

## **ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА СТАЛЕАЛЮМИНЕВЫХ ПРОВОДАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ ДонНАСА**

*В статье представлены результаты экспериментальных исследований образования гололедных отложений на сталеалюминевых проводах воздушных линий электропередачи. Изучение закономерностей и особенностей воздействия гололедных нагрузок на провода ВЛ позволит разработать научно-методические основы защиты объектов электроэнергетики при гололеде и обеспечить устойчивость конструкций при стихийных бедствиях и природных катастрофах.*

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередачи (ВЛ), провод, гололедообразование, экспериментальные исследования.

**Постановка проблемы.** Целями Энергетической стратегии Украины на период до 2030 года являются: создание условий для безопасного, надежного и постоянного функционирования энергетики и ее максимально эффективного развития, обеспечение энергетической безопасности государства, а также интеграция Объединенной энергосистемы Украины в европейскую энергосистему с последовательным увеличением экспорта электроэнергии. Необходимость реализации поставленных целей выносит на первый план вопросы обеспечения надежной эксплуатации существующих сетей электроэнергетики. В то же время массовые аварии первого десятилетия XXI века в электрических сетях Украины [1,3] обнаружили недостаточную надежность электрических сетей при повышенных гололедно-ветровых воздействиях.

**Анализ последних исследований и выделение не решённых ранее частей общей проблемы.** Несмотря на достаточно хорошо изученную «конструктивную» сторону обеспечения надежности, основные проблемы в расчетах при назначении оптимального уровня надежности конструкций возникают при выборе оптимального уровня нагрузок, причем в первую очередь климатических. Природа гололедно-ветровых нагрузок существенно зависит от региона строительства и достаточно сильно изменяется в зависимости от различных факторов, основными из которых являются микроклиматические особенности местности по профилю трассы воздушной линии, конструктивные особенности ВЛ (тип провода, диаметр провода, высота подвеса проводов), разнообразие форм гололедно-изморозевых отложений (ГИО), отличающихся плотностью и наветренной площадью и т.д. Поэтому основные исследования в области теории надежности должны освещать проблематику климатических нагрузок и воздействий.

Атмосферный лед имеет широкий ряд форм и разновидностей [2]. Характер его воздействия выдвигает строгие требования к безопасности различных искусственных сооружений, и в первую очередь протяженных объектов, таких как воздушные линии электропередачи (ВЛ). Наличие гололеда на проводах и тросах ВЛ в сочетании с сильным ветром приводит к резкому увеличению статических и динамических нагрузок, что в свою очередь может вызывать обрывы проводов, разрушения узлов крепления, обрушения конструкций, а иногда и каскадные аварии [3].

Для принятия решений о противогололедных мероприятиях на ВЛ необходимо иметь знания о различных типах гололедно-изморозевых отложений и процессах гололедообразования на проводах. Физические условия образования гололедно-изморозевых отложений (ГИО), а также термодинамические процессы при гололедообразовании достаточно хорошо изучены [2,5-8]. Вопросам районирования территории Украины по гололедным воздействиям также уделено достаточное внимание [1,9], что в свою очередь, на основании массива метеорологических данных за более чем

полувековой период позволило уточнить карты по толщине стенки гололеда, положенные в основу современной нормативной базы для проектирования ВЛ [10]. В последние годы создается научная база, позволяющая осуществлять работы по разработке средств и методов мониторинга процесса гололедообразования, внедрению автоматизированных систем предупреждения аварийных ситуаций на ВЛ [11,12].

Большое внимание заслуживает численное и экспериментальное моделирование гололедообразования. Математическая формулировка задачи последнее время получает все большее развитие [13-15]. Экспериментальное моделирование механизма возникновения и прироста ГИО на образцах проводов выполнялось в аэродинамической трубе в лаборатории CRIEPI Ishiuchi [16,17], а также в CIGELE Atmospheric Research Icing Wind Tunnel (CAIRWT) [18]. При этом контролировались климатические условия на уровне температуры 0...+2°C, скорости ветрового потока 5...15 м/с, что позволяло осуществлять приrost мокрого снега и формирование снежных «рукавов» на поверхности проводов. В Украине подобных исследований не проводилось.

**Формулирование целей статьи.** Данная статья посвящена изучению закономерностей и особенностей воздействия гололедных нагрузок на провода воздушных линий электропередачи, что позволит разработать научно-методические основы защиты объектов электроэнергетики при гололеде и обеспечить устойчивость конструкций при стихийных бедствиях и природных катастрофах.

**Основной материал.** Работа выполнена на базе лаборатории испытаний строительных конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (ДонНАСА).

Объектом исследования является нагрузка от гололеда на провода ВЛ. Предмет исследования – влияние конструктивных факторов (тип, диаметр провода) на формирование гололедной нагрузки. Методы исследования – экспериментальные методы тензометрии для получения данных о весе ГИО на проводах. В статье рассмотрены только результаты испытаний образцов традиционных сталеалюминевых проводов АСР, известных под маркой АС (табл. 1, рис. 1).

**Таблица 1 – Характеристики сталеалюминевых проводов**

Марка провода	Число и диаметр проволок, мм		Расчетное сечение, мм <sup>2</sup>			Расчетный диаметр, мм		Масса провода, кг/м
	алюмин.	стальн.	алюминия	стали	всего провода	стального сердечн.	провода	
АС 150/24	26x2,7	7x2,1	149	24,2	173,2	6,3	17,1	0,599
АС 185/24	24x3,15	7x2,1	187	24,2	211,2	6,3	18,9	0,705
АС 240/32	24x3,6	7x2,4	244	31,7	275,7	7,2	21,6	0,921
АС 300/39	24x3,0	7x2,65	301	38,6	339,6	8,0	24,0	1,132
АС 450/56	54x3,2	7x3,2	434	56,3	490,3	9,6	28,8	1,640



*Рисунок 1 – Провода марки АС:  
АС 150/24, АС 185/24, АС 240/32, АС 300/39, АС 450/56*

Помимо этого были выполнены аналогичные исследования для компактных проводов марки Aero-Z и секторных проводов марки AFLs, результаты которых заслуживают отдельного анализа и публикации.

При экспериментальных исследованиях был принят тип гололедно-изморозевого отложения, представляющий наибольшую опасность для конструкций ВЛ, и приводящий к наиболее масштабным авариям в электроэнергетике, – стекловидный гололед. Климатическая камера ДонНАСА запроектирована с учетом требований необходимости моделирования именно данного типа ГИО [19]. Моделирование гололеда выполнялось после предварительного охлаждения климатической камеры, включения вентилятора и форсунок для создания водно-воздушного потока со скоростью 10 м/с в зоне среза нагнетательного канала и выхода на температурный режим в диапазоне  $-4...-2$  °С, что соответствует природным условиям образования ГИО.

Образец провода устанавливался горизонтально на расстоянии 150 мм от среза нагнетательного воздушного канала и закреплен шарнирно на подвесках, соединенных с 2-мя тензодинамометрами. При этом эталонный стержень диаметром 5 мм располагался горизонтально и закреплен жестко на П-образной раме, соединенной с тензодинамометром. Стержень предназначен для сравнительного контроля веса гололедного отложения и представляет собой контрольный образец имитатора провода, аналогичного применяемым на метеостанциях [1]. Для достижения идентичности всех последующих экспериментов за окончание опыта принято значение ГИО на контрольном стержне 450 г (10 Н/м), что соответствует характеристическому значению гололеда 12 Н/м на проводе диаметром 10 мм (2-й гололедный район в соответствии с Главой 2.5 ПУЭ: 2006 [10]). При этом продолжительность одного опыта составляла около трех часов. Мониторинг образования ГИО осуществлялся в SCADA-системе, построенной на базе многоканального универсального измерительно-управляющего периферического процессорного модуля OWEN TPM-138P. В качестве иллюстрации выполненных исследований на рис. 2 представлен ход опыта по образованию ГИО на проводе АС 185/24.

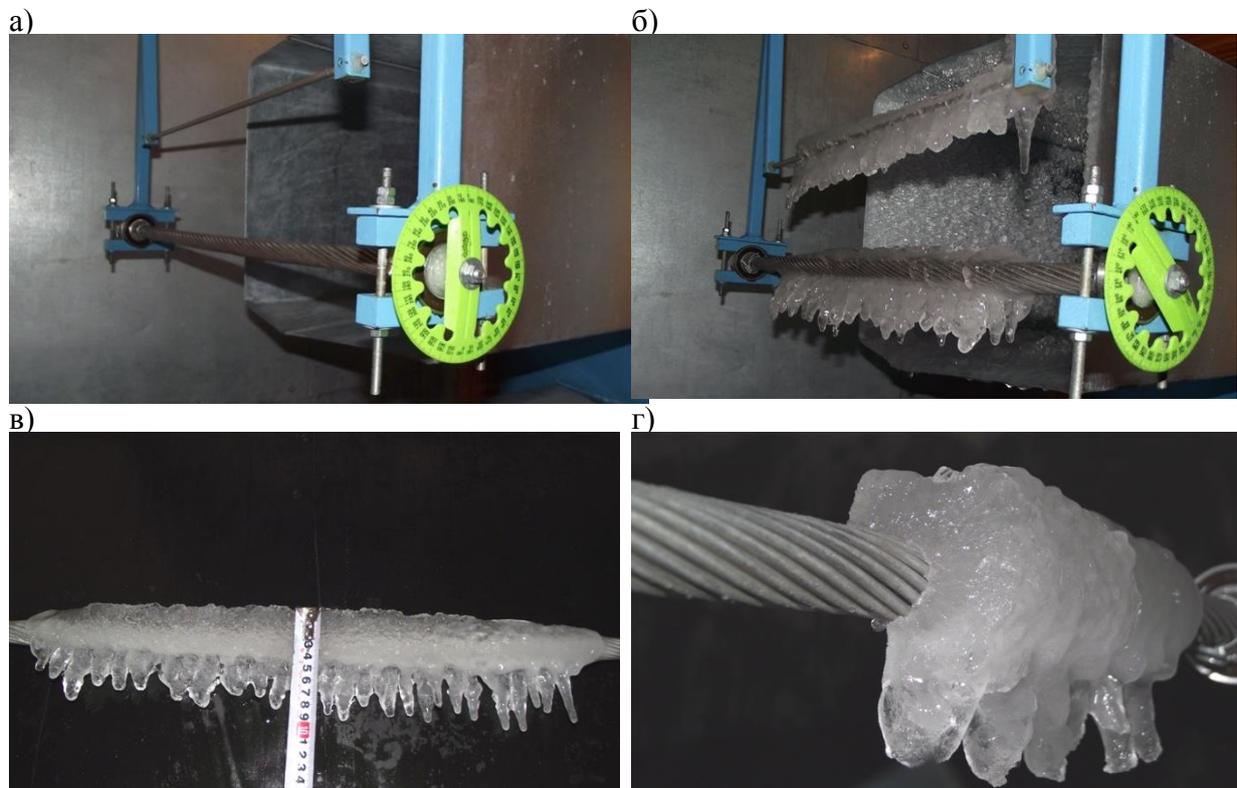


Рисунок 2 – Моделирование гололеда на проводе АС 185/24:

а – начало эксперимента; б – конец эксперимента; в,г – визуальный контроль ГИО

Результаты измерений массы образца провода АС 185/24 в сравнении с контрольным стержнем приведены на рис. 3. Процесс гололедообразования хорошо описывается линейной интерполяцией.

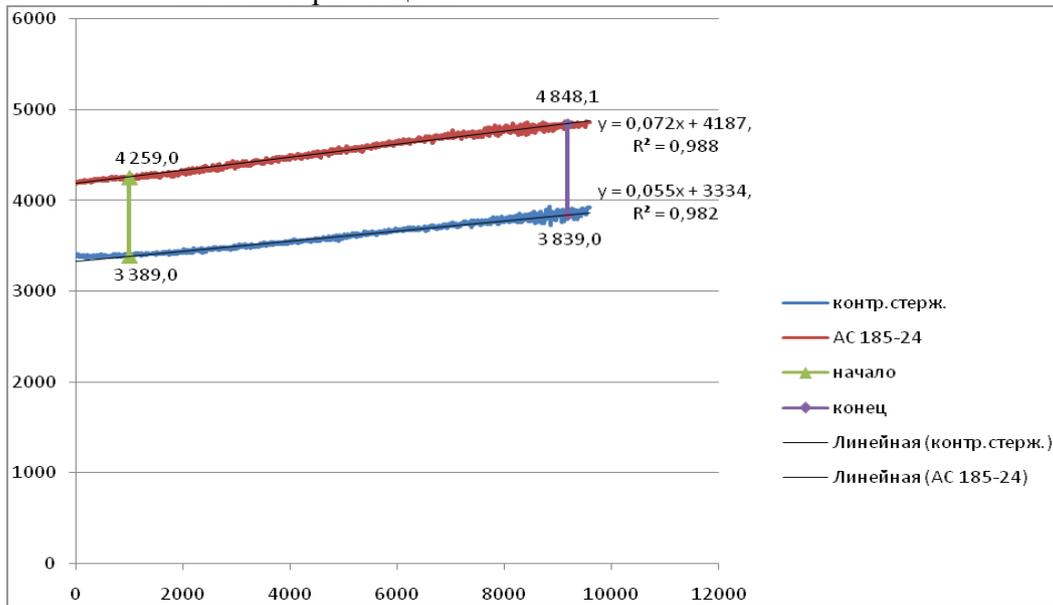


Рисунок 3 – Изменение массы образца провода АС 185/24 (г) во времени (с) за счет гололедных отложений (в сравнении с контрольным стержнем)

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

С целью анализа полученных данных экспериментов было выполнено сравнение результатов. Для этого сначала на одном графике совмещены изменения массы всех образцов проводов марок АС (рис. 4).

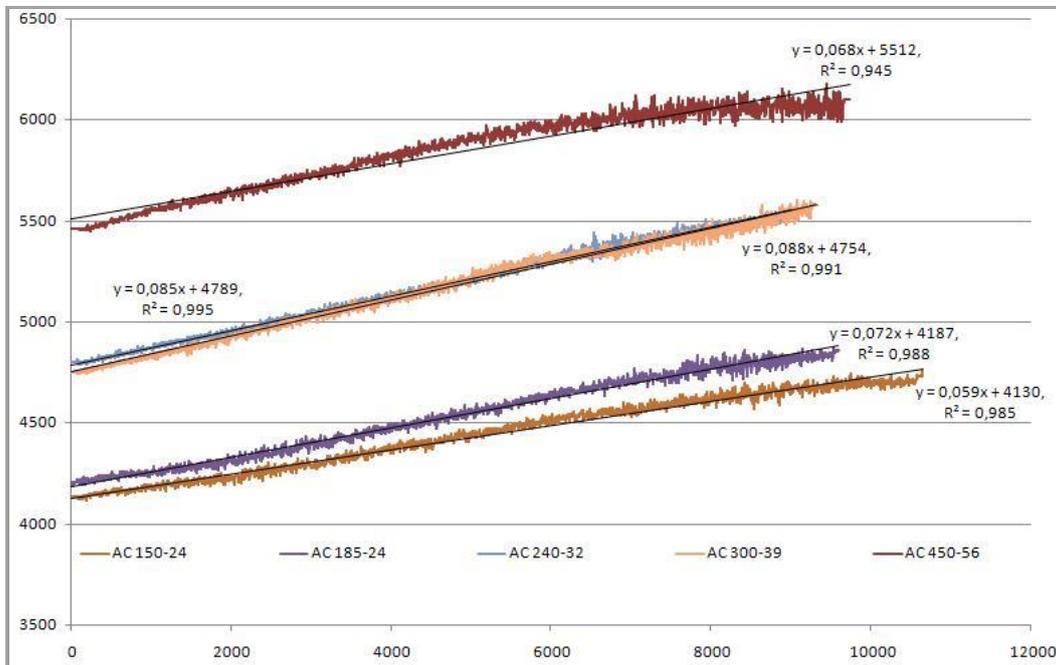


Рисунок 4 – Изменение массы образцов проводов марки АС (г) во времени (с)

Далее проанализирован прирост ГИО на образцах проводов (рис. 5), по результатам которого выполнена аппроксимация линейной зависимостью процесса образования ГИО для всей группы проводов марки АС (рис. 6).

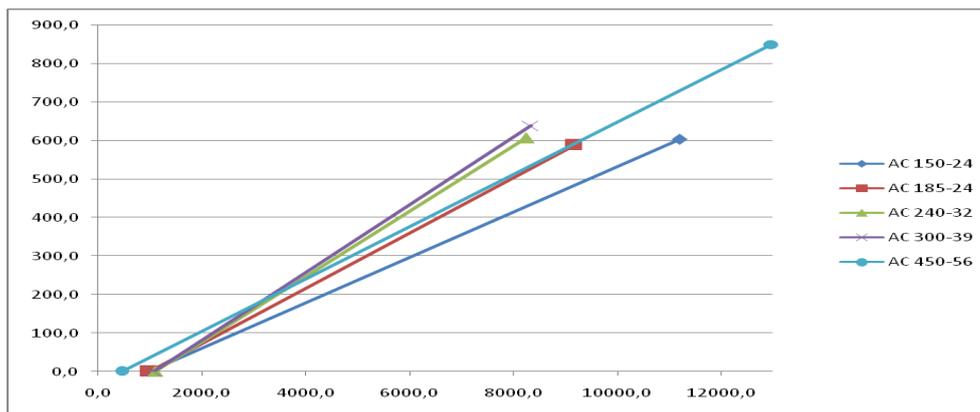


Рисунок 5 – Изменение массы ГИО на образцах проводов марки АС (г) во времени (с)

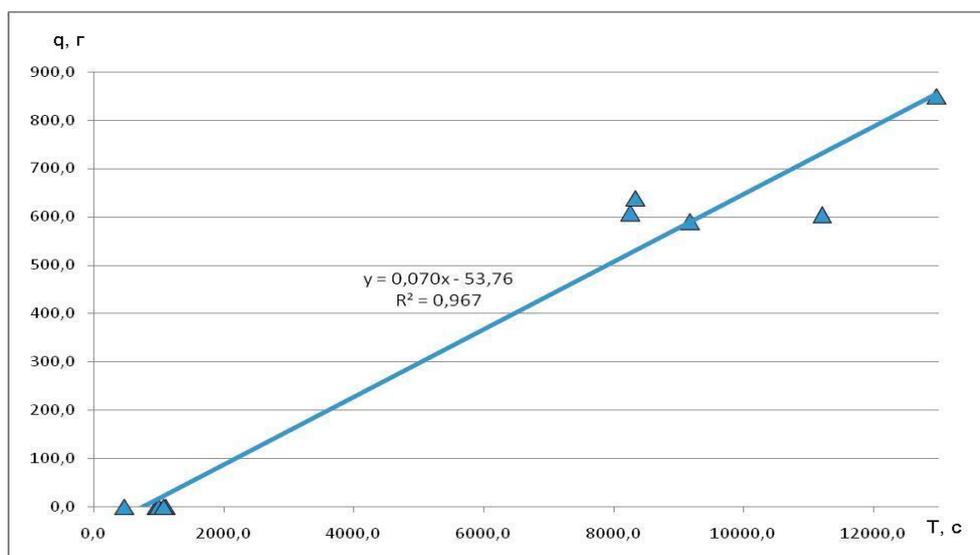


Рисунок 6 – Аппроксимация результатов процесса гололедообразования для проводов марки АС

Полученные результаты достаточно хорошо коррелируются между собой (рис. 6), что позволяет сделать вывод о возможности их распространения на однотипные провода АС в пределах контролируемых условий эксперимента. В то же время, принимая во внимание, что в ходе эксперимента моделировались условия, соответствующие 1-2 районам по стенке гололеда [10], а также, анализируя расхождение аппроксимационных зависимостей для отдельных проводов с увеличением веса ГИО (рис. 5), необходимо сделать вывод о существенном влиянии диаметра провода на скорость гололедообразования. Таким образом, для распространения результатов на 3-6 гололедные районы необходимо использовать аппроксимационные зависимости (см. рис. 4), полученные для отдельных проводов.

**Выводы.** Надежность работы ВЛ реализуется через множество взаимозависимых составляющих. Снижение надежности работы электрических сетей особенно характерно для 5-6 гололедных районов, где воздушные линии электропередачи подвержены опасным метеорологическим воздействиям. Предотвращение гололедных аварий и существенное повышение надежности ВЛ возможно за счет применения комплексной системы мероприятий, включающей внедрение автоматизированной информационной системы наблюдения за гололедом и схем плавки гололеда на проводах и тросах ВЛ. Данные полученные в результате эксперимента можно использовать для прогнозирования процесса гололедообразования, а также сопоставления с результатами исследований для других типов проводов с целью выбора рационального решения для применения в гололедоопасных районах [20].

#### Литература

1. Ветровые и гололедные воздействия на воздушные линии электропередачи / [Горохов Е.В., Казакевич М.И., Турбин С.В., Назим Я.В.] ; под ред. Е. В. Горохова. – Донецк : [б. и.], 2005. – 348 с. – (Монография).
2. Заварина М. В. Строительная климатология. – М.: Гидрометеиздат, 1976. – 312 с. – (Монография).
3. Анализ причин и последствий аварий на участках ВЛ 330 кВ Джанкойских МЭС Крымской электроэнергетической системы НЭК «Укрэнерго» / Е. В. Горохов, С.Н. Бакаев, Я. В. Назим та [ін.] // *Металеві конструкції*. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 81-97.
4. Назим Я. В. Модернизация устройства измерения гололедной нагрузки для метеопостов / Я. В. Назим, А. А. Леценко // *Металеві конструкції*. – Макеевка, 2008. – Том 14, №3. – С. 169-180.
5. Guidelines for field measurement of ice loadings on overhead line conductors // CIGRE SC 22 WG06 TF01. – Technical Brochure No. 179, 2001.
6. Guidelines for Meteorological Icing models, Statistical Methods and Topographical Effects // CIGRE WG B2.16. – Technical Brochure No. 291, 2006.
7. Design criteria of overhead transmission lines (11/165A / CDV) : IEC 60826, Geneva, Switzerland, 2002. – Ed. 3 (International standard of International Electrotechnical Commission).
8. Probabilistic design of overhead transmission lines : Companion document to «Improved design criteria of overhead transmission lines based on reliability concepts» // CIGRE SC 22 WG 06. – Technical Brochure No. 109, 1996. – Final version, July 2000.
9. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / [Гордеев В. Н., Лантух-Лященко А. И., Микитаренко М. А., Пашинский В. А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф.]; под ред. А. В. Перельмутера. – К. : изд-во «Сталь», 2005. – 500 с. – (Монография).
10. Правила улаштування електроустановок. Глава 2.5 «Повітряні лінії електропередачі напругою вище 1 кВ до 750 кВ». – Офіц. вид. – К. : ГРІФРЕ : М-во палива та енергетики України, 2006. – III, 125 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
11. Горохов Е.В. Прогнозирование и предупреждение аварий на воздушных линиях электропередачи при действии экстремальных гололедноветровых нагрузок // Эффективность энергетического строительства и эксплуатации в Украине / Под ред. Е.В. Горохова и Г.И. Гримуда. / Е.В. Горохов, Я.В. Назим, В.Н. Васылев, А.А. Леценко. – Макеевка : ДонНАСА, 2008. – С. 54-65.
12. Леценко А.А. Автоматизированная система мониторинга метеопараметров на воздушных линиях электропередачи / А.А. Леценко, Я.В. Назим, Е.В. Горохов // Информатика та комп'ютерні технології: збірка матеріалів IV міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих учених, 25-27 лист. 2008 р. – Донецьк, 2008. – С. 494-496.
13. Lozowski E.P., Makkonen L. Fifty years of progress in modelling the accumulation of atmospheric ice on power network equipment // Proc. XI International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), June 2005. – Montreal, 2005. – pp. 55-62.
14. Makkonen L., Lozowski E.P. Numerical Modelling of Icing on Power Network Equipment // Atmospheric Icing of Power Networks; M. Farzaneh (ed.) – Springer, 2008. – pp. 83-118.
15. Горохов Е.В. Математическая формулировка задачи об осаждении облачных капель на провода электросетевых систем / Е.В. Горохов, А.М. Алехин // «Металеві конструкції» – Макеевка, 2006. – Том 11, №3. – С. 203-207.
16. Sakamoto Y., Admirat P., Lapeyre J. L., Maccagnan M. Thermodynamic simulation of wet snow accretion under wind-tunnel conditions // Proc. IV International Workshop on Atmospheric Icing of Structures(IWAIS). – Paris, France, 1988. – pp. A6.6.
17. Admirat P. Wet Snow Accretion on Overhead Lines // Atmospheric Icing of Power Networks; M. Farzaneh (ed.) – Springer, 2008. – pp. 119-169.

18. Chen, Y., Farzaneh, M., Lozowski, E.P., and Szilder, K., "Modeling of Ice Accretion on Transmission Line Conductors // Proc. of the IX International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), June 2000. – Chester, United Kingdom, 2000. – Session 7a.

19. Назим Я. В. Методика експериментальних досліджень образования гололедных отложений на проводах ВЛ в климатической камере / Я.В. Назим, А.А. Лещенко // Металеві конструкції. – Макеєвка, 2011. – Том 17, №4. – С. 275-288.

20. Пути повышения надежности ВЛ с учетом координации прочности элементов в районах с повышенными гололедно-ветровыми нагрузками/ Е. В. Горохов, Я. В. Назим та [ін.] // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2010. – Т. 6, №2. – С. 113-130.

Надійшла до редакції 12.12. 2011

© Я.В. Назим, О.О. Лещенко

**Я.В. Назим, к.т.н., О.О. Лещенко, інж.**

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури*

## **ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОЖЕЛЕДОУТВОРЕННЯ НА СТАЛЕАЛЮМІНІЄВИХ ПРОВОДАХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ В КЛІМАТИЧНІЙ КАМЕРІ ДонНАБА**

*У статті представлені результати експериментальних досліджень утворення ожеледних відкладень на сталеалюмінієвих проводах повітряних ліній електропередавання. Вивчення закономірностей і особливостей впливу ожеледних навантажень на проводи ПЛ дозволить розробити науково-методичні основи захисту об'єктів електроенергетики при ожеледі і забезпечити стійкість конструкцій при стихійних лихах і природних катастрофах.*

**Ключові слова:** повітряні лінії електропередавання (ПЛ), провід, ожеледоутворення, експериментальні дослідження.

**Ya. Nazim, O. Leshchenko**

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*

## **EXPERIMENTAL SIMULATIONS OF ICING PROCESS ON STEEL-ALUMINUM CONDUCTORS OF OVERHEAD LINES IN THE CLIMATIC CHAMBER OF THE DONNACEA**

*The article presents the results of experimental simulations of icing process on bi-metallic conductors in aluminum and steel for overhead power transmission lines. The study of patterns and characteristics of the ice loads on conductors of overhead power lines will develop the scientific and methodological framework for the protection of power structures under the ice and ensure the sustainable of structures under natural hazards and catastrophic events.*

**Key words:** overhead lines (OHL), conductor, icing, experimental investigations.