

Исследование молниестойкости ПКМ на основе функционального покрытия с интегрированной металлической вязано-паяной сеткой (ВПС)

Investigation of the lightning resistance of PCM based on a functional coating with an integrated metal knitted-soldered mesh

Н.Н. ПАНИНА¹, А.И. ЛУКИНА¹, А.Е. ЛУТОШКИНА¹, А.В. САВЕЛЬЕВ¹,

Т.А. ГРЕБЕНЕВА¹, Л.В. ЧУРСОВА¹, М.Л. МАРАХОВСКАЯ²

N.N. PANINA¹, A.I. LUKINA¹, A.E. LUTOSHKINA¹, A.V. SAVELYEV¹,

T.A. GREBENEVA¹, L.V. CHURSOVA¹, M.L. MARAKHOVSKAYA²

¹ АО «Препрег-СКМ», Юматекс, Росатом, Москва, Россия

² ООО НПЦ «УВИКОМ», Москва, Россия

¹ JSC Prepreg-SKM, Umatex, Rosatom, Moscow, Russia

² Uvicom Co Ltd., Moscow, Russia

L.chursova@umatex.ru

Цели: исследование молниестойкости ПКМ на основе функционального покрытия с интегрированной металлической вязано-паяной сеткой (ВПС) при различных параметрах тока высоковольтных разрядов, имитирующих ток молнии.

Методы: испытательная установка ГТМ-4, обеспечивающая значения нормированного разряда тока молнии в соответствии с требованиями КТ-23.0 КТ-160Г для молниепасной зоны 1А.

Результаты: установлено, что на исследуемых образцах при взаимодействии моделируемого разряда молнии в соответствии с комбинацией компонентов А, В, С (молниепасная зона 1А) образуются области повреждений, характеризующиеся фрагментированием, повреждением волокон, подгарами ПКМ и приспособлений для заземления.

Выводы: исследована молниестойкость ПКМ на основе функционального покрытия с интегрированной металлической вязано-паяной сеткой (ВПС) при различных параметрах тока высоковольтных разрядов, имитирующих ток молнии.

Ключевые слова: молниестойкость, ПКМ, молниезащита, высоковольтный разряд, авиационная техника, углеродные препреги, функциональное покрытие

Objectives: investigation of the lightning resistance of a PCM based on a functional coating with an integrated metal knitted-soldered mesh at various current parameters of high-voltage discharges simulating lightning current.

Methods: GTM-4 test facility providing the values of normalized lightning current discharge in accordance with the requirements of КТ-23.0 КТ-160G for lightning hazard zone 1A.

Results: It was established that on the studied samples, when exposed to a simulated lightning discharge in accordance with the combination of components A, B, C (lightning hazardous zone 1A), areas of damage are formed, characterized by fragmentation, damage to fibers, burns of the PCM and grounding devices.

Conclusions: the lightning resistance of a PCM based on a functional coating with an integrated metal knitted-soldered mesh has been studied at various current parameters of high-voltage discharges simulating lightning current.

Keywords: lightning resistance, lightning protection, high-voltage discharge, aviation equipment, carbon prepregs, functional coating

DOI: 10.35164/0554-2901-2024-05-38-41

Введение

Взаимодействие атмосферного электричества (молнии) с летательным аппаратом может приводить к различным неблагоприятным последствиям, которые возникают вследствие воздействия тока молнии. Последствия прямого удара молнии в летательный аппарат могут быть фатальными – от отказа отдельных узлов, выполняющих критически важные функции, до взрывов, пожаров и гибели людей, находящихся на борту.

Опыт эксплуатации отечественных и зарубежных самолетов показывает, что невозможно исключить удара молнии в самолет. Это связано с тем, что в большинстве случаев удар молнии в самолет происходит не в грозовой обстановке, а, как правило, при полетах в слоистой, в слоисто-дождевой облачности, или при облете грозовых облаков [1]. Удары молнии в самолеты отмечались практически на всех широтах. Статистика показывает, что для территорий со средней интенсивностью грозовой деятельности (средние широты) один удар молнии в самолет приходится на 400–2000 часов полета [1, 2, 3].

Принцип молниезащиты волокнистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) реализуется путем снижения поверхностного электросопротивления конструкции (например, обшивки самолёта) за счёт расположенных в наружном слое композитного материала электропроводящих покрытий. В большинстве технических решений – это сплошные или дискретные металлические слои, металлизированные частицы, отделенные от несущего материала конструкции слоем диэлектрика, металлические волокна, вплетенные непосредственно в волокнистую текстуру армирующего материала, и др. Металлические слои, волокна и частицы принимают на себя электрическую энергию молнии, отводят ее от центрального канала по своим разветвлениям, преобразуют в тепловую и рассеивают. Слой диэлектрика в виде полимерной композиции выполняет изолирующую функцию – препятствует распространению электрического разряда молнии в материал несущей конструкции [4]. Эффективность защиты ПКМ от прямых ударов молнии зависит от применяемых способов металлизации поверхностей изделий, подверженных воздействию грозовых разрядов.

В последние годы получило промышленное развитие отечественное производство молниезащитных проволочных сеток, которое основано на технологии изготовления металлических трикотажных полотен. В настоящее время российское предприятие Научно-производственный центр углеродных волокон и композитов (ООО «НПЦ «Увиком») освоило промышленную технологию изготовления молниезащитных металлических вязано-паяных сеток. Для их создания используются покрытые легкоплавким припоем медные микропроволоки с низким электросопротивлением, высокой теплопроводностью и достаточной прочностью. Проволочные петли соединяются между собой на каждом контакте легкоплавким припоем, что обеспечивает формирование проволочного каркаса с определенным уровнем жесткости и прочности, а также способствует повышению электропроводности сетки. Пропаянные контакты между петлями не позволяют затекать полимерному связующему в межпроволочное пространство при формировании композитов с молниезащитными системами, что обеспечивает стабильность электропроводимости сеточного полотна и гарантирует надежную защиту от ударов молнии [5, 6].

На производстве композитных конструкций традиционно применяют двухэтапный технологический процесс размещения молниезащитных металлических поверхностей на защищаемой композитной конструкции: сначала наносится клейкая пленка (полимерное связующее или пленочный клей), а затем, на втором этапе, внедряют металлическую сетку в клейкий полимерный слой.

С целью упрощения этой технологии и повышения эффективности размещения молниезащитных систем АО «Препрег-СКМ» предлагает новейшую разработку – многослойное функциональное покрытие для молниезащиты изделий из ПКМ. Многослойное функциональное покрытие содержит предварительно встроенную токопроводящую вязано-паяную сетку и пленочное полимерное связующее.

По правилам международной организации гражданской авиации (International Civil Aviation Organization, ICAO) ни один самолет не может использоваться для пассажирских перевозок без детальных испытаний на молниестойкость. Методика испытаний имитирует последствия воздействия на летательный аппарат прямого удара молнии с предельными параметрами. Учитывая вышесказанное, целью работы является исследование молниестойкости образцов из ПКМ при воздействии высоковольтных разрядов, моделирующих разряд молнии, соответствующий максимальной молниеподатливой зоне 1А (IMA = 200 кА, Q(B + C) = 39 Кл).

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования выбраны образцы ПКМ, армированные волокнистым углеродным наполнителем марок С200Т, С130Р (производитель АО «Препрег Дубна») с функциональным покрытием на основе эпоксидных связующих расплавленного типа, обладающие различными температурными режимами эксплуатации и активно применяемые в современном авиастроении, а также вязано-паяные сетки марок СМПК-0,08 и СМПК-0,1.

А₁ – эпоксидное связующее пленочного типа на основе эпоксидиановых олигомеров; А₂ – эпоксидное связующее пленочного типа на основе азотосодержащих эпоксидных олигомеров. Основные свойства связующих приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные физико-химические свойства эпоксидных пленочных связующих.

Связующее	Характеристика	Значение
А ₁	Время гелеобразования при температуре 110°С, мин	60–100
	Плотность отвержденного связующего, г/см ³	1,22–1,26
	Температура стеклования, °С	150
А ₂	Время гелеобразования при температуре 145°С, мин	45
	Плотность отвержденного связующего, г/см ³	1,19–1,21
	Температура стеклования, °С	180

Основные характеристики вязано-паяных сеток марок СМПК-0,08 и СМПК-0,1 приведены в таблице 2.

Испытанию на прямое воздействие молнии подлежат образцы ПКМ с функциональными покрытиями, в составе которых име-

ются металлические вязано-паяные сетки с легкоплавким бессвинцовым припоем, связующее А₁ (образец ПКМ-1/23) и связующее А₂ (образец ПКМ-2/23) (рис. 1).

Таблица 2. Основные свойства вязано-паяных сеток (ТУ 2899-044-18070047-23, производитель ООО «НПЦ «Увиком»).

Наименование характеристик	Фактические значения
Масса сетки	не более 85 г/м ²
Глубина поражения по зоне 1А	не более 0,25 мм
Площадь поражения по зоне 1А	не более 190 см ²
Материал проволоки	медь и/или медные сплавы диаметром 0,08–0,10 мм
Марка используемого припоя	легкоплавкий бессвинцовый припой марок SAC (Sn-Ag ₄ -Cu _{0,5}) и CASTIN (Sn-Ag _{2,5} -Cu _{0,7} -Sb ₀)

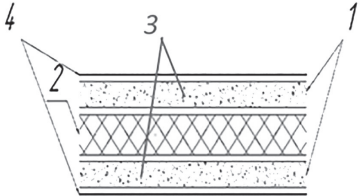


Рис. 1. Разрез многослойного (пятислойного) функционального покрытия с интегрированной металлической сеткой для молниезащиты изделий из ПКМ: 1 – диэлектрический слой – эпоксидное пленочное связующее; 2 – вязано-паяная медная проволочная сетка; 3 – волокнистый армирующий углеродный наполнитель; 4 – технологическая подложка из силиконизированной бумаги.

Испытания проведены прямым воздействием импульсов тока молнии на испытываемые образцы по условиям молниеподатливой зоны 1А (компоненты А, В, С*), соответствующим разделу 23.0. «Квалификационных требований Межгосударственного Авиационного комитета КТ-160G. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования».

Амплитудно-временные характеристики испытательных импульсов тока, соответствующие требованиям раздела 23.0 КТ-160G, приведены на рис. 2.

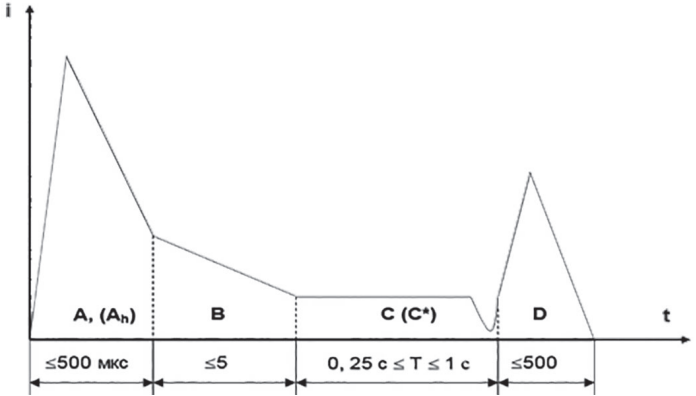


Рис. 2. Форма нормированного импульса тока молнии.

Составляющие смоделированной формы волны удара молнии (рис. 2):

Компонент А – ток первого обратного разряда молнии на высоте не более 1500 м. Амплитуда импульса тока 200 кА ± 10%, длительность – не более 500 мкс, интеграл действия – 2 × 10⁶ А₂ × с ± 20%, компонент А по форме может быть униполярным или колебательным, время нарастания от 10 до 90% пикового значения тока не должно превышать 50 мкс.

Компонент В – промежуточная составляющая разряда молнии. Среднее значение тока – 2 кА ± 20%, длительность – 5 мс ± 10%, переносимый заряд – 10 Кл ± 10%, форма импульса должна быть униполярной, импульс может быть прямоугольным либо спадать по экспоненциальному или линейному закону.

Компонент С* – (часть компонента С) – переносимый заряд 18 Кл ± 20% за время 45 мс ± 20% (время удержания канала молнии на поверхности самолета в одной точке) при среднем значении амплитуды тока не менее 400 А, данный компонент должен быть униполярным, по форме может быть прямоугольным, либо спадать по экспоненциальному или линейному закону.

Обсуждение результатов

Прямое воздействие молнии на образцы ПКМ с функциональным покрытием проводится по методикам и характеристикам, соответствующим категории XX1A раздела 23.0 КТ-160G. Эскиз общего вида образца из ПКМ с функциональным покрытием представлен на рис. 3.

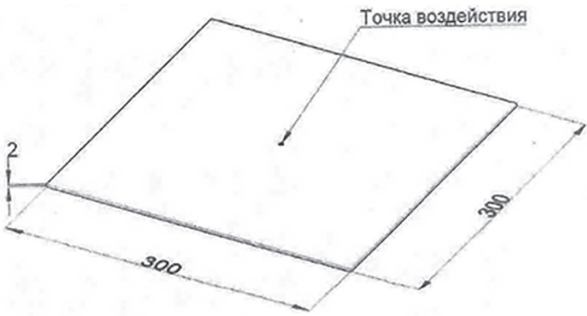


Рис. 3. Эскиз общего вида образца из ПКМ для проведения испытаний.

Характеристики воздействующих на испытываемый образец импульсов тока соответствуют максимально молниопасной зоне 1А/ (А, В, С*), а место воздействия разряда молнии определено на рис. 3.

Испытания проводились на испытательной площадке в Испытательной лаборатории «Молниезащиты летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». Условия проведения исследований: температура окружающего воздуха – 15,2°С, относительная влажность воздуха – 36,2%; атмосферное давление – 991,2 hPa. Необходимым компонентом для испытаний являлся генератор испытательного импульса тока молнии четырёхкомпонентный ГТМ-4. В качестве средств измерений использовались: цифровые осциллографы, делитель импульсов напряжения ДН-20, преобразователь импульсного тока измерительный ИТМ-200, высоковольтный пробник Tektronix P6015A 1000X, прибор для контроля окружающей среды Testo 622.

Для проведения испытаний осуществлялось крепление образцов ПКМ с функциональным покрытием на испытательной площадке ГТМ-4, после чего заземляющие токопроводы подсоединялись к местам заземления образцов (рис. 4А).

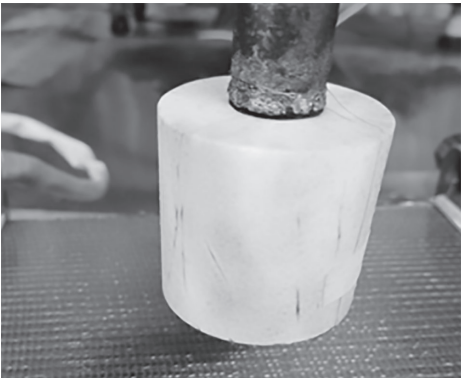
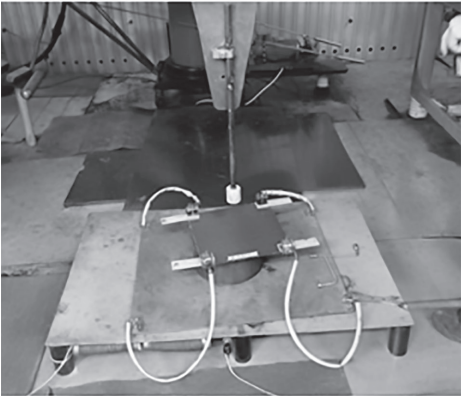


Рис. 4. Проведение испытания образца ПКМ с функциональным покрытием на испытательной площадке ГТМ-4: А – крепление образца с присоединением заземляющих токопроводов; Б – высоковольтный электрод, расположенный над образцом с проволочкой, инициирующей разряд тока молнии.

Высоковольтный электрод устанавливался над образцом ПКМ с функциональным покрытием на высоте до 50 мм от поверхности образца (рис. 4Б) над точкой удара молнии. Обеспечение привязки дуги (канала разряда) в заданную точку испытываемого объекта и инициирование пробоя разрядного промежутка осуществлялось с помощью тонкой медной проволочки диаметром 0,06 мм (рис. 4Б).

После запуска генератора ГТМ-4, который воспроизводит импульсную и постоянную составляющие тока молнии, фиксировалось остаточное напряжение генератора тока, а после запуска цифровых осциллографов записывался файл с осциллограммой на внешний носитель, в результате чего регистрировались показания параметров инициированного разряда молнии. После отключения генератора проводился внешний осмотр образца, фиксировался объём повреждений путём измерений максимальных линейных размеров зоны видимых повреждений в двух взаимно перпендикулярных направлениях, фотографировались крупным планом области повреждений. Результаты воздействия нормированного импульса тока молнии на образец ПКМ с функциональным покрытием приведены в табл. 3 и на рис. 5 и 6.

Таблица 3. Результаты испытаний образцов ПКМ на основе углеродных наполнителей с молниезащитным функциональным покрытием после воздействия тока высоковольтных разрядов, имитирующего ток молнии с параметрами, соответствующими молниопасной зоне 1А (компоненты А, В, С).

Наименование образца	Параметры воздействующего тока		Результаты внешнего осмотра
	I_{MA} , кА	Q_{B+C} , Кл	
ПКМ-1/23	189	39	1. В точке удара очаг поражения с обугливанием и распушением волокон материала композита размерами 13×14 см без сквозного отверстия. 2. Подгары и следы копоты на внешней поверхности образца размерами 23×18 см. 3. Подгары и повреждения волокон материала в местах крепления заземляющих струбцин к образцу на внешней и внутренней поверхностях образца. 4. На внутренней стороне под точкой удара повреждений не обнаружено
ПКМ-2/23	189	39	1. В точке удара очаг поражения с обугливанием и распушением волокон материала композита размерами 11×12 см без сквозного отверстия. 2. Подгары и следы копоты на внешней поверхности образца размерами 15×19 см. 3. Подгары и повреждения волокон материала в местах крепления заземляющих струбцин к образцу на внешней и внутренней поверхностях образца. 4. На внутренней стороне под точкой удара повреждений не обнаружено.

Результатами проведенных стендовых испытаний подтверждено (табл. 3, рис. 5 и 6), что созданное эффективное проводящее многослойное функциональное покрытие способно повысить степень защиты конструкций из ПКМ от воздействия молнии в зонах с высокой вероятностью зависания разрядов. Так, при воздействии моделируемого разряда молнии, соответствующего максимальной молниопасной зоне 1А ($I_{MA} = 200$ кА, $Q_{(B+C)} = 39$ Кл), на поверхности композитных панелей с молниезащитным функциональным покрытием образуются области повреждения, характеризующиеся только наличием следов токового воздействия (обугливание, распушение армирующего волокна, подгары, следы копоты). Сквозного прожига и локальных повреждений композитной панели в толщину не происходит. Разряд удара молнии оставляет только незначительные следы на поверхности панели с молниезащитным покрытием. В случае возникновения таких

незначительных повреждений воздушное судно сможет безопасно продолжить свой полет по заданному курсу без угроз причинения вреда транспортному средству и пассажирам.

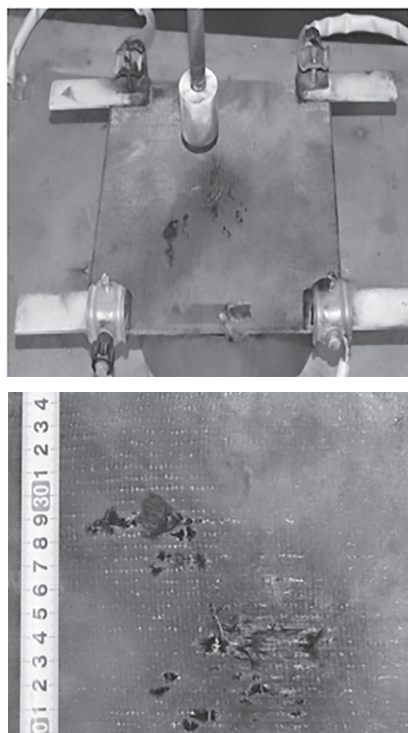


Рис. 5. Образец плиты ПКМ-1/23 на основе углеродного наполнителя с функциональным молниезащитным покрытием после воздействия прямого нормированного разряда молнии по условиям зоны 1А ($I = 200$ кА, $Q = 39$ Кл): А – общий вид образца на испытательном поле после удара молнии; Б – след токового воздействия на внешнюю сторону образца после удара молнии (крупный план).

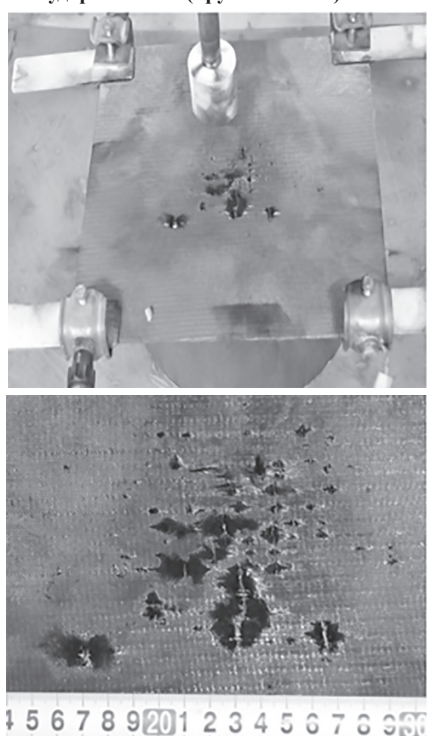


Рис. 6. Образец плиты ПКМ-2/23 на основе угленаполнителя с функциональным молниезащитным покрытием после воздействия прямого нормированного разряда молнии по условиям зоны 1А ($I = 200$ кА, $Q = 39$ Кл): А – общий вид образца на испытательном поле после удара молнии; Б – след токового воздействия на внешнюю сторону образца после удара молнии (крупный план).

Заключение

Разработанное многослойное функциональное покрытие с интегрированной металлической сеткой значительно уменьшает вероятность поражения композитных конструкций воздушного судна и предотвращает сквозной прожиг и локальные повреждения ПКМ при воздействии высоких импульсных токов; обеспечивает эффективность изготовления конструкций с элементами молниезащиты, способствует повышению их качества, а также дает возможность серийно получать длинномерные и крупногабаритные композитные конструкции; удобно в производстве и использовании при ремонте. К заказчику будет поставляться в виде готового материала – многослойного функционального покрытия с интегрированной металлической сеткой для молниезащиты ПКМ, и это позволит существенно сократить цикл выкладки изделия, а также удовлетворит экологическим требованиям производства ПКМ за счет минимизации контакта рабочего персонала с токсичными компонентами, не отвержденными полимерными композициями и препрегом. Созданный продукт можно рекомендовать к широкому использованию в авиационной отрасли, ветроэнергетике, а также в других отраслях промышленности.

Информация о финансовой поддержке: статья подготовлена с использованием результатов, полученных в ходе выполнения работ по теме «НИР «Разработка составов и технологий нанесения на полимерные композиционные материалы специальных функциональных покрытий, обеспечивающих функции молниезащиты». Соглашение с Минобрнауки России о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидии от 28.08.2023 г. 075-11-2023-053 в рамках реализации комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 4 июля 2023 г. № 1789-р.

Литература

1. Баранов А.М. Облака и безопасность полётов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1983.
2. Мошников В.А. Вероятность поражения самолётов молнией при обходе кучево-дождевых облаков. Ленинград: ОЛАГА, 1980.
3. Мошников В.А., Мошников А.Н. К вопросу оценки продолжительности гроз на ограниченной площади. Ленинград: ОЛАГА, 1974.
4. Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Вишняков Л.Р. Материалы для систем молниезащиты полимерных композиционных материалов. Особенности изготовления (обзор, часть I). Все материалы. Энциклопедический справочник. 2023. №9. С. 25–33. DOI: 10.31044/1994-6260-2023-0-9-25-33.
5. Ткаченко А.Н., Вишняков Л.Р., Гогаев К.А., Нешпор А.В., Коханая И.Н., Коханий В.А. Медные микропровода для молниезащитных сеток трикотажной структуры // Технологические системы, 2009, №4, С. 40–44.
6. Chemartin L, Lalande P, Peyrou B, Chazottes A, Elias PQ. Direct Effects of Lightning on Aircraft Structure: Analysis of the Thermal, Electrical and Mechanical Constraints // J. Aerosp Lab 2012; AL05-09. P. 1–15.