



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

2016, ТОМ 22, НОМЕР 1, 31–43

УДК 621.315

(16)-0341-1

## **ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОЖЕЛЕДОУТВОРЕННЯ НА ПРОВОДАХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ**

**Я. В. Назім**

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,*

*2, вул. Державіна, м. Макіївка, 86123.*

*E-mail: yaroslav.nazim@gmail.com*

*Отримана 21 грудня 2015; прийнята 22 січня 2016.*

**Анотація.** У статті розглянуто питання геометричного моделювання утворення ожеледі на проводах повітряних ліній електропередавання з метою визначення та прогнозування ожеледних навантажень на конструкції ПЛ. Завданням цих досліджень було отримання аналітичного опису і побудова теоретичної моделі поверхні обмерзання проводу ПЛ. Під теоретичною моделлю розуміється наближена, аналітично визначена поверхня, що відповідає вихідним даним для моделювання. Для досягнення поставленої мети було виконано математичне моделювання, в основу якого покладені експериментальні дослідження з фізичного моделювання ожеледі на проводах в лабораторних умовах. Як принциповий підхід до вирішення завдання запропоновано перехід від фізичних параметрів до геометричних.

**Ключові слова:** повітряні лінії електропередавання (ПЛ), провід, ожеледоутворення, геометричне моделювання.

## **ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ПРОВОДАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

**Я. В. Назим**

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,*

*2, ул. Державина, г. Макеевка, 86123.*

*E-mail: yaroslav.nazim@gmail.com*

*Получена 21 декабря 2015; принята 22 января 2016.*

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы геометрического моделирования гололедообразования на проводах воздушных линий электропередачи с целью определения и прогнозирования гололедных нагрузок на конструкции ВЛ. Задачей данных исследований являлось получение аналитического описания и построение теоретической модели поверхности обледенения провода ВЛ. Под теоретической моделью понимается приближённая, аналитически определённая поверхность, соответствующая исходным данным для моделирования. Для достижения поставленной цели было выполнено математическое моделирование, в основу которого положены экспериментальные исследования по физическому моделированию гололеда на проводах в лабораторных условиях. В качестве принципиального подхода к решению задачи предложено от физических параметров перейти к геометрическим.

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередачи (ВЛ), провод, гололедообразование, геометрическое моделирование.

## GEOMETRICAL MODELING OF ICING PROCESS ON THE CONDUCTORS OF OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES

Yaroslav Nazim

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,*

*2, Derzhavina Str., Makiyivka, 86123.*

*E-mail: yaroslav.nazim@gmail.com*

*Received 21 December 2015; accepted 22 January 2016.*

**Abstract.** Questions, touching geometrical modeling of simulation of icing process on the conductors for overhead power transmission lines, are considered in the article. The goal – definition and predictive modeling of ice load on OPTL constructions. The task of this research is to obtain the analytical description and the construction of a theoretical model of the surface icing of the conductor OPTL. Under the theoretical model is meant approximate, analytical determination of the surface, corresponding to the initial materials for modeling. For achieving this goal, it was done mathematical modeling, which is based on experimental studies on physical modeling of ice on conductors in the laboratory. As a principled approach it is suggested to transfer from physical parameters to geometrical for solving tasks.

**Keywords:** overhead power transmission lines (OPTL), icing, conductor, geometrical modeling.

### Введение

Несмотря на многолетние усилия электроэнергетиков, гололедные аварии в электрических сетях многих энергосистем по-прежнему относятся к наиболее тяжелым, периодически дезорганизующим электроснабжение регионов [1].

Физические условия образования гололедно-изморозевых отложений (ГИО) и классификация обледенения конструкций известны в достаточной мере. В наиболее полной мере разнообразие реальных форм ГИО на основе многолетних наблюдений, а также география гололеда и изморози на территории СНГ приведены в Атласе обледенений [2], а наиболее характерные формы ГИО на проводах воздушных линий электропередачи (ВЛ) представлены в [3].

Для конструкций ВЛ наибольшую опасность несут ГИО в виде стекловидного плотного гололеда, образующегося по всей длине проводов и тросов ВЛ в результате кристаллизации переохлажденной воды (мороси и дождя). Наличие гололеда на проводах и тросах ВЛ в сочетании с сильным ветром приводит к резкому увеличению статических и динамических нагрузок на опоры, что в свою очередь может вызывать обрывы проводов и тросов, разрушения узлов крепления, обрушения конструкций

траверс, тросостоек, ствола опоры, а в отдельных случаях и каскадные аварии на протяженных участках ВЛ [4, 5].

### Анализ состояния вопроса

Вопросам численного и экспериментального моделирования гололедообразования уделялось достаточное внимание как зарубежными, так и отечественными учеными.

За рубежом математическая формулировка задачи в последнее время получила большое развитие [6]. Например, в модели гололедообразования Л. Макконена [7] существенным преимуществом является учет влияния термодинамических процессов при обледенении провода ВЛ. Данная численная модель рекомендована для теоретических исследований международным стандартом ISO 12494: Atmospheric Icing of Structures.

В отечественной науке следует отметить существенные наработки ВНИИЭ по математическому моделированию для вычисления интенсивности гололедообразования на проводах ВЛ. Так, в модели Е. П. Никифорова [8] детально учтены аэродинамические факторы, обуславливающие движение капель воды в воздушном потоке при обтекании провода ВЛ. В Донбасской национальной академии строи-

тельства и архитектуры (ДонНАСА) Е. В. Горуховым и А. М. Алехиным выполнена математическая формулировка задачи об осаждении облачных капель на провода электросетевых систем [9], а в усовершенствованной А. А. Левченко и Я. В. Назимом модели Л. Макконена было впервые учтено влияние закручивания провода ВЛ на форму и диаметр гололедных отложений [10].

Экспериментальное моделирование механизма возникновения и прироста ГИО на образцах проводов выполнялось в аэродинамической трубе в лаборатории CRIEPI Ishiuchi, а также в CIGELE Atmospheric Research Icing Wind Tunnel (CAIRWT) [11, 12]. Однако в данных зарубежных опытах моделировался прирост мокрого снега и формирование снежных «рукавов» на поверхности проводов, что в большей степени характерно для климатических условий Канады либо Сибири. В климатических условиях большей территории Евразии, включая Западную, Центральную и Южную часть России, Украину, Беларусь, наибольшую опасность для электроэнергетики несет стекловидный гололед, образующийся на проводах.

Первые опыты лабораторной имитации гололеда в специальной установке описаны В. В. Бургдорфом [13]. Впоследствии Е. П. Никифоровым проводились экспериментальные исследования гололедообразования на специально оборудованном опытном пролете ВЛ [14]. В Украине подобных исследований не проводилось до тех пор, пока на базе климатической камеры лаборатории испытаний строительных конструкций и сооружений ДонНАСА не была создана экспериментальная установка, с помощью которой моделировался процесс гололедообразования на образцах проводов ВЛ [15]. Также известно, что получившие в последнее время распространение в зарубежной электроэнергетической практике провода новых типов, по данным производителей, имеют способность к противодействию гололедообразованию и снижению гололедно-ветровых нагрузок на ВЛ в целом. Зарубежные исследования [16, 17] показывают эффективность компактных проводов (AAAC – conductors in aluminium alloy) при использовании на ВЛ в районах с повышенными гололедными нагрузками по сравнению с традиционными сталеалюминиевыми провода-

ми (ACSR – bi-metallic conductors in aluminium and steel), более известными в СНГ под маркой АС. Для научного обоснования вышеуказанного в лаборатории ДонНАСА были проведены стендовые испытания образцов проводов разных марок с целью проверки возможности их противодействия гололедообразованию [18, 19].

Данные, полученные в результате экспериментов в климатической камере ДонНАСА, в дальнейшем были использованы в теоретических исследованиях по разработке геометрических моделей обледенения для разных типов проводов ВЛ.

### **Основные идеи и предпосылки исследований**

Объектом исследования являлась нагрузка от гололеда на провода ВЛ.

Предметом теоретических исследований являлось геометрическое моделирование гололедообразования на проводах воздушных линий электропередачи с целью определения и прогнозирования гололедных нагрузок на конструкции ВЛ.

Задачей данных исследований являлось получение аналитического описания и построение теоретической модели поверхности обледенения провода ВЛ. Под теоретической моделью понимается приближённая, аналитически определенная поверхность, соответствующая исходным данным для моделирования. При этом принимается, что обледенение распределено равномерно по всей длине провода.

В качестве принципиального подхода к решению задачи предложено от физических параметров перейти к геометрическим. Поставленная в работе задача геометрического моделирования гололедообразования решается на основе математического аппарата моделирования геометрических объектов, который позволяет получить аналитические зависимости, описывающие действительную поверхность, и построить изображения геометрических форм обледенения проводов. В качестве методов исследования используются методы аналитической и начертательной геометрии, компьютерные методы расчета и графического изображения геометрических форм с помощью

программного пакета Maple, программного пакета Компас 3D для визуализации аналитических результатов моделирования.

Для достижения поставленной цели было выполнено математическое моделирование, в основу которого положены экспериментальные исследования [18, 19] по физическому моделированию гололеда на проводах в лабораторных условиях (рис. 1), где в эксперименте был принят тип ГИО, приводящий к наиболее масштабным отказам в электроэнергетике, – гололед овалообразный, стекловидный, с плотностью  $0,7...0,9 \text{ г/см}^3$ . Установка для экспериментальных исследований запроектирована с учетом требований необходимости моделирования именно данного типа ГИО. Моделирование гололеда выполнялось после предварительного охлаждения климатической камеры, включения вентилятора и форсунок для создания водно-воздушного потока со скоростью  $10 \text{ м/с}$  в зоне среза нагнетательного канала и поддержания температурного режима в диапазоне  $-4...-2 \text{ }^\circ\text{C}$ , что соответствует природным условиям образования гололеда.

Теоретическое моделирование выполнялось на примере экспериментальных данных, полученных для образцов сталеалюминиевых проводов марки АС (АС 150/24, АС 185/24, АС 240/32, АС 300/39, АС 450/56) и компактных проводов марки Аеро-Z (Аеро-Z 177-1Z, Аеро-Z 242-2Z, Аеро-Z 301-2Z, Аеро-Z 366-2Z, Аеро-Z 504-2Z).

### Моделирование поверхности обледенения проводов

*Исходные данные для моделирования:*

Диаметр провода –  $d$ .

Длина провода –  $l$ .

Масса льда –  $m$ .

Плотность льда –  $\rho = 0,9 \text{ г/см}^3$ .

*Принципиальный подход к решению задачи*

Для поставленной задачи необходимо от физических параметров перейти к геометрическим.

Зная массу и плотность льда, определим его объём:

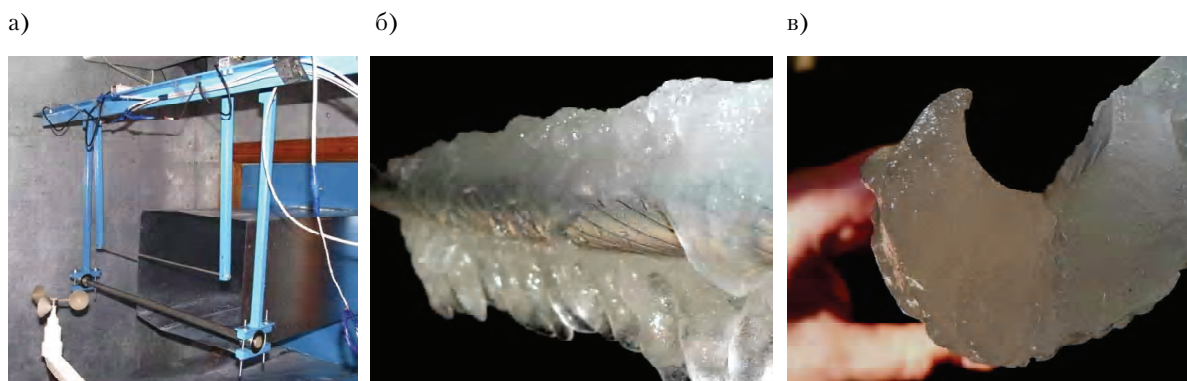
$$V = \frac{m}{\rho}. \quad (1)$$

Определим площадь поперечного сечения льда:

$$S = \frac{V}{l} = \frac{m}{l\rho}. \quad (2)$$

Таким образом, задача сводится к определению такой формы обледенения, которая соответствовала бы заданной площади сечения. Отсюда возможны несколько вариантов решения задачи.

В случае с овалообразным (эллипсовидным) обледенением возможны два варианта формирования льда вокруг провода ВЛ:



**Рисунок 1.** Моделирование обледенения проводов ВЛ в климатической камере ДонНАСА: а) общий вид активной зоны эксперимента внутри климатической камеры; б), в) образцы гололеда, образованного на проводах при экспериментальных исследованиях (б) общий вид; в) поперечное сечение).

1. Обледенение охватывает всю поверхность провода (Модель 1). Данный вариант более характерен для традиционных сталеалюминиевых проводов марки АС, способных поворачиваться вокруг своей оси под массой гололеда, за счет чего спиралевидные напылы льда охватывают поверхность провода.
2. Обледенение охватывает поверхность провода частично (Модель 2), что более характерно для проводов новых типов (компактных, секторных), обладающих гладкой поверхностью и большей жесткостью, препятствующей кручению провода в полете.

*Модель 1*

Рассмотрим первый из этих вариантов с геометрической точки зрения (рис. 2). Для данного случая площадь обледенения  $S$  представляется как разность площадей сечения эллипса и окружности.

$$S = \pi(ab - r^2). \tag{3}$$

Наша задача – определить значения большой и малой полуосей эллипса так, чтобы получилась конкретная площадь обледенения  $S$ ,

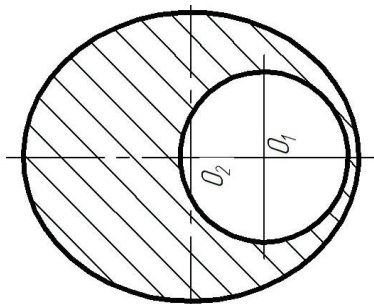


Рисунок 2. Модель обледенения № 1.

характерная для данного промежутка времени. Для этого введём дополнительный параметр взаимосвязи большой и малой осей эллипса:  $a = ub$ . Тогда, с учётом (3), получим:

$$S = \pi(ub^2 - r^2). \tag{4}$$

Отсюда определим величину малой полуоси эллипса:

$$|b| = \sqrt{\frac{S + \pi r^2}{\pi u}}. \tag{5}$$

С учётом (2), получим зависимость характерного размера обледенения от массы льда:

$$|b| = \sqrt{\frac{m + \pi r^2 l \rho}{\pi l \rho u}}. \tag{6}$$

Диаметр провода в зависимости от марки провода определим из таблицы 1.

Участок гололедаобразования в примере принят длиной  $l = 40$  см, поскольку геометрическое моделирование обледенения основывается на экспериментальных данных по обледенению образцов проводов в специализированной климатической камере.

Массу льда определим из уравнений аппроксимации, приведенных в таблице 1 и полученных в ходе измерений веса гололедных отложений тензометрическим методом при лабораторном эксперименте. С помощью табличного процессора MS Excel на примере проводов АС 150/24 и АС 240/32 рассчитаем характерные размеры обледенения в зависимости от времени протекания эксперимента, например через 1, 1,5 и 2 часа от начала гололедаобразования. Результаты представим в виде таблицы 2.

Таблица 1. Характеристики проводов марки АС

№	Эскиз провода	Марка провода	Расчетный диаметр провода, см	Уравнение аппроксимации
1		АС 150/24	1,71	$m = 0,059t - 57,659$
2		АС 185/24	1,89	$m = 0,072t - 72$
3		АС 240/32	2,16	$m = 0,085t - 94,444$
4		АС 300/39	2,40	$m = 0,088t - 95,097$
5		АС 450/56	2,88	$m = 0,068t - 32,111$

Таблица 2. Характерные размеры обледенения для проводов АС

Марка провода	Длина провода, см	Диаметр провода, см	Плотность льда, г/см <sup>3</sup>	Время, с	Масса льда, г	Характерный размер, мм
АС 150/24	40	1,71	0,9	3 600	154,7	12,7
				5 400	260,9	15,3
				7 200	367,1	17,5
АС 240/32	40	2,16	0,9	3 600	211,6	15,3
				5 400	364,6	18,4
				7 200	517,6	21,0

Далее воспользуемся программным пакетом Компас 3D для визуализации аналитических результатов моделирования.

Результаты визуализации геометрической модели процесса обледенения на примере проводов АС 150/24 и АС 240/32 представлены в таблице 3.

### Модель 2

Как уже указывалось, модель 2 более свойственна для проводов марки Аего-Z, геометрические характеристики и уравнения аппроксимации гололедообразования для которых представлены в таблице 4.

Для определения площади сечения льда необходимо увязать характерные размеры окружности и эллипса (рис. 3), которые соответствуют диаметру провода, а также малой и большой полуосям эллипса обледенения:

$$b = kr, \quad a = 1,15b.$$

Площадь сегмента окружности определим по формуле:

$$s_1 = \frac{\pi r^2}{2} - \left( x\sqrt{r^2 - x^2} + r^2 \arcsin \frac{x}{r} \right), \quad (7)$$

где  $x$  – расстояние от центра окружности до её хорды.

Далее определяем площадь окружности, ограниченную хордой:

$$s_2 = \frac{\pi r^2}{2} + \left( x\sqrt{r^2 - x^2} + r^2 \arcsin \frac{x}{r} \right). \quad (8)$$

Переходим к эллипсу. Расстояние от центра эллипса до его хорды определяется следующим соотношением:

$$y = \frac{abc \cos \varphi}{\sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}}, \quad (9)$$

$$\text{где } \varphi = \text{arcctg} \left[ \sqrt{\frac{a^2(b^2 - r^2 + x^2)}{b^2(r^2 - x^2)}} \right].$$

Определим площадь сегмента эллипса по формуле:

$$S_1 = \frac{\pi ab}{2} - \frac{b}{a} \left( y\sqrt{a^2 - y^2} + a^2 \arcsin \frac{y}{a} \right). \quad (10)$$

Далее определяем площадь сечения эллипса, ограниченную хордой:

$$S_2 = \frac{\pi ab}{2} + \frac{b}{a} \left( y\sqrt{a^2 - y^2} + a^2 \arcsin \frac{y}{a} \right). \quad (11)$$

Площадь обледенения определяется следующим тождеством:

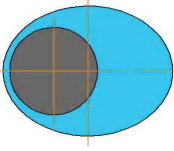
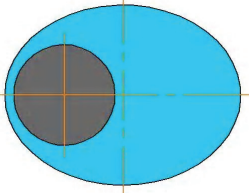
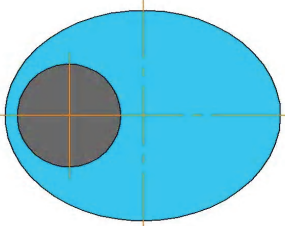
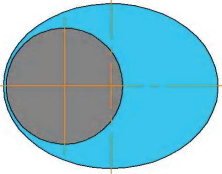
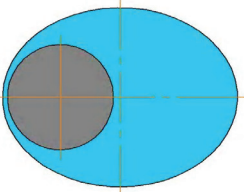
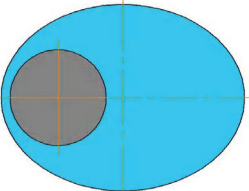
$$S = S_2 - s_2. \quad (12)$$

Подставив в выражения (12) значения параметров из (8) и (11), после некоторых преобразований получим:

$$S = \frac{\pi}{2} (ab - r^2) + \frac{b}{a} \left( y\sqrt{a^2 - y^2} + a^2 \arcsin \frac{y}{a} \right) - \left( x\sqrt{r^2 - x^2} + r^2 \arcsin \frac{x}{r} \right). \quad (13)$$

Решив полученное трансцендентное уравнение относительно параметра  $k$ , получим воз-

Таблица 3. Геометрические модели гололедообразования на проводах марки АС

Марка провода	Время $t$ , с	Параметр $u$	Характерный размер $b$ , мм	Масса льда $m$ , г	Визуализация геометрической модели процесса обледенения провода
АС 150/24	3 600	1,3	12,7	154,7	
	5 400	1,3	15,3	260,9	
	7 200	1,3	17,5	367,1	
АС 240/32	3 600	1,3	15,3	211,6	
	5 400	1,3	18,4	364,6	
	7 200	1,3	21,0	517,6	

возможность моделировать поверхность обледенения провода ВЛ. Воспользуемся программным пакетом Maple для компьютерного расчета и изображения геометрических форм. Результаты моделирования на примере проводов Aero-Z 177-1Z и Aero-Z 301-2Z, близких по диаметру к проводам АС 150/24 и АС 240/32, мо-

делированным ранее, представим в виде таблицы 5.

#### Анализ результатов

Сравним полученные модели обледенения с экстраполяцией воздействия атмосферных

Таблица 4. Характеристики проводов марки Aero-Z

№ п/п	Эскиз провода	Марка провода	Расчетный диаметр провода, см	Уравнение аппроксимации
1		Aero-Z 177-1Z	1,65	$m = 0,058t - 67,872$
2		Aero-Z 242-2Z	1,89	$m = 0,054t - 40,8$
3		Aero-Z 301-2Z	2,10	$m = 0,064t - 35,902$
4		Aero-Z 366-2Z	2,31	$m = 0,062t - 73,625$
5		Aero-Z 504-2Z	2,75	$m = 0,088t - 98,621$

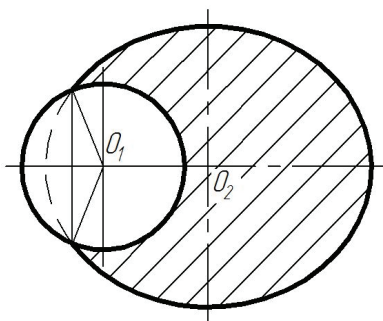


Рисунок 3. Модель обледенения № 2.

осадков до 3-х часов для аналогичных по диаметру проводов марок АС и Aero-Z всей исследованной группы (табл. 6).

Ввиду разных, хотя и близких, диаметров сравниваемых проводов марки АС и Aero-Z для более корректного сравнения результатов обледенения имеет смысл ввести понятие среднего диаметра провода, который вычисляется по формуле:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (14)$$

где  $d_1$  – диаметр провода марки АС;

$d_2$  – диаметр провода марки Aero-Z.

Для наглядности сравним полученные модели обледенения (через 3 часа) на примере 2-х пар проводов марки АС и Aero-Z (табл. 7). На схемах визуализации геометрической модели зеленым цветом (I) выделено обледенение про-

водов марки АС, синим (II) – проводов марки Aero-Z.

Сравнение процесса гололедообразования на проводах марок АС и Aero-Z показывает, что при всех равных условиях интенсивность образования ГИО на компактных проводах в целом ниже, что позволяет сделать вывод об их эффективности при использовании на ВЛ в районах с повышенными гололедными нагрузками по сравнению с традиционными сталеалюминиевыми проводами. При этом уровень их эффективности различен для разных диаметров проводов и длительности процесса гололедообразования и в основном проявляется для проводов средних диаметров.

### Заключение

Данные, полученные в результате экспериментов в климатической камере ДонНАСА, можно использовать в теоретических исследованиях по разработке геометрических моделей обледенения для разных типов проводов ВЛ. Построенные теоретические модели могут быть использованы для прогнозирования процесса гололедообразования во времени, в т. ч. в составе автоматизированных систем мониторинга метеопараметров при эксплуатации ВЛ, а также с целью рационального выбора типов проводов для применения в гололедоопасных районах при проектировании и реконструкции ВЛ.



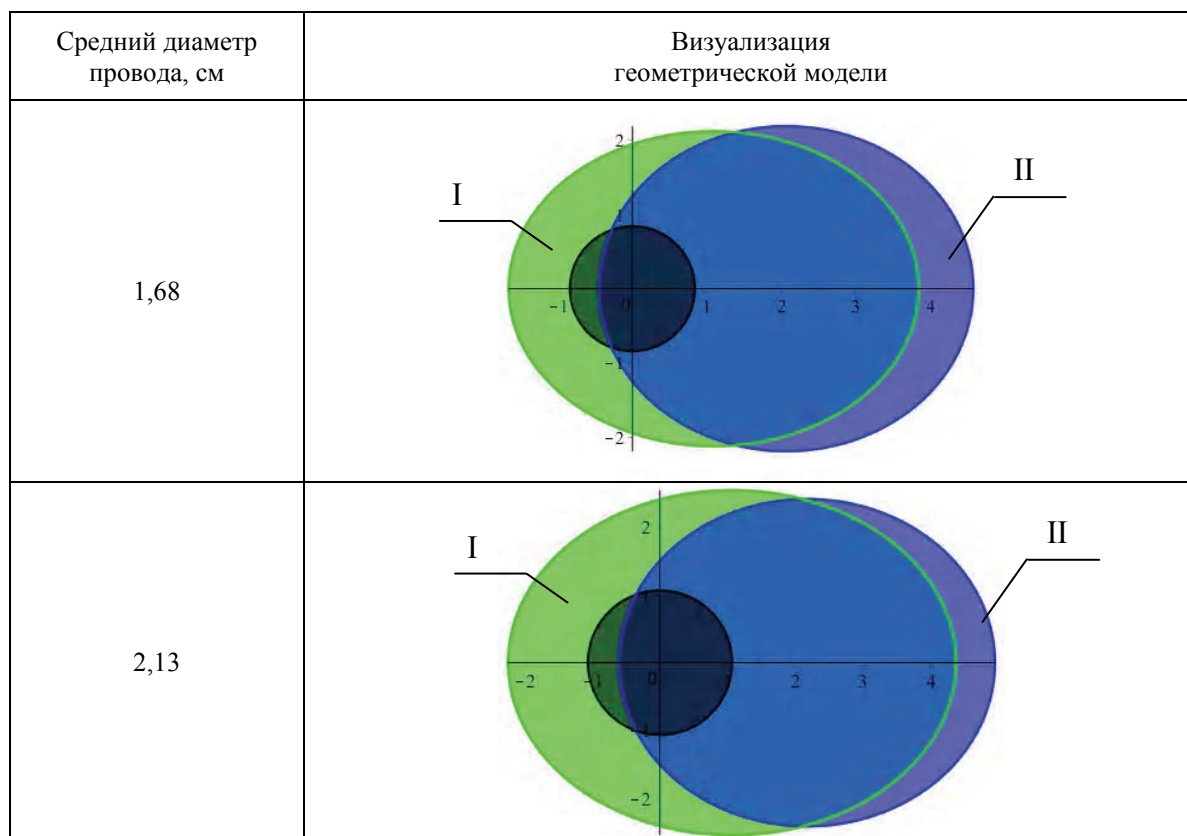
Таблица 5. Геометрические модели гололедообразования на проводах марки Aero-Z

Марка провода	Время $t$ , с	Масса льда $m$ , г	Визуализация геометрической модели процесса обледенения провода
Aero-Z 177-1Z	3 600	140,9	
	5 400	245,3	
	7 200	349,7	
Aero-Z 301-2Z	3 600	194,5	
	5 400	309,7	
	7 200	424,9	

Таблица 6. Сравнение обледенения проводов марки АС и Аеро-Z

АС		Аеро-z	
Диаметр провода	Визуализация геометрической модели	Диаметр провода	Визуализация геометрической модели
1,71		1,65	
1,89		1,89	
2,16		2,10	
2,40		2,31	
2,88		2,75	

Таблица 7. Сравнение обледенения проводов марки АС и Aero-Z



### Литература

1. Анализ причин и последствий аварий на участках ВЛ 330 кВ Джанкойских МЭС Крымской электроэнергетической системы НЭК «Укрэнерго» [Текст] / Е. В. Горохов, С. Н. Бакаев, Я. В. Назим [и др.] // Металеві конструкції. 2010. Том 16, № 2. С. 81–97.
2. Бучинский, В. Е. Атлас обледенения проводов [Текст] : Монография / В. Е. Бучинский. – Л. : Гидрометеиздат, 1966. – 116 с.
3. Аэродинамика электросетевых конструкций [Текст] : Монография / [Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. Н. Шаповалов, Назим Я. В.]; под ред. Е. В. Горохова, М. И. Казакевича. – Донецк : [б. и.], 2000. – 336 с.
4. Ветровые и гололедные воздействия на воздушные линии электропередачи [Текст] : Монография / [Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. В. Турбин, Я. В. Назим]; под ред. Е. В. Горохова. – Донецк : [б. и.], 2005. – 348 с.
5. Крижов, Г. Ожеледно-вітрові навантаження, галування проводів повітряних ліній електропередавання та боротьба з ними [Текст] : Довідково-методичний посібник / [Г. Крижов, Т. Удод, Г. Гримуд]. – К. : ДП НТУКЦ «АСЕлЕнерго», 2010. – 456 с.

### References

1. Gorokhov, Ye. V.; Bakaev, S. N.; Nazim, Ya. V. [et al.] Failure cause and consequence analysis at the OPTL 330 kV line sections of the Dzhan koy local electrical power station of the Crimean electrical power system of the NEC «Ukrenerg o». In: *Metal Constructions*, 2010, Vol. 16, No. 2, pp. 75–92. (in Russian)
2. Buchinskiy, V. E. Atlas of icing conductors. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1966. 116 p. (in Russian)
3. Gorokhov, Ye. V. (Ed.); Kazakevich, M. I. (Ed.); Shapovalov, S. N.; Nazim, Ya. V. Aerodynamics of the power supply structures. Monograph. Donetsk, 2000. 336 p. (in Russian)
4. Gorokhov, Ye. V.; Kazakevich, M. I.; Turbin, S. V.; Nazim, Ya. V.; Edited by Gorokhov, Ye. V. Wind and ice loading on overhead power transmission lines. Monograph. Donetsk, 2005. 348 p. (in Russian)
5. Kryzhov, G.; Udod, T.; Grimud, G. Wind and ice-forming load, cords galloping of overhead transmission lines and fighting with them. Reference and recourse book. Kyiv: DP NTUKC «AsElEnerg o», 2010. 456 p. (in Ukrainian)
6. Lozowski, E. P.; Makkonen L. Fifty years of progress in modelling the accumulation of atmospheric ice

6. Lozowski, E. P. Fifty years of progress in modelling the accumulation of atmospheric ice on power network equipment [Текст] / E. P. Lozowski, L. Makkonen // Proceedings of the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWAIS 2005, June 2005 / M. Farzaneh & A. P. Goel, Editors. – Montreal : [s. n.], 2005. – P. 55–62.
7. Modelling of Ice Accretion on Transmission Line Conductors [Текст] / Y. Chen, M. Farzaneh, E. P. Lozowski, K. Szilder // Proceedings of the 9th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), Session 7a. – Chester, United Kingdom : E A Technology, 2000. – P. 1–8.
8. Никифоров, Е. П. Влияние конструкции воздушных линий электропередачи на расчетные нагрузки от гололеда [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Е. П. Никифоров, Всесоюз. науч.-исслед. ин-т электроэнергетики (ВНИИЭ). – М., 1963. – 153 с.
9. Горохов, Е. В. Математическая формулировка задачи об осаждении облачных капель на провода электросетевых систем [Текст] / Е. В. Горохов, А. М. Алехин // Металеві конструкції. 2006. Том 11, № 3. С. 203–207.
10. Лещенко, А. А. Совершенствование методов определения гололедных нагрузок на провода воздушных линий электропередачи [Текст] / А. А. Лещенко, Я. В. Назим // Металеві конструкції. 2012. Том 18, № 4. С. 267–279.
11. Atmospheric Icing of Power Networks [Текст] / Masoud Farzaneh (ed.) – [S. l.] : Springer, 2008. – XVI, 381 p. – ISBN 978-1-4020-8530-7.
12. Thermodynamic simulation of wet snow accretion under wind-tunnel conditions [Текст] / Y. Sakamoto, P. Admirat, J. L. Lapeyre, M. Maccagnan // Proceedings of the 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), Session A5. – Paris, France : [s. n.], 1988. – P. A6.6.
13. Бургсдорф, В. В. Сооружение и эксплуатация линий электропередачи в сильно гололедных районах [Текст] : Монография / В. В. Бургсдорф. – М. : Госэнергоиздат, 1947. – 196 с.
14. Никифоров, Е. П. Экспериментальные исследования обледенения проводов [Текст] / Е. П. Никифоров. – М. : ВНИИЭ, 1961. – 233 с. – (Труды ВНИИЭ ; вып. 11).
15. Назим, Я. В. Методика экспериментальных исследований образования гололедных отложений на проводах ВЛ в климатической камере [Текст] / Я. В. Назим, А. А. Лещенко // Металеві конструкції. 2011. Том 17, № 4. С. 271–284.
16. Belgian experience on initiatives to improve the capability of existing overhead lines [Текст] / J. Lamsoul, J. Rogier, P. Couneson, A. Van Overmeere. – CIGRE 2000 session documentation. Report CIGRE 22-206. – Paris : CIGRE, 2000. – 6 p.
17. Increasing the ampacity of overhead lines using homogeneous compact conductors [Текст] / M. Gaudry, F. Chore, C. Hardy, E. Ghannoum. – on power network equipment. In: *Proceedings of the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWAIS 2005, June 2005* / M. Farzaneh & A. P. Goel, Editors. Montreal, 2005, pp. 55–62.
7. Chen, Y.; Farzaneh, M.; Lozowski, E. P.; and Szilder, K. Modeling of Ice Accretion on Transmission Line Conductors. In: *Proceedings of the 9th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), Session 7a*. Chester, United Kingdom: E A Technology, 2000, pp. 1–8
8. Nikiforov, E. P. Influence of construction of overhead power lines on the design loads of ice: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering. Moscow, 1963. 153 p. (in Russian)
9. Gorokhov, Ye. V.; Alyochin, A. M. Mathematical problem definition about besieging of cloudy drops on wires of electronetwork systems. In: *Metal Constructions*, 2006, Vol. 11, No. 3, pp. 203–207. (in Russian)
10. Leshchenko, O. O., Nazim, Ya. Improvement of methods for determining icing load on the conductors of overhead lines. In: *Metal Constructions*, 2011, Vol. 18, No. 4, pp. 267–279. (in Russian)
11. Farzaneh, M. (ed.) Atmospheric Icing of Power Networks. Springer, 2008. XVI, 381 p. ISBN 978-1-4020-8530-7.
12. Sakamoto, Y.; Admirat, P.; Lapeyre, J. L.; Maccagnan, M. Thermodynamic simulation of wet snow accretion under wind-tunnel conditions. In: *Proceedings of the 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), Session A5*. Paris, France, 1988, pp. A6.6.
13. Burgsdorf, V. V. Structure and operation of transmission lines in ice-forming districts. Monograph. Moscow: State power publishing house, 1947. 196 p. (in Russian)
14. Nikiforov, E. P. Experimental investigations icing on the conductors. Moscow: AUEPRI, 1961. 233 p. (Proceedings of the All-Union Electric Power Research Institute; Vol. 11). (in Russian)
15. Nazim, Ya. V.; Leshchenko, O. O. Method of experimental simulation of icing process on the conductor of overhead lines in climatic chamber. In: *Metal Constructions*, 2011, Vol. 17, No. 4, pp. 271–284. (in Russian)
16. Lamsoul, J.; Rogier, J.; Couneson, P.; Van Overmeere, A. Belgian experience on initiatives to improve the capability of existing overhead lines. CIGRE 2000 session documentation. Report CIGRE 22-206. Paris: CIGRE, 2000. 6 p.
17. Gaudry, M.; Chore, F.; Hardy, C.; Ghannoum, E. Increasing the ampacity of overhead lines using homogeneous compact conductors. CIGRE 1998 session documentation. Report CIGRE 22-201. Paris: CIGRE, 1998. 7 p.
18. Nazim, Ya. V.; Leshchenko, O. O. Experimental simulations of icing process on steel-aluminum conductors of overhead lines in the climatic chamber of

- CIGRE 1998 session documentation. Report CIGRE 22-201. – Paris : CIGRE, 1998. – 7 p.
18. Назим, Я. В. Лабораторные исследования гололедообразования на сталеалюминевых проводах воздушных линий электропередачи в климатической камере ДонНАСА [Текст] / Я. В. Назим, А. А. Лещенко // Збірник наукових праць, серія: Галузеве машинобудування, будівництво. Полтава: ПолтНТУ, 2011. Вип. 2 (30). С. 122–128.
19. Испытания на гололедофобность компактных и секторных проводов воздушных линий электропередачи в климатической камере [Текст] / Е. В. Горюхов, Я. В. Назим, В. Н. Василев, В. В. Лях // Металеві конструкції. 2012. Том 18, № 1. С. 73–84.
- the DonNACEA. In: *Edited volume, series: Machine building industry, civil engineering*, Poltava: PNTU, 2011, Issue 2(30), pp. 122–128. (in Russian)
19. Gorokhov, Ye. V.; Nazim, Ya. V.; Vasylev, V. M.; Lyah, V. M. Testing of icing process on the compacted and sectored conductors of overhead lines in climatic chamber. In: *Metal Constructions*, 2012, Vol. 18, No. 1, pp. 73–84. (in Russian)

**Назім Ярослав Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент, проректор з міжнародних зв'язків, завідувач кафедри спеціалізованих інформаційних технологій і систем Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член Міжнародної асоціації з великих систем енергетики (CIGRE). Наукові інтереси: експлуатаційна надійність та довговічність електромережних конструкцій, динамічні впливи на будівельні конструкції електромереж.

**Назім Ярослав Вікторович** – кандидат технических наук, доцент; проректор по международным связям, заведующий кафедрой специализированных информационных технологий и систем Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Член Международной ассоциации по большим системам энергетики (CIGRE). Научные интересы: эксплуатационная надежность и долговечность электросетевых конструкций, динамические нагрузки на строительные конструкции электросетей.

**Nazim Yaroslav** – PhD (Engineering), Associate Professor; a Vice-rector in the International Relations, a Head Department of specialized information systems and technologies at Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a Member of the International Council on Large Electric Systems (CIGRE). His research interests include operational characteristics, the longevity and the reliability of power supply structures, dynamic loads on structures of overhead lines.