

УДК 621.315.175: 624.144.24

Мезеря Андрій Юрійович канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики**Занихайло Євген Олександрович** асистент кафедри електроенергетики, OneginEA@mail.ru

Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків, Україна. Вул. Університетська 16, м. Харків, Україна, 61003

ЗАЛЕЖНІСТЬ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОЖЕЛЕДІ НА ПРОВОДАХ І ТРОСАХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ВІД ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ

У статті розглянуто залежність фізико-механічних властивостей ожеледі на проводах і тросах повітряних ліній електропередачі від впливу зовнішніх факторів. В статті була побудована структурно-функціональна схема, виявлено функціональну залежність та побудовано графіки залежностей фізико-механічних властивостей ожеледі на проводах і тросах повітряних ліній електропередачі від впливу зовнішніх факторів.

Ключеві слова: фізико-механічні властивості, ожеледь, провід, повітряні лінії електропередачі.

Мезеря Андрей Юрьевич канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики**Заныхайло Евгений Александрович** ассистент кафедры электроэнергетики, OneginEA@mail.ru

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков, Украина. Ул. Университетская 16, г. Харьков, Украина, 61003

ЗАВИСИМОСТЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОЛОЛЕДА НА ПРОВОДАХ И ТРОСАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

Рассмотрена зависимость физико-механических свойств гололеда на проводах и тросах воздушных линий электропередачи от воздействия внешних факторов. В статье была построена структурно-функциональная схема, выявлена функциональную зависимость и построены графики зависимостей физико-механических свойств гололеда на проводах и тросах воздушных линиях электропередачи от воздействия внешних факторов.

Ключевые слова: физико-механические свойства, гололед, провод, воздушные линии электропередачи.

Mezersa Andrii Jurevich, Ph.D., associate professor of department of electroenergy**Zanykhailo Yevgen Aleksandrovich**, assistant lecturer of department of electroenergy, OneginEA@mail.ru

Ukrainian engineer-pedagogical academy, Kharkov, Ukraine. Str. Universitetskaya 16, Kharkov, Ukraine, 61003

DEPENDENCE OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES GLAZE ON WIRES AND CABLES OVERHEAD POWER LINES FROM THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS

In the article the dependence of physical and mechanical properties of ice on wires and cables overhead power lines from external factors. The article was based structural diagram is found functional dependence and Schedules of dependence of physical and mechanical properties of ice on wires and cables overhead power lines from external factors.

Keywords: physical and mechanical properties, glaze, wires, overhead transmission lines.

Вступ

Лід належить до числа давно відомих матеріалів, але, тим не менш, властивості його вивчені далеко не достатньо. Це пояснюється великою різноманітністю структури, складів, фізико-механічних станів. Істотну роль у поведінці льоду грають і тимчасові процеси [1].

У звичайних умовах лід існує при температурах, дуже близьких до точки фазового переходу. Це значною мірою визначає його фізико-механічні властивості і поведінку під навантаженням. У різних умовах лід проявляє пружність, нелінійну в'язкість, крихке руйнування, руйнування при повзучості і т. д. Пов'язано це з тим, що процеси деформування льоду часто супроводжуються фазовими переходами [1].

Відомо, що навіть найбільш чисті форми прісноводного льоду містять домішки у вигляді твердих частинок, розчинних речовин і газів. Ці домішки в значній мірі впливають на процес утворення зародків і рух дислокацій, визначаючи міцність оболонки ожеледі.

Кристалічна будова льоду залежить від багатьох причин, в тому числі від історії льодоутворення.

При оцінці механічних властивостей структура матеріалу не так важлива, важливіше деякі макроскопічні властивості - міцність, в'язкість, модуль пружності і т. д. [1].

Виходячи з вище викладеного дослідження залежності фізико-механічних властивостей оболонки ожеледі на проводах і тросах повітряних ліній електропередачі від впливу зовнішніх та внутрішніх факторів є актуальним та потребує детального аналізу.

Основний матеріал

Для оцінки фізико-механічних властивостей відкладень ожеледі на проводах і тросах повітряних лініях електропередачі (ПЛЕП) ми використаємо наступні параметри: щільність ожеледі, модуль пружності ожеледі, границя міцності ожеледі, питома маса відкладень ожеледі, товщина відкладень ожеледі. Структурно-функціональна залежність фізико-механічних властивостей відкладень ожеледі на проводах і тросах ПЛЕП від впливу зовнішніх факторів показана на рис.1.

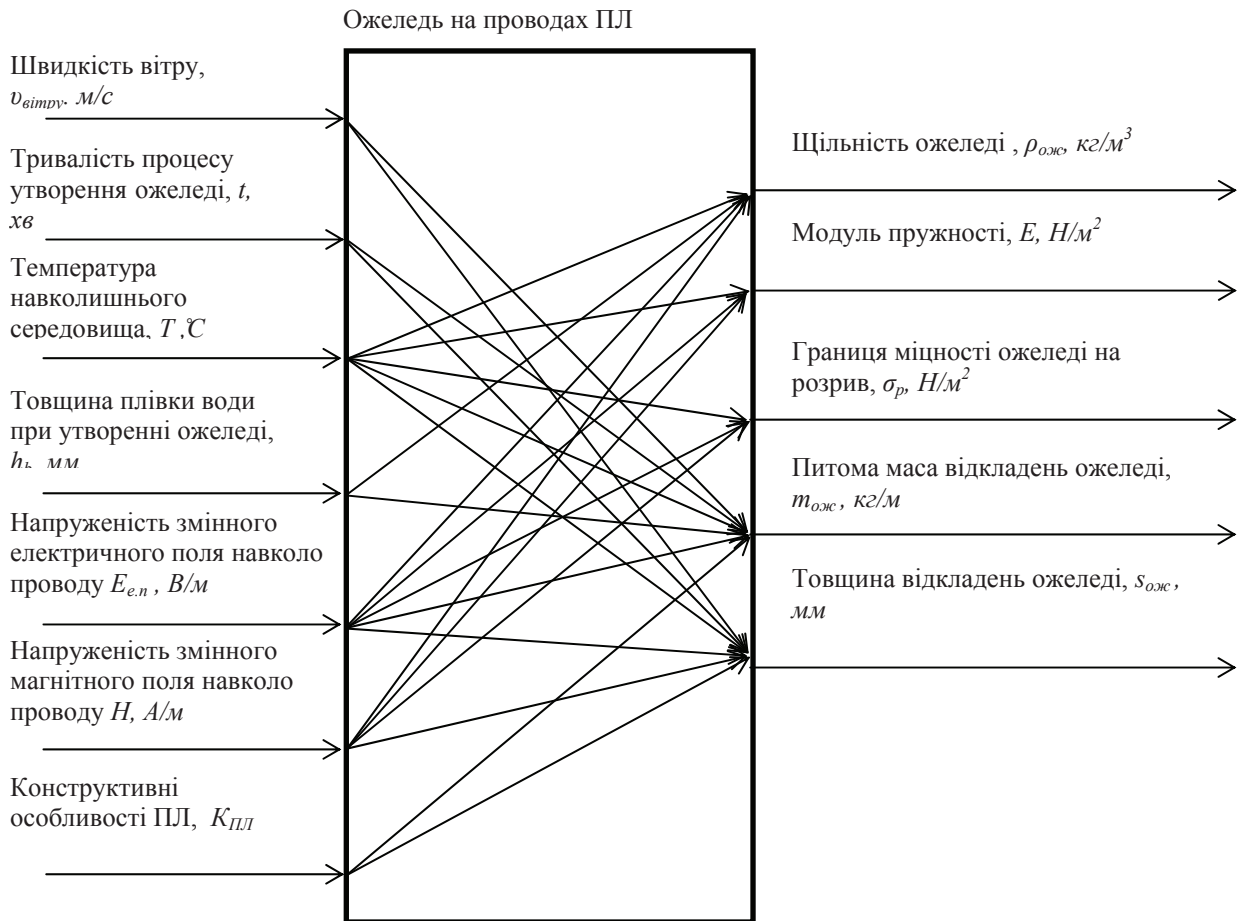


Рис.1. Модель впливу зовнішніх факторів на фізико-механічні властивості ожеледі, яка утворюється на проводах і тросах ПЛЕП

Функціональну залежність фізико-механічних властивостей відкладень ожеледі від впливу зовнішніх факторів представимо наступним чином:

$$\begin{aligned} \rho_{ож} &= f(T, h_b, E_{e.n}, H), \\ E &= f(T, E_{e.n}, H), \\ \sigma_p &= f(T, E_{e.n}, H), \\ m_{ож} &= f(v_{випр}, t, T, h_b, E_{e.n}, H, K_{ПЛ}), \\ s_{ож} &= f(v_{випр}, t, T, h_b, E_{e.n}, H, K_{ПЛ}), \end{aligned}$$

де: $\rho_{ож}$ – щільність ожеледі, яка утворилась на проводі ПЛ, $кг/м^3$;
 E – модуль пружності ожеледі, яка утворилась на проводі ПЛ, $Н/м^2$;
 σ_p – границя міцності ожеледі, яка утворилась на проводі ПЛ, на розрив, $Н/м^2$;
 $m_{ож}$ – питома маса відкладень ожеледі на проводах ПЛ, $кг/м$

- $s_{ож}$ – товщина відкладень ожеледі на проводах ПЛ, мм ;
- $v_{вітру}$ – швидкість вітру, який діє при утворенні ожеледі, м/с ;
- t – тривалість процесу утворення ожеледі, с;
- T – температура навколишнього середовища при утворенні ожеледі, °C;
- h_b – товщина плівки води при утворенні ожеледі, мм ;
- $E_{e,n}$ – напруженість змінного електричного поля навколо проводу, В/м;
- H – напруженість змінного магнітного поля навколо проводу, А/м;
- $K_{ПЛ}$ – конструктивні особливості ПЛ.

Оцінка міцності оболонки ожеледі в значній мірі залежить від об'єктивної оцінки його фізико-механічних властивостей.

Проведені дослідження дозволяють вибрати чисельні значення параметрів, що характеризують властивості міцності льоду: модуль пружності (модуль Юнга), границя міцності при стисканні, розтягуванні та згинанні, коефіцієнт Пуассона і щільність льоду.

Щільність льоду в значній мірі визначається структурою льоду та дією на нього зовнішніх факторів. За даними досліджень [1, 2, 3] щільність прісноводного льоду коливається в межах $\rho_{ож} = 700-930 \text{ кг/м}^3$.

З феноменологічної теорії утворення шаруватої структури льоду, розвиненою в [4], випливає, що шарувата структура льоду визначається параметром h_b – рівноважної товщини плівки. Вимірювання щільності крижаних нашарувань ρ_i на перешкодах, які обтікає потік водного аерозолі, при різних значеннях h_b добре апроксимується формулою:

$$\rho_i = \rho_0 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{0,32}{h_b}\right) \right)$$

де ρ_0 – щільність прозорої однорідної ожеледі, $\rho_0 = 930 \text{ кг/м}^3$.

При малих h_b утворюється прозора однорідна структура льоду, при великих h_b – матова неоднорідна структура льоду.

При температурах від -3 °C і нижче, і при короткочасних діях лід поводить себе як цілком пружне тіло, що підкоряється закону Гука. Пластична деформація при цьому не встигає розвинути.

При визначенні границі міцності льоду використовують статичний і динамічний способи. Статичний спосіб дозволяє отримати при статичному навантаженні зразків так званий модуль деформації, який завжди менше динамічного. Границя міцності сильно залежить від режиму навантаження. При динамічному навантаженні пружні властивості льоду зменшуються, тобто модуль пружності зростає [2, 3, 5].

Значення границі міцності льоду на стискання та розтягнення в залежності від абсолютної температури повітря за [2, 3, 5] наведено в табл. 1 і табл. 2 та на рис. 2 і рис. 3.

Міцність на згинання істотно залежить від швидкості деформації. Міцність льоду при розтягненні і стисканні різна, тому при згинанні характер розподілу напружень по товщині пластини часто стає нелінійним [2, 3, 5].

Таблиця 1

Значення пружності льоду на стискання в залежності від абсолютної температури повітря

$T, ^\circ\text{C}$	0 ÷ -5	-5 ÷ -10	10 ÷ -15	-15 ÷ -20
$\sigma_{ст}, \text{МПа}$	1,6 ÷ 3,0	3,0 ÷ 3,6	3,6 ÷ 3,9	3,9 ÷ 4,0

Таблиця 2

Значення пружності льоду на розтягнення в залежності від абсолютної температури повітря

$T, ^\circ\text{C}$	0 ÷ -10	-10 ÷ -20	-20 ÷ -35
$\sigma_p, \text{МПа}$	0,9 ÷ 1,2	1,2 ÷ 1,5	1,5 ÷ 1,8

У роботі [2] відзначається залежність E від температури навколишнього повітря:

$$E(T) = (90,5 - 0,21T - 0,0017T^2) * 10^3 \text{ МПа}$$

Також за даними [1–3,5] визначено залежність динамічного модуля пружності від щільності льоду (табл. 3).

Таблиця 3

Значення динамічного модуля пружності від щільності льоду

$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$	0,7	0,8	0,9	0,91	9,3
$E_d, 10^3 \text{ МПа}$	4	5	7,5	9	9,8

Коефіцієнт Пуассона μ характеризує відношення відносної поперечної до відносної поздовжньої деформації і впливає на величину циліндричної жорсткості крижаної пластини. Коефіцієнт Пуассона змінюється в межах вузького діапазону. Так, результати μ [2, 3] для льоду при різній температурі представлені в табл. 4

Таблиця 4

Коефіцієнт Пуассона для прісного льоду

$T, ^\circ\text{C}$	-1	-10	-20	-30	-40	-50
μ	0,368	0,342	0,331	0,324	0,318	0,315

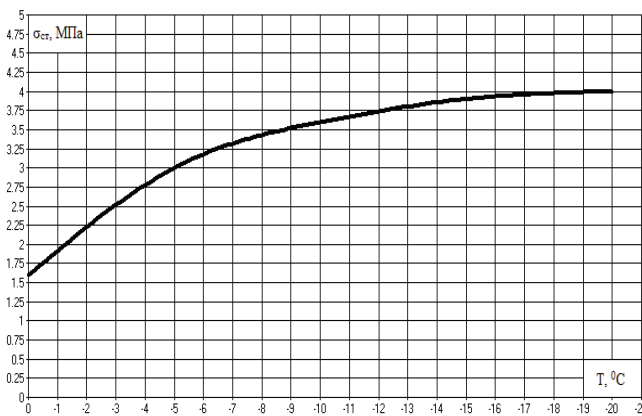


Рис. 2. Графік залежності пружності ожеледі на стискання від абсолютної температури повітря

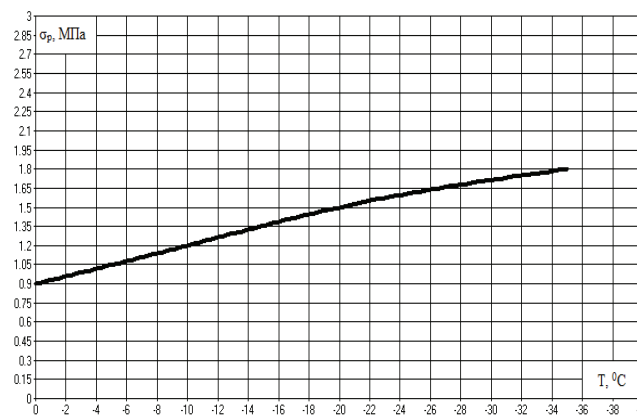


Рис. 3. Графік залежності пружності ожеледі на розтягнення від абсолютної температури повітря

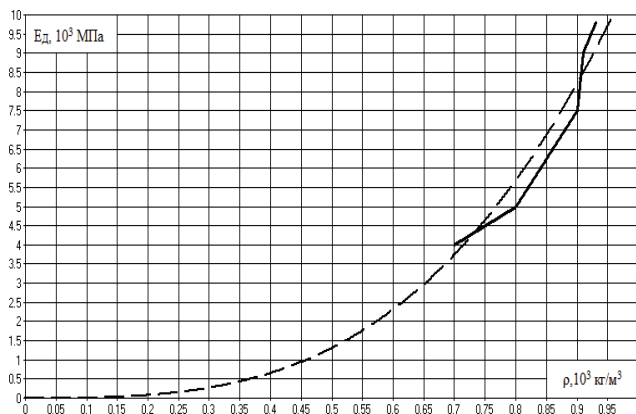


Рис. 4. Графік залежності динамічного модуля пружності від щільності льоду:
 ----- - графік, побудований за експериментальними даними досліджень;
 - - - - графік, отриманий завдяки регресії аналізу експериментальних даних.

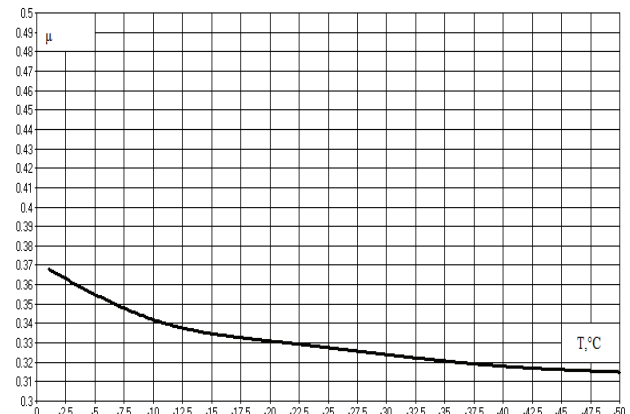


Рис. 5. Графік залежності коефіцієнта Пуассона від абсолютної температури повітря

Теоретичний розрахунок міцності на розрив σ_p (напрузі, при якому настає розрив) для реальних тіл представляє великі труднощі. Значення σ_p при одночасному розриві всіх міжатомних зв'язків на поверхні розриву оцінюється в $0,1E$. Зазвичай експериментальні значення міцності на кілька порядків менше теоретичних. Причина низької міцності звичайних тіл - нерівномірний розподіл внутрішніх напружень [2,3,5].

Щодо конструктивних особливостей ПЛЕП, то на фізико-механічні властивості ОПВ впливають діаметр проводу, матеріал проводу, висота підвісу проводу, наявність засобів захисту від ожеледі.

Вплив діаметра проводу повітряних ліній електропередачі (ПЛЕП) на масу ожеледі визначається за виразом [6]:

$$K_d = B_d / B_5$$

де K_d – коефіцієнт утворення ожеледі;

B_d – товщина стінки ожеледі на проводі діаметром d , мм;

B_5 – товщина стінки ожеледі на проводі діаметром $d = 5$ мм (приймач відкладень ожеледі на метеостанціях).

Залежність товщини стінки ожеледі від діаметра проводу ПЛЕП представлено на рис. 6. Із збільшенням діаметра проводу від 5 до 50 мм маса відкладення збільшується середньому в 2,5 рази (рис. 7).

Маса ожеледі залежить від швидкості повітряного потоку та діаметру проводу (рис. 8). Так, при швидкості 5 м/с маса осаду на проводі діаметром 5 мм менше, ніж на проводі діаметром 30 мм, в 2,2 рази. При швидкості 15 м/с відмінність у масі відкладень на цих же проводах становить 3,9 рази. У зоні швидкостей повітряного потоку 20 м/с і більше спостерігається зменшення маси ожеледі. Це пояснюється інтенсивним випаровуванням ожеледиці. При підвищенні температури від -5 °C до -1 °C випаровування відкладень ожеледі збільшується до 40 %, а при температурі від -5 °C до -10 °C випаровування маси відкладень ожеледі становить менше 10 % [6].

Дія електричного та магнітного поля проводу в даний час не враховується при визначенні навантажень від відкладень ожеледі на проводи ПЛЕП. В [6,7] проведено практичні спостереження за відкладень ожеледі на проводах ПЛЕП, що знаходяться під напругою (рис. 9). Автор оцінює збільшення маси ожеледі на проводах під впливом електричного поля в 30 %, а також збільшення щільності ожеледі. Причиною цього є тяжіння краплі до проводу, що зумовлено наведеним зарядом, який утворює диполь. Порівнюючи електричну силу з силою тяжіння випливає висновок, що електричне поле є додатковим чинником, що впливає на збільшення маси та щільності ожеледиці.

Іншим чинником, що обумовлює тяжіння краплі, є її поляризація в електричному полі проводу ПЛЕП. Сила взаємодії визначається рівнянням [5]:

$$F_e = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^3 \cdot \left(\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) \cdot \text{grad}E^2$$

де r – радіус краплі, м;

E – напруженість поля в даній точці, В/м;

ϵ_0 – відносна діелектрична постійна, Ф/м;

ϵ – діелектрична проникність краплі, Ф/м.

При змінній напрузі диполь змінює полярність у відповідності з напрямком поля, а сила залишається спрямованою завжди в одну сторону, притягаючи краплю до проводу.

Висота підвісу проводу ПЛЕП завжди більше висоти підвісу проводу на метеостанціях, де $h_0 = 2$ м. С зростанням висоти підвісу проводів маса ожеледі зростає. Тому при розрахунку дійсної стінки відкладень ожеледі необхідно враховувати поправочний коефіцієнт K_h , який залежить від висоти підвісу проводу (рис. 10) [6].

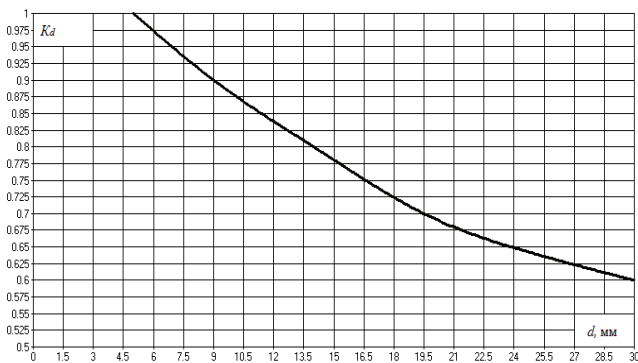


Рис. 6. Графік залежності товщини стінки ожеледі від діаметру проводу ПЛЕП

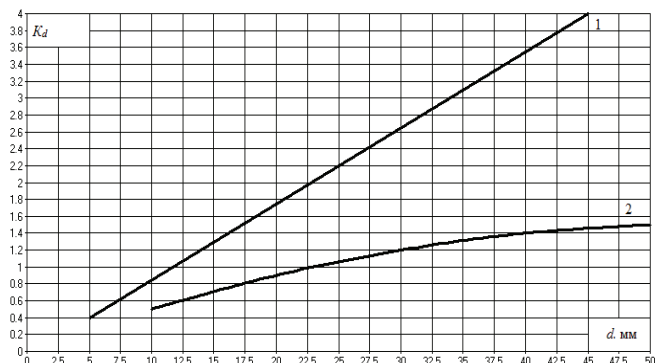


Рис. 7. Графік залежності маси відкладень ожеледі (1) та паморозі (2) від діаметру проводу ПЛЕП

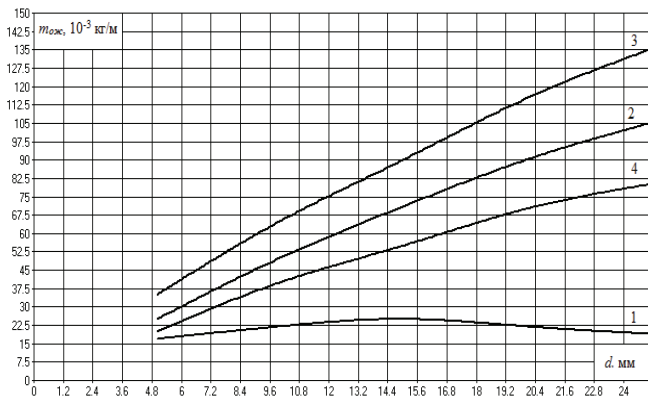


Рис. 8. Графік залежності маси відкладень ожеледі від діаметру проводу ПЛЕП та швидкості вітру: 1 - $v_{вітру} = 5$ м/с; 2 - $v_{вітру} = 10$ м/с; 3 - $v_{вітру} = 15$ м/с; 4 - $v_{вітру} = 20$ м/с.

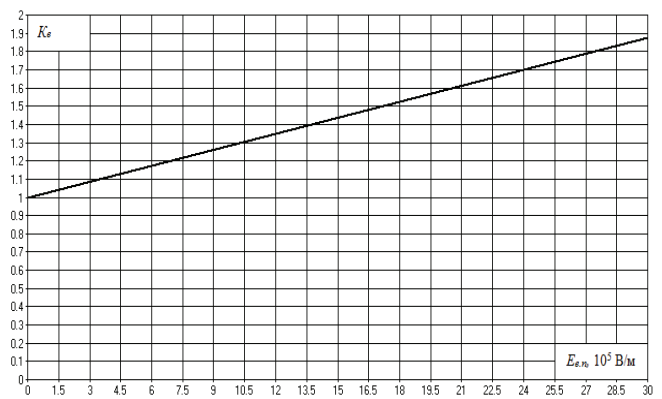


Рис. 9. Усереднений графік залежності впливу напруженості електричного поля змінного струму на масу відкладень ожеледі

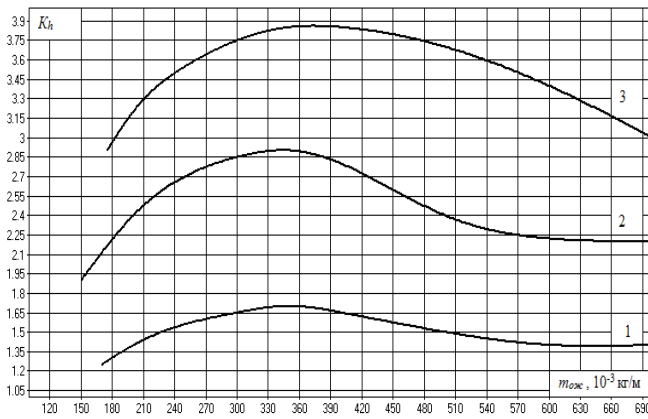


Рис. 10. Графік зміни маси відкладень ожеледі та паморозі на проводах і тросах ПЛЕП при різних висотах підвісу: 1 - $h = 8$ м; 2 - $h = 16$ м; 3 - $h = 24,5$ м;

Проведені дослідження вказують на те, що ожеледь на проводах і тросах ПЛЕП має різні характеристики під дією зовнішніх факторів і це потрібно враховувати при розрахунку навантаження на ПЛЕП.

Виявлені функціональні залежності фізико-механічних властивостей відкладень ожеледі на ПЛЕП від зовнішніх факторів показують, що цей напрям на даний період часу недостатньо вивчений в Україні та Світі та потребує подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

Висновки

1. Складена структурно-функціональна схема, яка наглядно ілюструє вплив зовнішніх факторів на фізико-механічні властивості відкладень ожеледі на ПЛЕП.

2. Встановлено функціональна залежність фізико-механічних властивостей відкладень ожеледі від зовнішніх факторів

3. Побудовані залежності фізико-механічних властивостей відкладень ожеледі на ПЛЕП від зовнішніх факторів.

Перелік літератури:

1. Войтковский К. Ф. Механические свойства льда / К.Ф. Войтковский - М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 190 с.
2. Лавров В. В. Деформация и прочность льда / В.В. Лавров и др. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – 206 с.
3. Смирнов В. Н. Некоторые вопросы натурального исследования деформаций и напряжений в ледяном покрове: Труды ААНИИ. - Л.: – Гидрометеоздат, 1976. – 140 с.
4. Закинян Р. Г. К теории образования слоистой структуры льда на поверхности пластины, помещенной в поток переохлажденного водного аэрозоля/ Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74, № 9. – С. 9–14.
5. Берденников В. П. Изучение модуля упругости льда/ В. П. Берденников и др. – М.: – Машиностроение. – 1948. – 123 с.
6. Николаев Н. Я. Исследование и разработка способа снижения гололедообразования на проводах воздушных линий электропередачи сельской электрификации : автореф. дис. ... на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.02 «Электрификация сельскохозяйственного производства» / Н. Я. Николаев – Челябинск, 1999. – 24 с.
7. Бургсдорф В.В. Сооружение и эксплуатация линий электропередачи с сильно гололедных районах/ В.В. Бургсдорф. – М.: Госэнергоиздат, 1947. – 196 с.

References:

1. Woitkovskii K.F. The mechanical properties of ice [Mehnicheskie svoistva lda]. M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1960. – 190 p.
2. Lavrov V. V. Deformation and strength of ice [Deformatsiia i prochnost lda]. L. : Gidrometeoizdat, 1969. – 206 p.
3. Smirnov V. N. Some research questions of natural strains and stresses in the ice cover: Proceedings of the AARI [Nekotorye voprosy naturalnogo issledovaniia deformatsii i napriazhenii v ledianom pokrove: Trudy AANII]. L.: Gidrometeoizdat, 1976. – 140 p.
4. Zakinian R. G. On the theory of the formation of the layered structure of ice on the surface of the plate, placed in the stream of supercooled water aerosol [K teorii obrazovaniia sloistoy struktury lda na poverhnosti plastiny, pomeshennoi v potok pereohlazhdennoogo vodnogo aerozolia] / Technical Physics. – 2004. – V. 74, № 9. – P. 9–14.
5. Berdennikov V. P. The study of the modulus of elasticity of ice [Izuchenie modulua uprugosti lda]. M.: Engineering, 1948. – 123 p.
6. Nikolaev N. Y. Exploration and creative reduction formation of ice preferred method for wire lines air power countryside electrification, [Issledovanie i razrabotka sposoba snizheniia gololedoobrazovaniia na provodah vozdushnyh linii elektroperedachi selskoy electroficatsii]: Author thesis competition the Ph.D. sciences specials 05.20.02 " Electrification countryside production ", Chelyabinsk, – 1999. – 24 p.
7. Burgsdorf V.V. Construction and operation of transmission lines with strong glaze areas [Sooruzhenie i ekspluatatsiia linii elektroperedachi v silno gololednyh raionah]. M.: Gosenergoizdat, 1947. – 196 p.

Поступила в редакцию 20.12 2014 г.