

8. **Руководящие** указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования/Под ред. Б.Н. Неклепаева. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006.

9. **Неклепаев Б.Н.** Координация и оптимизация уровней токов короткого замыкания в электрических системах. — М.: Энергия, 1978.

10. **Елагин, Малышев А., Дементьев Ю.** Коммутационные ограничители тока. Основные преимущества применения. — Новости электротехники, 2009, №1 (55).

11. **Балыбердин Л.Л., Дьячков В.А., Капитула Ю.В., Лозинова Н.Г.** Многомодульные вставки постоянного тока. — Электрические станции, 2010, № 11.

12. **ГОСТ 13109–97.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Изд-во стандартов, 1997.

[18.01.12]

* * *

Электродинамическая стойкость древесины хвойных пород к прямому воздействию на нее большого импульсного тока молнии

БАРАНОВ М.И., ЛЫСЕНКО В.О.

Выполнена экспериментальная оценка электродинамической стойкости «живой» и «мертвой» древесины сосны к прямому действию на нее импульсной А-компоненты тока искусственной молнии. При использовании опытных образцов древесины сосны и сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора с мощным емкостным накопителем энергии получены количественные данные для критических амплитуд импульсного тока имитированной молнии, вызывающего локальное раскалывание (щепление) указанной древесины. Предложен и экспериментально апробирован расчетный критерий электродинамической стойкости древесины хвойных пород к прямому удару в нее линейной молнии. Показано, что данный критерий можно использовать для прогнозирования и приближенной оценки результатов разрушающего действия большого импульсного тока молнии на элементы деревянных конструкций объектов промышленной электроэнергетики и высоковольтной импульсной техники.

Ключевые слова: удар молнии, древесина, генератор импульсного тока, критерий стойкости древесины

В настоящее время в области промышленной электроэнергетики как у нас, так и за рубежом при сооружении опор высоковольтных воздушных линий электропередачи (ВЛ) классов напряжения 35–220 кВ и высоковольтной импульсной техники при создании изоляционных несущих конструкций устройств наружной установки высокого и сверхвысокого напряжений находят применение клееная и клееная древесина хвойных пород (ели, со-

Авторы: Фролов Олег Валерьевич окончил в 1995 г. Ленинградский политехнический институт по специальности «Электроэнергетические системы и сети». В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Оптимизация режимов энергосистемы Северо-Запада на основе применения фазорегулирующих устройств» в Санкт-Петербургском государственном университете. Генеральный директор ОАО «НИИПТ».

Чемборисова Наиля Шавкатовна окончила в 1974 г. Ташкентский политехнический институт по специальности «Электроэнергетические системы и сети». В 2004 г. защитила докторскую диссертацию «Обобщенные показатели в задачах управления установившимися режимами ЭЭС» в ИСЭМ СО РАН. Профессор кафедры «Электроэнергетические системы» НИУ «МЭИ».

The electrodynamic strength of «live» and «dead» pine wood to direct impact of the impulse A-component of an artificial lightning's current is experimentally estimated under laboratory conditions. Quantitative data for critical amplitudes of a simulated lightning's surge current causing local breaking (chipping) of the above-mentioned wood are obtained using experimental samples of pine wood and the heavy-current discharge circuit of a high-voltage generator equipped with a powerful capacitive energy storage. A calculation criterion for estimating the electrodynamic strength of coniferous wood to a direct stroke of linear lightning is proposed and experimentally approved. It is shown that the proposed criterion can be used for predicting and estimating the results from the destructive effect of high surge lightning current on the elements of wood structures used in industrial facilities of electric power systems and high-voltage impulse engineering.

Key words: lightning stroke, wood, impulse current generator, wood strength criterion

сны и др.) [1–3]. Для прогнозирования поведения (в частности щепления) при прямом ударе молнии (ПУМ) деревянных элементов (траверс, стоек и др.) опор ВЛ и элементов деревянных строительных конструкций объектов высоковольтной испытательной техники высотой в десятки метров (систем формирования мегавольтных импульсов напряжения и полеобразования мощных электромагнитных нано- и микросекундных импульсов и др. [4]),

которые могут подвергаться в естественных условиях воздействию линейной молнии, а также дальнейшего изучения инженерами-экологами физико-механических процессов при ПУМ в зеленые насаждения парков и лесов требуются как расчетные, так и опытные данные по электродинамической стойкости в воздушной атмосфере «живой» (растущей с соками-электролитами в ее микроструктуре) и «мертвой» (срезанной и без соков-электролитов в ее микроструктуре) древесины указанных пород к действию на нее больших импульсных токов молнии.

В нашем случае под электродинамической стойкостью древесины к ПУМ понимается ее способность противостоять поражающему внешнему воздействию на нее линейной молнии до определенного критического амплитудного значения ее импульсного тока I_{mk} без разрушения древесины путем раскалывания (щепления) ее пористой структуры [5]. Анализ отечественных и зарубежных публикаций по данному вопросу показывает, что поведению древесины хвойных и других пород в условиях воздействия на нее молнии естественного или искусственного происхождения, характеризующейся протеканием в ее плазменном канале искрового разряда импульсного тока амплитудой в десятки (сотни) килоампер при его длительности в десятки (сотни) микросекунд [5], было уделено недостаточное внимание [6, 7]. Одной из причин тому является сложность математического и физического моделирования соответствующих процессов в древесине. С учетом создания в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» генератора тока искусственной молнии [8], отвечающего наиболее жестким требованиям международных нормативных документов по оценке молниезащиты технических объектов [9, 10], в настоящее время появилась возможность экспериментального исследования результатов прямого воздействия имитированной молнии на ту или иную древесину. В этой связи изучение электрофизических механизмов разрушения (щепления) при ПУМ «живой» и «мертвой» древесины хвойных пород и определение ее электродинамической стойкости к действию протекающих по ней больших импульсных токов, сопровождающих ПУМ в ее пористую макроструктуру с микротрахеидами, заполненными для «живой» древесины в зоне ее камбия восходящими (нисходящими) жидкими соками-электролитами, а для «мертвой» древесины – воздухом и частично влагой [11], являются актуальными научно-техническими задачами в области техники и электрофизики высоких импульсных напряжений и больших импульсных токов.

Первоначально оценим экспериментально электродинамическую стойкость в атмосферном воздухе опытных образцов «живой» и «мертвой» древесины сосны к прямому действию на них импульсной А-компоненты тока искусственной молнии, нормированные амплитудно-временные параметры (АВП) которой характеризуются первой амплитудой I_m затухающего тока до (200 ± 20) кА при ее длительности до 500 мкс и временем t_m на участке первой полуволны разрядного тока, соответствующим значению I_m , не более 50 мкс [5, 8–10]. На основании опытных измерений принимаем, что давление атмосферного воздуха составляет около $-1,087 \cdot 10^5$ Па, а его относительная влажность и температура равны примерно 80% и $T_0 \approx 20$ °С соответственно. В качестве испытываемых опытных образцов выбираем образцы «живой» и «мертвой» древесины сосны, наружный диаметр которых составляет $d_H = 100$ мм, а их высота равна $h_H = 50$ мм (рис. 1). Данные образцы древесины исследовались на высоковольтной испытательной электроустановке конденсаторного типа, сильноточная разрядная цепь которой построена на основе генератора импульсной А-компоненты тока искусственной молнии (генератора импульсного тока, обозначаемого как ГИТ-А [8]) на номинальное зарядное электрическое напряжение $U_{3A} = \pm 50$ кВ с запасаемой в его импульсных конденсаторах номинальной энергией 416 кДж (рис. 2).

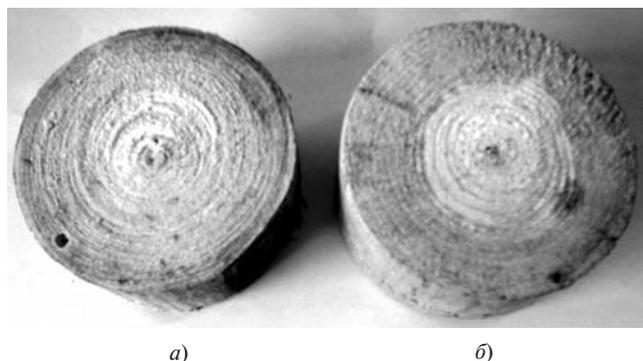


Рис. 1. Внешний вид испытываемых опытных образцов «живой» (а) и «мертвой» (б) древесины сосны ($d_H = 100$ мм; $h_H = 50$ мм) с круглым сквозным отверстием на их периферии ($d_0 = 3$ мм; $l_0 = 50$ мм) для установки электрически взрывающегося прямолинейного медного провода диаметром $d_k = 0,2$ мм и длиной $l_k = 50$ мм

В проводимых опытах собственные электрические параметры разрядной цепи генератора ГИТ-А имели следующие численные значения [8]: емкость $C_A \approx 333$ мкФ; индуктивность $L_A \approx 2,5$ мкГн; активное сопротивление $R_A \approx 0,057$ Ом. Токопроводы рабочего стола генератора ГИТ-А (без учета активного сопротивления плазменного канала искрового разряда в образцах древесины R_k) имели суммарную индуктивность $L_T \approx 0,81$ мкГн и суммарное ак-

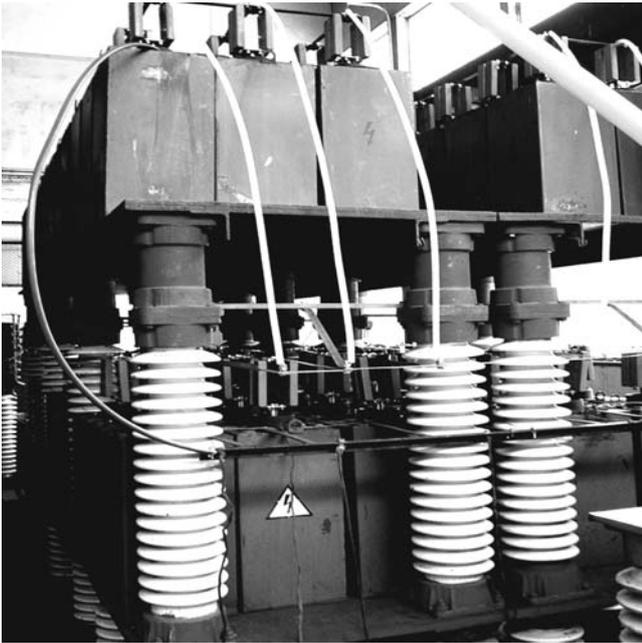


Рис. 2. Внешний вид высоковольтного генератора ГИТ-А с мощным емкостным накопителем энергии (111 шт. параллельно включенных конденсаторов типа ИК 50-3 емкостью около 3 мкФ каждый), формирующего импульсную А-компоненту тока искусственной молнии [8]

тивное сопротивление $R_T \approx 0,03$ Ом. Образцы «живой» древесины изготавливались из свежесрезанной в вегетативный период (весна—осень) непосредственно перед испытаниями сосны диаметром около 104 мм (с влажностью до 100%), а образцы «мертвой» древесины (с влажностью до 10%) — из пролежавшего не менее полугода в закрытом помещении при комнатной температуре срезанного и ошкуренного ствола сосны аналогичного диаметра. Рассматриваемые электродинамические испытания проводились согласно требованиям действующего межгосударственного стандарта [12] ступенчатым методом при изменении в конденсаторах генератора ГИТ-А зарядного напряжения U_{3A} на 1 кВ и соответственно изменении амплитуды I_m тока в его разрядной цепи в зависимости от вида образца древесины примерно на 6 кА.

Опытные образцы древесины сосны в процессе их испытаний размещаются и жестко закрепляются на рабочем столе генератора ГИТ-А в двухэлектродной системе (рис. 3), состоящей из верхнего круглого массивного медного электрода 1 диаметром 6,6 мм (жилы крупногабаритного радиочастотного кабеля марки РК 75-44-17 с полиэтиленовой изоляцией и снятым медным экраном) и нижнего плоского массивного алюминиевого электрода 4 размером в плане 500×500 мм² и толщиной 2 мм. При выбранном методе испытаний опытных образцов древесины сосны на каждый из них подавался лишь один сформированный в цепи ГИТ-А импульс тока имитированной молнии с его измеряе-

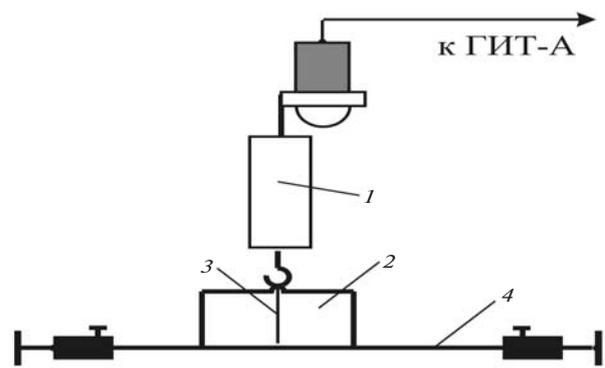


Рис. 3. Схема двухэлектродной системы с опытным образцом древесины сосны в разрядной цепи генератора ГИТ-А при определении электродинамической стойкости исследуемой древесины к прямому воздействию на нее импульсной А-компоненты тока искусственной молнии: 1 — верхний медный электрод системы; 2 — опытный образец древесины; 3 — взрывающийся медный провод; 4 — нижний алюминиевый электрод системы

мой наибольшей амплитудой I_m . После нахождения опытного значения $I_m \approx I_{mk}$ не менее трех испытываемых образцов древесины сосны подвергались в дальнейшем воздействию тока с данной амплитудой для повышения достоверности найденного критического амплитудного значения I_{mk} .

Для ввода создаваемого в цепи генератора ГИТ-А сильнооточного плазменного канала воздушного искрового разряда, имитирующего разрядный канал молнии, внутрь опытных образцов древесины был использован электрически взрывающийся на воздухе тонкий медный провод 3 диаметром $d_k = 0,2$ мм и длиной $l_k = 50$ мм, размещаемый в его периферийном сквозном отверстии диаметром $d_0 = 3$ мм и длиной $l_0 = l_k = 50$ мм (см. рис. 1). Такое размещение в опытном образце древесины сосны взрывающегося медного провода соответствует наиболее вероятной зоне распространения (в наружной части заболони) канала молнии в поражаемой ею «живой» ранней или «мертвой» древесине [11], а также является энергетически целесообразным условием проведения указанных испытаний. Используем отрицательную полярность зарядного напряжения U_{3A} в генераторе ГИТ-А и метрологически поверенный коаксиальный измерительный шунт типа ШК-300 собственной разработки для регистрации АВП его разрядного тока, установленный в заземленной части разрядного контура генератора и имеющий активное сопротивление около 0,185 мОм и коэффициент преобразования, равный примерно $11,26 \cdot 10^3$ А/В [8]. После выполнения указанных высоковольтных экспериментов оценивается расчетным путем электродинамическая стойкость выбранной древесины к ПУМ и результаты оценки сравниваются с данными соответствующих экспериментальных исследований, проведенных

ранее на опытных образцах древесины сосны с использованием высоковольтного генератора ГИТ-А.

Результаты экспериментальных исследований.

Проведенные эксперименты показали, что для видимого разрушения (раскалывания) путем щепления исследуемых образцов древесины сосны значение отрицательного зарядного напряжения емкостного накопителя энергии в генераторе ГИТ-А должно быть в диапазоне от 7 до 10 кВ. На рис. 4,а представлена осциллограмма протекающего по взрывающемуся тонкому медному проводу и локально раскалываемому опытному образцу «живой» древесины сосны разрядного тока генератора ГИТ-А, полученная с помощью измерительного шунта типа ШК-300 и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012. Согласно рис. 4,а первая (наибольшая) отрицательная амплитуда имитированного согласно требованиям [9, 10] в лабораторных условиях импульсного тока молнии равна (по модулю) $I_m \approx 65,7$ кА. Этой токовой амплитуде I_m соответствуют время, равное около $t_m \approx 34$ мкс. При указанных значениях U_{3A} и I_m происходит локальное разрушение (щепление) испытываемого образца из сосны. Проведенные опыты (при их общем числе до 10) для каждого вида древесины сосны показали, что при меньших значениях напряжения U_{3A} и тока I_m подобного раскалывания структуры образца «живой» древесины сосны в разрядной цепи генератора ГИТ-А не наблюдается. Поэтому значение тока 65,7 кА можно приближенно принять за критическую амплитудную токовую нагрузку I_{mk} для указанного опытного образца сосны, вызывающую его раскалывание (щепление). Усредненный диаметр выходящего из испытываемого образца «живой» древесины сосны разрядного канала (размер оплавленного «следа» на плоской поверхности нижнего алюминиевого электрода под образцом) составляет около 34 мм.

Локальное раскалывание (щепление) опытного образца «мертвой» древесины сосны происходило при протекании по нему от генератора ГИТ-А импульсного тока искусственной молнии с амплитудой его первой полуволны, равной по модулю (см. соответствующую осциллограмму на рис. 4,б) около $I_m \approx 41,4$ кА. Данной амплитуде тока при $t_m \approx 34$ мкс соответствует зарядное напряжение ГИТ-А, равное $U_{3A} \approx -7$ кВ. Выполненные эксперименты показали, что амплитуда тока искусственной молнии значением 41,4 кА в первом приближении является критическим амплитудным токовым значением для опытного образца «мертвой» древесины сосны, приводящим к ее локальному раскалыванию (щеплению). Таким образом для «живой» древесины сосны значение I_{mk} примерно на 37% больше, чем для «мертвой». Образующийся под

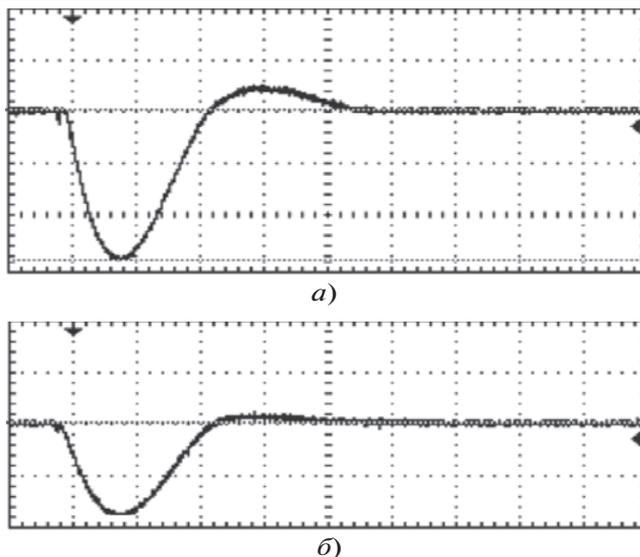


Рис. 4. Осциллограмма импульсной А-компоненты тока искусственной молнии при разряде генератора ГИТ-А на взрывающийся в воздухе тонкий медный провод ($d_k = 0,2$ мм; $l_k = 50$ мм), вертикально установленный в отверстии ($d_0 = 3$ мм; $l_0 = 50$ мм) локально разрушающегося опытного образца древесины сосны ($d_n = 100$ мм; $h_n = 50$ мм; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; по горизонтали – 50 мкс/клетка): а – «живой» древесины ($U_{3A} \approx -10$ кВ; $I_{mk} \approx -65,7$ кА); б – «мертвой» ($U_{3A} \approx -7$ кВ; $I_{mk} \approx -41,4$ кА)

испытываемым образцом этого вида древесины оплавленный «след» на листовом алюминиевом электроде от действия на него плазменного канала сильного разряда в цепи генератора ГИТ-А имеет усредненный диаметр, равный примерно 28 мм.

Расчетный критерий электродинамической стойкости древесины хвойных пород к воздействию тока молнии. Ранее в [13] авторами при ряде ограниченных расчетным путем приближенно было показано, что при ПУМ и принятых допущениях волоконная структура древесины хвойных пород оказывается в плоском (двумерном) напряженном состоянии и испытывает действие двух главных нормальных механических напряжений – меридионального напряжения σ_m (действует вдоль продольной оси округлых полых микротрахеид, ориентированных вдоль поражаемой древесины ствола дерева или строительного элемента) и тангенциального напряжения σ_τ (действует вдоль округлого периметра полых микротрахеид перпендикулярно направлению распространения канала молнии в древесине). Из-за внезапно возникающего при ПУМ избыточного давления ($p_k - p_0$) внутри цилиндрических полостей микротрахеид рассматриваемой древесины, обусловленного появляющейся в зоне ее поражения низкотемпературной плазмой (с температурой до $25 \cdot 10^3$ К [14]) на пути распространения по древесине канала грозового искрового разряда с давлением p_k , указанные микротрахеиды при соответствующих АВП импульсной А-компоненты тока молнии могут подвергаться про-

должному разрыву своих тонких целлюлозных стенок толщиной $h=R_2-R_1$, где R_1, R_2 – соответственно внутренний и наружный радиусы округлой микротрахеиды древесины хвойных пород [11]. При этом очевидно, что указанная деформация микротрахейд древесины, первоначально скрепленных друг с другом клейким лигнином [11], в зоне ее разрушения будет сопровождаться их взаимным отделением друг от друга. Массовый разрыв и взаимный отрыв друг от друга вдоль пути протекания по древесине большого импульсного тока молнии тонких стенок продольно ориентированных относительно ствола дерева или деревянного строительного элемента полых микротрахейд древесины и приводит, по-нашему мнению, к продольному раскалыванию (щеплению) при ПУМ рассматриваемой древесины.

Исходя из двумерной модели напряженного состояния внутренней структуры древесины в зоне поражения ее ПУМ и применения IV теории прочности оболочных конструкций, расчетный критерий электродинамической стойкости древесины хвойных пород к прямому воздействию на нее большого импульсного тока линейной молнии с учетом использования стандартного для статического режима нагружения строительных конструкций коэффициента запаса прочности приближенно запишем в следующем обобщенном виде [15]:

$$[\sigma_\tau^2 - \sigma_\tau \sigma_m + \sigma_m^2]^{1/2} \leq 0,7\sigma_p, \quad (1)$$

где $\sigma_\tau = (p_k - p_0)(R_1 + R_2) / [2(R_2 - R_1)]$;

$\sigma_m = (p_k - p_0)(R_1 + R_2) / [4(R_2 - R_1)]$ – тангенциальное и меридиональное напряжения в стенке толщиной $(R_2 - R_1)$ округлых полых микротрахейд исследуемой древесины [13] соответственно; σ_p – временное сопротивление раскалывания древесины [11]; $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 (1 + T_0 / 273,16)$ – давление атмосферного воздуха, окружающего древесину [16].

Для определения амплитудного значения давления плазмы в поперечном сечении сильноточного разрядного канала молнии с учетом проявления в нем Z-пинч-эффекта, связанного с поперечным стягиванием токового канала искрового разряда при ПУМ под действием собственного азимутального магнитного поля, воспользуемся следующим расчетным выражением [17]:

$$p_k = \mu_0 I_m^2 (8\pi^2 r_{0m}^2)^{-1} [2 - (r / r_{0m})^2], \quad (2)$$

где r, r_{0m} – текущее и максимальное значение радиуса разрядного канала молнии в древесине соответственно; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная [16].

Из (2) следует, что максимальное давление плазмы в разрядном канале молнии прямо пропорционально квадрату амплитуды аксиального импульсного тока I_m и обратно пропорционально квадрату радиуса r_{0m} токового канала. Согласно (2) наибольшее давление в плазменном канале линейной молнии наблюдается на его оси (для текущего радиуса $r=0$), а наименьшее давление – на его периферии (при текущем радиусе $r=r_{0m}$). Из физики газового разряда известно, что при развитии канала грозового разряда в атмосферном воздухе с заданными АВП его импульсного тока для нахождения вблизи земной поверхности значения r_{0m} , входящего в (2), в первом приближении может быть использована формула Брагинского [18]:

$$r_{0m} = B_m (I_m)^{1/3} (t_m)^{1/2}, \quad (3)$$

где $B_m = 0,093$ м/(А^{1/3}с^{1/2}) – эмпирический коэффициент; t_m – время, соответствующее первой амплитуде I_m тока импульсной А-компоненты тока линейной молнии (размерность параметров I_m и t_m – в системе СИ).

Для более точного по сравнению с (3) определения значения r_{0m} в исследуемой древесине должны быть использованы полученные в лабораторных условиях экспериментальные данные, указывающие при зарегистрированных с помощью измерительного шунта и осциллографа параметрах I_m и t_m и по зафиксированному размеру округлого оплавленного «следа» под опытным образцом древесины на усредненное значение радиуса проходящего через нее сильноточного канала искрового разряда. При этом отметим, что согласно выполненным экспериментам, например при $I_m \approx 65,7$ кА и $t_m \approx 34$ мкс для «живой» ранней древесины сосны, опытное значение r_{0m} равно примерно 17 мм. В то же время по (3) это расчетное значение при указанных значениях I_m и t_m оказывается равным 21,8 мм, что примерно на 22 % больше опытного значения. Эти данные для r_{0m} указывают на то, что древесина как более плотная изоляционная среда по сравнению с воздухом вызывает определенное поперечное стягивание распространяющегося вдоль нее сильноточного разрядного канала линейной молнии, входящего в ее пористую макроструктуру из атмосферного воздуха.

В результате после подстановки в (1) приведенных выражений для наибольших значений при ПУМ механических напряжений σ_τ и σ_m в микротрахеидах древесины и газодинамического давления p_k по (2) в плазменном канале грозового разряда (при $r=0$) и элементарных преобразований расчетный критерий электродинамической стойкости для «живой» и «мертвой» древесины хвойных пород к прямому действию на нее большого им-

пульсного тока линейной молнии принимает следующий окончательный безразмерный вид:

$$I_{mk}^* \leq 2\pi \left[1 + \frac{1,616(R_2 - R_1)\sigma_p}{(R_2 - R_1)\rho_0} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где $I_{mk}^* = I_{mk} / I_{mb}$; $I_{mb} = r_{0m}\rho_0^{1/2} / \mu_0^{1/2}$ – базисное значение тока.

В соответствии с полученным критерием (4) при ПУМ в рассматриваемую древесину с безразмерной амплитудой протекающего импульсного тока в разрядном канале линейной молнии $I_m^* > I_{mk}^*$ данная древесина хвойных пород будет подвергаться разрушению путем раскалывания (щепления) своей внутренней волоконной структуры.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных для электродинамической стойкости к ПУМ древесины сосны. При данном сравнении остановимся на «живой» ранней древесине сосны, для которой достоверно известны основные геометрические параметры ее микротрахеид и статические прочностные характеристики образуемой ими ее пористой волоконной структуры [11,13]: $R_1 = 18$ мкм; $R_2 = 22,3$ мкм; $h = 4,3$ мкм; $\sigma_p = 4,11$ МПа. Заметим, что в этом случае длина отдельных округлых трахеид сосны составляет около 3,3 мм [11, 13]. При подстановке приведенных исходных данных в критериальное соотношение (4) при $\rho_0 \approx 1,087 \cdot 10^5$ Па получаем численное значение безразмерной критической амплитуды тока молнии, равное $I_{mk}^* \approx 17,2$. При $r_{0m} \approx 17$ мм и $I_{mb} = 4,99$ кА этому безразмерному значению I_{mk}^* соответствует размерная критическая токовая амплитуда в канале грозового разряда, равная по модулю $I_{mk} \approx 85,8$ кА. Данное расчетное значение превышает экспериментально найденное для «живой» древесины сосны приближенное значение модуля критической амплитуды импульсного тока 65,7 кА, вызывающего ее локальное раскалывание (щепление), примерно на 23%. На наш взгляд, подобное расхождение между расчетными и опытными значениями для амплитуды критического тока I_{mk}^* может быть объяснено неучетом в используемой в данном случае расчетной модели напряженного состояния при ПУМ микроструктуры рассматриваемой древесины динамического характера действующих на нее нагрузок и соответствующих импульсному режиму нагружению древесины ее прочностных характеристик.

Вывод. Экспериментальная апробация в лабораторных условиях полученного расчетного безразмерного критерия (4) для электродинамической стойкости древесины хвойных пород к прямому воздействию на нее большого импульсного тока

линейной молнии подтвердила возможность его применения при приближенных оценках разрушающего действия сильноточного плазменного канала линейной молнии на строительные элементы высотных деревянных конструкций линий электропередачи и высоковольтной импульсной техники наружной установки и поражаемые ПУМ деревянные насаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бургсдорф В.В., Овсенко В.В., Рашкес В.С. Применение деревянных опор на линиях электропередачи. – Электричество, 1970, № 3.
2. Шнель Р.В., Китушин В.Г., Киселев В.В. и др. Целесообразность применения деревянных опор на линиях электропередачи. – Электричество, 1975, № 3.
3. Рудаков В.В., Недзельский О.С. Исследование импульсной электрической прочности крупногабаритных клееных деревянных конструкций. – Вестник ХПИ. Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок. – Харьков: ХПИ, 1993, вып. № 18.
4. Баранов М.И. Ретроспектива, современное состояние и перспективы развития исследований в области создания электроустановок с мощными накопителями электрической и магнитной энергии. – Электротехніка і електромеханіка (Харьков), 2007, № 5.
5. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. Т. 2, кн. 2: «Теория электрофизических эффектов и задач». – Харьков: Изд-во «Точка», 2010.
6. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеоздат, 1978.
7. Кужекин И.П., Ларионов В.П., Прохоров Е.Н. Молния и молниезащита. – М.: Знак, 2003.
8. 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.
9. MIL-STD-464A. Военный стандарт США «Электромагнитные и экологические эффекты воздействия молнии. Требования интерфейса и критерии проверки систем», 2002.
10. КТР-ВВФ/ДО-160D/ED-14D. Квалификационные требования «Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний» (Раздел 23.0. «Прямое воздействие молнии»). – М.: Изд-во стандартов РФ, 2004.
11. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине/Под ред. Б.Н. Уголева. – М.: Лесная промышленность, 1989.
12. ГОСТ 1516.2–97. Межгосударственный стандарт «Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции». – Минск: Изд-во стандартов, 1997.
13. 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.
14. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987.
15. Соппротивление материалов/Под общей ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Вища школа, 1973.
16. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики/Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989.
17. Баранов М.И. Моделирование электромагнитного эффекта при прямом ударе молнии в металлическую обшивку летательного аппарата. – Технічна електродинаміка (Киев), 1999, № 1.
18. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975.

Авторы: Баранов Михаил Иванович окончил в 1972 г. инженерно-физический факультет Харьковского политехнического института (ХПИ) по специальности «Инженерная электрофизика». В 1999 г. в Национальном техническом университете (НТУ) «ХПИ» защитил докторскую диссертацию «Переходные процессы при воздействии больших импульсных токов и сильных импульсных магнитных полей на проводящие объекты». Заведующий отделом электромагнитных испытаний Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института (НИПКИ) «Молния» НТУ «ХПИ», профессор кафедры инженерной электрофизики НТУ «ХПИ».

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