



(24)-0414-1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОЛОЛЁДООБРАЗОВАНИЯ И АЭРОДИНАМИКИ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Евгений Васильевич Горохов¹, Ярослав Викторович Назим²

^{1,2}Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия,

¹mk@donnasa.ru, ²ya.v.nazim@donnasa.ru

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований образования гололёдных отложений на сталеалюминовых проводах воздушных линий электропередачи. Исследования выполнены с использованием экспериментальной установки на базе климатической камеры лаборатории испытаний строительных конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Также в работе рассмотрены вопросы экспериментальных исследований коэффициентов лобового сопротивления сталеалюминовых проводов в аэродинамической трубе МАТ-1. Данные, полученные в результате эксперимента, можно использовать для прогнозирования процесса гололёдообразования, а также сопоставления с результатами исследований для других типов проводов с целью выбора рационального решения для применения в гололёдоопасных районах. Результаты работы необходимы для использования в расчетах нагрузок на ВЛ в целях обеспечения безаварийной работы ВЛ. Изучение закономерностей и особенностей воздействия гололёдных нагрузок на провода ВЛ, а также аэродинамических характеристик проводов позволяет разработать научно-методические основы обеспечения устойчивости конструкций при ветровых и гололёдно-ветровых воздействиях.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи (ВЛ), провод, гололёдообразование, аэродинамика, экспериментальные исследования

Для цитирования: Горохов Е. В., Назим Я. В. Экспериментальные исследования гололёдообразования и аэродинамики проводов воздушных линий электропередачи // *Металлические конструкции*. 2024. Том 30, № 4. С. 173–187. doi: 10.71536/mc.2024.v30n4.2. edn: hhyxhx.

Original article

EXPERIMENTAL STUDIES OF ICE FORMATION AND AERODYNAMICS OF OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINE CONDUCTORS

Yevgenii V. Gorokhov¹, Yaroslav V. Nazim²

^{1,2}Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia,

¹mk@donnasa.ru, ²ya.v.nazim@donnasa.ru

Abstract. The article presents the results of experimental simulations of icing process on aluminum-steel conductors of overhead power transmission lines. The research was carried out using an experimental installation based on the climate chamber of the laboratory for testing building structures and structures of the Donbas National Academy of Construction and Architecture. The paper also considers the issues of experimental studies of the drag coefficients of aluminum-steel conductors in the MAT-1 wind tunnel. The data obtained as a result of the experiment can be used to predict the process of ice formation, as well as



compare it with research results for other types of conductors in order to choose a rational solution for use in icy areas. The results of the work are necessary for use in overhead line load calculations in order to ensure trouble-free operation of overhead lines. The study of patterns and characteristics of the ice loads on conductors of overhead power lines, as well as the aerodynamic characteristics of conductors, allows us to develop scientific and methodological foundations for ensuring structural stability under wind and ice-wind effects.

Keywords: overhead power transmission lines (OPTL), conductor, icing, aerodynamics, experimental research

For citation: Gorokhov Ye. V., Nazim Ya. V. Experimental studies of ice formation and aerodynamics of overhead power transmission line conductors. *Metal Constructions*. 2024;30(4):173–187. (in Russ.). doi: 10.71536/mc.2024.v30n4.2. edn: hhyxhx.

Введение

Снижение надежности работы электрических сетей особенно характерно для регионов, где воздушные линии электропередачи (ВЛ) подвержены опасным метеорологическим воздействиям. Массовые аварии начала XXI века в электрических сетях определили недостаточную надежность электрических сетей при повышенных ветровых, гололёдных и гололёдно-ветровых воздействиях. Природа гололёдно-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 электропередачи, конструктивные особенности ВЛ (тип провода, диаметр провода, высота подвеса проводов), разнообразие форм гололёдно-изморозевых отложений (ГИО), отличающихся плотностью и наветренной площадью и т. д. Поэтому исследования в области теории надежности должны включать также проблематику климатических нагрузок и воздействий. При этом, 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 [1]. Гололёдные нагрузки на провода и тросы ВЛ в сочетании с силь-

ным ветром приводят к резкому увеличению статических и динамических нагрузок на изношенный фонд электроэнергетики и технологическим нарушениям [2–5].

В статье представлены результаты научных исследований, выполненных в рамках реализации научно-технической программы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Оценка технического состояния воздушных линий электропередачи, открытых распределительных устройств и опор под оборудование на подстанциях Донбасса на основе диагностики и мониторинга ресурса и действительной работы конструкций» (Пер. № НИОКТР 123122800065-8).

Анализ исследований и публикаций

В условиях открытой местности прохождения ВЛ конструкции опор, гирлянды изоляторов и, прежде всего, провода и грозозащитные тросы испытывают повышенную ветровую и гололёдную нагрузки. Для принятия решений о противоаварийных мероприятиях на ВЛ в условиях неблагоприятных климатических воздействиях необходимо иметь знания о типах гололёдно-изморозевых отложений, процессах гололёдообразования на проводах, аэродинамических характеристиках проводов и особенностях их взаимодействия с ветровым потоком. Физические

условия образования гололёдно-изморозевых отложений, термодинамические процессы при гололёдообразовании, а также особенности воздействий на ВЛ достаточно хорошо изучены [3; 6–9]. Исследованиям в области аэродинамики линейной части воздушных линий электропередачи также уделялось большое внимание [2], в том числе изучению влияния обледенения конструкций на их аэродинамические свойства. Вопросам районирования территорий по ветровым и гололёдным воздействиям в нормах стран [10–12] также уделено достаточное внимание, но тем не менее для отдельных регионов необходимы накопления дополнительных метеорологических данных и уточнения карт по ветровому давлению и толщине стенки гололёда для уточнения нормативной базы для проектирования ВЛ. В последние годы создается научная база, позволяющая осуществлять работы по разработке средств и методов мониторинга процесса гололёдообразования, внедрению автоматизированных систем предупреждения аварийных ситуаций на ВЛ.

Большого внимания заслуживает численное и экспериментальное моделирование гололёдообразования. Математическая формулировка задачи последнее время получает все большее развитие [13; 14]. Экспериментальное моделирование механизма возникновения и прироста ГИО на образцах проводов выполнялось в аэродинамической трубе в лаборатории CRIEPI Ishiuchi [15; 16], а также в CIGELE Atmospheric Research Icing Wind Tunnel (CAIRWT) [17]. При этом контролировались климатические условия на уровне температуры $0...+2$ °С, скорости ветрового потока $5...15$ м/с, что позволяло осуществлять приrost мокрого снега и формирование снежных «рукавов» на поверхности проводов. В России подобных исследований не проводилось, к тому же особый интерес вызывает экспериментальное моделирование не мокрого снега на проводах, а стекловидного льда при температуре $-2...+2$ °С, образование которого характерно для южных регионов, и при воздействии которого наблюдаются наиболее масштабные аварии в электроэнергетике.

Изучение закономерностей и особенностей воздействия ветровых и гололёдных нагрузок на провода воздушных линий электропередачи позволит разработать научно-методические осно-

вы надежности объектов электроэнергетики при стихийных климатических воздействиях.

Описание объекта исследований

Объектом исследования являются нагрузки на провода воздушных линий электропередачи, создаваемые отложением гололёда и воздействием ветра.

Цель работы

На основе экспериментального моделирования гололёдообразования на проводах ВЛ и исследования аэродинамических характеристик проводов получены данные для использования в расчетах гололедных и ветровых нагрузок в целях обеспечения безаварийной работы ВЛ.

Основная часть

Экспериментальные исследования гололёдообразования проводов ВЛ

Атмосферный лед имеет широкий ряд форм и разновидностей [3; 6–7]. Характер его воздействия выдвигает строгие требования к безопасности различных искусственных сооружений, и в первую очередь протяженных объектов, таких как воздушные линии электропередачи. Наличие гололёда на проводах и грозозащитных 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 [1–5].

В целях изучения влияния конструктивных факторов (тип, диаметр провода) на формирование гололёдной нагрузки выполнены экспериментальные исследования гололёдообразования проводов ВЛ в климатической камере лаборатории испытаний строительных конструкций и сооружений ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (ФГБОУ ВО «ДОННАСА»). При исследованиях были использованы экспериментальные методы тензометрии для получения данных о весе ГИО на проводах. В статье рассмотрены только

Таблица 1. Характеристики сталеалюминевых проводов

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



Рисунок 1. Образцы проводов марки АС для экспериментальных исследований: АС 150/24, АС 185/24, АС 240/32, АС 300/39, АС 450/56.

результаты испытаний образцов традиционных сталеалюминевых проводов АС_{SR}, более известных в России под маркой АС (табл., рис. 1). Авторами проводились также исследования для проводов других марок АС, а также современных типов проводов (компактные провода из алюминиевого сплава АААС; секторные уплотненные сталеалюминевые провода АС_{SR}/ТW и др.) [18; 19], но в данной публикации их результаты не рассматриваются.

В процессе экспериментальных исследований моделировался тип гололёдно-изморозевого отложения, представляющий наибольшую опасность для конструкций ВЛ, и приводящий к наиболее масштабным авариям в электроэнергетике, – стекловидный гололёд. Климатическая камера ФГБОУ ВО «ДОННАСА» запроектирована с учетом требований необходимости моделирования именно данного типа ГИО [20] при его плотности 0,9 г/см³. Моделирование гололёда выполнялось после предварительного охлаж-

дения 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 закреплялся шарнирно на подвесках, соединенных с 2-мя тензодинамометрами. При этом контрольный стержень диаметром 5 мм располагался горизонтально и закреплялся жестко на П-образной раме, соединенной с тензодинамометром. Стержень предназначен для мониторинга (контроля) веса гололёдного отложения и представляет собой контрольный образец имитатора провода, аналогичного применяемому на метеостанциях Гидрометеорологической службы России.

Продолжительность одного опыта составляла около трех часов. Мониторинг образования

ГИО (рис. 2) осуществлялся в SCADA-системе, построенной на базе многоканального универсального измерительно-управляющего периферического процессорного модуля OWEN TPM-138P. Для достижения идентичности всех последующих экспериментов за окончание опыта принято значение ГИО на контрольном стержне 450 г (10 Н/м), что соответствует значению гололёда 12 Н/м на проводе диаметром 10 мм, располо-

женном на высоте 10 м над поверхностью земли в соответствии с применяемым районированием по гололёду (II-й гололёдный район в соответствии с ПУЭ-7 [11]).

Результаты измерений массы образца провода АС 150/24 в сравнении с контрольным стержнем приведены на рисунке 3. Процесс гололёдообразования хорошо описывается линейной интерполяцией.

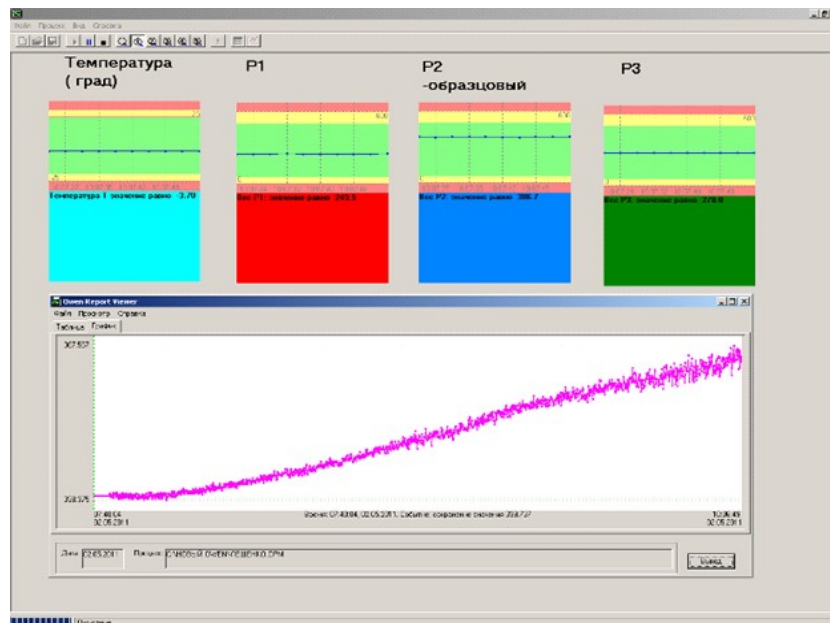


Рисунок 2. Мониторинг образования ГИО на контрольном стержне.

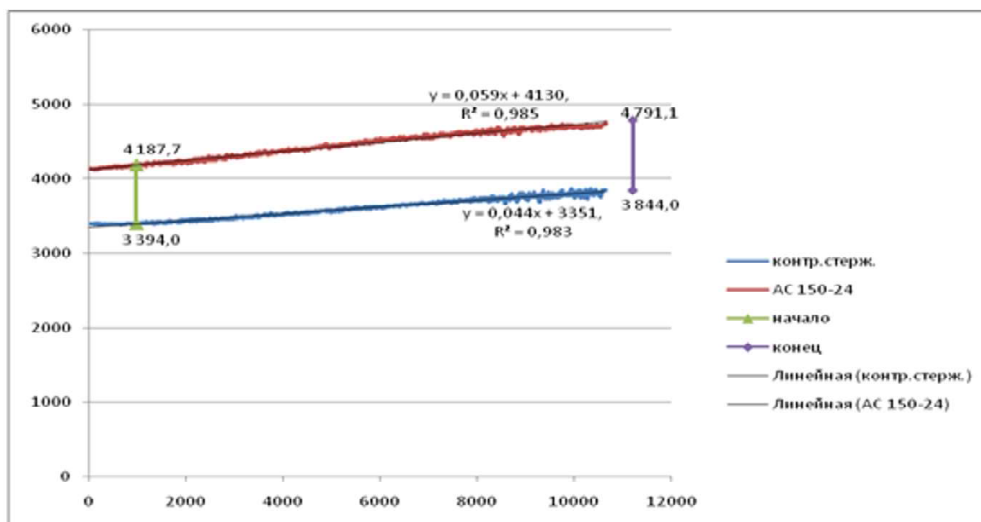


Рисунок 3. Изменение массы образца провода АС 150/24 (z) во времени (c) за счет гололёдных отложений (в сравнении с контрольным стержнем).

Аналогично были выполнены исследования гололёдообразования на образцах проводов марок АС 185/24, АС 240/32, АС 300/39, АС 450/56.

В качестве иллюстрации выполненных исследований на рисунке 4 представлен ход опыта по

образованию ГИО на проводе АС 185/24. Результаты измерений массы образца провода АС 185/24 в сравнении с контрольным стержнем приведены на рисунке 5. Результаты измерений массы образца провода АС 240/32 в сравнении с контрольным стержнем приведены на рисунке 6.

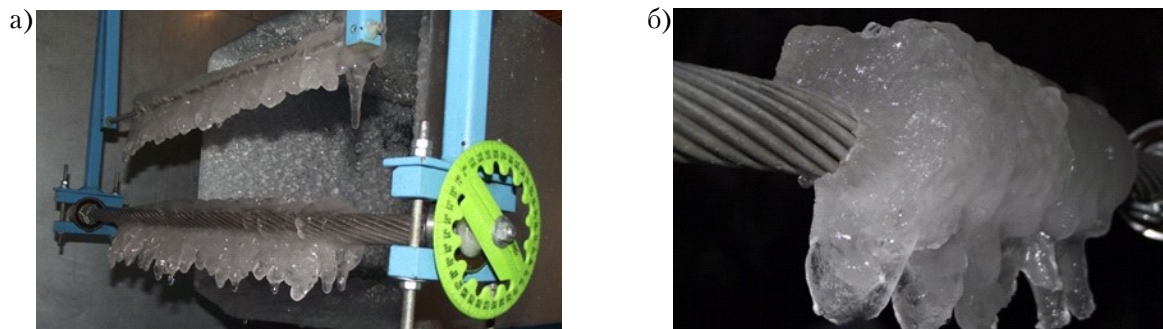


Рисунок 4. Моделирование гололёда на проводе АС 185/24: а) образец провода в сравнении с контрольным стержнем; б) визуальный контроль ГИО на проводе.

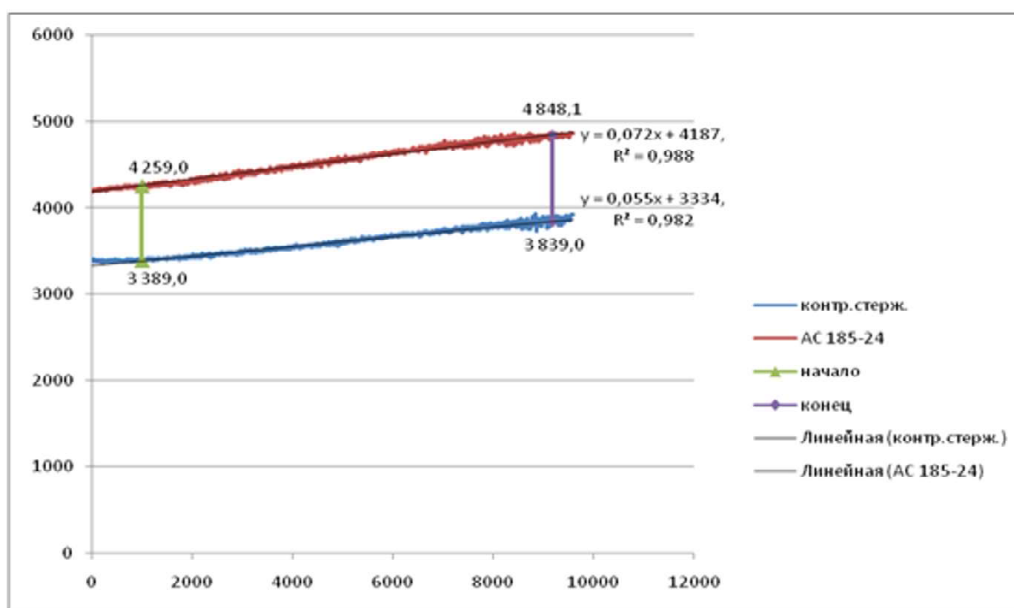


Рисунок 5. Изменение массы образца провода АС 185/24 (z) во времени (c) за счет гололёдных отложений (в сравнении с контрольным стержнем).

Результаты измерений массы образца провода АС 300/39 в сравнении с контрольным стержнем приведены на рисунке 7. Результаты изме-

рений массы образца провода АС 450/56 в сравнении с контрольным стержнем приведены на рисунке 8.

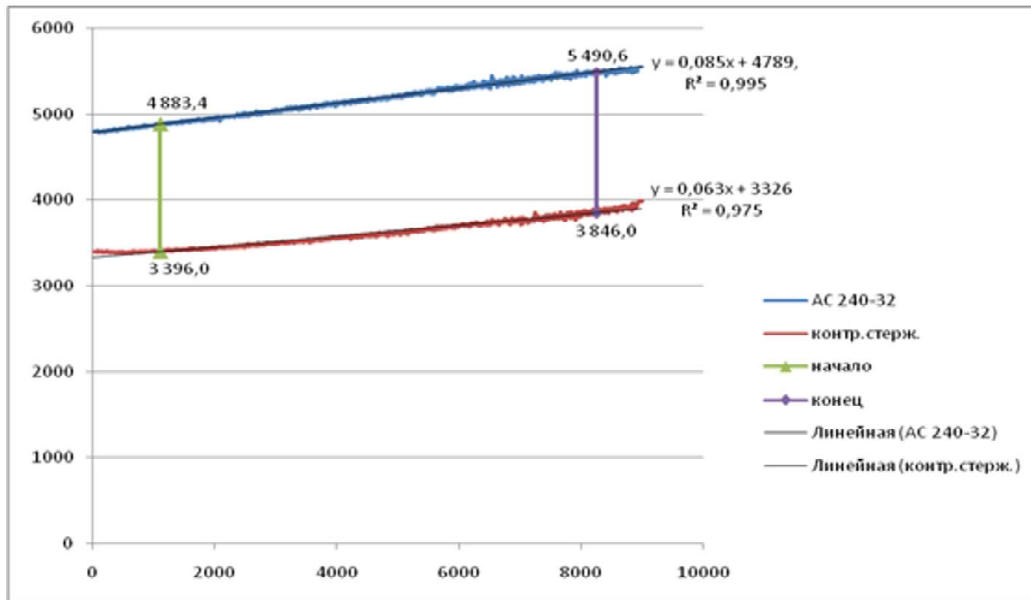


Рисунок 6. Изменение массы образца провода АС 240/32 (z) во времени (c) за счет гололёдных отложений (в сравнении с контрольным стержнем).

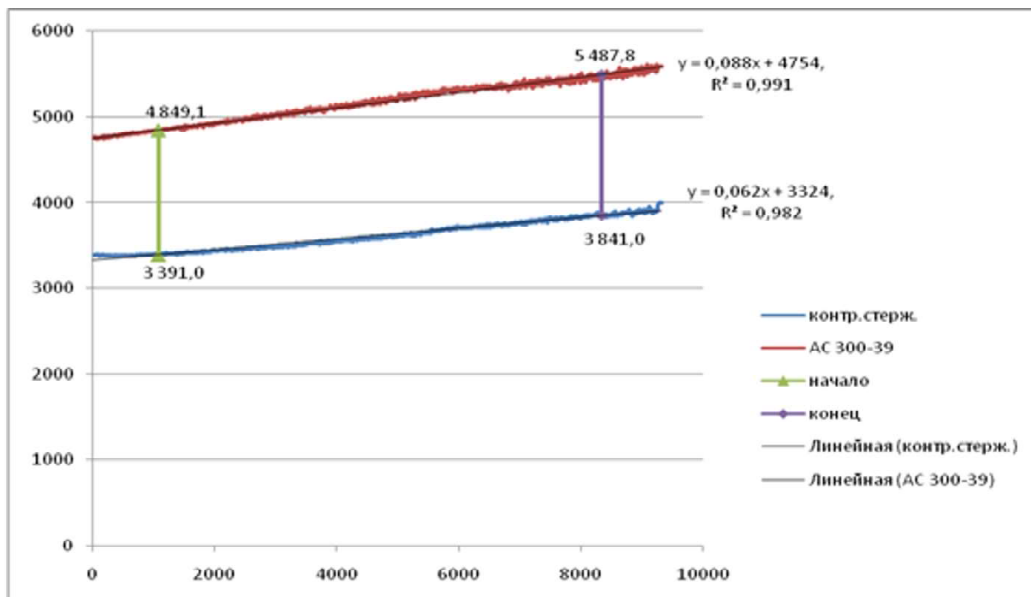


Рисунок 7. Изменение массы образца провода АС 300/39 (z) во времени (c) за счет гололёдных отложений (в сравнении с контрольным стержнем).

С целью анализа полученных экспериментальных данных было выполнено сравнение результатов. Для этого сначала на одном графике были совмещены значения результирующих

изменения массы всех исследованных образцов проводов марок АС (рис. 9).

Далее проанализирован прирост ГИО на образцах проводов (рис. 10), по результатам

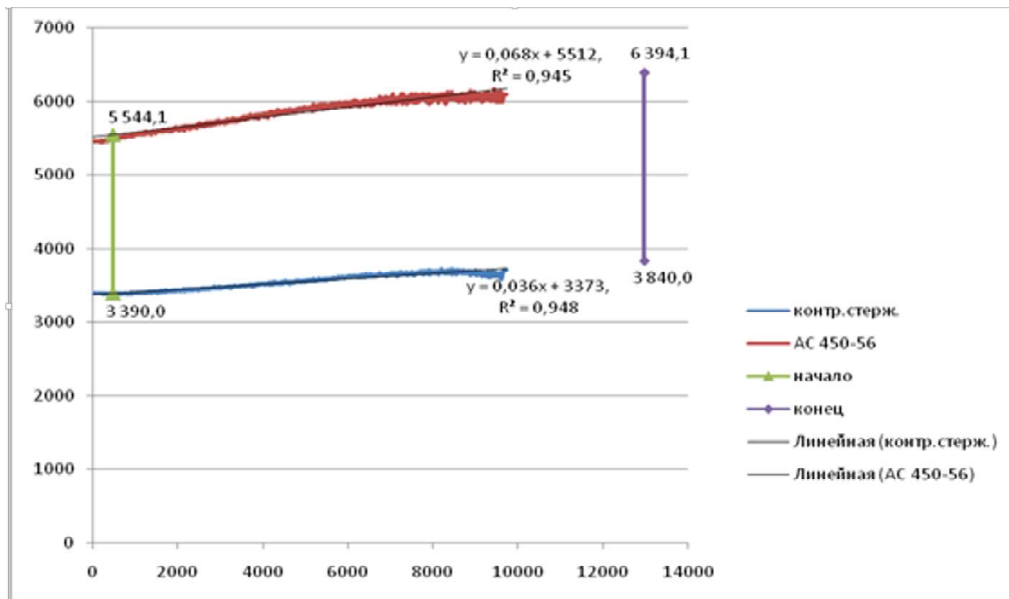


Рисунок 8. Изменение массы образца провода АС 450/56 (г) во времени (с) за счет гололёдных отложений (в сравнении с контрольным стержнем).

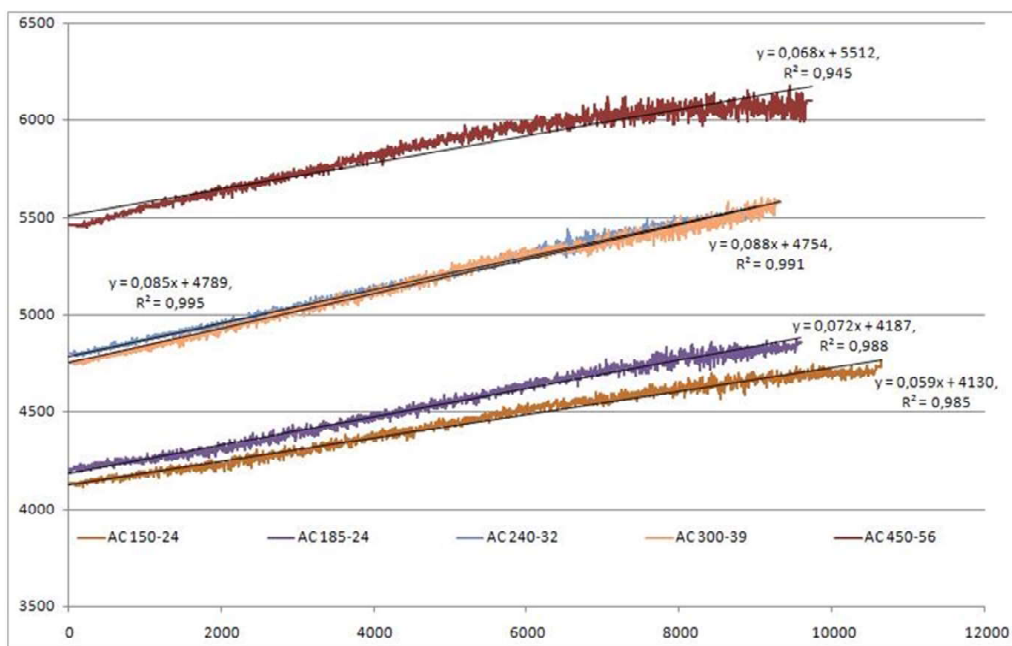


Рисунок 9. Изменение массы образцов проводов марки АС (г) во времени (с).

которого выполнена аппроксимация линейной зависимостью процесса образования ГИО для всей группы проводов марки АС (рис. 11).

Полученные результаты достаточно хорошо коррелируются между собой, 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 экспери-

мента моделировались условия, соответствующие I-II районам по стенке гололёда [12], а также, анализируя расхождение аппроксимационных зависимостей для отдельных проводов с увеличением веса ГИО (рис. 10), необходимо сделать вывод о существенном влиянии конструктивных факторов на скорость гололёдообразования. Таким образом, для распространения результатов на III-VII гололёдные районы необходимо

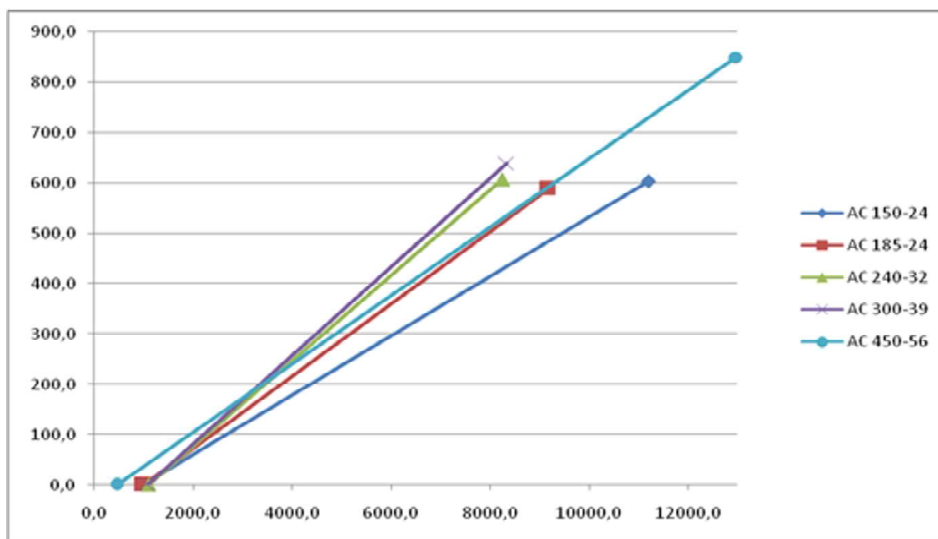


Рисунок 10. Изменение массы ГИО на образцах проводов марки АС (z) во времени (c).

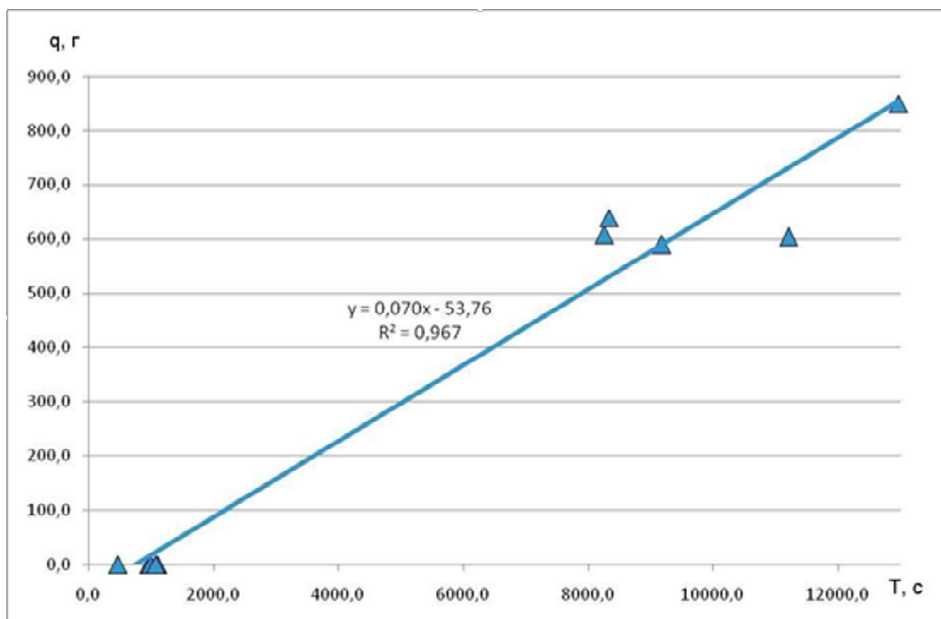


Рисунок 11. Аппроксимация результатов процесса гололёдообразования для проводов АС.

использовать аппроксимационные зависимости, полученные для отдельных проводов (рис. 3, 5–8). Результаты экспериментальных исследований, полученные для образцов сталеалюминиевых проводов, могут использоваться в прогнозных моделях гололедообразования [21; 22].

Экспериментальные исследования аэродинамики проводов ВЛ

Другим немаловажным аспектом исследования является учет воздействия ветрового потока на конструкции проводов ВЛ. Для определения нагрузок на провода от действия ветра необходимо детальное изучение особенностей ветровых течений в приземном слое атмосферы и взаимодействия проводов с ветровым потоком. Поэтому для каждого типа сталеалюминиевых проводов марки АС, использованных в экспериментальных исследованиях гололедообразования (табл. 1), были проведены аэродинамические исследования в условиях физического имитирования воздушного потока. В качестве основного оборудования для исследования применялась аэродинамическая труба МАТ-1 ФГБОУ ВО «ДОННАСА» (рис. 12, а), предназначенная для аэрофизических исследований, прямооточного типа с прямоугольным сечением рабочей части с размерами $1 \times 0,7$ м и длиной 4,8 м.

Максимальная скорость воздушного потока в рабочей части аэродинамической трубы – до 25 м/с, мощность электродвигателя ветроколеса – 8 кВт. Характерным для МАТ-1 является длинная рабочая часть, в которой за счет естественной шероховатости нижней ее стенки создается стационарный пограничный слой, по-

добный по целому ряду физических параметров приземному слою атмосферы. Интенсивность турбулентности свободного потока составляет 2 %.

Для испытаний приняты по одному образцу провода каждого типа марки АС (АС 150/24, АС 185/24, АС 240/32, АС 300/39, АС 450/56). Длина образцов принята 500 мм. Расположение образцов на поворотном круге принималось вертикальным с консольным креплением на тензосах (рис. 12, б) [23; 24].

В качестве основных аэродинамических характеристик проводов производились измерения лобового сопротивления, подъёмной силы и аэродинамического момента. Во время проведения эксперимента процесс измерения статического воздушного давления, преобразование его в электрический сигнал, обработка и отображение полученных результатов автоматизирован с использованием информационно-вычислительной системы SCADA, в состав которой входят пневмокоммутатор с датчиками давления, высокопроизводительный компьютер с системой преобразования аналогового сигнала в цифровой, а также соответствующая коммутационная аппаратура и источники электрического питания (рис. 13).

Один цикл опроса занимал 3 мин. Запускалась аэродинамическая труба, и скорость воздушного потока регулировалась ступенчато в диапазоне 5...22 м/с. Скорость удерживалась постоянной в течение 180 сек, и в это время производился опрос датчиков (рис. 13, б). В дальнейшей обработке соответствующие первичные сигналы по-

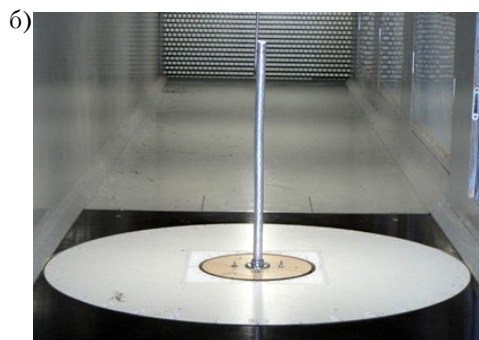


Рисунок 12. Проведение исследований аэродинамических характеристик проводов в аэродинамической трубе МАТ-1: а) общий вид аэродинамической трубы МАТ-1; б) расположение образца провода в рабочей части МАТ-1.

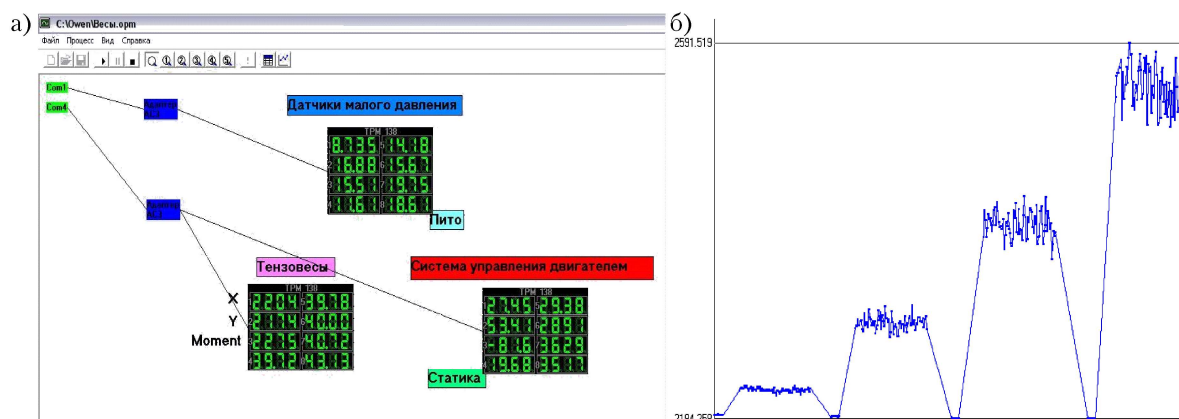


Рисунок 13. Информационно-вычислительная система SCADA: а) отображение данных в среде Owen Process Manager; б) визуализация по 4-м циклам опроса тензвесов по направлению X.

каждому циклу и по каждому измеряемому показателю усреднялись. После каждого цикла испытаний на различной скорости ветра производился опрос сигнала при нулевой скорости воздушного потока в течение 20 сек.

Для проводов исследованных типов проводов на рисунке 14 приведены полученные значения аэродинамических коэффициентов S_x .

Данные графика свидетельствуют о зависимости коэффициента S_x лобового сопротивления от диаметра провода. К примеру, для проводов марки АС коэффициенты S_x варьируются от 0,95 (для провода АС 150/24) до 1,7 (для провода АС 450/56), что свидетельствует об увеличении аэродинамических коэффициентов с увеличением диаметров провода. Очевидным является и увеличение аэродинамических коэф-

фициентов для проводов при образовании на них гололёда цилиндрической формы. Дополнительного исследования требует анализ поведения в ветровом потоке проводов, покрытых односторонним гололёдом, для изучения их склонности к явлениям аэродинамической неустойчивости.

Выводы

Надежность работы ВЛ реализуется через множество взаимозависимых составляющих. Предотвращение аварий при гололёдно-ветровых воздействиях и существенное повышение надежности ВЛ возможно за счет применения комплексной системы мероприятий, включающей

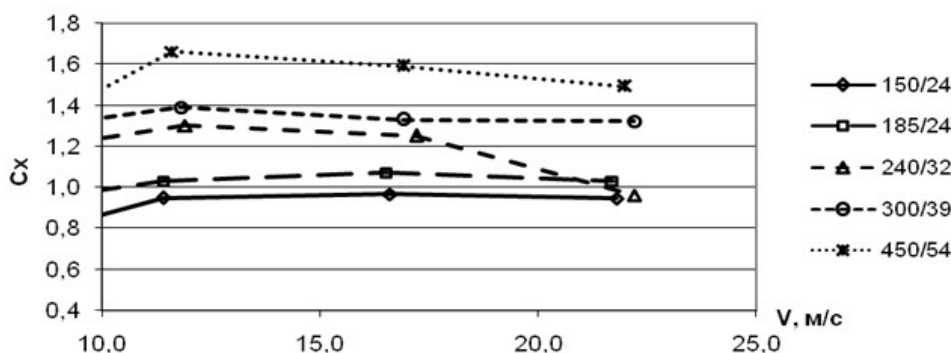


Рисунок 14. Аэродинамические коэффициенты S_x сталеалюминевых проводов.

внедрение автоматизированных информационных систем наблюдения за гололёдом и схем плавки гололёда на проводах и тросах ВЛ.

Основными результатами данного исследования являются аппроксимационные зависимости, полученные для наиболее распространенных в межрегиональных и региональных распределительных сетевых компаниях России сталеалюминевых проводов АС 150/24, АС 185/24, АС 240/32, АС 300/39, АС 450/56 (рис. 3, 5–8), а также аэродинамические коэффициенты S_x для данных марок проводов (рис. 14). Данные, полученные в результате эксперимента в климатической камере, можно использовать для прогнозирования процесса гололёдообразования, в

автоматизированных системах раннего обнаружения гололёда при взаимодействии с системами управления по предотвращению аварийных ситуаций при гололёдно-ветровых нагрузках, а также сопоставления с результатами исследований для других типов проводов (компактные провода Aero-Z из алюминиевого сплава; секторные уплотненные сталеалюминевые провода AFLs и др.) [18; 19] с целью выбора рационального решения для применения в гололёдоопасных районах. Результаты аэродинамических исследований характеристик проводов могут быть использованы в расчетах ветровых нагрузок в целях обеспечения безаварийной работы ВЛ.

Список источников

1. Назим, Я. В. Критерии необходимости повышения надежности для отдельных участков воздушных линий электропередачи / Я. В. Назим. – Текст : непосредственный // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сборник трудов по материалам международной конференции, 12–13 ноября 2014 г., Москва. – Москва : МГСУ, 2014. – С. 196–202.
2. Аэродинамика электросетевых конструкций / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. Н. Шаповалов, Я. В. Назим ; под общей редакцией Е. В. Горохова и М. И. Казакевича. – Донецк : [б. и.], 2000. – 336 с. – Текст : непосредственный.
3. Ветровые и гололедные воздействия на воздушные линии электропередачи / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. В. Турбин, Я. В. Назим ; под общей редакцией Е. В. Горохова. – Донецк : [б. и.], 2005. – 348 с. – Текст : непосредственный.
4. 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 [и др.]. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2010. – Том 16, № 2. – С. 75–92. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2010-2/01_gorohov_bakaev_nazim_morgaj_popov.pdf (дата обращения: 18.11.2024). – ISSN 1993-3517.
5. Анализ аварийности в электрических сетях 6–110 кВ Кузбасской энергосистемы / С. А. Захаров, Д. С. Кудряшов, В. А. Бродт [и др.]. – Текст : непосредственный // Экологические проблемы

References

1. Nazim, Ya. V. Criteria for the need to improve reliability for individual sections of overhead power transmission lines. – Text: direct. – In: *Integration, Partnership and Innovations in Construction Science and Education* : collection of papers based on the materials of the international conference, November 12–13, 2014, Moscow. – Moscow : MGSU, 2014. – P. 196–202. (in Russian)
2. Gorokhov, E. V.; Kazakevich, M. I.; Shapovalov, S. N.; Nazim, Ya. V. Aerodynamics of electric grid structures ; under the general editorship of E. V. Gorokhov and M. I. Kazakevich. – Donetsk : [s. n.], 2000. – 336 p. – Text : direct. (in Russian)
3. Gorokhov, E. V.; Kazakevich, M. I.; Turbin, S. V.; Nazim, Ya. V. Wind and ice impacts on overhead power transmission lines ; under the general editorship of E. V. Gorokhov. – Donetsk : [s. n.], 2005. – 348 p. – Text : direct. (in Russian)
4. Gorokhov, E. V.; Bakayev, S. N.; Nazim, Ya. V. [et al.]. Failure cause and consequence analysis at the high voltage (330 kV) line sections of the dzhankoy local electrical power station of the Crimean electrical power system of the NEC «UKRENERGO». – Text : electronic. – In: *Metal Constructions*. – 2010. – Volume 16, № 2. – P. 75–92. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2010-2/01_gorohov_bakaev_nazim_morgaj_popov.pdf (date of access: 18.11.2024). – ISSN 1993-3517.
5. Zakharov, S. A.; Kudryashov, D. S.; Brodt, V. A. [et al.]. Accident analysis in 6–110 kV electric networks of the Kuzbass power system. – Text : direct. – In:

- промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения : материалы II Всероссийской молодежной научно-практической конференции, 21–22 декабря 2017 г., Кемерово / Под редакцией С. Г. Костюк [и др.]. – Кемерово : КГТУ им. Т. Ф. Горбачева, 2017. – С. 404-1–404-5.
6. Бургсдорф, В. В. О физике гололедно-изморозевых явлений / В. В. Бургсдорф. – Текст : непосредственный // Труды главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – 1947. – № 3(65). – С. 3–12.
 7. Бучинский, В. Е. Гололед и борьба с ним / В. Е. Бучинский. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1960. – 192 с. – Текст : непосредственный.
 8. Заварина, М. В. Строительная климатология / М. В. Заварина. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1976. – 312 с. – Текст : непосредственный.
 9. Farzaneh, M. Atmospheric Icing of Power Networks / M. Farzaneh. – Canada : Springer. – 2008. – 381 p. – Текст : непосредственный.
 10. Overhead lines – Meteorological data for assessing climatic loads: IEC/TS 61774. – Geneva, Switzerland. – TR 2. Ed. 1. – 2000. – 91 p. – Текст : непосредственный.
 11. Cigré WG B2.16. TB 291 Guidelines for meteorological icing models, statistical methods and topographical effects, Cigré, April 2006, Paris, France. – 116 p. – Текст : электронный. – URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/291-guidelines-for-meteorological-icing-models-statistical-methods-and-topographical-effects.html> (дата обращения: 18.04.2024).
 12. Российская Федерация. Приказ. Об утверждении глав правил устройства электроустановок (вместе с «Правилами устройства электроустановок (ПУЭ). Издание седьмое. Раздел 2. Передача электроэнергии. Главы 2.4, 2.5») : Приказ Минэнерго России : утверждены Приказом Минэнерго России от 20 мая 2003 г. № 187 : введены в действие с 1 октября 2003 года. – Текст : электронный // КОДИФИКАЦИЯ.РФ : [сайт]. – 2003. – URL: <https://rulings.ru/acts/Prikaz-Minenergo-Rossii-ot-20.05.2003-N-187/> (дата обращения: 18.11.2024).
 13. Lozowski E. P. Fifty years of progress in modelling the accumulation of atmospheric ice on power network equipment / E. P. Lozowski, L. Makkonen. – Текст : непосредственный // Atmospheric Icing of Structures : Processing XI International Workshop (IWAIS), June 2005, Montreal. – Montreal : [s. n.], 2005. – P. 55–62.
 14. Makkonen, L. Numerical Modelling of Icing on Power Network Equipment / L. Makkonen, E. P. Lozowski. – Текст : непосредственный // Atmospheric Icing of Power Networks. – 2008. – Finland : Springer, 2008. – P. 83–118.
 15. Thermodynamic simulation of wet snow accretion under wind-tunnel conditions / Y. Sakamoto, P. Admirat, J. L. Lapeyre, M. Maccagnan. – Текст : непосредственный // Atmospheric Icing of Structures : Processing IV International Workshop (IWAIS), Paris. – Paris : [s. n.], 1988. – P. 80–185.
 16. *Environmental problems of industrially developed and resource-producing regions: solutions : proceedings of the II All-Russian Youth Scientific and Practical Conference, December 21–22, 2017, Kemerovo / under the general editorship of S. G. Kostyuk [et al.]. – Kemerovo: KGTU named after T. F. Gorbachev, 2017. – P. 404-1–404-5. (in Russian)*
 6. Burgsdorf, V. V. On the physics of ice-rime phenomena. – Text : direct. – In: *Works of the main geophysical observatory named after A. I. Voeikov.* – 1947. – № 3(65). – P. 3–12. (in Russian)
 7. Buchinsky, V. E. Ice and its control. – Leningrad : Gidrometeizdat, 1960. – 192 p. – Text: direct. (in Russian)
 8. Zavarina, M. V. Construction climatology. – Leningrad : Gidrometeizdat, 1976. – 312 p. – Text : direct. (in Russian)
 9. Farzaneh, M. Atmospheric Icing of Power Networks. – Canada : Springer. – 2008. – 381 p. – Text : direct.
 10. Overhead lines – Meteorological data for assessing climatic loads: IEC/TS 61774. – Geneva, Switzerland. – TR 2. Ed. 1. – 2000. – 91 p. – Текст : непосредственный.
 11. Cigré WG B2.16. TB 291 Guidelines for meteorological icing models, statistical methods and topographical effects, Cigré, April 2006, Paris, France. – 116 p. – Text : electronic. – URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/291-guidelines-for-meteorological-icing-models-statistical-methods-and-topographical-effects.html> (date of access: 18.11.2024).
 12. Russian Federation. Order. On approval of chapters of the rules for the installation of electrical installations (together with the «Rules for the installation of electrical installations (PUE). Seventh edition. Section 2. Transmission of electric power. Chapters 2.4, 2.5») : Order of the Ministry of Energy of Russia: approved by Order of the Ministry of Energy of Russia dated May 20, 2003 № 187 : entered into force on October 1, 2003. – Text : electronic // CODIFICATION.RF: [site]. – 2003. – URL: <https://rulings.ru/acts/Prikaz-Minenergo-Rossii-ot-20.05.2003-N-187/> (date of access: 18.11.2024). (in Russian)
 13. Lozowski, E. P.; Makkonen, L. Fifty years of progress in modelling the accumulation of atmospheric ice on power network equipment. – Text : direct. – In: *Atmospheric Icing of Structures : Processing XI International Workshop (IWAIS), June 2005, Montreal.* – Montreal : [s. n.], 2005. – P. 55–62.
 14. Makkonen, L.; Lozowski, E. P. Numerical Modelling of Icing on Power Network Equipment. – Text : direct. – In: *Atmospheric Icing of Power Networks.* – 2008. – Finland : Springer, 2008. – P. 83–118.
 15. Sakamoto, Y., Admirat, P., Lapeyre, J. L., Maccagnan, M. Thermodynamic simulation of wet snow accretion under wind-tunnel conditions. Text : direct. – In: *Atmospheric Icing of Structures : Processing IV International Workshop (IWAIS), Paris.* – Paris : [s. n.], 1988. – P. 80–185.
 16. Admirat, P. Wet Snow Accretion on Overhead Lines. – Text: direct. – In: *Atmospheric Icing of Power Networks.* – 2008. – Finland : Springer, 2008. – P. 119–169.

16. Admirat, P. Wet Snow Accretion on Overhead Lines / P. Admirat. – Текст : непосредственный // Atmospheric Icing of Power Networks. – 2008. – Finland : Springer, 2008. – P. 119–169.
17. Modeling of Ice Accretion on Transmission Line Conductor / K. Szilder, M. Farzaneh, Y. Chen, E. P. Lozowski. – Текст : непосредственный // Atmospheric Icing of Structures : Processing of the IX International Workshop (IWAIS), June, 2000, United Kingdom. – Chester, United Kingdom, 2000. – Session 7a.
18. Назим, Я. В. Лабораторные исследования гололедообразования на сталеалюминовых проводах воздушных линий электропередачи в климатической камере ДонНАСА / Я. В. Назим, А. А. Лещенко. – Текст : непосредственный // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2011. – Випуск 2 (30). – С. 122–128.
19. Испытания на гололедофобность компактных секторных проводов воздушных линий электропередачи в климатической камере / Е. В. Горохов, Я. В. Назим, В. Н. Васылев, В. В. Лях. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2012. – Том 18, № 1. – С. 73–84. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2012-1/07_gorohov_nazim_vasilev_lyah.pdf (дата обращения: 18.11.2024). – ISSN 1993-3517.
20. Назим, Я. В. Методика экспериментальных исследований образования гололедных отложений на проводах воздушных линий электропередачи в климатической камере / Я. В. Назим, А. А. Лещенко. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2011. – Том 17, № 4. – С. 271–284. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2011-4/06_nazim_leschenko.pdf (дата обращения: 18.11.2024). – ISSN 1993-3517.
21. Назим, Я. В. Моделирование обледенения проводов воздушных линий электропередачи / Я. В. Назим. – Текст : электронный // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : материалы VI Международного симпозиума, 15–20 августа 2016 г., Владивосток. – Владивосток : ФГАОУ ВО «ДФУ», 2016. – С. 141–142.
22. Назим, Я. В. Геометрическое моделирование гололедообразования на проводах воздушных линий электропередачи / Я. В. Назим. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2016. – Том 22, № 1. – С. 31–43. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2016-1/03_nazim.pdf (дата обращения: 18.11.2024). – ISSN 1993-3517.
23. Экспериментальное определение результирующих аэродинамических характеристик моделей зданий и сооружений / Е. В. Горохов, С. Ф. Пичугин, А. В. Махинько, Я. В. Назим. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2011. – Том 17, № 2. – С. 85–95. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2011-2/
17. Szilder, K.; Farzaneh, M.; Chen, Y.; Lozowski, E. P. Modeling of Ice Accretion on Transmission Line Conductor. – Text : direct. – In: *Atmospheric Icing of Structures* : Processing of the IX International Workshop (IWAIS), June, 2000, United Kingdom. – Chester, United Kingdom, 2000. – Session 7a.
18. Nazim, Ya. V.; Leshchenko, A. A. Laboratory studies of ice formation on steel-aluminum wires of overhead power transmission lines in the climatic chamber of DonNACEA. – Text : direct. – In: *Collection of scientific papers of Poltava National Technical University named after Yu. Kondratyuk*. Series : Industrial mechanical engineering, construction. – 2011. – Issue 2 (30). – P. 122–128. (In Ukraine)
19. Gorokhov, Ye. V.; Nazim, Ya. V.; Vasylev, V. N.; Lyakh, V. V. Testing of icing process on the compacted and sectored conductors of overhead lines in climatic chamber. – Text : electronic. – In: *Metal Constructions*. – 2012. – Volume 18, № 1. – P. 73–84. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2012-1/07_gorohov_nazim_vasilev_lyah.pdf (date of access: 18.11.2024). – ISSN 1993-3517. (in Russian)
20. Nazim, Ya. V.; Leshchenko, A. A. Method of experimental simulation of icing process on the conductor of overhead lines in climatic chamber. – Text : electronic. – In: *Metal Constructions*. – 2011. – Volume 17, № 4. – P. 271–284. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2011-4/06_nazim_leschenko.pdf (date of access: 18.11.2024). – ISSN 1993-3517. (in Russian)
21. Nazim, Ya. V. Modeling of icing of overhead power transmission line wires. – Text : electronic. – In: *Proceedings of the VI International Symposium*, 15–20 August, 2016, Vladivostok. – Vladivostok : FGAOU VO «FEFU», 2016. – P. 141–142. (in Russian)
22. Nazim, Ya. V. Geometrical Modeling of Icing Process on the Conductors of Overhead Power Transmission Lines. – Text : electronic. – In: *Metal Constructions*. – 2016. – Volume 22, № 1. – P. 31–43. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2016-1/03_nazim.pdf (date of access: 18.11.2024). – ISSN 1993-3517. (in Russian)
23. Gorokhov, Ye. V.; Pichugin, S. F.; Makhinko, A. V.; Nazim, Ya. V. Experimental determination of the combined aerodynamic characteristics of building and structure models. – Text : electronic. – In: *Metal Constructions*. – 2011. – Volume 17, № 2. – P. 85–95. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2011-2/02_gorohov_pichugin_mahinko_nazim.pdf (date of access: 18.11.2024). – ISSN 1993-3517. (in Russian)
24. Nazim, Ya. V. Aerodynamic tests of wire samples for overhead power lines. – Text : direct. – In: *Integration, partnership and innovation in construction science and education* : collection of works of the International scientific conference, 19–21 October, 2011, Moscow. – Moscow : MGSU, EBS ASV, 2011. – P. 195–199. (in Russian)

02_gorohov_pichugin_mahinko_nazim.pdf (дата обращения: 16.10.2024). – ISSN 1993-3517.

24. Назим, Я. В. Аэродинамические испытания образцов проводов для воздушных линий электропередачи / Я. В. Назим. – Текст : непосредственный // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сборник трудов Международной научной конференции, 19–21 октября 2011 г., Москва. – Москва : МГСУ, ЭБС АСВ, 2011. – С. 195–199.

Информация об авторах

Горохов Евгений Васильевич – доктор технических наук, профессор, президент Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Заведующий кафедрой металлических конструкций и сооружений. Иностраный член Российской Академии архитектуры и строительных наук, академик Академии Высшей школы и Академии строительства Украины, Член Международного комитета по изучению воздействия ветра на здания и сооружения. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, климатические нагрузки на строительные конструкции.

Назим Ярослав Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой специализированных информационных технологий и систем Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Член Международной ассоциации по большим системам энергетики (CIGRE). Научные интересы: надежность и долговечность электросетевых конструкций, ветровые и гололедные нагрузки на воздушные линии электропередачи.

Information about the authors

Gorokhov Yevgenii V. – D. Sc. (Eng.), Professor; President of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. The Head of the Metal Structures and Constructions Department. Foreign member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, academician of the Academy of Higher Education and the Academy of Civil Engineering of Ukraine, Member of the International Committee of study of wind effects on buildings and structures. Scientific interests: operational reliability of building metal structures, climatic loads on building structures.

Nazim Yaroslav V. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Head Department of specialized information systems and technologies, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Member of the International Council on Large Electric Systems (CIGRE). Scientific interests: reliability and longevity of power supply structures, wind and ice loads on overhead power transmission lines.

Статья поступила в редакцию 26.11.2024; одобрена после рецензирования 19.12.2024; принята к публикации 23.12.2024.

The article was submitted 26.11.2024; approved after reviewing 19.12.2024; accepted for publication 23.12.2024.