



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

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

2012, ТОМ 18, НОМЕР 4, 267–279

УДК 621.315.1

(12)-0277-1

## **УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ОЖЕЛЕДНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРОВОДИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ**

**О. О. Лещенко, Я. В. Назім**

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,  
вул. Державіна, 2, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.  
E-mail: ksv@donnasa.edu.ua*

*Отримана 7 грудня 2012; прийнята 21 грудня 2012.*

**Анотація.** У статті розглянуті питання чисельних та експериментальних досліджень ожеледоутворення на проводах повітряних ліній електропередавання, взаємодії ожеледних відкладень з проводом, а також деякі аспекти впливу напрямку вітру на ожеледоутворення на проводі. Була створена комп'ютерна програма на базі моделі Макконена, що дозволяє виконувати теоретичне моделювання процесу ожеледоутворення з урахуванням крутильної жорсткості проводу, складено диференціальне рівняння кута закручування проводу під дією ексцентричного ожеледного навантаження. Для визначення спільного впливу швидкості і напрямку вітру на параметри ожеледних відкладень виконані дослідження за допомогою експериментальної установки на базі кліматичної камери лабораторії випробувань будівельних конструкцій і споруд ДонНАБА. Встановлено, що ожеледне навантаження призводить до інтенсивного закручування одиночного проводу ПЛ, напрямком вітру впливає на форму і структуру ожеледно-паморозевих відкладень.

**Ключові слова:** повітряні лінії електропередавання (ПЛ), провід, ожеледоутворення, жорсткість на кручення, чисельне моделювання, експериментальні дослідження.

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГОЛОЛЕДНЫХ НАГРУЗОК НА ПРОВОДА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

**А. А. Лещенко, Я. В. Назим**

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
ул. Державина, 2, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.  
E-mail: ksv@donnasa.edu.ua*

*Получена 7 грудня 2012; прийнята 21 грудня 2012.*

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы численных и экспериментальных исследований гололедообразования на проводах воздушных линий электропередачи, взаимодействия гололедного отложения с проводом, а также некоторые аспекты влияния направления ветра на гололедообразование на проводе. Была создана компьютерная программа на базе модели Макконена, позволяющая выполнять теоретическое моделирование процесса гололедообразования с учетом крутильной жесткости проводу, составлено дифференциальное уравнение угла закручивания проводу под действием эксцентричной гололедной нагрузки. Для определения совместного влияния скорости и направления ветра на параметры гололедного отложения выполнены исследования с помощью экспериментальной установки на базе климатической камеры лаборатории испытаний строительных конструкций и

сооружений ДонНАСА. Установлено, что гололедная нагрузка приводит к интенсивному закручиванию одиночного провода ВЛ, направление ветра влияет на форму и структуру гололедно-изморозевых отложений.

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередачи (ВЛ), провод, гололедообразование, жесткость на кручение, численное моделирование, экспериментальные исследования.

## IMPROVEMENT OF METHODS FOR DETERMINING ICING LOAD ON THE CONDUCTORS OF OVERHEAD LINES

**Olexandr Leshchenko, Yaroslav Nazim**

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,  
2, Derzhavina Str., Makiivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.  
E-mail: ksv@donnasa.edu.ua*

*Received 7 December 2012; accepted 21 December 2012.*

**Abstract.** The paper deals with numerical simulation and experimental investigations of icing on the conductors of overhead power transmission lines, interaction of glaze ice with conductor, as well as some aspects of the influence of wind direction on the icing on the conductor. There was a computer program based on the model Makkonen that lets you perform a theoretical simulation of the icing with stiffness in torsion of the conductor. Made up the differential equation of the angle of twist the conductors under the eccentric ice load. To determine the combined effect of wind speed and direction on the parameters icing deposits performed studies using the experimental setting on the base of climatic chamber of laboratory of tests of build constructions and buildings of the DonNACEA. Found that the ice load leads to an intense single twisting power lines, wind direction affects the shape and structure of glaze ice.

**Keywords:** overhead transmission lines (OHL), conductor, icing, stiffness in torsion, the numerical simulation, experimental investigations.

### Введение

Определяющую роль при проектировании и эксплуатации конструкций опор воздушных линий электропередачи играет задача обеспечения надежности и долговечности конструктивных элементов на протяжении всего периода эксплуатации [1–5]. В настоящее время в энергосистемах Украины эксплуатируется около 915 тысяч километров ВЛ. Основными особенностями строительных электросетевых конструкций являются: массовость, высокая степень ответственности каждого элемента и исключительная подверженность влиянию климатических нагрузок [6–7]. Вопросам совершенствования методов определения гололедных нагрузок ВЛ всегда уделялось достаточное внимание [8–10]. Крупные аварии в объединенной электроэнергетической системе Украины, охватывавшие в ноябре 2000 и декабре 2009

года целые регионы, показали значимость исследований проблем повышения эксплуатационной надежности электросетевых конструкций при гололедных и гололедно-ветровых нагрузках за счет изучения и уточнения их действия [11–12]. Поэтому в сложившихся условиях необходимо провести дополнительные исследования с численным и экспериментальным моделированием гололедных нагрузок и воздействий как основной причины аварийности электросетевых конструкций; разработать способы по повышению эксплуатационной надежности воздушных линий электропередачи за счет совершенствования методов определения нагрузок от гололедно-изморозевых отложений (ГИО). Указанные задачи актуальны, поскольку даже незначительное повышение надежности конструкций ВЛ обеспечит существенный экономический эффект.

### 1. Численная модель гололедообразования на проводе

Анализ различных методов теоретического моделирования гололедообразования на провода ВЛ [13–14] позволяет сделать следующие выводы: существующие в настоящее время теоретические модели образования гололеда не учитывают все факторы, которые влияют на массу, диаметр и форму гололедных отложений.

Для достижения поставленной цели были установлены значимые климатические факторы и определены механические характеристики проводов, влияющие на процесс гололедообразования на проводах ВЛ, а также усовершенствована математическая модель Макконена и Лозовски для определения параметров гололедообразования на провод, учитывающая конструктивные и климатические факторы.

Усовершенствование аналитической модели Макконена и Лозовски было выполнено за счет учета влияния закручивания провода на форму и диаметр гололедного отложения, необходимость выполнения которого доказано исследованиями Никифорова В. П. [15].

#### 1.1. Исходные данные и выходные параметры модели гололедообразования

Исходные данные модели: давление воздуха, скорость воздушного потока, температура воздуха, содержание жидкой воды в воздушном потоке, диаметр капель, диаметр провода и продолжительность гололедообразования.

В результате моделирования вычисляется интенсивность обледенения,  $I$ , которая определяется как уровень увеличения массы льда деленный на часть площади поверхности наветренного гололедного отложения. На круговом цилиндре интенсивность обледенения:

$$I = \frac{2}{\pi} E \cdot n \cdot V \cdot w, \quad (1)$$

где  $E$  – эффективность столкновения;

$n$  – эффективность кристаллизации;

$V$  – скорость ветра, м/с;

$w$  – содержание жидкой воды в воздухе, кг/м<sup>3</sup>.

Количества  $I$ ,  $E$  и  $n$  являются общими значениями для наветренной части поверхности предмета.

#### 1.2. Эффективность столкновения частиц переохлажденной воды с проводом

Эффективность столкновения представляет собой соотношение количества капель воды, которое под действием сил инерции сместится с линии тока и столкнется с проводом, к общему количеству капель воды, двигающихся в полосе, ширина которой равна диаметру провода. Расчет эффективности столкновения основан на численном решении для безразмерного уравнения перемещения капли в воздушном потоке.

Вектор скорости воздушного потока получен из уравнения для потенциального тока вокруг цилиндра и коэффициента лобового сопротивления. Решение уравнения перемещения капли может использоваться для вычисления траектории капель, по которым определяется полная эффективность столкновения.

#### 1.3. Эффективность кристаллизации

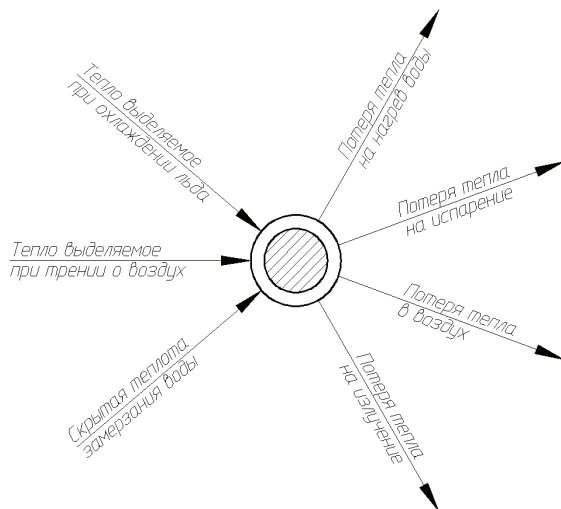
Эффективность кристаллизации характеризует соотношение количества капель воды, которые замерзли при столкновении, к общему числу капель, столкнувшихся с проводом.

В том случае, когда эффективность кристаллизации  $n < 1$ , некоторая часть воды стекает с образующегося гололедного отложения. Стекающая вода, предположительно, срывается в воздушный поток на кромках цилиндра. При  $n = 1$  замерзают все частицы воды, столкнувшиеся с проводом, хотя локальная эффективность кристаллизации может быть меньше единицы.

Эффективность кристаллизации может быть вычислена исходя из уравнения теплового баланса поверхности обледенения, которая в этом случае является фронтальной половиной цилиндрического гололедного отложения (рис. 1).

#### 1.4. Временная зависимость в модели гололедообразования

Временная зависимость – главный аспект модели, и является следствием наблюдений за изменениями диаметра обмерзающего провода во время процесса обледенения. Эффективность столкновения и эффективность кристаллизации зависят от времени, даже когда атмосферные



**Рисунок 1.** Схема теплового баланса процесса гололедообразования на проводе ВЛ.

условия сохраняются неизменными. Это обусловлено аэродинамическими явлениями при обтекании провода, диаметр которого увеличивается, и термодинамическими процессами при кристаллизации столкнувшихся с проводом частиц воды.

В процессе расчетов с использованием модели вычисление нагрузки от гололеда на единицу длины провода  $M_i$  за время  $\tau_i$  выполняется пошагово. Для каждого временного шага,  $i$ , определяется эффективность столкновения,  $E_p$ , и эффективность кристаллизации,  $n_p$ . Интенсивность обледенения,  $I_p$ , получается из уравнения (1) и нагрузки от гололеда,  $M_p$ , определяется следующим образом:

$$M_i = M_{i-1} + I_{i-1} \frac{\pi}{2} D_{i-1} \Delta \tau. \quad (2)$$

Если форма гололедного отложения принимается цилиндрической, то диаметр обледенения,  $D_p$ , соответствующий нагрузке от гололеда,  $M_p$ , вычисляется по формуле:

$$D_i = \sqrt{\frac{M_i - M_{i-1}}{\pi \rho_i} + D_{i-1}^2}. \quad (3)$$

### 1. 5. Плотность гололеда

Так как модель по своему характеру зависит от времени, необходимо учитывать плотность, чтобы увеличение диаметра объекта с нарастанием гололеда соотносилось с массой гололедного отложения. Плотность гололедного отло-

жения вычисляется на основании параметра Маклина.

### 1. 6. Реализация модели гололедообразования

Для выполнения вычислений параметров процесса гололедообразования с помощью высокопроизводительного оптимизирующего компилятора «Open Watcom C/C++» была создана компьютерная программа блок-схема, которая представлена на рис. 2.

По результатам численного моделирования установлено, что наибольшее влияние на гололедную нагрузку, помимо температуры воздуха, скорости и влажности гололедонесущего потока, оказывает диаметр капель. Это обусловлено как аэродинамическими явлениями при обтекании провода потоком, так и термодинамическими процессами при кристаллизации воды. При этом значения влажности и диаметра капель могут существенно изменяться в процессе обледенения, и измерение данных параметров представляет собой сложную техническую задачу.

Результаты расчетов массы гололедного отложения, выполненные с помощью приведенной модели, соответствуют данным экспериментальных исследований [16, 17] и натурных наблюдений.

## 2. Исследование закручивания провода в процессе обледенения

### 2. 1. Жесткость провода на кручение

Процесс образования ГИО на проводе является достаточно сложным и зависит от значительного числа факторов. Кроме климатических факторов, на процесс гололедообразования оказывает влияние взаимодействие провода с гололедным отложением. На начальном этапе гололедное отложение нарастает с наветренной стороны провода, что приводит к эксцентричной нагрузке и закручиванию провода вокруг продольной оси. Угол закручивания изменяется в зависимости от крутильной жесткости провода. Теоретическое вычисление данного параметра представляет собой весьма сложную задачу, что обусловлено особенностями взаимодействия между проволоками провода, которые к тому же выполнены из различных материа-

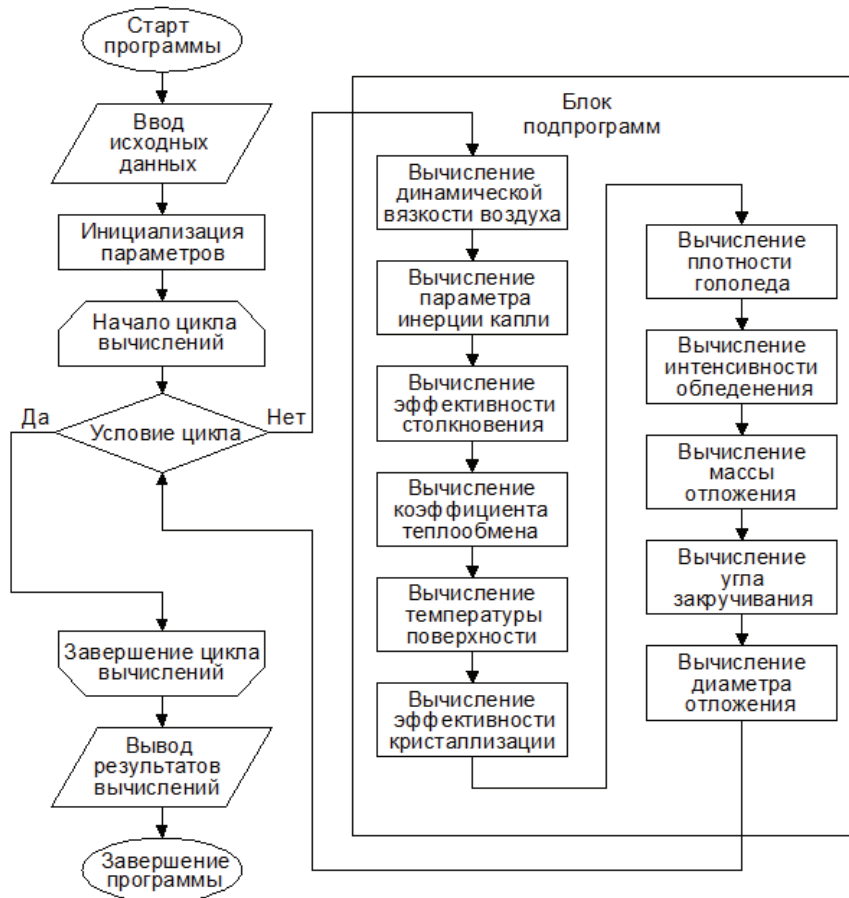


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма вычисления параметров гололедного отложения.

лов и имеют различные характеристики (модуль сдвига для стали  $G_{st} = 79,3 \cdot 10^6$  Па, для алюминия  $G_{al} = 25,5 \cdot 10^6$  Па).

Дж. Ванг и Дж.-Л. Лилен на основании экспериментальных данных установили [18], что крутильная жесткость одиночного провода ВЛ близка к постоянной в условиях натяжения провода от 10 до 35% от разрывного усилия, что соответствует условиям эксплуатации проводов. На истинную крутильную жесткость провода влияет наличие смазки и состояние поверхности проволок. При этом величина крутильной жесткости зависит от диаметра провода и достаточно точно определяется следующим эмпирическим выражением:

$$GI_p = 0,00028d^4. \quad (4)$$

Диаметры проводов ВЛ 35–110 кВ находятся в пределах 10...15 мм, соответственно их крутильная жесткость весьма низкая.

## 2.2. Определение угла закручивания провода в начальный момент времени

На жестко закрепленных проводах гололедное отложение имеет форму кольцевого сектора (рис. 4). На проводе реальной ВЛ такая форма отложения имеет место на начальной стадии процесса гололедообразования.

Площадь сечения гололедного отложения определяется как разность площадей двух кольцевых секторов:

$$A = \frac{\alpha\pi}{360^\circ} (R^2 - r^2), \quad (5)$$

где  $\alpha$  – половина угла кольцевого сектора, °;

$R$  – внешний радиус гололедного отложения, м;

$r$  – радиус провода, м.

Внешний радиус гололедного отложения:

$$R = \sqrt{\frac{A \cdot 360^\circ}{\alpha\pi} + r^2}. \quad (6)$$

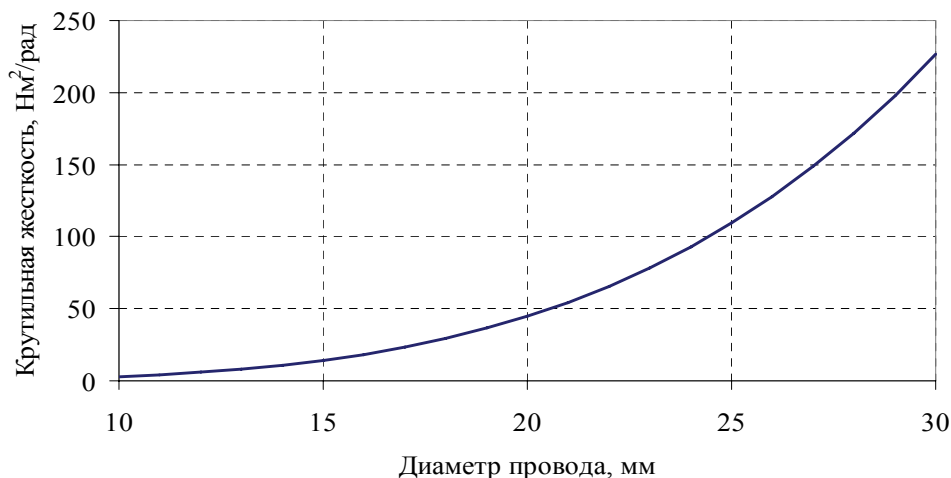


Рисунок 3. Жесткость на кручение одиночных проводов.

Таблица 1. Характеристики проводов ВЛ 35–110 кВ

Марка провода	Число и диаметр проволок, мм		Расчетное сечение, мм <sup>2</sup>			Расчетный диаметр провода, мм		Масса провода, кг/м	Крутильная жесткость провода, Нм <sup>2</sup> /рад
	алюм.	стальн.	алюм.	стальн.	всего провода	стального сердечника	провода		
АС 70/11	6×3,8	1×3,8	68	11,3	79,3	3,8	11,4	0,276	4,73
АС 95/16	6×4,5	1×4,5	95,4	15,9	111,3	4,5	13,5	0,385	9,3
АС 120/19	26×2,4	7×1,85	118	18,8	136,8	5,6	15,2	0,471	14,95

Расстояние от центра провода до центра тяжести кругового сектора определяется по формуле:

$$e = \frac{2}{3} \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \frac{\sin \alpha}{\alpha}. \quad (7)$$

Таким образом, по известной массе и плотности гололедного отложения, в начале обледенения, можно вычислить положение центра тяжести гололедного отложения.

При односторонней равномерно распределенной гололедной нагрузке (рис. 5) угол закручивания провода описывается нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} - \frac{m \cos \varphi}{GI_p} = 0, \quad (8)$$

где  $\varphi$  – угол закручивания провода, рад;

$m$  – распределенная моментная нагрузка, Нм/м;

$GI_p$  – крутильная жесткость провода, Нм<sup>2</sup>/рад.

Граничные условия выводятся из конструктивных особенностей крепления провода на концах пролета. На ВЛ 35–110 кВ для прикрепления провода к гирлянде изоляторов применяются глухие зажимы, препятствующие как линейному, так и угловому перемещению провода, соответственно:

$$\varphi(x=0)=0; \varphi(x=l)=0.$$

Таким образом, определение угла поворота провода под действием гололедной нагрузки представляет собой краевую задачу.

Полученное дифференциальное уравнение не имеет аналитического решения. Для расчетов угла закручивания необходимо применять численные методы.

Для интегрирования дифференциального уравнения угла закручивания провода применялась программа Maple. Примеры результатов вычислений угла закручивания провода ВЛ представлены на рис. 6.

В целом результаты расчетов изменение угла закручивания, выполненные с помощью приведенной модели, соответствуют данным натурных наблюдений [5, 6].

### 3. Исследование закручивания провода в процессе обледенения

В соответствии с исследованиями [19] на снижение массы гололедного отложения, обусловленное действием ветра на провод под углом менее  $90^\circ$ , оказывает влияние скорость воздушного потока рис. 7.

В стандартной методике обработки данных метеостанций [20] из характеристик воздушного потока учитывается только направление ветра, причем измеренное в начале гололедообразования. Пересчет веса гололеда для стержня, который ориентирован перпендикулярно к потоку, на основании данных измерений веса на стержне под углом к направлению ветра, производится с помощью дискретных коэффициентов. При этом не учитывается скорость ветра, а также изменчивость направления и скорости ветра с течением времени.

Для определения совместного влияния скорости и направления ветра на параметры гололедного отложения были выполнены исследования с помощью экспериментальной установки на базе климатической камеры лаборатории испытаний строительных конструкций и сооружений ДонНАСА [21]. Гололедные отложения моделировались на имитаторах провода (стержни датчика гололеда автоматизированного

метеопоста [22, 23]). Разработанные устройства измерения гололедных нагрузок внедрены в составе метеорологических постов НЭК «Укрэнерго» и апробированы в реальных условиях гололедообразования в течение 2009–2012 гг.

При проведении эксперимента создавались условия для образования гололедных отложений с плотностью  $0,75\text{--}0,90\text{ г/см}^3$ . Скорость воздушного потока составляла  $10\text{--}14\text{ м/с}$ , температура воздуха  $-4\text{...}-6\text{ }^\circ\text{C}$ . Стержни датчика гололеда ориентировались под различными углами к направлению воздушного потока (рис. 8а, 9а). Продолжительность процесса гололедообразования составляла 2 часа. За указанный промежуток времени на эталонном стержне масса гололедного отложения достигала  $214\text{...}216\text{ г}$ , что соответствует линейной нагрузке  $5,3\text{ Н/м}$ .

Так как имитаторы провода закреплены жестко, при направлении ветра перпендикулярно имитатору, образовывалось одностороннее гололедное отложение, имеющее выраженную форму кольцевого сектора (рис. 8б, 8в). При ориентации имитатора под углом отличным от  $90^\circ$  наблюдались некоторые нарушения формы поперечного сечения отложения, также изменялась структура гололедного осадка. При угле  $45^\circ$  наблюдалось образование отдельных гололедных наростов на имитаторе (рис. 10б, 10в, 10г), при этом они имели такую же плотность, как и гололедное отложение на эталонном стержне, ориентированном перпендикулярно к потоку, но за счет наличия промежутков средняя плотность отложения снижалась.

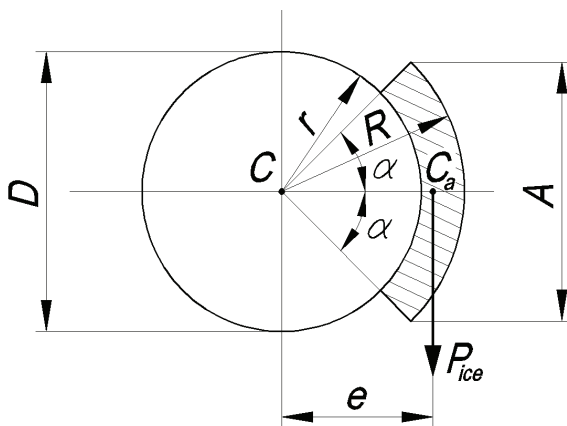


Рисунок 4. Схема гололедного отложения в начальный момент времени.

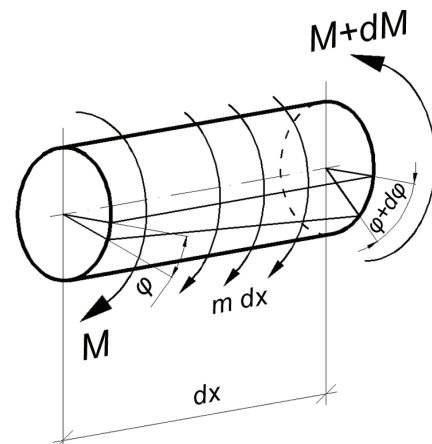
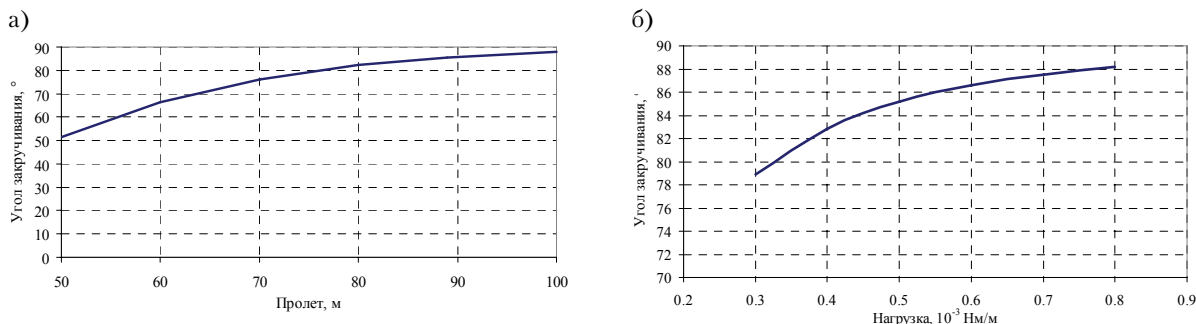
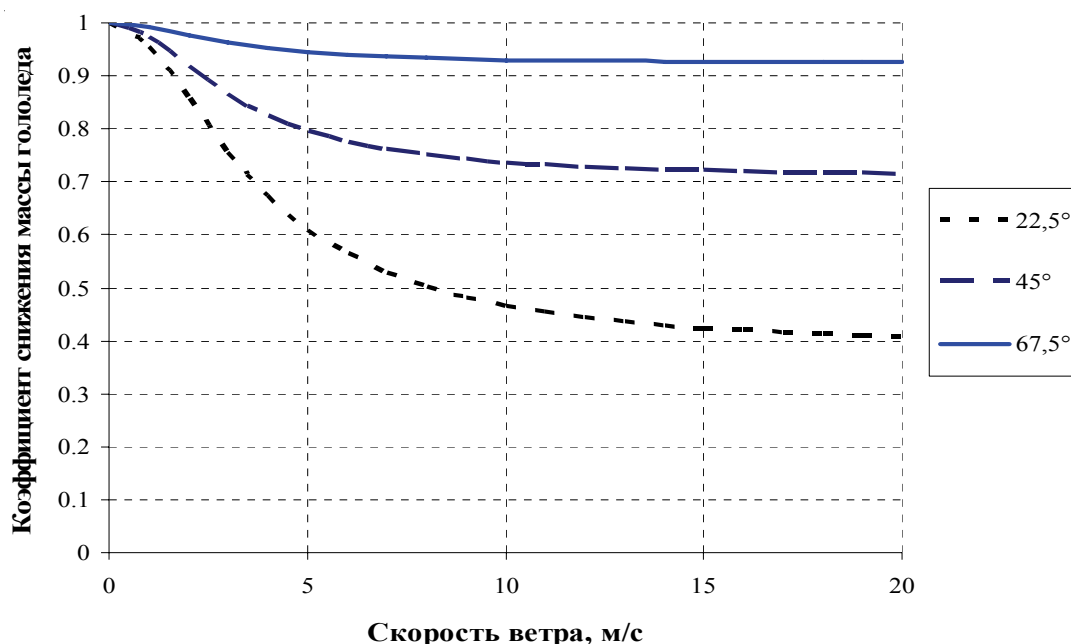


Рисунок 5. Равновесие провода под действием односторонней гололедной нагрузки.



**Рисунок 6.** Изменение угла закручивания провода АС 95/16: а) с увеличением длины пролета; б) при увеличении распределенной моментной нагрузки.



**Рисунок 7.** Коэффициент снижения гололедной нагрузки в зависимости от скорости ветра и угла между направлением ветра и провода ВЛ.

На основании результатов экспериментальных исследований (рис. 10) получены коэффициенты отношения массы гололеда для разных направлений ветра в зависимости от времени (табл. 3).

### Выводы

1. По результатам численного моделирования установлено, что наибольшее влияние на гололедную нагрузку, помимо температуры воздуха, скорости и влажности гололедоносущего потока, оказывает диаметр капель.
2. Одиночный провод ВЛ обладает чрезвычайно низкой жесткостью на кручение, что обусловлено значительной длиной провода

по отношению к его диаметру. Выполненные теоретические расчеты угла закручивания провода на начальном этапе процесса обледенения показывают, что при минимальной односторонней гололедной нагрузке происходит существенное закручивание провода вокруг своей оси. Резкое увеличение угла поворота происходит на участках, расположенных непосредственно у поддерживающих зажимов на расстоянии 1/10 длины пролета. В остальной части пролета значения угла поворота близки к 90°. В данной части пролета можно рассматривать провод ВЛ как свободновращающийся.

3. Учет влияния изменения направления ветра по отношению к проводу ВЛ позво-



лит прогнозировать уровень гололедной нагрузки для линий различной ориентации на основании автоматических изме-

рений параметров климата в конкретной географической точке, выполненных с помощью автоматизированных метеопостов.

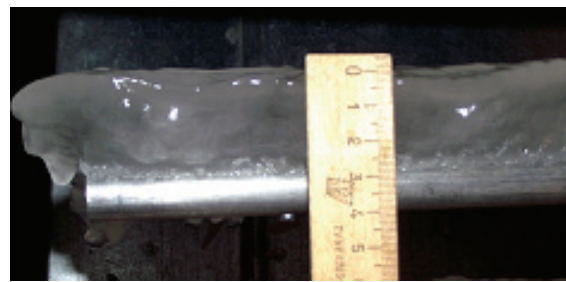
**Таблица 2.** Коэффициенты изменения гололедной нагрузки в зависимости от направления

№ румба	Направление ветра	Значение угла, град	Коэффициент
1	С	$348,75 \leq \beta \leq 11,25$	1
2	ССВ	$11,25 \leq \beta \leq 33,75$	1,33
3	СВ	$33,75 \leq \beta \leq 56,25$	1,82
4	СВВ	$56,25 \leq \beta \leq 78,75$	1,33
5	В	$78,75 \leq \beta \leq 101,25$	1
6	ЮВВ	$101,25 \leq \beta \leq 123,75$	1,33
7	ЮВ	$123,75 \leq \beta \leq 146,25$	1,82
8	ЮЮВ	$146,25 \leq \beta \leq 168,75$	1,33
9	Ю	$168,75 \leq \beta \leq 191,25$	1
10	ЮЮЗ	$191,25 \leq \beta \leq 213,75$	1,33
11	ЮЗ	$213,75 \leq \beta \leq 236,25$	1,82
12	ЮЗЗ	$236,25 \leq \beta \leq 258,75$	1,33
13	З	$258,75 \leq \beta \leq 281,25$	1
14	СЗЗ	$281,25 \leq \beta \leq 303,75$	1,33
15	СЗ	$303,75 \leq \beta \leq 326,25$	1,82
16	ССЗ	$326,25 \leq \beta \leq 348,75$	1,33

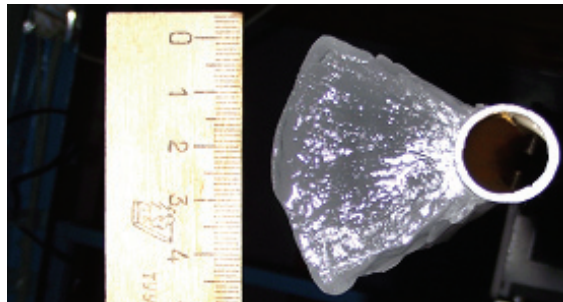
а)



б)



в)

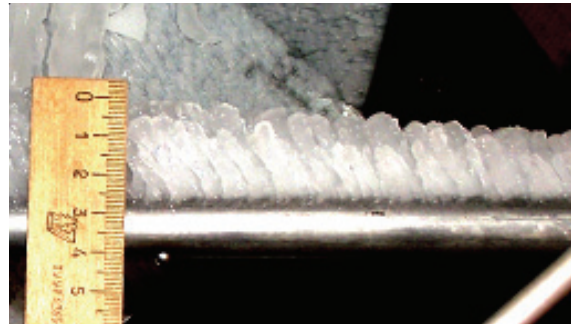


**Рисунок 8.** Испытания устройства измерения веса ГИО (стержень ориентирован под углом  $90^\circ$  к гололедоносному потоку): а – устройство измерения веса ГИО в климатической камере; б, в – форма и размеры гололедного отложения на стержне датчика.

а)



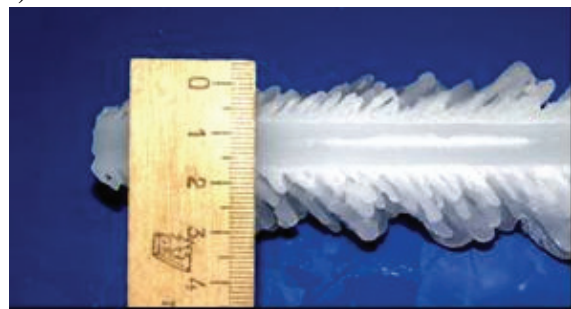
б)



в)

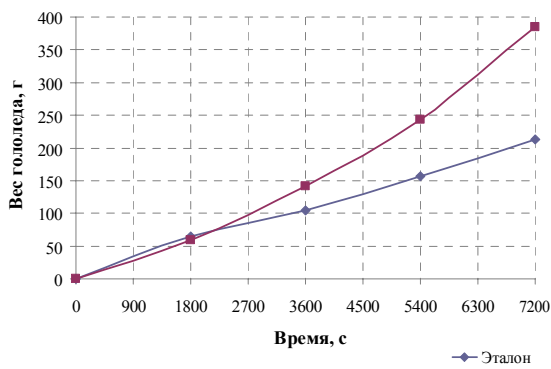


г)

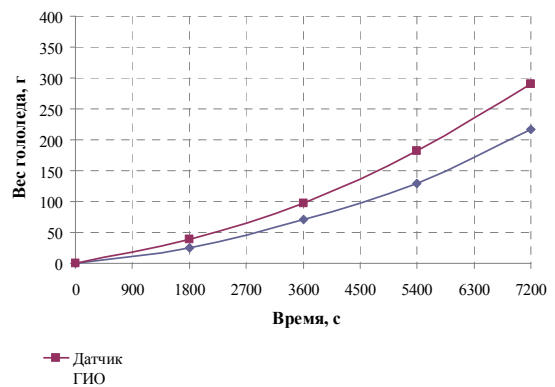


**Рисунок 9.** Испытания устройства измерения веса ГИО (стержень ориентирован под углом 45° к гололедонесущему потоку): а – устройство измерения веса ГИО в климатической камере; б – гололедное отложение на стержне датчика; в, г – структура гололедного отложения.

а)



б)



**Рисунок 10.** Изменение веса гололедного отложения: а – стержень датчика ориентирован под углом 90° к гололедонесущему потоку; б – стержень датчика ориентирован под углом 45° к гололедонесущему потоку.

**Таблица 3.** Значения коэффициента изменения гололедной нагрузки в зависимости от направления ветра

Время гололедообразования, ч	Соотношения между массой гололедных отложений (относительно значений для 90°)	
	45°	22,5°
0,5	1,51	1,20
1,0	1,45	1,18
1,5	1,34	1,14
2,0	1,33	1,14

4. Результаты работы необходимы также для разработки мероприятий с целью обеспече-

ния безаварийной работы ВЛ при гололедно-ветровых воздействиях.

## Литература

1. Барг, И. Г. Воздушные линии электропередачи: Вопросы эксплуатации и надежности [Текст] : Монография / [И. Г. Барг, В. И. Эдельман]. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
2. Повышение надежности и долговечности электросетевых конструкций [Текст] : Монография / [Е. В. Горохов, С. Н. Шаповалов, Е. И. Удод и др.] ; под редакцией Е. В. Горохова. – К. : Техніка, 1997. – 284 с.
3. Повышение надежности ВЛ распределительных сетей при гололедно-ветровых нагрузках [Текст] / А. С. Выскирка, М. К. Головатюк, С. Я. Княжевская, Н. А. Лебедева, В. Б. Нарожный, Е. Д. Голованова // Энергетическое строительство за рубежом. – 1988. – № 6. – С. 34–43.
4. Никифоров, Е. П. Надежность воздушных линий электропередачи при атмосферных нагрузках [Текст] / Е. П. Никифоров // Энергетическое строительство. – 1989. – № 9. – С. 36–39.
5. Бургсдорф, В. В. Сооружение и эксплуатация линий электропередачи в сильногололедных районах [Текст] : Монография / В. В. Бургсдорф. – М. : Государственное энергетическое издательство, 1947. – 196 с.
6. 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.
7. Крижов, Г. Ожеледно-вітрові навантаження, галопування 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.
8. Княжевская, С. Я. Методы определения расчетных климатических условий при проектировании воздушных линий электропередачи [Текст] / С. Я. Княжевская, В. Б. Нарожный // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1986. – № 6. – С. 54–56.
9. Нарожный, В. Б. Кліматичні навантаження на повітряні лінії електромереж [Текст] : Монография / [В. Б. Нарожный, С. Я. Княжевська, Л. В. Глей]. – К. : Енергопрогрес, 1994. – 212 с.
10. Назим, Я. В. Сравнительный анализ подходов к определению климатических нагрузок на воздушные линии электропередачи на примере Крымской ЭС [Текст] / Я. В. Назим, А. А. Лещенко, В. В. Костин // Металеві конструкції. – 2010. – Том 16, Номер 1. – С. 61–74.
11. Масові пошкодження в електричних мережах України, що сталися наприкінці листопада та початку грудня 2000 р. [Текст] : Висновки комісії

## References

1. Barg, I. G.; Edelman, V. I. Overhead transmission lines: items of operation and reliability. Monograph. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 248 p. (in Russian)
2. Gorokhov, Ye. V.; Shapovalov, S. N.; Udod, E. I. et al. Edited by Gorokhov, Ye. V. Growth of reliability and life of the power supply network construction. Monograph. Kyiv: Technics, 1997. 284 p. (in Russian)
3. Vyskirka, A. S.; Golovatiuk, M. K.; Kniazhevskaja, S. Ya.; Lebedeva, N. A.; Narozhnyi, V. B.; Golovanova, E. D. Growth of reliability of VL of distributing mains during gust-and-glaze loading. In: *Power engineering building abroad*, 1988, Number 6, p. 34–43. (in Russian)
4. Nikiforov, E. P. Reliability of overhead transmission lines during atmosphere load. In: *Power engineering building*, 1989, Number 9, p. 36–39. (in Russian)
5. Burgsdorf, V. V. Structure and operation of transmission lines in ice-forming districts. Monograph. Moscow: State power publishing house, 1947. 196 p. (in Russian)
6. Gorokhov, Ye. V.; Kazakevich, M. I.; Turbin, S. V.; Nazim, Ya. V. Edited by Gorokhov, Ye. V. Wind and ice-forming influence on overhead transmission lines. Monograph. Donetsk: [s. n.], 2005. 348 p. (in Russian)
7. 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 «AsElEnergо», 2010. 456 p. (in Ukrainian)
8. Kniazhevskaja, S. Ya.; Narozhnyi, V. B. Methods of determination of effective environmental withstand during design of overhead transmission lines. In: *Institutes news. Power engineer*, 1986, Number 6, p. 54–56. (in Russian)
9. Narozhnyi, V. B.; Kniazhevskaja, S. Ya.; Glei, L. V. Climate-relevant impact on overhead transmission lines. Monograph. Kyiv: Energoprogress, 1994. 212 p. (in Ukrainian)
10. Nazim, Ya. V.; Leshchenko, A. A.; Kostin, V. V. A comparative analysis of the approaches to the determination of climatic loads on the high-voltage lines illustrated by the Crimean power plant. In: *Metal Constructions*, 2010, Том 16, Number 1, p. 61–74. (in Russian)
11. Mass damage over power network of Ukraine, which happened at the end of November and at the beginning of December, 2000: Recommendations of the commission as to mechanical durability of damage over power network of Ukraine. Proposal according to the growth of the level of their reliability. Kyiv: Ministry of Energy, 2000. 9 p. (in Ukrainian)

- щодо механічної стійкості пошкоджених електричних мереж України. Пропозиції з підвищення рівня їх надійності. – К. : Міністерство палива та енергетики, 2000. – 9 с.
12. 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.
  13. Makkonen, L. Numerical Modelling of Icing on Power Network Equipment [Текст] / L. Makkonen, E. P. Lozowski // *Atmospheric Icing of Power Networks* / M. Farzaneh (ed.) – Berlin : Springer, 2008. – P. 83–118.
  14. Горохов, Е. В. Математическая формулировка задачи об осаждении облачных капель на проводах электросетевых систем [Текст] / Е. В. Горохов, А. М. Алексин // Металеві конструкції. – 2006. – Том 11, № 3. – С. 203–207.
  15. Никифоров, Е. П. Влияние закручивания провода в процессе гололедообразования на вес отложения гололеда [Текст] / Е. П. Никифоров // Труды ВНИИЭ. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – Вып. 15. – С. 220–227.
  16. Лещенко, А. А. Лабораторные исследования гололедообразования на проводах воздушных линий электропередачи с различными условиями крепления [Текст] / А. А. Лещенко, Я. В. Назим // Устойчивость, безопасность и энергоресурсосбережение в современных архитектурных, конструктивных, технологических решениях и инженерных системах зданий и сооружений : сб. трудов III Всероссийской научн. конф., 18.10.2012 / М-во образования и науки Рос. Федерации, ФГПОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». – М. : МГСУ, 2012. – С. 182–188.
  17. Modeling of Ice Accretion on Transmission Line Conductors [Текст] / Y. Chen, M. Farzaneh, E. P. Lozowski, K. Szilder // *Proc. of the IX International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), June 2000.* – Chester, United Kingdom : E A Technology, 2000. – Session 7a. – P. 1–8.
  18. Wang, J. A new theory for torsional stiffness of multi-span bundle overhead transmission lines [Текст] / J. Wang, J. L. Lilien // *IEEE Trans. On Power Delivery.* – 1998. – Vol. 13, No. 4. – P. 1405–1411.
  19. Chouinard, L. E. Analysis of wind direction on the accumulation of glaze ice and its effect on design criteria of transmissions [Текст] / L. E. Chouinard, N. Feknous, G. Sabourin // *Proc. of the X International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), June 17–20, 2002.* – Brno, Czech Republic : EGU Brno a.s., 2002. – P. 1–7.
  20. СОУ-НН 21.262:2008. Кліматичне забезпечення будівництва та експлуатації електричних мереж [Текст]. – К. : НТСЕУ, ОЕП «ГРІФРЕ», 2008. – 36 с.
  21. Назим, Я. В. Методика экспериментальных исследований образования гололедных отложений на
  22. Gorokhov, E. V.; Bakayev, S. N.; Nazim, Ya. V.; Morgay, V. V.; Popov, M. S. 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». In: *Metal Constructions*, 2010, Том 16, Number 2, p. 81–97. (in Russian)
  23. Makkonen, L.; Lozowski, E. P. Numerical Modelling of Icing on Power Network Equipment. In: *Atmospheric Icing of Power Networks* / M. Farzaneh (ed.) Berlin: Springer, 2008, p. 83–118.
  24. Gorokhov, Ye. V.; Alyochin, A. M. Mathematical problem definition about besieging of cloudy drops on wires of electornetwork systems. In: *Metal Constructions*, 2006, Том 11, Number 3, p. 203–207. (in Russian)
  25. Nikiforov, E. P. The influence of cord wrest in the process of ice-forming on the weight of sheet of clear ice. In: *WorksVNIIE*. Moscow: Gosenergoizdat, 1963, Issue 15, p. 220–227. (in Russian)
  26. Leshchenko, A. A.; Nazim, Ya. V. Laboratory research of ice-forming on cords of overhead transmission lines under different binding conditions. In: *Stability, safety and energy resource-saving in present-day, architectural, constructive, engineering solutions and services of building and structures: Edited Volume III, International scientific conference*. Moscow: MGSU, 2012, p. 182–188. (in Russian)
  27. Chen, Y.; Farzaneh, M.; Lozowski, E. P.; Szilder, K. Modeling of Ice Accretion on Transmission Line Conductors. In: *Proc. of the IX International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), June 2000*. Chester, United Kingdom: E A Technology, 2000. Session 7a, p. 1–8.
  28. Wang, J.; Lilien, J. L. A new theory for torsional stiffness of multi-span bundle overhead transmission lines. In: *IEEE Trans. On Power Delivery*, 1998, Vol. 13, Number 4, p. 1405–1411.
  29. Chouinard, L. E.; Feknous, N.; Sabourin, G. Analysis of wind direction on the accumulation of glaze ice and its effect on design criteria of transmissions. In: *Proc. of the X International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), June 17–20, 2002*. Brno, Czech Republic: EGU Brno a.s., 2002, p. 1–7.
  30. SOU-NN 21.262:2008. Climate supporting of building and operation of power network. Kyiv: NTSEU, OEP «GRIFRE», 2008. 36 p. (in Ukrainian)
  31. Nazim, Yaroslav; Leshchenko, Olexandr. Method of experimental simulation of icing process on the conductor of overhead lines in climatic chamber. In: *Metal Constructions*, 2011, Том 17, Number 4, p. 275–288. (in Russian)
  32. Nazim, Ya. V.; Leshchenko, A. A. Modernization of a weather post device to measure ice loading. In: *Metal Constructions*, 2008, Том 14, Number 3, p. 169–180. (in Russian)
  33. Leshchenko, A. A.; Nazim, Ya. V. Modernization of installations of measuring operation of ice load for meteoposts. In: *Materials of scientific and practice conference «Scientific and technical creation of young*

- проводах ВЛ в климатической камере [Текст] / Я. В. Назим, А. А. Лещенко // Металеві конструкції. – 2011. – Том 17, Номер 4. – С. 275–288.
22. Назим, Я. В. Модернизация устройства измерения гололедной нагрузки для метеопостов [Текст] / Я. В. Назим, А. А. Лещенко // Металеві конструкції. – 2008. – Том 14, Номер 3. – С. 169–180.
23. Лещенко, А. А. Модернизация устройств измерения гололедной нагрузки для метеопостов [Текст] / А. А. Лещенко, Я. В. Назим // Материалы научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях», 25–28.06.2008. / М-во образования и науки Рос. Федерации, ФГПОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». – Москва : МГСУ, 2008. – С. 48–49.
- people – the way to the knowledge based society», 25–28.06.2008. Moscow: MGSU, 2008, p. 48–49. (in Russian)*

**Лещенко Олександр Олександрович** – асистент кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: особливості ожеледних і ожеледно-вітрових впливів на повітряні лінії електропередавання.

**Назім Ярослав Вікторович** – к.т.н., проректор з міжнародних зв'язків, доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член Української асоціації з металевих конструкцій, Міжнародної асоціації з великих систем енергетики – CIGRE. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність та довговічність електромережних конструкцій, динамічні впливи на будівельні конструкції електромереж.

**Лещенко Александр Александрович** – ассистент кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: особенности гололедных и гололедно-ветровых воздействий на воздушные линии электропередачи.

**Назим Ярослав Викторович** – к.т.н., проректор по международным связям, доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Член Украинской ассоциации по металлическим конструкциям, Международной ассоциации по большим системам энергетики – CIGRE. Научные интересы: эксплуатационная надежность и долговечность электросетевых конструкций, динамические нагрузки на строительные конструкции электросетей.

**Leshchenko Olexandr** – assistant, Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: ice and ice-wind loadings and influences on the overhead power transmission lines.

**Yaroslav Nazim** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor; Vice-rector of the International Relations, Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Member of Ukrainian Association of Metal Construction, Member of the CIGRE. Research interests: operational characteristics, the longevity and the reliability of power supply structures, dynamic loads on structures of overhead lines.