

**М. И. БАРАНОВ**, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
**В. О. ЛЫСЕНКО**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## **РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА РАДИУСА ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА ПОДВОДНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА В ЦЕПИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГЕНЕРАТОРА БОЛЬШИХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ**

Наведено формулу для наближеного розрахунку максимального значення радіусу сильнострумного плазмового каналу підводного іскрового розряду, що формується в електричному розрядному колі високовольтного генератора великих імпульсних струмів.

A formula is resulted for the close calculation of maximal value of radius of heavy-current plasma channel of a submarine spark discharge, formed in the electric bit chain of high-voltage generator of large impulsive currents.

**Введение.** При теоретическом и экспериментальном исследовании механизмов разрушения под действием больших импульсных токов (БИТ), формируемых природными грозowymi электрическими разрядами (молниями) и испытательными высоковольтными электрофизическими установками (ВЭФУ), древесины и деревянных клееных конструкций (ДКК) из нее [3,4] необходимо иметь ряд исходных физико-технических характеристик, касающихся в том числе и сильноточных плазменных каналов (СПК) искровых разрядов в воздушной и водной средах. Данные среды, как известно, присутствуют во внутренней структуре древесины и ДКК [5,6]. При прямом ударе молнии в древесину или ДКК, используемых в качестве размещенных на открытом воздухе изоляционных несущих элементов объектов электроэнергетики (например, низко- и высоковольтных воздушных линий электропередачи [7]) и высоковольтной импульсной техники (ВИТ) специального назначения (например, систем полеобразования ВЭФУ [8]), в указанных средах могут формироваться воздушные и подводные искровые разряды той или иной длины, разрушающие микро- и макроструктуру древесины и ДКК. В настоящее время вопросы поведения растущей или «неживой» древесины и изготовленных из нее ДКК в условиях воздействия на них БИТ естественного (токи молнии) и искусственного (разрядные токи ВЭФУ) происхождения находятся на начальной стадии исследования [4,9] и остаются слабо изученными. В [10] были представлены некоторые полученные приближенным расчетно-экспериментальным путем электрические характеристики СПК для воздушных искровых разрядов (например, активное сопротивление, удельная электропроводность, напряженность продольного электрического поля), протекающих в сильноточной разрядной цепи генератора импульсных токов (ГИТ), формирующего сильно затухающую повторную импульсную  $D$ -компоненту тока искусственной молнии амплитудой до 100 кА при ее длительности до 500 мкс [1,2]. Полученные в [10] данные для СПК воздушного искрового разряда в цепи мощного ГИТ ба-

зируются на известной формуле Брагинского для максимального радиуса  $r_{mk}$  плазменного канала, развивающегося в воздухе при его непосредственном электрическом пробое или при пробое, инициированном явлением электрического взрыва (ЭВ) в воздушном промежутке тонкой металлической проволочки [11,12]. На взгляд авторов, в настоящий момент времени расчетные аналитические соотношения для определения максимального радиуса  $r_{mk}$  плазменного канала, развивающегося в жидкой среде (например, в технической воде) при ее электрическом пробое без ЭВ или с использованием ЭВ, отсутствуют. Поэтому получение подобной приближенной расчетной зависимости для  $r_{mk}$  при сильноточном искровом разряде в воде является актуальной научно-технической задачей в области ВИТ.

**1. Краткая постановка электрофизической задачи.** Рассмотрим вызванный высоковольтным ГИТ с предварительно заряженным до постоянного напряжения  $\pm U_0$  емкостным накопителем энергии (ЕНЭ) искровой разряд, протекающий в рабочей камере (РК) с технической водой, находящейся под атмосферным давлением  $1,013 \cdot 10^5$  Па и при температуре окружающего воздуха, равной  $0$  °С. Считаем, что данный разряд в РК инициирован подводным ЭВ тонкой прямолинейной металлической проволочки длиной  $l_0$ . Считаем, что в процессе разряда ЕНЭ в электрической цепи ГИТ протекает импульсный ток, характеризующийся первой наибольшей амплитудой  $I_m$  той или иной полярности, которой соответствует время  $t_m$ . На основании результатов известных экспериментальных наблюдений принимаем, что максимальное энерговыделение в подводном СПК происходит на участке первой полуволны разрядного тока ГИТ [13]. Такому характеру выделения в СПК энергии будет соответствовать и максимальная температура канала разряда, наблюдаемая также на участке первого полупериода колебаний разрядного тока ГИТ. Полагаем, что образующийся после подводного ЭВ металлической проволочки СПК принимает форму круглого цилиндра и характеризуется длиной  $l_k = l_0$  и максимальным радиусом  $r_{mk}$ , соответствующим первой амплитуде  $I_m$  разрядного тока ГИТ. Допускаем, что высокоионизированная низкотемпературная «металлическая» плазма исследуемого сильноточного канала может быть охарактеризована усредненной по его поперечному сечению удельной электропроводностью  $\sigma_k$ . Требуется найти аналитическое соотношение, приблизительно описывающее изменение максимального радиуса  $r_{mk}$  плазменного канала в зависимости от амплитудно-временных параметров (АВП) разрядного импульсного тока ГИТ.

**2. Предлагаемый подход для решения поставленной электрофизической задачи.** Принимая во внимание определенную общность электрофизических процессов, протекающих в области плазменных каналов сильноточных искровых разрядов для газообразных и конденсированных сред, а также известные научно-технические материалы для канальной стадии ЭВ в воде, приведенные в монографии проф. Гулого Г.А. по теории и практике электрогидравлического эффекта [13], представим искомое аналитическое соотношение для величины максимального радиуса  $r_{mk}$  подводного СПК в следующем

обобщенном виде:

$$r_{mk} = B_k \cdot (I_m)^{1/3} (t_m)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $I_m$ ,  $t_m$  – первая амплитуда импульсного тока в разрядной цепи высоковольтного ГИТ и время достижения импульсом тока этой амплитуды соответственно;  $B_k$  – неизвестный размерный коэффициент, подлежащий дальнейшему расчетному или экспериментальному определению.

Для определения в (1) значения коэффициента  $B_k$  воспользуемся экспериментальными результатами, приведенными в табл. 2 из [13] и полученными при подводном ЭВ в случае исследования развития в технической воде разрядного плазменного канала в сильноточных цепях высоковольтных ГИТ, характеризующихся зарядным напряжением  $U_0 = 5$  кВ (при амплитуде тока  $I_m = 88$  кА и времени ее достижения  $t_m = 4$  мкс) и  $U_0 = 8$  кВ (при амплитуде тока  $I_m = 42$  кА и времени ее достижения  $t_m = 2$  мкс). Заметим, что для указанных выше АВП разрядного тока в упомянутых ГИТ подводные СПК имели соответственно следующие значения своих максимальных радиусов  $r_{mk}$  [13]: 2,14 и 1,16 мм. Тогда на основании опытных данных из [13], соответствующих рассматриваемому электротехнологическому случаю получения подводного СПК в сильноточной разрядной цепи высоковольтного ГИТ, коэффициент  $B_k$  в формуле (1) примет численное значение, приближенно равное  $0,024 \text{ м}/(\text{А}^{1/3} \cdot \text{с}^{1/2})$ . В результате формула для приближенного расчета максимального радиуса  $r_{mk}$  СПК подводного искрового разряда в цепи высоковольтного ГИТ, генерирующего на электрической нагрузке БИТ колебательной или аperiodической временной форм, примет с учетом (1) в системе СИ следующий окончательный аналитический вид:

$$r_{mk} = 0,024 \cdot (I_m)^{1/3} (t_m)^{1/2}. \quad (2)$$

Заметим, что в формуле Брагинского из [11], используемой при расчете максимального радиуса  $r_{mk}$  СПК воздушного искрового разряда в разрядной цепи ГИТ и подтвержденной для сильноточной области ВИТ одним из авторов экспериментально [12], для принятых нами нормальных атмосферных условий размерный коэффициент, стоящий перед значениями амплитуды тока  $I_m$  и соответствующего ей времени  $t_m$ , составляет  $0,093 \text{ м}/(\text{А}^{1/3} \cdot \text{с}^{1/2})$  [2]. Видно, что данный коэффициент для воздуха является примерно в 3,9 раз больше коэффициента, входящего в (2) и характерного для технической воды. В этой связи значения максимального радиуса  $r_{mk}$  СПК искрового разряда в воде, по сравнению с воздухом, оказываются для рассматриваемых случаев электрического пробоя газообразной и конденсированной сред при одних и тех же АВП разрядного импульсного тока высоковольтного ГИТ примерно в 3,9 раз меньшими. Выполним по (2) расчетную численную оценку значения максимального радиуса  $r_{mk}$  СПК, соответствующего электротехнологическому применению мощного генератора тока искусственной молнии [1] при разряде его ЕНЭ на РК с технической водой, содержащую в сильноточной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А ( $U_0 = -7$  кВ), формирующего импульсную А- компоненту тока имитированного грозового разряда [2], электрически взрывающуюся тонкую медную проволочку диаметром 0,2 мм и длиной 100 мм. Для рассматри-

ваемого сильноточного разряда мощного высоковольтного ГИТ-А при подводном ЭВ в РК указанной медной проволочки нами с помощью метрологически поверенного измерительного коаксиального шунта ШК-300 [10] и цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS 1012 были зафиксированы следующие АВП разрядного импульсного тока  $i_A$  указанного ГИТ:  $I_m = 39,6 \cdot 10^3$  В и  $t_m = 44 \cdot 10^{-6}$  с. После подстановки в формулу (2) этих исходных экспериментальных данных получаем, что в исследуемом электрофизическом случае максимальный радиус  $r_{mk}$  СПК при подводном искровом разряде в сильноточной цепи генератора ГИТ-А принимает численное значение, равное около 5,42 мм. Найденное расчетным путем с помощью (2) относительно большое значение для радиуса  $r_{mk}$  СПК, по сравнению с приведенными выше опытными данными для  $r_{mk}$  из [13], обуславливается существенно бóльшим для нашего случая значением  $t_m$ .

**Список литературы:** 1. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 81-85. 2. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во «Точка», 2010. – 407 с. 3. Рудаков В.В., Недзельский О.С.. Исследование импульсной электрической прочности крупногабаритных клееных деревянных конструкций // Вестник НТУ «ХПИ». Серия «Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок». – Харьков: ХПИ, 1993. – Вып. 18. – С. 73-77. 4. Баранов М.И., Лысенко В.О. Приближенные модели электродинамического разрушения древесины в атмосферном воздухе под действием прямого удара в нее линейной молнии // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – № 39. – С. 10-18. 5. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы. – М.: Стройиздат, 1986. – 688 с. 6. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине: справочник / Под ред. Б.Н. Уголева. – М.: Лесн. пром-сть, 1989. – 296 с. 7. Slitskouhov Yu., Vudanov V., Garpov M. et al. Wooden and Plastic Structures. – М.: Mir Publishers, 1989. – 400 p. 8. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – 252 с. 9. Баранов М.И., Лысенко В.О. Моделювання електродинамічних процесів у відокремленому капілярі дерев'яної конструкції при дії на неї прямого удару блискавки // Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. – Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції (Харків, 20-22 травня 2009 р.). Частина II. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 334. 10. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Лысенко В.О. и др. Экспериментальная оценка электрического сопротивления и электропроводности сильноточного плазменного канала в цепи разряда мощного генератора тока искусственной молнии // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 1. – С. 61-64. 11. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с. 12. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ», 2009. – 384 с. 13. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – Киев: Наукова думка, 1990. – 208 с.

Поступила в редколлегию 21.03.2011