

Основные характеристики сильноточного плазменного канала подводного электрического разряда

БАРАНОВ М.И., ЛЫСЕНКО В.О.

Предложен инженерный подход по расчетно-экспериментальному определению основных тепло- и электрофизических характеристик сильноточного плазменного канала, формируемого в разрядной цепи высоковольтного низкоомного генератора импульсных токов (ГИТ) за счет подводного электрического взрыва тонкого металлического проводника. Этот подход основан на данных расшифровки двух осциллограмм разрядного тока ГИТ, получаемых вначале при зашунтированном массивным металлическим проводником разрядном промежутке в рабочей камере с технической водой и затем при установленном в этом разрядном промежутке тонком электрически взрывающемся металлическом проводнике. Показано, что по экспериментально найденным значениям первой амплитуды разрядного тока ГИТ, времени достижения этой токовой амплитуды и активного сопротивления низкотемпературной плазмы разрядного канала могут быть определены некоторые важные характеристики сильноточного канала подводного искрового разряда.

К л ю ч е в ы е с л о в а: генератор импульсных токов, электрический взрыв проводника, подводный искровой разряд, плазменный канал, характеристики

В настоящее время при выполнении прикладных научных исследований, связанных с изучением поведения различных материалов под действием интенсивных импульсных нагрузок [1], физики электрического пробоя жидких диэлектриков [2] и теплофизических свойств плазмы при высоких температурах и давлениях [3], а также в нашедшей практическое применение прогрессивной электро-технологии энергосиловой обработки жидких (твердых) проводящих и изоляционных материалов, основанной на электровзрывном преобразовании энергии и электрогидравлическом эффекте [4], широко используются сильноточные искровые электрические разряды в конденсированных средах. Как правило, в качестве источника электрической энергии для таких искровых разрядов применяются высоковольтные генераторы импульсных токов (ГИТ) с мощными емкостными накопителями энергии [5]. Согласно [1, 2, 4] исследование тепло- и электрофизических характеристик плазменных каналов подводных искровых разрядов, как у нас, так и за рубежом базируется, в основном, на

A new combined calculation-and-experimental engineering approach is proposed for determining the main thermal and electrophysical characteristics of the heavy-current plasma channel formed in the discharge circuit of a high-voltage low-resistance generator of impulse currents (ICG) as a result of subaqueous electrical explosion of a thin metal conductor. The proposed approach is based on the data from processing of two oscillograms of the ICG discharge current obtained first with the discharge gap in the working chamber filled with service water bypassed by a bulk metal conductor and then with a thin electrically exploding metal conductor installed in this discharge gap. It is shown that certain important characteristics of the heavy-current channel of subaqueous spark discharge can be determined from the experimentally found values of the first amplitude of ICG discharge current, the time at which this amplitude is reached, and the resistance of the discharge channel's low-temperature plasma.

Key words: generator of impulse currents, electrical explosion of a conductor, subaqueous spark discharge, plasma channel

статистически обрабатываемых экспериментальных данных. Опытное определение этих характеристик для плазменных каналов импульсных искровых разрядов при всей своей сложности и трудоемкости сопряжено при этом и с внесением немалых погрешностей.

Приведенные в [4] расчетные соотношения для высоковольтных импульсных искровых разрядов в жидких средах из-за наличия в них многофакторных нелинейных функциональных зависимостей содержат большое число коэффициентов, требующих дополнительного экспериментального определения, и не позволяют инженерно-техническому персоналу оперативно находить с учетом электрических параметров разрядной цепи ГИТ и соответственно получаемых в ней амплитудно-временных параметров (АВП) импульсного тока такие характеристики сильноточного плазменного канала искрового разряда, как его радиус, температура, выделяемая в нем энергия и создаваемое им давление. В этой связи актуальными задачами в области высоковольтной импульсной техники, использу-

мой для научных и технологических целей при получении в конденсированных средах сильноточных искровых разрядов, остаются те, которые связаны с разработкой новых подходов для приближенного расчетно-экспериментального определения основных тепло- и электрофизических характеристик канала подводных искровых разрядов в цепях ГИТ с большими импульсными токами.

Постановка задачи. Рассмотрим включенный в разрядную цепь высоковольтного ГИТ конденсаторного типа прямолинейный тонкий металлический электрически взрывающийся проводник [4], размещенный в рабочей технологической камере с технической водой (рис. 1). Пусть воздушная среда, окружающая эту камеру с взрывающимся проводником, находится при нормальных атмосферных условиях (давление воздуха составляет $1,013 \cdot 10^5$ Па, а его температура равна 0 [6]). Считаем, что взрывающийся проводник имеет диаметр d_k и длину l_k . Полагаем, что этот проводник своими концами жестко подключен к массивным металлическим электродам-зажимам, выполненным из однородного материала, погруженным в воду и являющимся анодом и катодом в двухэлектродном разрядном промежутке технологической камеры. Пусть данный разрядный промежуток подключен к сильноточной цепи разряда генератора ГИТ-А, предназначенного для получения на активно-ин-

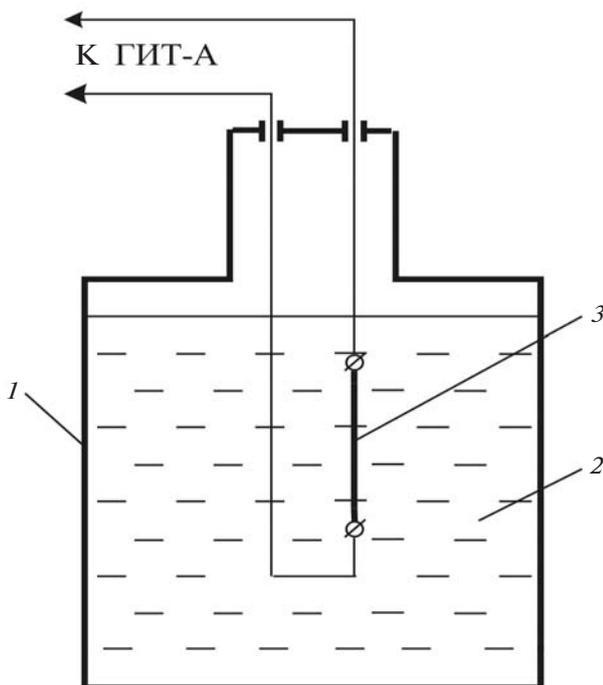


Рис. 1. Схема рабочей технологической камеры с технической водой и установленным в ее разрядном промежутке электрически взрывающимся проводником, включенным в разрядную цепь высоковольтного низкоомного генератора ГИТ-А: 1 – изоляционный или металлический корпус камеры; 2 – техническая вода; 3 – прямолинейный тонкий взрывающийся проводник

дуктивной нагрузке импульсной А-компоненты тока искусственной молнии [7]. Принимаем, что при разряде на эту камеру с водой и взрывающимся проводником предварительно заряженного емкостного накопителя энергии генератора ГИТ-А в его разрядной цепи (рис. 2) протекает большой импульсный ток. Полагаем, что АВП этого тока могут соответствовать колебательному или аperiodическому режимам разряда конденсаторов ГИТ-А на указанную нагрузку. Считаем, что в проводимых экспериментах с подводным искровым разрядом, инициируемым тонким взрывающимся проводом, АВП разрядного тока с периодом колебаний T в сильноточной цепи генератора ГИТ-А из-за использования пониженного зарядного напряжения U_{3A} его накопителя энергии, влияния вносимых в разрядную цепь параметров токоподводов к технологической камере и явления электрического взрыва тонкого провода в воде этой камеры могут отличаться от нормированных параметров импульсной А-компоненты тока имитированной молнии [7].

Пусть отрицательное зарядное напряжение для конденсаторов генератора ГИТ-А не превышает значения 7 кВ. Допускаем, что после электрического взрыва в камере тонкого провода, инициирующего в воде искровой разряд [4], канал данного разряда принимает цилиндрическую форму и может быть охарактеризован максимальным радиусом r_{mk} и длиной l_k . Считаем, что для образующейся в камере плазмы подводного искрового разряда выполняется условие ее неизотермичности, при котором максимальная температура в ней носителей электронного тока T_{me} превышает максимальную температуру носителей ионного тока T_{mi} ($T_{me} > T_{mi}$) [3,6]. В этой связи остановимся на определении температуры T_{me} в плазменном канале подводного искрового разряда. Принимаем, что

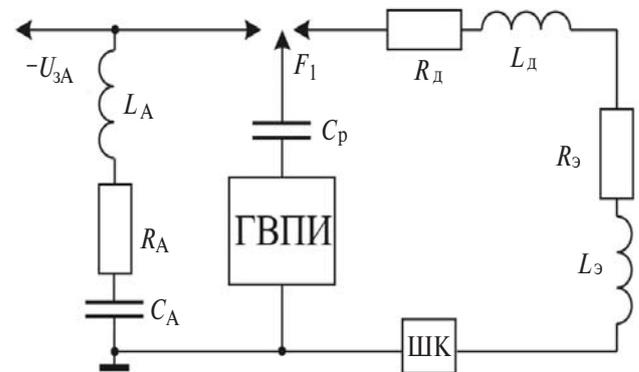


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема разрядной цепи высоковольтного низкоомного генератора ГИТ-А с мощной конденсаторной батареей для формирования на разрядном промежутке рабочей камеры с водой большого импульсного тока, содержащая генератор высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ) для управления срабатыванием трехэлектродного воздушного разрядника F_1 и коаксиальный шунт ШК для измерения АВП импульсов разрядного тока

при наличии в камере канала искрового разряда катоду ее двухэлектродного разрядного промежутка соответствует приэлектродное падение напряжения U_k , а аноду – приэлектродное падение напряжения U_a . Пусть значения постоянных напряжений U_k и U_a мало отличаются друг от друга ($U_k \approx U_a$), не зависят от АВП протекающего в разрядной цепи ГИТ-А импульсного тока и определяются видом материала электродов-зажимов разрядного промежутка камеры с водой [4, 7]. Используем приближение равномерного распределения плотности разрядного импульсного тока генератора ГИТ-А по поперечному сечению канала искрового разряда в принятой рабочей камере [4]. Изменением значений плотности тока вблизи поверхностей электродов-зажимов разрядного промежутка технологической камеры пренебрегаем [7]. Требуется с учетом принятых допущений выполнить приближенное определение основных тепло- и электрофизических характеристик сильноточного плазменного канала подводного искрового разряда в цепи ГИТ-А, содержащей мощную конденсаторную батарею и тонкий электрически взрывающийся провод, размещенный в технологической камере с технической водой.

Определение основных характеристик канала подводного искрового разряда. В качестве основных характеристик канала подводного искрового разряда в исследуемой камере выбираем следующие тепло- и электрофизические показатели канала с неизотермической плотной низкотемпературной плазмой:

максимальная электронная температура в канале искрового разряда T_{me} ;

активное сопротивление канала разряда R_k ;

выделяемая в разрядном канале тепловая энергия W_k ;

усредненная удельная электропроводность плазмы канала разряда σ_k ;

напряженность продольного электрического поля E_k ;

максимальное давление в канале разряда P_{mk} .

Максимальная электронная температура плазмы разрядного канала. Для этой температуры в плазменном канале подводного искрового разряда на основании известных положений классической физики можно записать следующее расчетное выражение [7]:

$$T_{me} = \sqrt[4]{\pi \sigma_c^{-1} q_{mk}}, \quad (1)$$

где q_{mk} – максимальная плотность теплового потока, воздействующего со стороны канала подводного разряда на электроды камеры, предназначенные для закрепления толстых (тонких) металлических

проводников; $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}(\text{м}^2\text{К}^4)^{-1}$ – постоянная Стефана–Больцмана [6].

Для определения q_{mk} воспользуемся приближенным соотношением [7]:

$$q_{mk} = \delta_m U_k, \quad (2)$$

где $\delta_m = I_m / (\pi r_{mk}^2)$ – максимальное значение плотности тока в разрядном канале; I_m – модуль первой амплитуды разрядного тока в цепи ГИТ; r_{mk} – максимальное значение радиуса разрядного канала для определения которого воспользуемся соотношением, записанным в системе СИ [8]:

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

где $B_k = 0,024 \text{ м}/(\text{А}^{1/3} \text{ с}^{1/2})$ – эмпирический коэффициент, найденный на основе экспериментальных данных, приведенных в [4, табл. 2] и относящихся к развитию сильноточного разрядного канала в технической воде; t_m – время, соответствующее первой амплитуде импульсного тока в разрядной цепи высоковольтного ГИТ с конденсаторной батареей I_m .

Отметим, что полученное соотношение (3) отличается от известной формулы российского электрофизика Брагинского [9] для максимального радиуса канала искрового разряда в воздухе при нормальных атмосферных условиях численным значением размерного коэффициента B_k . Согласно [9] для воздушного искрового разряда и указанных атмосферных условий данный коэффициент оказывается равным $0,093 \text{ м}/(\text{А}^{1/3} \text{ с}^{1/2})$. В результате из (1)–(3) для максимальной электронной температуры (в градусах К) в окончательном виде (в системе СИ) получаем следующее приближенное расчетное соотношение:

$$T_{me} = 6,464 \sqrt[4]{\frac{I_m^{1/3} U_k}{\sigma_c t_m}}. \quad (4)$$

Полученная формула (4) отличается от аналогичного расчетного соотношения (6) из [7], характерного для электронной температуры плазмы воздушного искрового разряда в цепи ГИТ с емкостным накопителем энергии, численным значением коэффициента, стоящего перед ее корнем. Данный коэффициент оказывается в нашем случае примерно в 1,97 раза больше соответствующего коэффициента из [7]. Поэтому температура T_{me} плазмы канала подводного искрового разряда по сравнению с соответствующей температурой плазмы канала воздушного искрового разряда в цепи ГИТ с конденсаторной батареей будет при прочих равных

условиях (одинаковых значениях I_m , t_m и U_k) также в 1,97 раза выше. Известно, что значение приэлектродного падения напряжения $U_k \approx U_a$, входящего в (2) и (4), для основных проводниковых материалов, применяемых для электродов-зажимов рабочей камеры в сильноточных разрядных цепях ГИТ, изменяется в достаточно узком диапазоне от 5 до 10 В [7,10]. Кроме того, из (4) видно, что при подводном искровом разряде значение температуры T_{me} мало зависит от значения первой амплитуды разрядного импульсного тока I_m и постоянно приэлектродного падения напряжения U_k и в большей степени будет определяться значением времени t_m , соответствующим амплитуде импульса тока в разрядной цепи ГИТ I_m . Отсюда можно заключить, что для достижения рекордно высоких температур в плазме сильноточного канала искрового разряда, получаемого в разрядной цепи высоковольтного ГИТ с конденсаторной батареей, необходимо:

во-первых, использовать высокоскоростные генераторы тока с предельно малыми значениями времени t_m достижения их импульсным разрядным током своей первой амплитуды I_m ;

во-вторых, искровой разряд в цепи высоковольтного ГИТ конденсаторного типа должен проходить в конденсированной или газовой среде технологической камеры, находящейся при высоком давлении и обеспечивающей для разрядного канала малое значение его радиуса r_{mk} и высокую плотность его плазмы соответственно.

Активное сопротивление плазмы разрядного канала. Активное сопротивление R_k плазменного канала при подводном искровом разряде ГИТ с мощным емкостным накопителем энергии, как и в [4], определим по конкретным результатам соответствующих экспериментальных исследований. Необходимые для этого опыты проведем с использованием генератора больших импульсных токов и технологической камеры (см. рис. 1) с технической водой и тонким медным взрывающимся проводником диаметром $d_k = 0,2$ мм и длиной $l_k = 100$ мм. Для этого согласно схеме рис. 2 был выбран высоковольтный низкоомный генератор ГИТ-А на номинальное напряжение ± 50 кВ с запасаемой в его конденсаторной батарее электрической энергией до 416 кДж [11]. Значения активного сопротивления R_k канала искрового разряда, инициируемого в технологической камере подводным электровзрывом тонкого медного проводника, находим на основании расшифровки опытных осциллограмм разрядного тока в цепи генератора ГИТ-А с мощным емкостным накопителем энергии. При этом данные осциллограммы будем получать как без электрического подрыва шунтирующего в камере с

водой разрядный промежуток толстого медного проводника ($d_0 = 2$ мм; $l_0 = 100$ мм) и соответственно образования искрового разряда между ее электродами-зажимами, так и при использовании в разрядном промежутке этой камеры явления подводного электровзрыва тонкого медного провода. Отметим, что в соответствии со схемой рис. 2 основные собственные электрические параметры разрядной цепи генератора ГИТ-А имели следующие значения [11,12]: $C_A \approx 333$ мкФ; $L_A \approx 2,5$ мкГн; $R_A \approx 0,057$ Ом. Для повышения достоверности получаемых результатов в разрядной цепи генератора ГИТ-А проводилась серия необходимых экспериментов, включающая не менее 10 опытов, при которых его накопитель энергии после соответствующего заряда до напряжения $U_{3A} = -7$ кВ разряжался с помощью управляемого трехэлектродного воздушного разрядника F_1 [13] через массивные медные токоподводы камеры на толстый медный шунтирующий проводник (с общими электрическими параметрами $R_3 \approx 0,047$ Ом и $L_3 \approx 2,05$ мкГн) или на тонкий медный взрывающийся проводник (с электрическими параметрами R_d и $L_d \approx 0,1$ мкГн). Электрический запуск разрядника F_1 в цепи генератора ГИТ-А осуществлялся ГВПИ, подающим через высоковольтную разделительную емкость $C_p = 180$ пФ (номинальное напряжение 120 кВ) на управляющий электрод этого разрядника микросекундный импульс напряжения амплитудой ± 100 кВ (рис. 2).

Для создания между основными электродами разрядника F_1 больших перенапряжений полярность этого импульса напряжения, мгновенно передаваемого его непотенциальному электроду, должна быть противоположной полярности зарядного напряжения U_{3A} [11]. Значение индуктивности L_d для тонкого медного взрывающегося провода мало отличалось от индуктивности предварительно шунтирующего участка его установки в камере прямолинейного толстого медного провода, активное сопротивление которого (около $0,55 \cdot 10^{-3}$ Ом) было существенно меньше значения собственного активного сопротивления $R_A \approx 0,057$ Ом генератора ГИТ-А и активного сопротивления R_d , вносимого в сильноточную разрядную цепь подводным электровзрывом тонкого медного провода аналогичной длины $l_k = l_0$ с диаметром $d_k = 0,2$ мм. Можно считать, что активное сопротивление $R_d = R_k$ плазменного канала при подводном искровом разряде в сильноточной цепи генератора ГИТ-А обусловлено возникающей от электрически взрывающегося в воде тонкого металлического проводника высокоионизированной плазмой, первоначально сосредоточенной практически в цилиндрическом проводящем объеме радиусом r_{mk} согласно (3) и длиной $l_k = 100$ мм.

Измерение АВП импульсного тока в разрядной цепи генератора ГИТ-А выполнялось с помощью метрологически поверенного коаксиального шунта (ШК) типа ШК-300 разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» [11], включенного согласно схеме рис. 2 в заземленную часть цепи разряда используемого ГИТ. На рис. 3,а приведена типичная осциллограмма большого импульсного тока в разрядной цепи согласно рис. 2 при $U_{3A} = -7$ кВ, полученная с помощью измерительного коаксиального шунта ШК-300 с коэффициентом преобразования, примерно равным $K_A \approx 11,26 \cdot 10^3$ А/В, и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012 практически при $R_k = R_d = 0$. Данная осциллограмма разрядного тока соответствует случаю, когда прямолинейный участок под тонкий медный взрывающийся провод был зашунтирован толстым медным проводником диаметром $d_0 = 2$ мм и длиной $l_0 = 100$ мм. Обработка данной осциллограммы показала, что в этом случае при длительности первой полуволны разрядного тока примерно в $T/2 \approx 123$ мкс, коэффициенте его затухания около $11,2 \cdot 10^3$ с⁻¹ и логарифмическом декременте его колебаний около 2,76 модуль ее амплитуды составляет $I_m \approx 50$ кА, а время $t_m \approx 46$ мкс. При этом суммарное активное сопротивление разрядной цепи генератора ГИТ-А оказывается примерно равным $R_1 \approx 0,104$ Ом. На рис. 3,б представлена типичная осциллограмма разрядного тока в цепи генератора ГИТ-А, полученная в рассматриваемой согласно схеме рис. 2 при использовании в рабочей камере с водой тонкого медного взрывающегося провода. Видно, что из-за проявления при этом в технологической камере подводного электровзрыва указанного провода кривая разрядного тока ГИТ-А при коэффициенте его затухания около $15,6 \cdot 10^3$ с⁻¹, по сравнению с данными рис. 3,а, подверглась значительной деформации. Колебательный режим разряда конденсаторной батареи в цепи ГИТ стал приближаться к критическому. Модуль амплитуды I_m первой полуволны импульсного тока также длительностью около 123 мкс стал составлять примерно 39,6 кА, а время $t_m \approx 44$ мкс. Дальнейшая обработка этой токовой осциллограммы показала, что из-за возникновения в рабочей камере с водой за счет подрыва тонкого медного провода подводного искрового разряда суммарное активное сопротивление разрядной цепи ГИТ-А увеличилось и стало примерно равным $R_2 \approx 0,153$ Ом. Поэтому из полученных экспериментальных данных находим, что при подводном электровзрыве в разрядном промежутке использованной рабочей камеры указанного тонкого медного провода активное сопротивление R_k канала подводного искрового разряда в исследуемой

сильноточной цепи генератора ГИТ-А оказывается приближенно равным $(R_2 - R_1) \approx 0,049$ Ом. Именно из-за внесения каналом искрового разряда активного сопротивления $R_k \approx 0,049$ Ом в разрядную цепь генератора ГИТ-А первая амплитуда I_m ее импульсного тока согласно осциллограммам на рис. 3 уменьшилась примерно на 21 %. Найденное опытным путем значение R_k позволяет оценить активное сопротивление подводного канала в сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-А как $R_{k0} = R_k / l_k \approx 0,49$ Ом/м.

Выделяемая энергия в плазме разрядного канала. Представим значение тепловой энергии W_k , выделяемой в канале подводного искрового разряда, в следующем обобщенном виде [4]:

$$W_k = A_k I_k^2 / R_k, \quad (5)$$

где A_k – искровой коэффициент, подлежащий расчетно-экспериментальному определению.

Согласно представленным в [4] результатам экспериментальных исследований электроразряд-

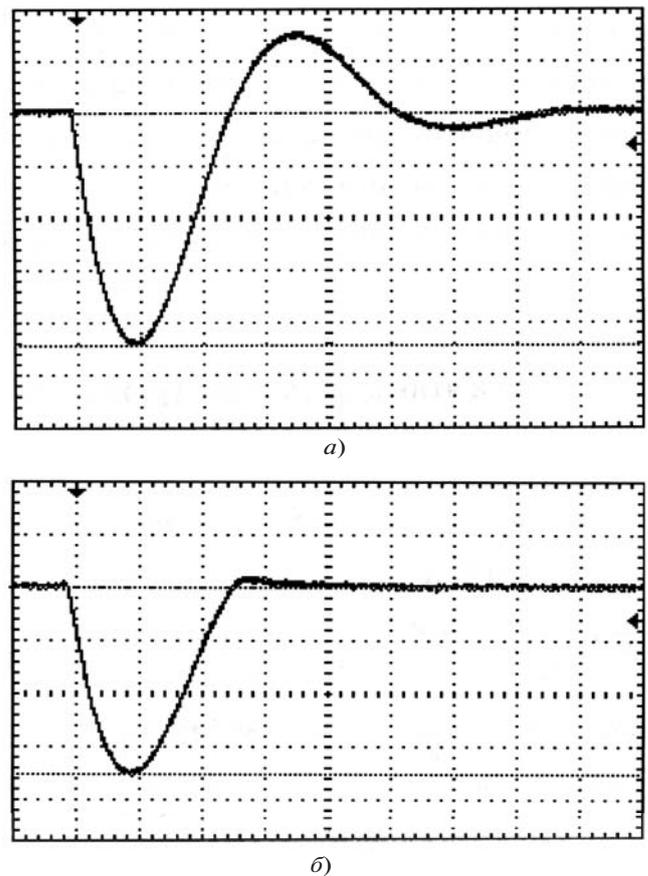


Рис. 3. Типичная осциллограмма большого импульсного тока в разрядной цепи высоковольтного низкоомного генератора ГИТ-А при его подводном сильноточном разряде (масштаб по вертикали – 11,26 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка): а – на толстый медный провод рабочей камеры ($d_0 = 2$ мм; $l_0 = 100$ мм; $U_{3A} = -7$ кВ); б – на тонкий медный взрывающийся провод рабочей камеры ($d_k = 0,2$ мм; $l_k = 100$ мм; $U_{3A} = -7$ кВ)

ных процессов в конденсированных средах основная доля электрической энергии, запасаемой в высоковольтных конденсаторах ГИТ, при подводном искровом разряде выделяется практически в течение первой полуволны его затухающего разрядного тока. Тогда в принятом приближении для значения W_k в рассматриваемом подводном разрядном канале, инициируемом тонким электрически взрывающимся проводником в сильноточной цепи генератора ГИТ-А, на участке первой полуволны длительностью $T/2 \approx 2,77t_m$ его резко затухающего синусоидального тока запишем следующее выражение:

$$W_k = R_k I_m^2 \int_0^{T/2} \sin^2(2\pi t/T) dt = 1,38 R_k I_m^2 t_m. \quad (6)$$

В результате из (5) и (6) находим искомый искровой коэффициент:

$$A_k = 1,38 R_k^2 I_m^2 t_m / l_k^2. \quad (7)$$

Из (5)–(7) следует, что для расчетного определения значения искрового коэффициента A_k и выделяемой в подводном канале длиной l_k тепловой энергии W_k фактически требуется знать численные значения лишь трех электрических параметров разрядной цепи высоковольтного ГИТ: первой амплитуды I_m разрядного тока, времени t_m наступления этой токовой амплитуды и активного сопротивления R_k плазмы канала подводного искрового разряда. Отметим, что в [4] на основании кусочно-линейной аппроксимации многочисленных экспериментальных данных для сильноточных разрядных цепей высоковольтных ГИТ с емкостными накопителями энергии для искрового коэффициента A_k в (5) рекомендуется при выполнении условия для начальной крутизны мощности в подводном разрядном канале применительно к рассматриваемой сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-А с тонким взрывающимся проводником в технологической камере с технической водой вида $2,5 \cdot 10^{14}$ Вт/(см) $< U_{3A}^2 [(L_A + L_{\text{э}} + L_{\text{д}}) l_k]^{-1} < 5 \cdot 10^{16}$ Вт/(см) использовать его приближенное численное значение, равное $A_k = 0,25 \cdot 10^5$ В²с/м². Следует указать, что применительно к рассматриваемому здесь опытному случаю значение $U_{3A}^2 [(L_A + L_{\text{э}} + L_{\text{д}}) l_k]^{-1}$ равно примерно 10^{14} Вт/(см).

Удельная электропроводность плазмы разрядного канала. Усредненную по поперечному круглому сечению радиусом r_{mk} инициируемого тонким взрывающимся проводом канала подводного искрового разряда в указанной камере удельную электропро-

водность его низкотемпературной плазмы σ_k на основании известных положений теоретической электротехники с учетом (3) и экспериментально определенного нами ранее значения активного сопротивления R_k плазмы рассматриваемого канала находим из следующего приближенного соотношения:

$$\sigma_k = l_k / (\pi r_{mk}^2 R_k). \quad (8)$$

Из (3) и (8) видно, что для приближенной расчетной оценки значения удельной электропроводности плазмы подводного разрядного канала σ_k , как и выделяющейся в нем энергии W_k по (6), необходимо также иметь только численные значения таких электрических параметров разрядной цепи высоковольтного ГИТ-А, как I_m , t_m и R_k .

Напряженность продольного электрического поля в плазме разрядного канала. При найденных значениях I_m , t_m и R_k максимальное усредненное значение напряженности продольного электрического поля в канале подводного искрового разряда в сильноточной цепи ГИТ-А может быть определено расчетным путем из следующего приближенного выражения:

$$E_k = I_m R_k / l_k = I_m / (\pi r_{mk}^2 \sigma_k). \quad (9)$$

Максимальное давление в канале подводного искрового разряда. Для наибольшего значения давления на продольной оси канала подводного искрового разряда P_{mk} с учетом проявления в нем Z-пинч-эффекта (явления поперечного стягивания канала разряда под действием собственного азимутального магнитного поля) запишем следующее выражение [9]:

$$P_{mk} = \mu_0 I_m^2 / (4\pi^2 r_{mk}^2), \quad (10)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная [6].

Из (10) следует, что для расчетной оценки P_{mk} достаточно иметь численные данные для токовой амплитуды I_m и соответствующего ей радиуса разрядного канала r_{mk} .

Пример расчета основных характеристик канала подводного искрового разряда. Используем исходные данные, характерные для представленной на рис. 3,б опытной осциллограммы разрядного тока в цепи высоковольтного низкоомного генератора ГИТ-А с размещенным под водой в рабочей камере тонким медным взрывающимся проводом ($d_k = 0,2$ мм; $l_k = 100$ мм): $U_{3A} = -7$ кВ; $I_m \approx 39,6$ кА; $t_m \approx 44$ мкс; $R_k \approx 0,049$ Ом.

В рассматриваемом случае из (3) получаем максимальный радиус подводного канала $r_{mk} \approx 5,42$ мм.

Этому значению r_{mk} соответствует максимальная плотность аксиального тока в канале δ_m , примерно равная $42,8 \cdot 10^7$ А/м², и согласно (10) $P_{mk} \approx 17 \cdot 10^5$ Па. При указанном опытным значении активного сопротивления R_k и найденном радиусе r_{mk} низкотемпературная плазма подводного канала длиной $l_k = 100$ мм согласно (8) будет иметь расчетную усредненную удельную электропроводность $\sigma_k \approx 22 \cdot 10^3$ (Ом·м)⁻¹. Отметим, что такое значение σ_k является характерным для опытных значений удельной электропроводности плазмы подводных искровых разрядов в цепи низкоскоростных ГИТ с емкостными накопителями энергии, имеющих относительно большие значения времени t_m нарастания импульса разрядного тока до своей первой амплитуды I_m [4]. Из (4) при $U_k \approx 6,1$ В [10] следует, что в нашем случае максимальная электронная температура в плазме подводного сильноточного канала $T_{me} \approx 1,95 \cdot 10^4$ К. Это значение соответствует опытным данным для яркостной температуры плазмы в сильноточном канале подводного искрового разряда, вызываемого электровзрывом тонкого проводника в цепи низкоскоростных ГИТ конденсаторного типа [4]. При этом следует заметить, что в цепи высокоскоростных ГИТ (например, при $t_m = 10$ нс и прежних значениях I_m и U_k) в соответствии с (4) температура равна $\sim 15,9 \cdot 10^4$ К. Продолжая для первоначальных исходных данных численную оценку рассматриваемых характеристик подводного канала, отметим, что в соответствии с (6) выделяемая тепловая энергия в канале подводного искрового разряда $W_k \approx 4,66$ кДж, что составляет около 57,1% полной электрической энергии $C_A U_{3A}^2 / 2 = 8,16$ кДж, запасаемой при выбранном значении зарядного напряжения U_{3A} в высоковольтной конденсаторной батарее генератора ГИТ-А. Укажем, что при этом согласно (7) расчетный искровой коэффициент $A_k \approx 0,23 \cdot 10^5$ В²·с/м² отличается от рекомендуемого для него эмпирическим соотношением (2.7) из [4] значения $0,25 \cdot 10^5$ В²·с/м² примерно всего на 8%. По (9) расчетное значение максимальной напряженности продольного электрического поля в подводном канале $E_k \approx 19,4$ кВ/м. В связи с этим наибольшее падение электрического напряжения $U_k = E_k l_k$ на длине l_k подводного разрядного канала окажется равным примерно 1,94 кВ, что составляет 27,7% зарядного напряжения U_{3A} высоковольтного емкостного накопителя энергии в используемом для проведения

описанных экспериментов низкоомном генераторе ГИТ-А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулий Г.А., Малошевский П.П. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах.— Киев: Наукова думка, 1977.
2. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей.— Томск: Изд-во ТГУ, 1975.
3. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы.— М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Гулий Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий.— Киев: Наукова думка, 1990.
5. Техника больших импульсных токов и магнитных полей/Под ред. В.С. Комелькова.— М.: Атомиздат, 1970.
6. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики/Отв. ред. В.К. Тартаковский.— Киев: Наукова думка, 1989.
7. Баранов М.И. Приближенный расчет максимальной температуры плазмы в сильноточном канале искрового разряда высоковольтного воздушного коммутатора атмосферного давления. — Технічна електродинаміка (Киев), 2010, №5.
8. Баранов М.И., Лысенко В.О. Расчетная оценка радиуса плазменного канала подводного искрового разряда в цепи высоковольтного генератора больших импульсных токов. — Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Тематичний випуск «Техніка та електрофізика високих напруг».— Харків: НТУ «ХПІ», 2011, №16.
9. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры.— М.: Атомиздат, 1975.
10. Абрамов Н.Р., Кужекин И.П., Ларионов В.П. Характеристики проплавления стенок металлических объектов при воздействии на них молнии. — Электричество, 1986, №11.
11. Баранов М.И., Колишко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов. — Приборы и техника эксперимента, 2008, №3.
12. Баранов М.И., Колишко Г.М., Лысенко В.О. Экспериментальное определение активного сопротивления и электропроводности сильноточного плазменного канала в разрядной цепи генератора импульсной компоненты тока искусственной молнии. — Електротехніка і електромеханіка (Харьков), 2011, №3.
13. Баранов М.И., Колишко Г.М., Кравченко В.И. и др. Высоковольтные сильноточные воздушные разрядники генератора тока искусственной молнии. — Приборы и техника эксперимента, 2008, №6.

[31.10.11]

Авторы: Баранов Михаил Иванович окончил в 1972 г. инженерно-физический факультет Харьковского политехнического института по специальности «Инженерная электрофизика». В 1999 г. защитил докторскую диссертацию «Переходные процессы при воздействии больших импульсных токов и сильных импульсных магнитных полей на проводящие объекты». Заведующий отделом электромагнитных испытаний в Научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте «Молния» Национального технического университета (НТУ) «Харьковский политехнический институт» («ХПИ»).

Лысенко Виталия Олеговна окончила в 2008 г. физико-технический факультет НТУ «ХПИ» по специальности «Инженерная электрофизика». Аспирант НТУ «ХПИ» по специальности «Техника сильных электрических и магнитных полей».