $U_{12m}$ в диапазоне 50 Гц $\le f_0 \le$ 10 кГц уменьшение значений разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ сравнительно невелико [7, 9]. Данное обстоятельство послужило одной из причин выбора нами нижней границы изменения в исследуемой ДЭРС частоты $f_0$ воздействующего на ее электроды высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$. Что касается верхней границы в принятом частотном диапазоне изменения переменного напряжения $U_{12}(t)$, то частота $f_0$ = 1 МГц является наиболее характерной для рассматриваемого исследования электроразрядных процессов в ДЭРС «стержень-плоскость» [4, 7, 16].

Принимаем, что усредненная при заданной минимальной длине $l_{min}$ разрядного воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» пробивная напряженность $E_{dm}(f_0)$ сильного электрического поля в зависимости от ее амплитудного разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$

может быть рассчитана по приближенному соотношению вида [17, 22]: $E_{dm}(f_0) \approx U_{dm}(f_0)/(1{,}13 l_{min})$. Наличие в этом соотношении сомножителя $n_d \approx 1{,}13$ связано с искривлением пути продвижения плазменного канала искрового разряда в длинном воздушном промежутке этой ДЭРС на стадии его электрического пробоя, достоверность численного значения которого была подтверждена результатами выполненных нами соответствующих высоковольтных экспериментов при электрическом искровом пробое ее длинных воздушных промежутков ($1 \text{ м} \le l_{min} \le 4$ м) с использованием стандартного коммутационного апериодического импульса напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс положительной полярности [14, 17, 22].




Общий вид высоковольтной ДЭРС «стержень-плоскость» с минимальной длиной $l_{min}$ ее воздушного промежутка (*1, 2* – соответственно потенциальный металлический стержень радиусом $r_0$ с заостренным нижним краем с радиусом $r_c << r_0$ его полусферического закругления и потенциалом $\varphi_1(t) \approx U_{12}(t)$ и заземленная металлическая плоскость с потенциалом $\varphi_2 \approx 0$).

При рассмотрении электродинамических процессов в длинном воздушном промежутке исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» в напряженной полевой зоне вблизи ее электрода-стержня с радиусом $r_c$ закругления его нижнего края воспользуемся декартовой системой координат *XYZ*, начало координат которой привяжем к заостренному полусферическому краю стержня с радиусом $r_c << r_0$ его закругления (см. рисунок). Учитывая, что геометрическая конфигурация исследуемой ДЭРС в зоне ее электрода-стержня с высоким потенциалом $\varphi_1(t)$ удовлетворяет вокруг оси *OX* условию осевой симметрии, то при рассмотрении распределения возникающего в воздушном промежутке ДЭРС плоско-меридианного электромагнитного поля (ЭМП) в данной резко напряженной полевой и критической с точки зрения начала развития предпробойных электроразрядных процессов зоне ДЭРС ограничимся использованием в приближенном полевом анализе плоских монохроматических линейно поляризованных поперечных электромагнитных волн (ЭМВ), которые могут распространяться в воздушном промежутке длиной $l_{min} \ge 1$ м данной ДЭРС как вблизи, так и вдали от ее потенциального электрода-стержня. При этом минимальная длина $\lambda_0 \approx v_0/f_0$ этих ЭМВ в рассматриваемом воздушном промежутке ДЭРС при $v_0 \approx 3 \times 10^8$ м/с [19] и $f_0 = 1$ МГц численно составляет около $\lambda_0 \approx 300$ м, что значительно превышает реальные значения минимальной длины $l_{min}$ воздушного промежутка в ДЭРС. Поэтому при рассмотрении полевых электромагнитных процессов в длинном воздушном промежутке исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» можно ограничиться их квазистационарным режимом протекания [17].

Считаем, что до начала подачи на исследуемую ДЭРС «стержень-плоскость» высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ объемная плотность $\rho_0$ свободных электрических зарядов в ее воздушном промежутке практически отсутствует, а электрическая прочность межэлектродного длинного воздушного промежутка ДЭРС определяется усредненным уровнем пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ резко неоднородного несимметричного сильного электрического поля в нем для указанного переменного напряжения $U_{12}(t)$, которое подается на металлические электроды этой ДЭРС.

Полагаем, что в первом приближении лавинно-стримерная и лидерная стадии высоковольтного искрового разряда в длинном воздушном промежутке исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» определяются процессом размножения в нем свободных электронов под их ударным ионизирующим действием на молекулы смеси газов ее атмосферного воздуха в сильном ЭМП, появление которого в этой ДЭРС вызывается подачей на ее электроды высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ [7, 8, 23–28].

Кроме того, принимаем то физическое положение, что активное размножение электронов главным образом происходит в окрестностях потенциального электрода-стержня ДЭРС с радиусом $r_c << r_0$ закругления его полусферического края в сферической зоне радиусом $r_i >> r_c$ активной ударной ионизации электронами атмосферного воздуха в ДЭРС [13], где напряженность $E_x(z, t)$ ее резко неоднородного сильного электрического поля значительно возрастает и достигает своего критического значения $E_{xk}(f_0)$ [29], вызывающего указанную ионизацию атмосферного воздуха в исследуемой ДЭРС.

Принимаем, что начало возникновения в ярко светящейся вблизи электрода-стержня исследуемой ДЭРС зоне радиусом $r_i$ активной ударной ионизации ее воздуха электронами, ускоренными в ее межэлектродном разрядном

промежутке электрическим полем с напряженностью порядка $E_{xk}(f_0)$ [29], плазменного канала лидера, то есть фактически время $T_d$ электрического пробоя ее воздушного промежутка длиной $l_{min} \geq 1$ м, соответствует напряжению появления $U_L$ вблизи края потенциального электрода-стержня этой ДЭРС беспрерывного электрического лидера разряда [7, 17]. Кроме того, считаем, что появление этого лидера у закругленного радиусом $r_c << r_0$ нижнего края потенциального электрода-стержня ДЭРС инициируется стримерной короной на данном металлическом электроде ДЭРС при положительной полуволне высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$, когда эта корона характеризуется своей наибольшей интенсивностью [7, 21]. В этой связи амплитудное (действующее) значение напряженности $E_{xm}$ электрического поля, соответствующее начальной напряженности стримерного коронного разряда с потенциального электрода-стержня высоковольтной ДЭРС, будет определять амплитудное (действующее) значение разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость», испытывающей воздействие принятого нами высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$.

Необходимо на основе расчетно-экспериментальных данных, касающихся развития электроразрядных процессов в длинном воздушном промежутке ДЭРС «стержень-плоскость», в приближенном виде определить указанные выше основные усредненные характеристики его электрического искрового пробоя, вызванного воздействием на металлические электроды этой ДЭРС высокого переменного напряжения $U_{12}(t) \approx U_{12m}\cos(2\pi f_0 t)$ повышенной частоты $f_0$ с диапазона 10 кГц $\leq f_0 \leq$ 1 МГц.

## РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАЗРЯДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ $U_{dm}(f_0)$ В ДЭРС

Используя известный инженерный метод расчета электрической прочности длинного воздушного промежутка ($l_{min} \geq 1$ м) в ДЭРС, получивший название метода критического коэффициента неоднородности электрического поля [7], для среднеквадратичного (действующего) значения разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в исследуемой воздушной ДЭРС «стержень-плоскость», испытывающей воздействие на ее металлические электроды высокого (сверхвысокого) переменного напряжения $U_{12}(t) \approx U_{12m}\cos(2\pi f_0 t)$ повышенной частоты $f_0$ с диапазона 10 кГц $\leq f_0 \leq$ 1 МГц, можно записать следующее приближенное соотношение [17]:

$$U_{dm}(f_0) \approx k_f E_{xm} l_{\min} / k_h, \qquad (1)$$

где $E_{xm} \approx 23[1+1{,}22(r_{ec})^{-0{,}37}]$ – действующее значение начальной напряженности электрического поля (с размерностью в кВ/см) стримерной короны в ДЭРС у края ее потенциального электрода-стержня с эквивалентным радиусом его закругления $r_{ec} \approx r_c$ (в см) [7]; $k_h \approx (14+1{,}5l_{min})$ – критическое значение безразмерного коэффициента неоднородности электрического поля в ДЭРС (с размерностью длины $l_{min}$ воздушного промежутка ДЭРС в м) [7]; $k_f \approx (0{,}9f_{0p}+0{,}1f_0)/f_0$ – безразмерный эмпирический коэффициент, учитывающий влияние частоты $f_0$ на электроразрядные процессы в ДЭРС; $f_{0p} \approx 10^4$ Гц – пороговое значение частоты $f_0$ применительно к исследуемой воздушной ДЭРС [7].

Из (1) при $f_0 = f_{0p} = 10$ кГц [7] следует, что $k_f \approx 1$ и разрядное напряжение $U_{dm}(f_0)$ в исследуемой ДЭРС при этом принимает значение, характерное для напряжения появления $U_L \approx E_{xm}l_{min}/k_h$ положительного лидера вблизи нижнего края с радиусом $r_c << r_0$ его закругления ее потенциального электрода-стержня, испытывающего импульсное воздействие на него напряжения $U_{12}(t)$ [17] и протекание с его заостренного края стримерной короны с начальной напряженностью $E_{xm}$ электрического поля. Видно, что значение начальной напряженности $E_{xm}$ электрического поля в нашем электрофизическом случае зависит только от радиуса $r_c$ закругления края электрода-стержня этой ДЭРС [7]. Отметим, что уменьшение в 2 раза численного значения $r_c$ (например, с 0,3 до 0,15 см) в рассматриваемой ДЭРС «стержень-плоскость» приводит к возрастанию в ней начальной напряженности $E_{xm}$ электрического поля примерно на 16% при ее действующем численном значении около $E_{xm} \approx 7{,}96$ МВ/м. Заметим, что для начала ионизации атмосферного воздуха в ДЭРС электронными ударами требуется, чтобы напряженность $E_{xi}$ электрического поля в ней составляла по меньшей мере примерно $E_{xi} \approx 2{,}4$ МВ/м [8].

В (1) безразмерный коэффициент $k_h \approx (14+1{,}5l_{min})$ учитывает влияние степени неоднородности сильного электрического поля в длинном воздушном промежутке ДЭРС «стержень-плоскость» на действующее значение разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ [7]. Поэтому в (1) величина $l_{min}/(14+1{,}5l_{min})$ будет отражать нелинейную зависимость амплитудного разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ от минимальной длины $l_{min}$ разрядного воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС, усиливающуюся с увеличением минимальной длины $l_{min}$ воздушного промежутка в этой ДЭРС и подтвержденную многочисленными результатами соот-

ветствующих высоковольтных экспериментальных исследований электроразрядных процессов в ДЭРС «стержень-плоскость» с длинными воздушными промежутками [2, 7, 9, 10].

На правомерность использования предлагаемого расчетного соотношения (1) при приближенном определении действующего значения разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» может указывать то, что для случаев, когда $k_f \approx 1$ ($f_0 = f_{0p} = 10$ кГц; *случай 1*), а влиянием частоты $f_0$ воздействующего напряжения $U_{12}(t)$ в диапазоне ее изменения 50 Гц $\le f_0 \le 10^4$ Гц на электроразрядные процессы в данной ДЭРС можно практически пренебречь (*случай 2*) [7, 9], результаты выполненных нами экспериментальных исследований электрической прочности длинного воздушного промежутка (например, при $l_{min}$ = 1,5 м; $r_c \approx 0{,}3$ см) в ДЭРС «стержень-плоскость» для стандартного коммутационного апериодического импульса напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс положительной полярности, нарастающая часть которого по форме полуволны напряжения $U_{12}(t)$ соответствует ее максимальной эквивалентной частоте $f_{0m} \approx 0{,}25T_m^{-1} \approx 1{,}25$ кГц, показали, что [17, 22]: во-первых, электрический искровой пробой указанного длинного воздушного промежутка всегда происходит на нарастающей части воздействующего на электроды ДЭРС импульсного напряжения $U_{12}(t)$ ($T_d \approx 95$ мкс; $f_{0d} \approx 0{,}25T_d^{-1} \approx 2{,}63$ кГц); во-вторых, опытное амплитудное значение разрядного напряжения $U_{dm}$ составляет около $U_{dm} \approx 611{,}6$ кВ. Укажем, что при этом согласно (1) при действующем значении начальной напряженности $E_{xm} \approx 6{,}68$ МВ/м электрического поля расчетное значение напряжения появления $U_L \approx E_{xm}l_{min}/k_h$ электрического положительного лидера в исследуемой ДЭРС с указанными параметрами ($l_{min}$ = 1,5 м; $r_c \approx 0{,}3$ см; $k_h \approx 16{,}25$) составляет примерно $U_L \approx 616{,}7$ кВ. Как видно, расхождение между опытным разрядным напряжением $U_{dm} \approx 611{,}6$ кВ и расчетным напряжением $U_L \approx E_{xm}l_{min}/k_h \approx 616{,}7$ кВ появления электрического лидера в этом случае в рассматриваемой высоковольтной воздушной ДЭРС не превышает 1%. В этой связи можно заключить, что напряжение появления $U_L \approx E_{xm}l_{min}/k_h$ электрического лидера в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» практически соответствует амплитудному (действующему) значению разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$, для которого частота $f_0$ колебаний воздействующего напряжения $U_{12}(t)$ находится в диапазоне 50 Гц $\le f_0 \le 10^4$ Гц.

Именно для учета влияния частоты $f_0$ изменения во времени $t$ высокого переменного напряжения $U_{12}(t) \approx U_{12m}\cos(2\pi f_0 t)$, удовлетворяющей принятому диапазону 10 кГц $\le f_0 \le$ 1 МГц, на действующее значение разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в исследуемой воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» нами дополнительно в известную формулу $U_L \approx E_{xm}l_{min}/k_h$ [7] и был введен согласно (1) безразмерный эмпирический коэффициент $k_f \approx (0{,}9f_{0p}+0{,}1f_0)/f_0$. Данный коэффициент отражает нелинейную зависимость действующего значения разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ от частоты $f_0$ изменения испытательного высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ в случае, когда частота $f_0$ превышает ее указанное пороговое значение $f_{0p} \approx 10^4$ Гц. Причем при данном значении коэффициента $k_f$ частотная зависимость амплитудного значения разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в (1) будет носить практически обратно пропорциональный характер от частоты $f_0$ переменного напряжения $U_{12}(t)$, воздействующего на исследуемую воздушную ДЭРС. Укажем, что именно такая зависимость для амплитудного разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ и была ранее выявлена экспериментальным путем при минимальных длинах $l_{min} \le 1$ м воздушного промежутка в ДЭРС «стержень-плоскость» [7]. Кроме того, эмпирический выбор такого значения безразмерного коэффициента $k_f$ в (1) принципиально не противоречит приведенным в [7, 9] расчетно-экспериментальным электрофизическим фактам о слабой зависимости значений амплитудного разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в высоковольтной ДЭРС «стержень-плоскость» с короткими воздушными промежутками ($l_{min} \le 1$ м) от частоты $f_0$ колебаний высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ на электродах ДЭРС, удовлетворяющей следующему диапазону ее изменения: 50 Гц $\le f_0 \le 10^4$ Гц.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА РАЗРЯДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ $U_{dm}(f_0)$ В ДЭРС

Ограничимся результатами приближенного расчета по (1) действующего значения разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в исследуемой высоковольтной воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» при следующих характерных значениях изменения ее геометрических и частотных параметров: минимальная длина $l_{min}$ воздушного промежутка в ДЭРС принимает три дискретных значения: 1,5; 3,0; 5,0 м; частота $f_0$ высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ принимает пять дискретных значений: 10; 30; 100; 300; 1000 кГц; радиус $r_c$ закругления нижнего края потенциального электрода-стержня ДЭРС принимает одно значение, которое составляет $r_c \approx 0{,}3$ см. С учетом указанных исходных данных для основных параметров воздушной

**Таблица 1.** Результаты расчета по (1) амплитудных значений разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в ДЭРС «стержень-плоскость» ($r_c \approx 0{,}3$ см) для различных значений частоты $f_0$ высокого (сверхвысокого) переменного напряжения $U_{12}(t)$ и минимальной длины $l_{min}$ ее воздушного промежутка

| Частота $f_0$, кГц | Амплитудное значение разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в высоковольтной ДЭРС, кВ | | |
|---|---|---|---|
| | Минимальная длина $l_{min}$ воздушного промежутка в высоковольтной ДЭРС, м | | |
| | 1,5 | 3,0 | 5,0 |
| 10 | 616,7 | 1083,4 | 1553,7 |
| 30 | 191,2 | 335,8 | 481,6 |
| 100 | 117,2 | 205,8 | 295,2 |
| 300 | 80,2 | 140,8 | 201,9 |
| 1000 | 67,2 | 118,1 | 169,3 |

*Примечание*. Для сравнения данных табл. 1 с известными результатами определения электрической прочности воздушных промежутков в исследуемой ДЭРС отметим, что полученные нами в условиях высоковольтной электрофизической лаборатории опытные данные для разрядного напряжения $U_{dm}$ в воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» (1 м $\le l_{min} \le$ 4 м; $r_c \approx 0{,}3$ см) в случае воздействия на ее стальные электроды стандартного коммутационного апериодического импульса напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx$ 200 мкс/1990 мкс ($f_{0m} \approx 0{,}25T_m^{-1} \approx 1{,}25$ кГц) положительной полярности составляли [17]: при $l_{min} = 1{,}5$ м – $U_{dm} \approx 611{,}6$ кВ; при $l_{min} = 3{,}0$ м – $U_{dm} \approx 1062{,}3$ кВ.

ДЭРС в табл. 1 приведены результаты определения по (1) амплитудных (действующих) значений разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в рассматриваемой ДЭРС «стержень-плоскость», испытывающей воздействие на ее металлические электроды высокого (сверхвысокого) переменного напряжения $U_{12}(t)$ повышенной частоты $f_0$ из принятого диапазона 10 кГц $\le f_0 \le$ 1 МГц.

Из расчетных данных табл. 1 видно, что с увеличением частоты $f_0$ высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ в рассматриваемом диапазоне ее изменения 10 кГц $\le f_0 \le$ 1 МГц наблюдается резкое уменьшение амплитудных (действующих) значений разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» с длинными воздушными промежутками. Так, при $l_{min} = 1{,}5$ м для частот $f_0 =$ 10 кГц и $f_0 =$ 1 МГц расчетное по (1) значение разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в такой воздушной ДЭРС снижается не менее чем в девять раз (с уровня ~ 616,7 кВ до уровня ~ 67,2 кВ). Интерполяция приведенных в [7, см. рис. 5.11] экспериментальных данных для разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в исследуемой ДЭРС при $f_0 =$ 1 МГц для $l_{min} \le$ 1 м на длину $l_{min} = 1{,}5$ м ее воздушного промежутка показывает, что в этом случае его численное значение может составлять примерно $U_{dm}(f_0) \approx$ 75 кВ. Как видно, расхождение этого опытного значения $U_{dm}(f_0) \approx$ 75 кВ с расчетным по (1) при $f_0 =$ 1 МГц разрядным напряжением $U_{dm}(f_0) \approx$ 67,2 кВ (см. табл. 1) находится в пределах 10%. С учетом интерполяции опытных данных для $U_{dm}(f_0)$ при $f_0 =$ 100 кГц [7, см. рис. 5.11]) можно считать, что при $l_{min} = 1{,}5$ м амплитудное разрядное напряжение $U_{dm}(f_0)$ в исследуемой ДЭРС численно составляет около $U_{dm}(f_0) \approx$ 107 кВ. Согласно расчету по (1) указанное напряжение $U_{dm}(f_0)$ при $f_0 =$ 100 кГц и $l_{min} = 1{,}5$ м (см. табл. 1) принимает численное значение около $U_{dm}(f_0) \approx$ 117,2 кВ. При этом расхождение между указанными опытным ($U_{dm}(f_0) \approx$ 107 кВ) и расчетным ($U_{dm}(f_0) \approx$ 117,2 кВ) значениями пробивного напряжения $U_{dm}(f_0)$ для выбранного длинного воздушного промежутка в ДЭРС «стержень-плоскость» ($l_{min} = 1{,}5$ м; $f_0 =$ 100 кГц) не превышает 9%. Приведенные выше результаты могут аргументированно указывать на работоспособность примененного нами инженерного подхода для нахождения в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» действующего значения разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в принятом частотном диапазоне 10 кГц $\le f_0 \le$ 1 МГц изменения частоты $f_0$ воздействующего на нее высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ и предложенного на его основе расчетного соотношения (1). Дополнительным физико-техническим аргументом в этом могут служить и приведенные в *примечании* к табл. 1 электрофизические данные, касающиеся полученных нами в условиях высоковольтной электрофизической лаборатории НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» экспериментальных значений разрядного напряжения $U_{dm}$ в ДЭРС «стержень-плоскость» при электрическом пробое ее длинных воздушных промежутков (для $l_{min} = 1{,}5$ м и $l_{min} = 3{,}0$ м) указанным высоким и сверхвысоким стандартным коммутационным апериодическим импульсом напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx$ 200 мкс/1990 мкс ($f_{0m} \approx 0{,}25T_m^{-1} \approx 1{,}25$ кГц) положительной полярности [13, 17]. Из приведенных в *примечании* к табл. 1 данных видно, что для $f_0 =$ 10 кГц и указанного испытательного апериодического импульса высокого и сверхвысокого напряжения

$U_{12}(t)$ расхождения между расчетными по (1) и экспериментальными результатами определения разрядного напряжения $U_{dm}$ в ДЭРС «стержень-плоскость» при $l_{min}$ = 1,5 м и $l_{min}$ = 3,0 м не превышают 2%.

Согласно расчетным данным табл. 1 в случае фиксированной частоты $f_0$ высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ при увеличении минимальной длины $l_{min}$ воздушного промежутка в исследуемой высоковольтной ДЭРС «стержень-плоскость» происходит и возрастание в ней амплитудных значений разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$. Причем это возрастание происходит не прямо пропорционально степени увеличения длины $l_{min}$ разрядного промежутка в ДЭРС. Данное возрастание разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ для неизменной частоты $f_0$ с увеличением длины $l_{min}$ воздушного промежутка в ДЭРС «стержень-плоскость» ограничивается ростом степени неоднородности ее электрического поля (возрастанием критического коэффициента $k_h$ неоднородности электрического поля в ДЭРС) и соответственно не пропорциональным степени повышения значения этой длины $l_{min}$ ростом величины $l_{min}/(14+1{,}5l_{min})$ в расчетной формуле (1) для амплитудного значения разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$.

При анализе и верификации полученных на основе формулы (1) количественных результатов приближенного расчета среднеквадратичных значений разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» (см. табл. 1) отправными материалами могут служить также и экспериментальные данные электрической прочности воздушной изоляции в ДЭРС «стержень-плоскость» (при $l_{min} \le 1$ м) в зависимости от частоты $f_0$ высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ и длины $l_{min}$, приведенные в [7, см. рис. 5.10]. Эти опытные результаты четко указывают на то, что действительно пороговое значение частоты $f_{0p}$ для исследуемой воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» численно составляет около $f_{0p} \approx 10$ кГц. Именно, начиная с данной частоты $f_0 = f_{0p}$ переменного напряжения $U_{12}(t)$ при ее возрастании на металлических электродах рассматриваемой ДЭРС с фиксированным значением минимальной длины $l_{min}$ ее воздушного промежутка, наблюдается резкое снижение ее разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$, носящее практически обратно пропорциональный характер от частоты $f_0$ колебаний воздействующего на исследуемую ДЭРС «стержень-плоскость» переменного напряжения $U_{12}(t)$.

## РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ПРОБИВНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ $E_{dm}(f_0)$ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДЭРС

С учетом (1) и приведенного выше приближенного расчетного соотношения между амплитудными (действующими) значениями разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ и пробивной напряженности $E_{dm}(f_0) \approx U_{dm}(f_0)/(1{,}13l_{min})$ сильного электрического поля в исследуемой высоковольтной воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» для определения усредненной пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в этой ДЭРС имеем следующее приближенное расчетное выражение:

$$E_{dm}(f_0) \approx 0{,}885 k_f k_h^{-1} E_{xm}. \qquad (2)$$

При расчетной оценке по (2) усредненной пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в высоковольтной воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» следует учитывать то обстоятельство, что используемая в ней начальная напряженность $E_{xm} \approx 23[1+1{,}22(r_c)^{-0{,}37}]$ электрического поля стримерной короны с заостренного края при радиусе его полусферического закругления $r_c$ (с размерностью в см) потенциального электрода-стержня этой ДЭРС (см. рисунок) имеет размерность в кВ/см [7]. При дальнейшем получении количественных результатов расчета по (2) усредненной пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в длинных промежутках исследуемой ДЭРС с атмосферным воздухом воспользуемся принятыми при нахождении по (1) разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в этой высоковольтной ДЭРС характерными дискретными значениями изменения ее основных геометрических и частотных параметров: минимальная длина $l_{min}$ воздушного промежутка в ДЭРС принимает три значения:1,5; 3,0; 5,0 м; частота $f_0$ высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ принимает пять значений: 10; 30; 100; 300; 1000 кГц; радиус $r_c$ закругления нижнего края потенциального металлического электрода-стержня ДЭРС принимает одно значение, равное $r_c \approx 0{,}3$ см.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПРОБИВНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ $E_{dm}(f_0)$ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДЭРС

Результаты приближенного определения по (2) амплитудных (действующих) значений пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ сильного электрического поля в исследуемой воздушной ДЭРС «стержень-плоскость», испытывающей воздействие на ее металлические электроды высокого (сверхвысокого) переменного напряжения $U_{12}(t)$ повышенной частоты $f_0$ с диапазона 10 кГц $\le f_0 \le$ 1 МГц, с учетом принятых дискретных изменений ее основных геометрических и частотных параметров могут быть сведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты расчета по (2) усредненных значений пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в ДЭРС «стержень-плоскость» ($r_c \approx 0{,}3$ см) для различных значений частоты $f_0$ высокого (сверхвысокого) переменного напряжения $U_{12}(t)$ и минимальной длины $l_{min}$ ее воздушного промежутка

| Частота $f_0$, кГц | Усредненное значение пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в ДЭРС, кВ/м | | |
|---|---|---|---|
| | Минимальная длина $l_{min}$ воздушного промежутка в высоковольтной ДЭРС, м | | |
| | 1,5 | 3,0 | 5,0 |
| 10 | 363,8 | 319,6 | 275,0 |
| 30 | 112,8 | 99,1 | 85,2 |
| 100 | 69,1 | 60,7 | 52,2 |
| 300 | 47,3 | 41,5 | 35,7 |
| 1000 | 39,6 | 34,8 | 30,0 |

*Примечание*. Для сравнения данных табл. 2 с известными результатами определения усредненных по минимальной длине $l_{min}$ воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС значений пробивной напряженности $E_{dm}$ электрического поля отметим, что согласно полученным нами в условиях высоковольтной электрофизической лаборатории опытным данным для разрядного напряжения $U_{dm} \approx 1{,}13 l_{min} E_{dm}$ в воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» ($1 \text{ м} \le l_{min} \le 4$ м; $r_c \approx 0{,}3$ см) в случае воздействия на ее стальные электроды стандартного коммутационного апериодического импульса напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс ($f_{0m} \approx 0{,}25 T_m^{-1} \approx 1{,}25$ кГц) положительной полярности расчетно-экспериментальные значения усредненной пробивной напряженности $E_{dm}$ составляли [17]: при $l_{min} = 1{,}5$ м – $E_{dm} \approx 360{,}8$ кВ/м; при $l_{min} = 3{,}0$ м – $E_{dm} \approx 313{,}4$ кВ/м.

Приведенные в табл. 2 расчетные по (2) данные для усредненной пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в воздушной ДЭРС «стержень-плоскость», испытывающей воздействие высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ повышенной частоты $f_0$ с принятого диапазона 10 кГц $\le f_0 \le$ 1 МГц, свидетельствуют о том, что с возрастанием значений как данной частоты $f_0$, так и минимальной длины $l_{min}$ длинного воздушного промежутка в этой ДЭРС происходит асимптотическое уменьшение значений указанной напряженности $E_{dm}(f_0)$. Причем согласно (2) в первом случае (в случае частотной зависимости напряженности $E_{dm}$ электрического поля) характер уменьшения значений $E_{dm}(f_0)$ определяется безразмерным коэффициентом $k_f \approx (0{,}9 f_{0p} + 0{,}1 f_0)/f_0$, а во втором случае (в случае зависимости напряженности $E_{dm}$ электрического поля от длины $l_{min}$ разрядного промежутка) – безразмерным коэффициентом $k_h \approx (14 + 1{,}5 l_{min})$. В обоих указанных случаях данное уменьшение значений усредненной пробивной напряженности $E_{dm}$ электрического поля в воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» будет носить обратно пропорциональный характер: в первом случае – от частоты $f_0$, а во втором случае – от длины $l_{min}$. Чем будет выше частота $f_0$ высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$, подаваемого на металлические электроды исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость», тем будет меньше значение усредненной пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в ней. Так, согласно данным табл. 2 при $l_{min} = 5$ м и увеличении частоты $f_0$ со значения $f_0 = 10$ кГц до значения $f_0 = 100$ кГц наблюдается уменьшение значения усредненной пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в рассматриваемой ДЭРС более чем в 5 раз (с уровня ~ 275,0 кВ/м до уровня ~ 52,2 кВ/м). Для частот $f_0 = 10$ кГц и $f_0 = 1$ МГц колебаний переменного напряжения $U_{12}(t)$ это уменьшение значения пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ в ДЭРС при $l_{min} = 5$ м составляет уже более чем в 9 раз (с уровня ~ 275,0 кВ/м до уровня ~ 30,0 кВ/м).

Для сравнения полученных приближенных расчетных результатов для усредненной пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в ДЭРС «стержень-плоскость» с известными расчетно-экспериментальными данными для $E_{dm}(f_0)$ укажем, что при $l_{min} = 1{,}5$ м и $f_0 = 100$ кГц они составляли соответственно при $U_{dm}(f_0) \approx 117{,}2$кВ (см. табл. 1) и $U_{dm}(f_0) \approx 107$ кВ [7] примерно $E_{dm}(f_0) \approx 69{,}1$ кВ/м (см. табл. 2) и $E_{dm}(f_0) \approx 63{,}1$ кВ/м [7]. Видно, что расхождение между указанными значениями $E_{dm}(f_0)$ находятся в пределах 9%. При $l_{min} = 1{,}5$ м и $f_0 = 1$ МГц рассматриваемые сравниваемые значения пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ были равными соответственно около $E_{dm}(f_0) \approx 39{,}6$ кВ/м (см. табл. 2); $U_{dm}(f_0) \approx 67{,}2$ кВ) и $E_{dm}(f_0) \approx 44{,}2$ кВ/м ($U_{dm}(f_0) \approx 75$ кВ) [7], а расхождение между ними не превышало 11%. Приведенные данные обоснованно указывают на правомерность использования в практических расчетах приближенной формулы (2) при определении усредненной пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ сильного электрического поля в высоковольтной ДЭРС «стержень-плоскость» с ее длинным воздушным промежутком ($l_{min} \ge 1$ м).

Дополнительным аргументом в пользу достоверности расчетного соотношения (2) и предложенного инженерного подхода для нахождения

приближенных усредненных значений разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ и пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» с длинными воздушными промежутками могут служить приведенные в *примечании* к табл. 2 расчетно-экспериментальные данные для усредненной пробивной напряженности $E_{dm}$ электрического поля ($E_{dm} \approx 360{,}8$ кВ/м при $l_{min} = 1{,}5$ м и $E_{dm} \approx 313{,}4$ кВ/м при $l_{min} = 3{,}0$ м), полученные в условиях высоковольтной электрофизической лаборатории НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» при воздействии на исследуемую ДЭРС стандартного коммутационного апериодического импульса высокого напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс ($f_{0m} \approx 0{,}25T_m^{-1} \approx 1{,}25$ кГц) положительной полярности. Данные значения для пробивной напряженности $E_{dm}$ отличаются от соответствующих им расчетных по (2) значений $E_{dm}(f_0)$ при $f_0 = 10$ кГц для $l_{min} = 1{,}5$ м ($E_{dm}(f_0) \approx 363{,}8$ кВ/м) и $l_{min} = 3{,}0$ м ($E_{dm}(f_0) \approx 319{,}6$ кВ/м) в пределах 2%.

Полученные приближенные расчетные результаты как для усредненной пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в ДЭРС «стержень-плоскость» с длинными воздушными промежутками (см. табл. 2), так и соответствующей ей амплитудного (действующего) значения разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в данной воздушной ДЭРС (см. табл. 1) позволяют более обоснованно с электрофизических позиций подходить к удивительным и на сегодня по достигнутым высоким научным результатам в области высоковольтной электротехники высокочастотным экспериментам выдающегося сербско-американского электротехника Н. Теслы [20], впервые применившего в области ВВТ при опытном исследовании длинных электрических разрядов в атмосферном воздухе высоковольтные высокочастотные генераторы (трансформаторы Теслы), содержащие оригинальные резонансные трансформаторные схемы со специальными катушками [1, 20, 30]. Используя эти генераторы сверхвысокого (высокого) переменного напряжения $U_{12}(t)$, имевшие электрическую мощность до $P_{12m} \approx 200$ кВт и амплитудное значение напряжения $U_{12}(t)$ до $U_{12m} \approx$ (1–10) МВ [20], Н. Тесла при частоте $f_0 = 150$ кГц сверхвысокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ на электродах воздушной ДЭРС имитировал и наблюдал в атмосферном воздухе длинные электрические искры (искусственные молнии) длиной до 40 м, веером расходящиеся от потенциального электрода примененной им высоковольтной ДЭРС в окружающее ее воздушное пространство [20, 30]. В основе этих пионерских выдающихся электрофизических достижений Н. Теслы как раз и лежит частотная зависимость среднеквадратичного разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ и усредненной пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в длинных воздушных промежутках ДЭРС, описанная нами выше в приближенном виде с помощью предложенных расчетных аналитических соотношений (1) и (2) применительно к высоковольтной воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» с резко неоднородным несимметричным сильным электрическим полем.

Выполненная по (1) расчетная оценка необходимого уровня амплитуды $U_{12m} \approx (2)^{1/2}U_{dm}(f_0)$ переменного напряжения $U_{12}(t)$ частотой $f_0 = 150$ кГц для электрического пробоя воздушного промежутка длиной $l_{min} = 40$ м в высоковольтной ДЭРС «стержень-плоскость» показывает, что в этом случае ($k_f \approx 0{,}16$; $k_h \approx 74$; $r_c \approx 0{,}3$ см; $E_{xm} \approx 6{,}68$ МВ/м) амплитуда переменного напряжения $U_{12}(t)$, воздействующего с частотой колебаний $f_0 \approx 150$ кГц на металлические электроды указанной ДЭРС, должна составлять при $U_{dm}(f_0) \approx 577{,}8$ кВ и $E_{dm}(f_0) \approx 0{,}885U_{dm}(f_0)/l_{min} \approx 12{,}8$ кВ/м примерно $U_{12m} \approx 817$ кВ. Таким образом, данная приближенная расчетная оценка по предлагаемому нами соотношению (1) среднеквадратичного разрядного напряжения $U_{dm}(f_0) \approx 577{,}8$ кВ в рассматриваемой ДЭРС «стержень-плоскость» ($f_0 = 150$ кГц; $l_{min} = 40$ м) и соответствующей ему амплитуды $U_{12m} \approx 817$ кВ переменного напряжения $U_{12}(t)$, подаваемого на электроды этой ДЭРС, указывает на практическую реализуемость приведенных выше экспериментальных результатов Н. Теслы при получении им электрических искр длиной около 40 м в сверхвысоковольтной воздушной ДЭРС при частоте $f_0 = 150$ кГц и амплитуде $U_{12m} \approx 1$ МВ переменного электрического напряжения $U_{12}(t)$ на выходе разработанной и созданной им новой конструкции сверхвысоковольтного резонансного трансформатора [1, 20, 30].

Как следует из полученных нами по предложенным формулам (1) и (2) расчетных данных для усредненных значений разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ и пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в ДЭРС «стержень-плоскость», возможность электрического пробоя ее воздушного разрядного промежутка минимальной длиной $l_{min} = 5$ м с помощью высоковольтного высокочастотного источника переменного напряжения $U_{12}(t)$ для частоты $f_0 = 100$ кГц будет проявляться при амплитуде $U_{12m}$ воздействующего на металлические электроды этой ДЭРС переменного напряжения $U_{12}(t)$, равной примерно $U_{12m} \approx (2)^{1/2}U_{dm}(f_0) \approx$ 417,4 кВ (см. табл. 1). В этом случае ($l_{min} = 5{,}0$ м;

$f_0$ = 100 кГц; $U_{dm}(f_0)$ ≈ 295,2 кВ) усредненная пробивная напряженность $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в ДЭРС «стержень-плоскость» будет принимать численное значение, равное около $E_{dm}(f_0)$ ≈ 52,2 кВ/м (см. табл. 2). Именно благодаря существенному уменьшению значения пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ в рассматриваемой воздушной ДЭРС при $f_0$ = 100 кГц по сравнению со случаем, когда $f_0$ = 10 кГц (примерно в 5,3 раза с уровня ~ 275,0 кВ/м до уровня ~ 52,2 кВ/м), появляется возможность электрического пробоя ее длинного воздушного промежутка ($l_{min}$ = 5,0 м) при сравнительно небольшом значении амплитуды $U_{12m} \approx 1{,}13\times(2)^{1/2}E_{dm}(f_0)l_{min} \approx$ 417,4 кВ переменного электрического напряжения $U_{12}(t)$, воздействующего на металлические электроды ДЭРС «стержень-плоскость».

## ВЫВОДЫ

1. На основе применения известного инженерного метода расчета электрической прочности воздушной изоляции в высоковольтной ДЭРС (метода критического коэффициента неоднородности электрического поля) для случая воздействия на ее металлические электроды высокого (сверхвысокого) переменного электрического напряжения $U_{12}(t)$ повышенной частоты $f_0$ его колебаний с диапазона 10 кГц ≤ $f_0$ ≤ 1 МГц предложены приближенные расчетные соотношения для нахождения среднеквадратичного разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ и усредненной пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» с длинным воздушным промежутком ($l_{min} \geq$ 1 м) и заостренным нижним краем с радиусом $r_c$ его полусферического закругления для ее потенциального электрода-стержня.

2. Полученные результаты приближенного расчетного определения основных усредненных характеристик электрического пробоя (разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ и пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля) длинного воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» указывают на их сильную частотную зависимость в рассматриваемом диапазоне 10 кГц ≤ $f_0$ ≤ 1 МГц изменения частоты $f_0$ переменного высокого (сверхвысокого) напряжения $U_{12}(t)$, воздействующего на металлические электроды этой ДЭРС. Установлено, что данная частотная зависимость для разрядных характеристик $U_{dm}(f_0)$ и $E_{dm}(f_0)$ носит практически обратно пропорциональный характер от частоты $f_0$ изменения напряжения $U_{12}(t)$. При этом расчетным путем показано, что чем будет выше частота $f_0$ переменного высокого (сверхвысокого) напряжения $U_{12}(t)$ в исследуемой воздушной ДЭРС, тем меньше будут в ней приближенные усредненные значения разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ и пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ сильного электрического поля.

3. Показано, что при частотах $f_0$ = 10 кГц и $f_0$ = 1 МГц воздействующего на исследуемую ДЭРС «стержень-плоскость» высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ для минимальной длины $l_{min}$ = 1,5 м ее воздушного промежутка расчетное среднеквадратичное разрядное напряжение $U_{dm}(f_0)$ в данной ДЭРС принимает численные значения, равные соответственно примерно $U_{dm}(f_0)$ ≈ 616,7 кВ и $U_{dm}(f_0)$ ≈ 67,2 кВ. При этом для указанных значений частоты $f_0$ уровень разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в исследуемой ДЭРС снижается не менее чем в 9 раз. При тех же частотах $f_0$ = 10 кГц и $f_0$ = 1 МГц сверхвысокого (высокого) переменного напряжения $U_{12}(t)$ и минимальной длине $l_{min}$ = 5,0 м воздушного промежутка в рассматриваемой высоковольтной ДЭРС усредненное разрядное напряжение $U_{dm}(f_0)$ в ней, при сохранении указанного выше уровня его снижения не менее чем в 9 раз для приведенного возрастания частоты $f_0$ в 100 раз (с 10 кГц до 1 МГц) сверхвысокого (высокого) переменного напряжения $U_{12}(t)$, принимает численные значения, составляющие соответственно около $U_{dm}(f_0)$ ≈ 1553,7 кВ и $U_{dm}(f_0)$ ≈ 169,3 кВ.

4. Установлено, что для минимальной длины $l_{min}$ = 1,5 м воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» при частотах $f_0$ = 10 кГц и $f_0$ = 1 МГц воздействующего на ее электроды высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ усредненная пробивная напряженность $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в ней составляет соответственно численные значения, равные примерно $E_{dm}(f_0)$ ≈ 363,8 кВ/м и $E_{dm}(f_0)$ ≈ 39,6 кВ/м. Как и для разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$, пробивная напряженность $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в данной ДЭРС при указанном изменении этой частоты $f_0$ уменьшается не менее чем в 9 раз. При минимальной длине $l_{min}$ = 5,0 м воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС и при тех же частотах $f_0$ = 10 кГц и $f_0$ = 1 МГц высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ на ее электродах рассматриваемая пробивная напряженность $E_{dm}(f_0)$ принимает численные значения, равные около $E_{dm}(f_0)$ ≈ 275,0 кВ/м и $E_{dm}(f_0)$ ≈ 30,0 кВ/м. При этом степень снижения пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в ДЭРС в связи с возрастанием частоты $f_0$ в 100 раз (с уровня 10 кГц до уровня 1 МГц) при $l_{min}$ = 5,0 м сохраняется и составляет не менее чем 9 раз.

5. Выполненное сравнение полученных приближенных расчетных результатов для среднеквадратичных значений разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в исследуемой высоковольтной воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» с их известными для $l_{min} \le 1$ м и интерполированными для $l_{min}$ = 1,5 м экспериментальными данными в рассматриваемом диапазоне 10 кГц $\le f_0 \le$ 1 МГц изменения частоты $f_0$ высокого переменного напряжения $U_{12}(t)$ на электродах данной ДЭРС подтверждает работоспособность предложенного инженерного подхода к расчету электрической прочности ДЭРС и базирующихся на нем приближенных расчетных соотношений для нахождения в ней усредненных значений как разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$, так и пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ сильного электрического поля.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Украины (бюджетная тема № 0125U001617).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него отсутствует конфликт интересов.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Бржезицький, В.О., Білий, І.В., Бойко, М.І., Гуль, В.І., и др., *Техніка і електрофізика високих напруг: Навчальний посібник*. Харків: НТУ “ХПІ”−Торнадо, 2005. 930 с.
2. Александров, Г.Н., *Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды: Учебное пособие для вузов*. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 360 с.
3. Бейер, М., Бек, В., Меллер, К., Цаенгль, В., *Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы ее применения*. М.: Энергоатомиздат, 1989. 555 с.
4. Мак-Дональд, А., *Сверхвысокочастотный пробой в газах*. М.: Мир, 1969. 205 с.
5. Дашук, П.Н., Зайенц, С.Л., Комельков, В.С., Кучинский, Г.С., и др., *Техника больших импульсных токов и магнитных полей*. М.: Атомиздат, 1970. 472 с.
6. Базелян, Э.М., Ражанский, И.М., *Искровой разряд в воздухе*. Новосибирск: Наука, 1988. 165 с.
7. Бортник, И.М., Белогловский, А.А., Верещагин, И.П., Вершинин, Ю.Н., и др., *Электрофизические основы техники высоких напряжений*: *Учебник для вузов*. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 704 с.
8. Райзер, Ю.П., *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1987. 592 с.
9. Дьяков, А.Ф., Бобров, Ю.К., Сорокин, А.В., Юргеленас, Ю.В., *Физические основы электрического пробоя газов*. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 400 с.
10. Базелян, Э.М., Райзер, Ю.П., *Искровой разряд*. М.: Изд-во МФТИ, 1997. 320 с.
11. Betz, H.D., Schumann, U., Laroche, P., *Lightning: Principles, Instruments and Applications. Review of Modern Lightning Research*. Munich: Germany, Springer Dordrecht Publ., 2009. 641 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9079-0
12. Baranov, M.I., Buriakovskyi, S.G., Kniaziev, V.V., and Rudenko, S.S., Analysis of characteristics and possibilities of high-voltage electrical engineering comlex Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute “Molniya” NTU “KhPI” for the tests of objects of energy, armament, aviation and space-rocket technique on electric safety and electromagnetic compatibility, *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, p. 37. https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.06.
13. Баранов, М.І., *Вибрані питання електрофізики: Монографія у 4 томах. Том 4: Ефекти взаємодії фізичних тіл з полями і струмами*. Харків: “ФОП Панов А.М.”, 2023. 552 с.
14. Baranov, M.I., A generalized physical principle of development of plasma channel of a high-voltage pulse spark discharge in a dielectric, *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no.1, p. 34. https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.1.05
15. Гулый, Г.А., *Научные основы разрядно-импульсных технологий*. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
16. Григорьев, А.Д., *Электродинамика и техника СВЧ*. М.: Высшая школа, 1990. 335 с.
17. Баранов, М.И., Амплитудно-временные характеристики электрического пробоя длинных воздушных промежутков в двухэлектродной разрядной системе “острие-плоскость” коммутационным апериодическим импульсом высокого напряжения, *Электронная обработка материалов*. 2025, том 61, №4, с. 29. https://doi.org/10.52577/*eom*.2025.61.4.29
18. *Стандарт ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции*. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. 31 с.
19. Кухлинг, Х., *Справочник по физике* / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. М.: Мир, 1982. 520 с.
20. Баранов, М.И., *Избранные вопросы электрофизики: Монография в 4-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира*. Харьков: НТУ “ХПИ”, 2008. 252 с.
21. Богатенков, И.М., Иманов, Г.М., Кизеветтер, В.Е., Костенко, М.В., и др., *Техника высоких напряжений. Учебное пособие для вузов*. СПб.: Изд-во ПЭИПК, 1998. 700 с.

22. Baranov, M.I., Calculation and experimental determination of speed of advancement of the plasma leader channel of a pulse spark discharge in atmospheric air, *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 2, p. 48. https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.2.07

23. Мик, Дж., Крэгс, Дж., *Электрический пробой в газах*. М.: ИЛ, 1960. 605 с.

24. Ретер, Г., *Электронные лавины и пробой в газах*. М.: Мир, 1968. 390 с.

25. Nijdam, S., Teunissen, J., and Ebert, U., The physics of streamer discharge phenomena, *Plasma Sources Science and Technology*, 2000, vol. 29, no.10, art. ID 103001. https://doi.org/10.1088/1361-6595/abaa05

26. Kupershtokh, A.L., Charalambakos, V.P., Agoris, D.P., and Karpov, D.I., Simulation of breakdown in air using cellular automata with streamer to leader transition, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, vol. 34, no. 6, p. 936. https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/6/315

27. Xiong, Z., Robert, E., Sarron, V., Pouvesle, J.-M., et al., Dynamics of ionization wave splitting and merging of atmospheric-pressure plasmas in branched dielectric tubes and channels, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, vol. 45, no. 27, art. ID 275201. https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/27/275201

28. Hu, H.M., Yang, Y., Lu, W., and Zhao, G.P., Electrical tree simulation based on the self-organization criticality. *Energy and Power Engineering*, 2013, vol. 5, no. 48, p. 1273. https://doi.org/10.4236/epe.2013.54B241

29. Baranov, M.I., The main characteristics of the leader channel during breakdown of a long air gap by high pulse voltage, *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, no. 4, p. 59. https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.4.08

30. Tilbury, Mitch, *The ultimate Tesla coil design and construction guide*. N.Y.: McGraw Hill Professional Publ., 2007. 413 p.

**Summary**

The results are presented of the calculation determination of basic characteristics of an electric hasp of a long air interval in the double-electrode discharge system (DEDS) “bar-plane” by a high variable voltage of $U_{12}(t)$ of an enhanceable frequency of $f_0$ from the range of 10 кHz$\le f_0 \le$1 MHz. Close calculation correlations were made so as to find the root-mean-square of a discharge voltage of $U_{dm}(f_0)$ and the middle on a minimum length of $l_{min}\ge$1 m of this interval of an aggressive tension of $E_{dm}(f_0)$ of a strong electric-field for the probed DEDS. The offered engineering approach for the determination of values of $U_{dm}(f_0)$ and $E_{dm}(f_0)$ is based on the known results of close calculations in the long air interval of DEDS “bar-plane” with the sharply not-homogeneous strong electric field of the voltage of appearance of $U_L$ of an electric leader near-by a lower edge with the radius of rounding of $r_c$ of its bar and introduced by the author in a formula for $U_L$ of a dimensionless coefficient of $k_f$, taking into account the influence of frequency of $f_0$ on the electro-discharge processes in that DEDS. The comparison of the obtained calculation results for the numeral values of the discharge voltage of $U_{dm}(f_0)$ with their known experimental information for the indicated turn-down frequency of $f_0$ voltage of $U_{12}(t)$ on the electrodes of that DEDS confirms a capacity offered approach for finding in it of a discharge voltage of $U_{dm}(f_0)$ and an aggressive tension of $E_{dm}(f_0)$ of an electric field.

*Keywords*: long air interval, variable voltage of enhanceable frequency, electric hasp of interval, discharge voltage, aggressive tension of electric field, calculation