

*М.И. БАРАНОВ*, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;

*В.М. ЗИНЬКОВСКИЙ*, зав. сектором, НТУ «ХПИ»;

*Ю.П. ЗЯБКО*, вед. инж., НТУ «ХПИ»;

*Н.Н. ИГНАТЕНКО*, канд. техн. наук, зав. сектором, НТУ «ХПИ»;

*В.О. ЛЫСЕНКО*, ассистент, НТУ «ХПИ»

## **НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕХНИКИ НИПКИ «МОЛНИЯ» НТУ «ХПИ»**

Надані результати ряду експериментальних досліджень на високовольтних електроустановах електрофізичних процесів при отриманні електровибуховим методом високодисперсних матеріалів, сферичних плазмодов штучної кульової блискавки в повітряній атмосфері та визначенні міцносних характеристик діелектричних матеріалів в умовах дії на них великих імпульсних струмів.

The results of row of experimental researches are resulted on high-voltage electric options of electro-physics processes at the receipt of strongly dispersible materials an electro-explosive method, spherical of plasma educations of artificial fire-ball in an air atmosphere and determination of durability descriptions of dielectric materials in the conditions of influence on them of large impulsive currents.

Приведены результаты ряда экспериментальных исследований на высоковольтных электроустановках электрофизических процессов при получении электровзрывным методом высокодисперсных материалов, сферических плазмодов искусственной шаровой молнии в воздушной атмосфере и определении прочностных характеристик диэлектрических материалов в условиях воздействия на них больших импульсных токов.

### **Введение**

В последние годы высоковольтная импульсная техника (ВИТ) находит свое практическое применение не только в традиционной области силовой электроэнергетики при испытаниях электрической прочности газовой, жидкой и твердой изоляции [1], но и в таких сравнительно новых технических областях как энергосиловая обработка тонких металлов и конденсированных слабопроводящих сред давлением мощных ударных механических [2] и электромагнитных [3,4] волн, конверсия промышленных газообразных отходов [5,6], электровзрывное получение мелкодисперсных не- и органических материалов [7], получение искусственной линейной (ЛМ) [8] и шаровой (ШМ) [9] молний и их применение при оценке степени молниезащиты технических объектов и испытание диэлектрических материалов на их электродинамическую стойкость к воздействию больших импульсных токов (БИТ) естественного и искусственного происхождения [10]. В этой связи актуальным и целесообразным является краткое рассмотрение ряда новых электротехнологических возможностей отечественного высоковольтного оборудования, имеющегося на сегодня в распоряжении отдела электромагнитных исследований

НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» и размещенного как на испытательном полигоне (п. Андреевка, Харьковской обл.), так и в лабораторном корпусе института (г. Харьков).

### 1. Получение высокодисперсных неорганических материалов

В период 2010-2011 гг. в отделе № 6 нашего института были выполнены экспериментальные исследования по возможности получения при помощи явления электрического взрыва (ЭВ) тонких металлических проводников мелкодисперсных неорганических материалов. При этом в качестве ВИТ нами был использован действующий мощный генератор импульсной А-компоненты тока искусственной ЛМ (генератор ГИТ-А с номинальной запасаемой энергией 416 кДж в его 111 шт. импульсных конденсаторах на номинальное зарядное напряжение  $U_{3A} = \pm 50$  кВ), характеризующийся следующими собственными электрическими параметрами [8,11]: емкостью  $C_A = 333$  мкФ; индуктивностью  $L_A = 2,5$  мкГн; активным сопротивлением  $R_A = 0,057$  Ом. Плоские и круглые медные, латунные и алюминиевые токопроводы рабочего стола высоковольтного генератора ГИТ-А (рис. 1) обладали суммарной индуктивностью  $L_T \approx 2,05$  мкГн и суммарным активным сопротивлением  $R_T \approx 0,047$  Ом.

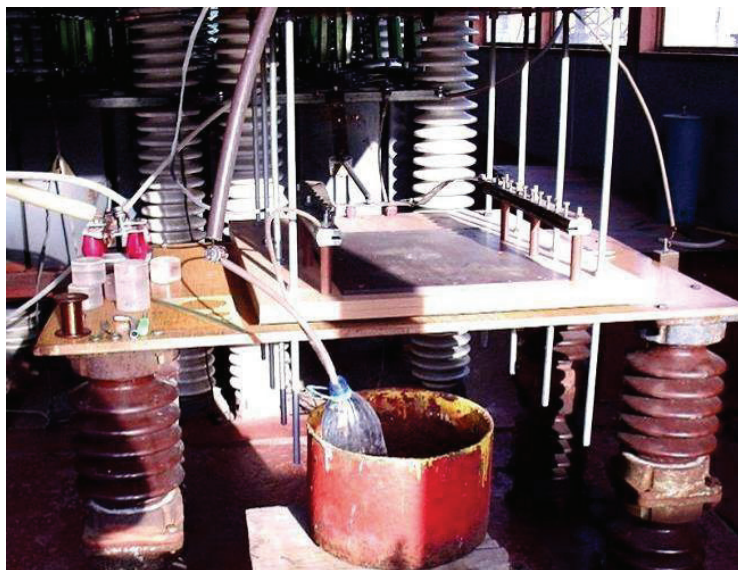


Рисунок 1 – Общий вид основных элементов сильноточной разрядной цепи высоковольтной электроустановки, используемой при подводном ЭВ тонких металлических проводников в изоляционной РК с технической водой объемом 1,5 л (РК для увеличения ее механической прочности размещена в металлическом баке с водой объемом 15 л)

Включенный в разрядную цепь генератора ГИТ-А взрывающийся тонкий медный провод диаметром  $d_k = 0,2$  мм и длиной  $l_k = 100$  мм размещался в изоляционной рабочей камере (РК), заполненной примерно на 3/4 от своего объема технической водой в количестве 1,5 л. Для измерения амплитудно-временных параметров (АВП) импульсного быстро затухающего синусоидального тока в сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-А нами в качестве рабочего измерительного средства был использован коаксиальный шунт типа ШК-300, прошедший метрологическую проверку и имеющий коэффициент преобразования, численно равный  $K_A = 11261$  А/В [8,11]. На рис. 2 приведены результаты электровзрывного действия БИТ от примененного генератора ГИТ-А, параллельно соединенные конденсаторы типа ИК 50-3 которого были заряжены до уровня  $U_{3A} \approx -7$  кВ, на металлическую структуру указанного тонкого провода.

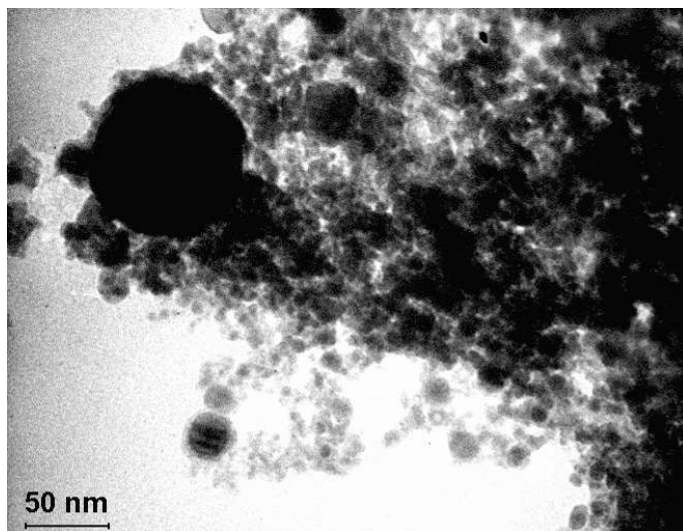


Рисунок 2 – Отдельные округлые наноструктурные неорганические образования в составе фрактального кластера вещества при подводном ЭВ тонкого медного провода в сильноточной разрядной цепи высоковольтной электроустановки ( $d_k = 0,2$  мм;  $l_k = 100$  мм;  $U_{3A} \approx -7$  кВ;  $I_{mA} \approx -40$  кА;  $\delta_{mA} \approx 350$  кА/мм<sup>2</sup>; линейный масштаб – 50 нм/метка)

Отметим, что данные согласно рис. 2 были получены при помощи просвечивающего электронного микроскопа типа ПЭМ-145К [11]. Измерения АВП протекающего через исследуемый тонкий медный провод показали, что амплитудное значение плотности тока  $\delta_{mA}$  в его не потерявшей металлической проводимости структуре при подводном ЭВ составляло около  $3,5 \cdot 10^{11}$  А/м<sup>2</sup>. Из приведенных на рис. 2 данных видно, что отдельные округлые неор-

ганические (медные) частицы по диаметру составляют до 10 нм. Таким образом, можно заключить, что указанное здесь мощное высоковольтное оборудование нашего института может практически использоваться для получения в лабораторных и иных условиях наноматериалов 1-го рода [12], имеющих сейчас повышенный спрос на отечественном и международном рынках высоких технологий.

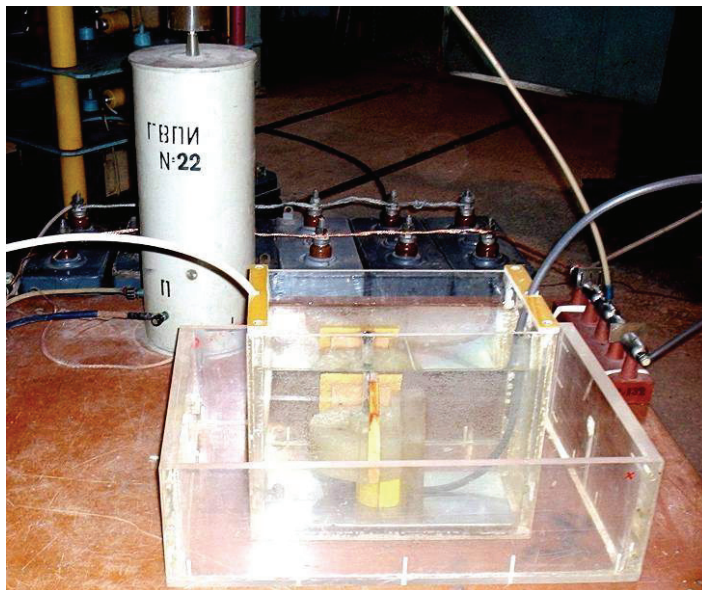


Рисунок 3 – Внешний вид основных элементов высоковольтной моделирующей электроустановки на рабочее напряжение до  $\pm 5$  кВ, формирующей в воздушной атмосфере над специальной двухэлектродной системой и изоляционной камерой с технической водой объемом до 10 л сферические плазмоиды искусственной шаровой молнии

## **2. Получение в воздушной атмосфере плазмоидов искусственной шаровой молнии**

В проводимых экспериментах по возможному моделированию в воздушной атмосфере плазмоидов искусственной ШМ на высоковольтном испытательном электрооборудовании авторы остановились на оригинальной двухэлектродной системе (ДЭС), содержащей как высоко-, так и низкоэлектропроводные материалы [9]. Укажем, что классическая ДЭС на основе металлических электродов той или иной конфигурации нашла широкое применение в области ВИТ [1–3]. На рис. 3 приведен общий вид специально созданной нами в 2012 году высоковольтной испытательной электроустановки энергоемкостью до 10,5 кДж для проведения подобных опытов. Данная элек-

троустановка в своей разрядной цепи содержала шесть параллельно соединенных высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИМ 2-5-140, один воздушный многоззорный коммутатор типа МЗК-100 (с двумя закороченными и двумя рабочими воздушными промежутками длиной 2 мм каждый) и изоляционную РК с указанной выше ДЭС и технической водой объемом до 10 л.

При подаче от генератора высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ), находящегося на рабочем столе этой электроустановки рядом с изоляционной РК (см. рис. 3), на средний стальной электрод коммутатора типа МЗК-100 управляющего микросекундного импульса напряжения амплитудой 100 кВ происходит разряд предварительно заряженных до напряжения  $U_3 \approx 4,5$  кВ отрицательной полярности конденсаторов типа ИМ 2-5-140 на коротко описанную ДЭС рассматриваемой электроустановки. В результате не до конца изученных в [9] и нами на сегодня сложных электрофизических процессов прямо в зоне ДЭС и изоляционной РК с технической водой наблюдается формирование ярко светящегося сферического плазмоида искусственной ШМ. На рис. 4 показана финальная стадия образования в воздушной атмосфере над ДЭС, размещенной в РК с водой, подобного плазмоида ШМ округлой формы.

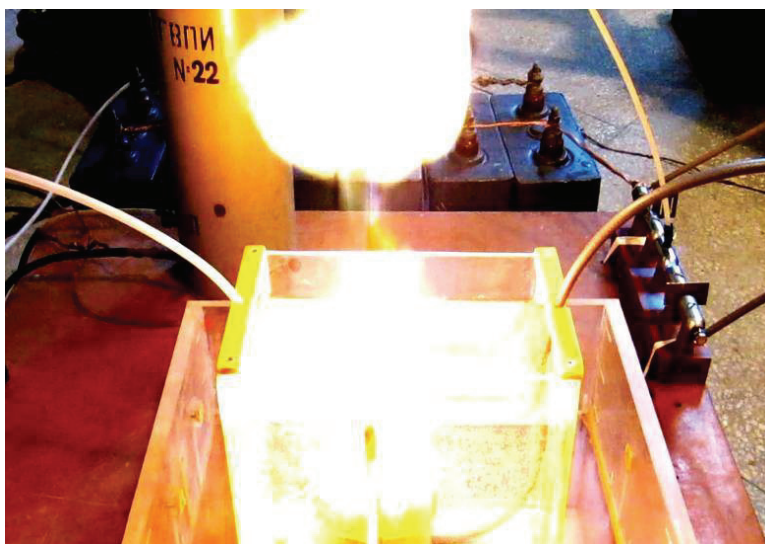


Рисунок 4 – Финальная стадия образования в воздушной атмосфере над специальной двухэлектродной системой и выполненной из оргстекла изоляционной камерой с технической водой высоковольтной моделирующей электроустановки ярко светящегося сферического плазмоида искусственной шаровой молнии ( $U_3 \approx -4,5$  кВ и  $I_m \approx -2,8$  кА)

Амплитуда высокочастотного затухающего импульсного тока  $I_m$ , протекающего в разрядной цепи использованной электроустановки от наводки при работе ГВПИ и измеренного при помощи указанного ранее коаксиального шунта типа ШК-300 [8] и запоминающего цифрового осциллографа типа Tektronix TDS 1012, была примерно равной 2,8 кА. Отметим, что диаметр плазмоида, приведенного на рис. 4 и полученного при помощи цифровой камеры типа Canon SX 200JS, составляет около 0,2 м. Полная длительность процесса образования (от момента начала формирования до момента визуально видимого исчезновения) наблюдаемых в проведенных нами экспериментах плазмоеидов искусственной ШМ (время их «жизни») оказывается равной не более 1 с.



Рисунок 5 – Внешний вид опытного образца «мертвой» древесины сосны ( $d_H=100$  мм;  $h_H=50$  мм) перед его электродинамическими испытаниями в сильноточной разрядной цепи генератора тока искусственной линейной молнии (генератора ГИТ-А [8])

### **3. Определение прочностных характеристик диэлектрических материалов в условиях воздействия на них бит**

При оценке электродинамической стойкости твердых диэлектрических материалов, применяемых в изоляционных несущих и иных рабочих конструкциях объектов ВИТ, требуется проведение их соответствующих испытаний, предусматривающих использование высоковольтных электроустановок



и протекание вдоль их наружных поверхностей и внутренних структур БИТ с теми или иными АВП [1,13,14]. Для исследования возможности применения для подобных научно-технических целей имеющегося в нашем распоряжении высоковольтного оборудования были проведены необходимые эксперименты применительно к «живой» (растущей или срезанной прямо перед испытаниями) и «мертвой» (давно срезанной и высохшей в естественных климатических условиях) древесины сосны. С этой целью нами был использован кратко описанный в разделе 1 этой статьи генератор ГИТ-А [8], имитирующий импульсную  $A$ - компоненту тока искусственной ЛМ. На рис. 5 показан закрепленный на рабочем столе генератора ГИТ-А испытываемый опытный образец «мертвой» древесины сосны, имеющий диаметр  $d_H = 100$  мм и высоту  $h_H = 50$  мм.



Рисунок 6 – Внешний вид опытного образца «мертвой» древесины сосны после его электродинамического испытания в сильноточной разрядной цепи генератора импульсной  $A$ - компоненты тока искусственной линейной молнии ( $U_{3A} \approx -7$  кВ и  $I_{mA} \approx -41,4$  кА)

Для ввода БИТ во внутреннюю исследуемую структуру опытных образцов древесины сосны нами был применен тонкий электрически взрывающийся медный провод диаметром  $d_k = 0,2$  мм и длиной  $l_k = 50$  мм. Измерение

АВП протекающего вдоль исследуемой целлюлозной структуры древесины выполнялось как и в предыдущих опытах при помощи коаксиального шунта типа ШК-300 и запоминающего цифрового осциллографа типа Tektronix TDS 1012. На рис. 6 представлены результаты электродинамических испытаний в сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-А опытного образца «мертвой» древесины сосны (на заднем плане данного рисунка хорошо видны используемые в составе генератора ГИТ-А шунт типа ШК-300 и конденсаторы типа ИК 50-3).

Из данных рис. 6 следует, что при протекании вдоль образуемой ЭВ тонкого медного провода, установленного в зоне заболони исследуемой древесины, низкотемпературной «металлической» плазмы БИТ с амплитудой его первой полуволны  $I_{mA}$  около 41,4 кА происходит локальное разрушение (щепление) испытываемого опытного образца сосны. Проведенные дальнейшие испытания показали, что амплитудный уровень тока  $I_{mA} \approx 41,4$  кА является той критической величиной, которая определяет электродинамическую стойкость «мертвой» древесины сосны к прямому воздействию на нее БИТ ЛМ.

### Выводы

Представленные здесь экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что указанное высоковольтное оборудование НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» может быть успешно использовано в таких сравнительно новых видах электротехнологий как получение неорганических наноматериалов 1-го рода, имитация в воздушной атмосфере сферических плазмоидов искусственной ШМ для дальнейшего изучения естественной ШМ и проведение испытаний элементов деревянных конструкций на их электродинамическую стойкость к прямому воздействию на них БИТ различных АВП.

**Список литературы:** 1. *Кужескин И.П.* Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с. 2. *Гулый Г.А.* Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. 3. *Баранов М.И.* Прогрессивные импульсные технологии обработки материалов: история, физические основы и технические возможности // Электротехника і електроmechanika. – 2009. – № 1. – С. 42-54. 4. *Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бондаренко А.Ю.* Инструмент для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 11 (47). – С. 44-51. 5. *Электrofизические основы техники высоких напряжений: учебник для вузов / Под общ. ред. И.П. Верещагина.* – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 704 с. 6. *Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М.* и др. Использование импульсного коронного разряда с расширенной зоной ионизации для конверсии токсичных газообразных отходов // Электротехника і електроmechanika. – 2007. – № 4. – С. 64-65. 7. *Лернер М.И.* Электровзрывные нанопорошки неорганических материалов: технология производства, характеристики, области применения. Автореферат дис. ... д-р техн. наук (01.04.07). – Томск (Россия), 2007. – 31 с. 8. *Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И.* и др. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 81-85. 9. *Егоров А.И., Степанов С.И., Шабанов Г.Д.* Демонстрация шаровой молнии в лаборатории // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174, № 1. – С. 107-109. 10. *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. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 39. – С. 10-18. **11.** Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х тт. Т. 2, кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: Изд-во «Точка», 2010. – 407 с. **12.** Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Т. 1. – Х.: Изд-во «НТМТ», 2011. – 311 с. **13.** Межгосударственный стандарт ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытательной электрической прочности изоляции. – Минск: Изд-во стандартов, 1997. – 31 с. **14.** ГОСТ 17512-82. Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 32 с.

*Поступила в редколлегию 06.04.2012*