



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ  
METAL CONSTRUCTIONS**

№2, ТОМ 13 (2007) 97-102

УДК 621.315.1

(07)-0135-1

## **КРАЄВІ УМОВИ ДЛЯ ПОСТАНОВКИ ВИПРОБУВАНЬ В УМОВАХ ШТУЧНОГО ОБМЕРЗАННЯ**

**Є.В. Горохов, В.М. Василев, В.І. Коваль, А.М. Альохін**

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,*

*вул. Державина 2, 86123, м. Макіївка, Україна.*

*E-mail: andrey-alyochin@rambler.ru*

*Отримана 5 квітня 2007; прийнята 20 квітня 2007*

**Анотація.** У статті проведений аналіз умов подібності для моделювання коефіцієнта захоплення. Визначені умови подібності при дослідженні осадження хмарних крапель з повітряного потоку на подібних тілах. Вироблений аналіз і сформульовані критерії подібності, які визначають умови існування і поведінки плівки рідкої води на межі поверхня-вода або лід-вода. Проаналізовані дані про швидкість, висоту і час дії обмерзання на натурний об'єкт, також метеорологічні умови, що впливають на конструкцію. Одержані: узагальнене рівняння для моделювання розподілу кінцевої товщини льоду в зоні захоплення; система рівнянь, в якій комбінації масштабних коефіцієнтів, визначені на основі умов подібності, задовольняють вимогам натурного об'єкту; масштабні коефіцієнти, залежні від швидкості вітру, розміру випробовуваної конструкції; кінематичної в'язкості повітря, характерного діаметру хмарного спектру, часу випробування в умовах штучного обмерзання, числа крапель в одиниці об'єму повітря, густини крапель; параметри для натурних і трубних випробувань; раціональна схема рішення системи рівнянь (1.3).

**Ключові слова:** подібність, обмерзання, електромеревеві системи, хмарні краплі, натурні випробування, трубні випробування, масштабні коефіцієнти, критерій інерції, число Струхалія, число Нуссельта, модель.

## **КРАЕВЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ПОСТАНОВКИ ИСПЫТАНИЙ В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННОГО ОБЛЕДЕНЕНИЯ**

**Е.В. Горохов, В.Н. Васылев, В.И. Коваль, А.М. Алёхин**

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,*

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

*E-mail: andrey-alyochin@rambler.ru*

*Получена 5 апреля 2007; принята 20 апреля 2007*

**Аннотация.** В статье проведен анализ условия подобия для моделирования коэффициента захвата. Определены условия подобия при исследовании осадения облачных капель из воздушного потока на подобных телах. Произведен анализ и сформулированы критерии подобия, которые определяют условия существования и поведения пленки жидкой воды на границе поверхность-вода или лед-вода. Проанализированы данные о скорости, высоте и времени действия обледенения на натурный объект, также метеорологические условия, влияющие на конструкцию. Получены: обобщенное уравнение для моделирования распределения конечных толщин льда в зоне захвата; система уравнений, в которой комбинации масштабных коэффициентов, определенные на основе условий подобия, удовлетворяют требованиям натурального объекта; масштабные коэффициенты, зависящие от скорости ветра, размера испытываемой конструкции; кинематической вязкости воздуха, характерного диаметра облачного

спектра, времени испытания в условиях искусственного обледенения, числа капель в единице объема воздуха, плотности капель; параметры для натуральных и трубных испытаний; рациональная схема решения системы уравнений (1.3).

**Ключевые слова:** подобие, обледенение, электросетевые системы, облачные капли, натурные испытания, трубные испытания, масштабные коэффициенты, критерий инерции, число Струхала, число Нуссельта, модель.

## BOUNDARY CONDITIONS FOR CARRYING OUT TESTS UNDER CONDITIONS OF ARTIFICIAL ICING

Ye. V. Horokhov, V. M. Vasylev, V. I. Koval', A. M. Alyokhin

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,*

*Derzavin str. 2, 86123, Makeyevka, Ukraine.*

*E-mail: andrey-alyochin@rambler.ru*

*Received 5 April 2007; accepted 20 April 2007*

**Abstract.** The paper analyzes the similarity conditions for pickup factor simulation. There have been determined the similarity conditions while studying the cloud drops deposition from an air flow on similar bodies. The analysis has been done and the similarity parameters determining the conditions of a liquid water film existence and behavior on the surface-water or ice-water boundaries have been formulated. There have been examined the data on speed, height, and time of icing effect on a full-scale design and meteorological conditions affecting the structure. There have been derived a generalized equation for simulating the final ice thickness distribution within the pickup area, the system of equations in which the scale factors combinations obtained with the use of similarity conditions meet the requirements of the full-scale design. There have been obtained the scale factors depending on the wind velocity, a structure size under testing, kinematical air viscosity, the cloud spectrum diameter, test time under artificial icing conditions, drops quantity per the air volume unit, drops density in a unit of air volume. There have been also obtained parameters for full-scale and pipe tests a rational scheme for solving the system of equations (1.3).

**Keywords:** similarity, icing, power system, cloud drops, large-scale tests, pipe tests, scale factors, inertia criterion, the Strouhal number, the Nusselt number, a model.

### Введение

Электросетевые конструкции составляют значительную часть основных производственных фондов предприятий электрических сетей Украины. В отличие от большинства инженерных сооружений, для которых определяющими являются нагрузки, связанные с деятельностью человека, поддающиеся сравнительно точному вычислению, то для электросетевых конструкций решающими являются нагрузки климатического характера: ветер, гололед и косвенно - температура, влияющая на величину тяжения по проводам и тросам, действующая в различных сочетаниях [1].

Воздействия климатических факторов в различных сочетаниях по-разному могут проявляться на отдельных участках линий.

Ввиду чрезвычайно большого количества таких возможных сочетаний нагрузок действующими в настоящее время «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ) [2] особое внимание необходимо уделять гололедным нагрузкам, действующим на конструкцию.

В Украине значительная часть (более 1/3) находящихся в эксплуатации конструкций электросетевого строительства исчерпала свой ресурс, или он близок к окончанию [3]. Поэтому в ближайшее время можно ожидать существенное увеличение количества аварий и отказов, вызванных потерей работоспособности электросетевых конструкций. В этой ситуации чрезвычайно актуален вопрос о повышении надежности и долговечности эксплуатируемых конструкций.

В работе [4] были определены условия искусственного обледенения, при которых необходимо распылить в воздушный поток климатической камеры, имеющий отрицательную температуру, водяные капли. При проведении испытаний на натуральных объектах дисперсность капель искусственного облака, их концентрация в единице объема воздушного потока и температура должны соответствовать естественным условиям.

При проведении испытаний на моделях искусственное облако капель должно быть перестроено по отношению к естественному, в соответствии с требованиями ранее приведенной методики моделирования обледенения [4].

Создана установка для создания искусственного облака капель, состоящая из распыливающего устройства (пневмоэжекторные форсунки) и систем, обеспечивающих работу этого устройства.

Данная работа направлена на то, чтобы предотвратить поток аварий и отказов, продлить сроки нормальной эксплуатации электросетевых конструкций, снизить экономический ущерб энергосистем и потребителей электроэнергии в результате действия климатических нагрузок.

**Краевые условия для постановки испытаний в условиях искусственного обледенения**

Прежде чем перейти к постановке испытаний в условиях искусственного обледенения был проведен анализ условия подобия для моделирования коэффициента захвата. Для решения поставленной задачи была решена система уравнений (1.1), которой определены условия подобия при исследовании процесса осаждения облачных капель [4] из воздушного потока на подобных телах:

$$\left. \begin{aligned} K_v \cdot K_b &= K_v \\ K_d^2 \cdot K_v &= K_b \cdot K_\mu \\ K_d \cdot K_v &= K_v \\ K_v \cdot K_\tau &= K_b \\ K_d^3 \cdot K_n \cdot K_{\rho b} &= 1 \end{aligned} \right\}, \quad (1.1)$$

где:

$K_v$  - масштабный коэффициент, зависящий от скорости ветра;

$K_b$  - масштабный коэффициент, зависящий от размера испытываемой конструкции;

$K_v$  - масштабный коэффициент, зависящий от кинематической вязкости воздуха;

$K_d$  - масштабный коэффициент, зависящий от характерного диаметра облачного спектра;

$K_\tau$  - масштабный коэффициент, зависящий от времени испытания в условиях искусственного обледенения;

$K_n$  - масштабный коэффициент, зависящий от числа капель в единице объема воздуха;

$K_{\rho b}$  - масштабный коэффициент, зависящий от плотности капель.

В процессе решения данной задачи рассмотрены основные факторы, которые определяют процесс захвата облачных капель на несущие конструкции электросетевых систем, основные тенденции моделирования процесса кристаллизации и полного коэффициента намерзания. Решение термодинамической части задачи нуждается в дальнейшем совершенствовании. Произведен анализ и сформулированы критерии подобия, которые определяют условия существования и поведения пленки жидкой воды на границе поверхность-вода или лед-вода. Получено обобщенное уравнение для моделирования распределения конечных толщин льда в зоне захвата:

$$H_{i(s)} = \Phi_1(K; S_h; N; N_{uo}), \quad (1.2)$$

где

$H_{i(s)}$  - распределение толщины льда в зоне захвата;

$K$  - критерий инерции:  $K = \frac{d_0^2 \cdot V_0 \cdot \rho_b}{18 \cdot b \cdot \mu}$ , [5,6,7];

$S_h$  - число Струхалья:  $S_h = \frac{V_0 \cdot \tau}{b}$ , [5,6,7];

$N$  - параметр, определяющий числовую плотность капель в единице объема воздуха:  $N = n \cdot d_0$ , [5,6,7];

$N_{uo}$  - число Нуссельта:  $N_{uo} = \frac{\alpha \cdot b}{\lambda}$ , [6,7];

$d_0$  - среднеэффективный диаметр капель облака, мкм;

$V_0$  - скорость потока в аэродинамической трубе, м/сек;

$\rho_b$  - плотность капли, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  - коэффициент динамической вязкости воздуха,  $(\text{кг} \cdot \text{сек})/\text{м}^2$ ;

$b$  - размер испытываемой конструкции, м;

$\tau$  - время испытания в условиях обледенения, мин.;

$\alpha$  - угол атаки, град.;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности

воздуха,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$ ;

$n$  - число капель в единице объёма;

$d_0$  - характерный диаметр облачного спектра, мкм.

На основе обобщенного уравнения (1.2) получена следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} K_d^2 \cdot K_V &= K_b \cdot K_\mu \\ K_V \cdot K_\tau &= K_b \\ K_d^3 \cdot K_n \cdot K_{\rho b} &= 1 \\ K_b^{0,2} \cdot K_V^{0,8} &= K_V^{0,8} \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

Получена система уравнений, в которой комбинации масштабных коэффициентов, определенные на основе условий подобия, удовлетворяют требованиям натурального объекта:

$$\begin{aligned} \frac{K_d^2 \cdot K_V}{K_b \cdot K_\mu} &= \frac{K_V \cdot K_\tau}{K_b} = K_d^3 \cdot K_n \cdot K_{\rho b} = \\ &= \frac{K_b^{0,2} \cdot K_V^{0,8}}{K_V^{0,8}} = 1 \end{aligned} \quad (1.4)$$

Система уравнений (1.4) даёт возможность определить конкретные условия для выбранного размера модели в трубных испытаниях.

Для решения системы уравнений (1.4) необходимо располагать данными о скорости, высоте и времени действия обледенения на натуральный объект  $(V_0; H; \tau)$ . Также были проанализированы метеорологические условия, влияющие на конструкцию:

- температура атмосферного воздуха,  $t_n$ ;
- размер капель,  $d_0$ ;
- водность естественного облака,  $W$ .

Данные метеорологические условия запишем в виде функции  $W = f(t_n)$ , при фиксированном значении среднеэффективного диаметра капель облака  $d_0 = 20 \text{ мкм}$ .

Указанные метеорологические условия должны быть приняты и для постановки трубных испытаний. Однако в природе могут встретиться и более суровые условия обледенения. Причем понятие «суровые условия» может быть связано как с метеорологическими параметрами облака капель, так и с конструктивными особенностями электросетевых систем. Для электросетевых систем со сложной конструктивной формой наиболее опасное влияние оказывает действие как мелких, так и крупных капель. Поэтому возникла необходимость проведения испытаний в более широком диапазоне метеорологических условий. В натуральных испытаниях это сделать сложно, а при трубных испытаниях такая постановка не вызывает принципиальных трудностей. Указанное обстоятельство является очень важным и во многих случаях результаты трубных испытаний могут стать единственно возможным источником информации по рассматриваемой проблеме.

Следует остановиться на особенностях, связанных с выбором размеров моделей для трубных испытаний.

Особенности испытаний в условиях обледенения вносят дополнительные ограничения в выборе размеров моделей. Эти особенности сводятся к следующему: во-первых, на малой модели измерения зон и толщин льдообразований будут проводиться с неизбежными ошибками. Во-вторых, чем меньше размер модели, тем меньше должен быть размер капель искусственного облака. При определении фракционного состава облачных спектров, основанном на заборе проб капель приборами, вносимыми в поток, также неизбежны ошибки в определении характерного размера искусственного облака. Указанные особенности приводят к тому, что результаты экспериментальных исследований, полученные на малых моделях могут быть сомнительными и малонадежными.

Эксперимент показал, что надежные результаты испытаний получаются при использовании моделей в масштабе не менее 1/10 от натурной величины.

В результате исследований получены параметры:

- для натуральных испытаний:

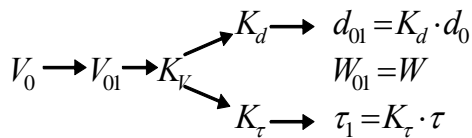
$$V_0; H; t_n; W; d_0; \tau; b; \rho; \rho_b \quad (1.5)$$

– для трубных испытаний:

$$V_o \cdot K_V; t_n; W \cdot K_W; d_o \cdot K_d; \tau \cdot K_\tau; b \cdot K_b; \rho; \rho_b \quad (1.6)$$

При проведении натуральных и трубных испытаний температура атмосферного воздуха и значение плотности льда  $\rho_s$  (так как при испытаниях в условиях искусственного обледенения применялась дистиллированная вода) были приняты одинаковыми. Из решения системы уравнений (1.2) найдены значения масштабных коэффициентов и определены параметры для трубных испытаний.

В результате проведенных исследований получена рациональная схема решения системы уравнений (1.3):



### Литература

1. Аеродинаміка електромережних конструкцій / Є.В. Горохов, М.І. Казакевич, С.М. Шаповалов, Я.В. Назім; За ред. Є.В. Горохова, М.І. Казакевича. – Донецьк, 2000. – 336с.

2. Правила улаштування електроустановок. Розділ 2. Передавання електроенергії. Глава 2.5 Повітряні лінії електропередавання напругою вище 1кВ до 750кВ./Об'єднання енергетичних підприємств "Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики" – К., 2006. – 192 с.

3. Ветровые и гололедные воздействия на воздушные линии электропередачи /Е.В. Горохов, М.И. Казакевич, С.В. Турбин, Я.В. Назим и др; под ред. Е.В. Горохова. – Донецк, 2005. – 348с.

4. Горохов Е.В., Алёхин А.М. Математическая формулировка задачи об осаждении облачных капель на провода электросетевых систем // Металеві конструкції. – Том 11, номер 3. – 2006. – С. 203-208.

5. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Изд-во "Наука", 1967.

6. Гухман А. А., Введение в теорию подобия, Изд. 2-е, доп. и перераб. Учеб пособие для вузов. – М.: "Высшая школа", 1973. – 296с. с илл.

7. С.Дж. Клайн, Подобие и приближённые методы /перевод с английского, под ред. И.Т. Аладьева, К.Д. Воскресенского. – М.: Изд-во "Мир", 1968.

8. Horokhov Ye.V., Turbin S.V., Grimud G.I. Principles of Overhead Line Reliability and Longevity Increasing under Ice and Wind Loads // 15 Internationale Baustofftagung. – Weimar. Bundesrepublik Deutschland. – 2003. – Band 1. – P. 1427-1439.

9. Horokhov Ye.V., Turbin S.V. Wind and Ice Loads on Structures. Recommendations for Ukrainian National Building Code // Proceedings of 10 International Workshop on Atmospheric Icing of the Structures. Czech Republic. Brno. 2002. – Session 8. №3.

**Горохов Євген Васильович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри металевих конструкцій, ректор Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Президент Української асоціації з металевих конструкцій, закордонний член Російської академії будівництва, академік Академії Вищої школи та Академії будівництва України, член Міжнародного комітету по вивченню впливу вітру на будівлі та споруди. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, кліматичні впливи на будівельні конструкції.

**Василев Володимир Миколайович** - к.т.н., доцент кафедри "Металеві конструкції", начальник Лабораторії випробувань будівельних конструкцій і споруд Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Лауреат Державної премії в галузі науки і техніки. Наукові інтереси: експериментально-теоретичне дослідження робіт опор ліній електропередачі; регулювання й облік внутрішнього напруженого стану гарячекатаного прокату в будівельних конструкціях.

**Коваль Віктор Іванович** є викладачем кафедри "Вища математика і економетрія" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: моделювання явищ, системний аналіз.

**Альохін Андрій Михайлович** є аспірантом кафедри "Металеві конструкції" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: ожеледні навантаження та впливи на будівельні конструкції; надійність повітряних ліній електропередачі.

**Горохов Евгений Васильевич** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлических конструкций, ректор Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Президент Украинской ассоциации по металлическим конструкциям, иностранный член Российской Академии строительства, 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 и воздействия на строительные конструкции.

**Васылев Владимир Николаевич** – к.т.н., доцент кафедры "Металлические конструкции", начальник Лаборатории испытаний строительных конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Лауреат Государственной премии в области науки и техники. Научные интересы: экспериментально-теоретическое исследование работ опор линий электропередач; регулирование и учет внутреннего напряженного состояния горячекатаного проката в строительных конструкциях.

**Коваль Виктор Иванович** является преподавателем кафедры "Высшая математика и эконометрия" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: моделирование явлений, системный анализ.

**Алёхин Андрей Михайлович** является аспирантом кафедры "Металлические конструкции" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: гололедные нагрузки на строительные конструкции, надежность воздушных линий электропередачи.

**Horokhov Yevgen Vasylovych** – Dc. Sc. (Eng), professor, Head of Metal Structures department, Rector of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, President of the Ukrainian Association of Metal Structures, a Foreign Member of the Russian Academy of Civil Engineering, an academician of the Higher School Academy and the Academy of Civil Engineering of Ukraine, a Member of the International Committee in Wind Engineering. His research interests include the operational reliability of the existing metal structures, influence of climatic conditions on building structures.

**Vasylev Volodymyr Mykolaiyvych** – Ph.D. (Eng), an associated professor of the Department "Metal Structures", chief of the Laboratory of engineering structures and buildings tests in the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a prize-winner of the State Prize in the field of science and technique. Scientific interests: experimental and theoretical investigation of the operational conditions of power transmission line towers; control and record of the internal stress state of the hot-rolled products in building structures.

**Koval Victor Ivanovych** is a lecturer of the Department "Higher mathematics and econometrics" of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: phenomena simulation, a system analysis.

**Alyokhin Andriy Mykhaylovych** is a post graduate student of the Metal Structures Department at the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. His scientific interests include icing loads effect on engineering structures; reliability of overhead power transmission lines.