

DOI: 10.6084/m9.figshare.11340743

УДК 539.2; 541.1; 542.269

**Краснянський Григорій Юхимович**

Кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики, *orcid.org/0000-0002-2421-1270*  
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**Клапченко Василь Іванович**

Кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри фізики, *orcid.org/0000-0002-4093-5500*  
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**Азнаурян Ірина Олександрівна**

Доцент кафедри фізики, *orcid.org/0000-0002-7085-7291*  
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**Кузнецова Ірина Олександрівна**

Асистент кафедри фізики, *orcid.org/0000-0003-1800-1733*  
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЕТЕЛІВ**

***Анотація.** Електропровідні бетони (бетели) набувають свого застосування в гідротехнічному, енергетичному і транспортному будівництві для захисту людей і електронного обладнання від електромагнітних полів. Оптимізація процесу виготовлення бетелів полягає, зокрема, в точному призначенні мінімальної кількості електропровідної добавки, необхідної для отримання матеріалу із заданою електропровідністю. В роботі на основі аналогії з теорією фазових переходів (гіпотези подібності) і теорії протікання отримані рівняння для розрахунку електропровідності бетелів при концентраціях електропровідних добавок нижчих за поріг протікання. Отримані співвідношення допомагають призначити концентрацію добавок у діапазоні 10 – 20% за об'ємом, що забезпечує задану електропровідність матеріалу в межах  $10^{-3} - 10^{-2}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>. Для бетелів, що виготовляються методом пресування, розрахунки за запропонованою методикою дають можливість визначити тиск пресування, що необхідний для досягнення заданої електропровідності. Перевірка теоретичних залежностей показала відповідність розрахованих і вимірених величин з точністю до 15%. В цілому отримані рівняння дають змогу оптимізувати склад і технологію приготування бетелів на основі гідравлічних в'язучих, що забезпечує зниження вартості за рахунок економії електропровідного компонента і підвищення будівельно-технічних характеристик матеріалу.*

***Ключові слова:** бетели; електропровідність; електропровідні добавки; оптимізація технології; теорія протікання; гіпотеза подібності*

**Постановка проблеми**

В гідротехнічному, енергетичному і транспортному будівництві для захисту людей і електронного обладнання від електромагнітних полів застосовують бетели на основі дрібнозернистих бетонів з електро-провідними добавками в концентраціях, які, як правило, перевищують поріг протікання [1 – 6].

Ресурсозберігаючі технології бетелів ґрунтуються переважно на економії електропровідних добавок, яка може бути досягнута за рахунок введення їх у бетон в концентраціях, менших за поріг протікання, з відповідним зниженням вартості матеріалу і підвищенням його будівельно-технічних характеристик. При цьому можуть бути отримані бетели з питомими електропровідностями в межах  $10^{-3} - 10^{-2}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>, які в багатьох випадках є

достатніми. Відомі рівняння [7 – 10] не дають змогу надійно прогнозувати електропровідність бетелів такого складу. Більше того, розрахунки за цими рівняннями в деяких випадках призводять до неадекватних результатів, зокрема показують залежність електропровідності від частоти струму, що не спостерігається на практиці.

**Мета статті**

Метою статті є оптимізація процесу виготовлення бетелів із заданою електропровідністю за рахунок точного призначення кількості електропровідної добавки на основі розрахунків за допомогою отриманих рівнянь. Для бетелів, що виготовляються методом пресування, – визначення оптимальної концентрації електропровідного компонента, за якої вибраний тиск пресування забезпечує досягнення необхідної електропровідності.

**Виклад основного матеріалу**

На основі аналогії з теорією фазових переходів (гіпотези подібності) і теорії протікання [7; 8; 11] отримані рівняння для розрахунку електропровідності  $\sigma$  цементного каменю з електропровідним наповнювачем при концентраціях  $x$  нижчих за поріг протікання  $x_c$ .

Керуючись [8], представимо комплексну електропровідність цієї системи (вважаємо, що прикладене поле є квазістаціонарним)

$$\sigma(\omega, x) = \sigma(\omega, x) - \frac{i\omega}{4\pi} \varepsilon(\omega, x) \quad (1)$$

у вигляді

$$\sigma = \sigma_d f(x, \hat{z}), \quad (2)$$

де

$$\hat{z}(\omega) = \frac{\sigma_{ц}(\omega)}{\sigma_d(\omega)}, \quad (3)$$

$$\sigma_{ц}(\omega) = \sigma_{ц} - i \frac{\omega}{4\pi} \varepsilon_{ц}, \quad (4)$$

і на достатньо низьких частотах, за яких  $\sigma_d \gg \omega \varepsilon_d / (4\pi)$ ,

$$\sigma_d(\omega) = \sigma_d. \quad (5)$$

У рівняннях (1) – (5)  $\sigma(\omega, x)$  і  $\varepsilon(\omega, x)$  – електропровідність і діелектрична проникність бетела;  $\sigma_{ц}$  і  $\sigma_d$  – статичні електропровідності відповідно цементного каменю і добавки;  $\varepsilon_{ц}$  – статична діелектрична проникність цементного каменю;  $\omega$  – циклічна частота струму.

З урахуванням (3) та (4)

$$\hat{z}(\omega) = h - i \frac{\omega \varepsilon_{ц}}{4\pi \sigma_d}, \quad (6)$$

де

$$h = \frac{\sigma_{ц}}{\sigma_d}. \quad (7)$$

В критичній області  $x$ , де  $|z|^{s/t} \ll x_c - x \ll 1$  (далі введемо позначення  $x_c - x = \tau$ ), функція  $f$  відповідно до гіпотези подібності має вигляд

$$f = \frac{\hat{z}}{\tau^q} (A_1 + A_2 \frac{\hat{z}}{t/s} + \dots), \quad (8)$$

де  $A_1, A_2$  – константи;  $t, q, s$  – критичні індекси теорії протікання [9], зв'язані між собою співвідношенням

$$q = \frac{t(1-s)}{s}. \quad (9)$$

Розкладаючи функцію  $f$  в ряд за ступенями  $z$  при  $z = 0$  і обмежуючись першими трьома членами розкладання, з (1) і (2) отримуємо:

$$\sigma(\omega, x) = \sigma_d \left( f(x, 0) + h \frac{\partial f(x, \hat{z})}{\partial \hat{z}} \Big|_{z=0} + \frac{1}{2} \left( h^2 - \left( \frac{\omega \varepsilon_{ц}}{4\pi \sigma_d} \right)^2 \right) \cdot \frac{\partial^2 f(x, \hat{z})}{\partial \hat{z}^2} \Big|_{z=0} \right). \quad (10)$$

Використовуючи далі співвідношення (8), на підставі (10) знаходимо остаточний вираз для електропровідності бетела:

$$\sigma = \sigma_d \left[ A_1 h \tau^{-q} + A_2 \left( h^2 - \left( \frac{\omega \varepsilon_{ц}}{4\pi \sigma_d} \right)^2 \right) \tau^{-p} \right], \quad (11)$$

де  $p$  – ще один критичний індекс:

$$p = t \left( \frac{z}{s} - 1 \right). \quad (12)$$

На відміну від відомих співвідношень, в (11) враховано ненульову провідність цементного каменю, причому рівняння (11) є справедливими як для постійного струму, так і для змінних струмів з частотою до 15 кГц (в тому числі і для струмів промислової частоти).

Рівняння (10) спрощується, якщо врахувати, що при будь-яких частотах з діапазону  $\nu < 15$  кГц виконується нерівність:

$$\frac{\omega \varepsilon_{ц}}{4\pi \sigma_d} \ll h. \quad (13)$$

При цьому (10) набуває вигляду:

$$\sigma = A_1 \sigma_d h \tau^{-q}. \quad (14)$$

З (14) випливає, що передбаченої в [7; 8] залежності електропровідності бетелів від частоти струму в зазначеному діапазоні частот не повинно спостерігатися, що і підтверджується практикою. Відсутність дисперсії електропровідності вказує на те, що на даних частотах не відбувається дисипації енергії електричного поля, обумовленої поляризацією ізольованих електропровідних кластерів і основний внесок в діелектричні втрати вносить наскрізна провідність.

Справедливість (14) була перевірена для дрібнозернистого бетону на портландцементі М400 з добавками мідного порошку (розміри частинок близько 30 мкм), при цьому було отримано відповідність розрахованих і вимірних величин електропровідності в межах 20%.

Рівняння (14) дає змогу призначати концентрацію добавок в діапазоні 10–20% за об'ємом, що забезпечують задану електропровідність бетелів на портландцементі в межах  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>.

Для бетелів, що виготовляються методом пресування, отримано рівняння, яке враховує також вплив тиску пресування  $p$  на електропровідність в передпороговій області концентрацій.

Припускаючи, що при прикладанні зовнішнього тиску зміна об'єму зразка  $V$  відбувається за рахунок стиснення ізолюючого середовища (в нашому випадку – гідросилікату кальцію і порового простору), а об'єм, який займала електропровідна фаза  $V_d$ , залишається незмінним (що в більшості випадків дійсно виконується), і вводячи відповідний коефіцієнт стисливості

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp}, \quad (15)$$

отримуємо:

$$\frac{dx}{dp} = \frac{d}{dp} \left( \frac{V_d}{V} \right) = x\beta, \quad (16)$$

$$x(p) = x_0 \exp \left( \int_{p_0}^p \beta(p) dp \right), \quad (17)$$

де  $x_0$  – вихідна об'ємна концентрація електропровідного компонента;  $p_0$  – початковий тиск.

Підставляючи (17) в (14) і апроксимуючи залежність  $\beta(p)$  експоненційною функцією

$$\beta(p) = a \exp(-bp), \quad (18)$$

де  $a$  і  $b$  – константи, значення яких визначаються із зіставлення аналітичної залежності стисливості матеріалу  $\beta$  з експериментальною, знаходимо

$$\sigma(p) = \sigma_{II} \left( \frac{a}{b} \right)^{-q} \left[ \exp(-bp) - \exp(-bp_c) \right]^{-q}. \quad (19)$$

Тут критичний тиск  $p_c$ , при якому для даної вихідної об'ємної концентрації добавки  $x_0$  досягається поріг протікання, як впливає з (14) – (18), може бути обчислений за формулою

$$p_c = \frac{1}{b} \ln \left[ \frac{b}{a} \ln \frac{x_0}{x_c} + \exp(-bp_0) \right]^{-1}. \quad (20)$$

І нарешті, підставляючи (20) в (19), знаходимо співвідношення, що зв'язує об'ємну концентрацію добавки у вихідній суміші і тиск пресування, необхідний для отримання матеріалу із заданим значенням електропровідності:

$$\sigma(p) = \sigma_{II} \left[ a \left( \exp(-bp) - \exp(-bp_0) \right) - \ln \frac{x_0}{x_c} \right]^{-q}. \quad (21)$$

Рівняння (19) допомагає призначити оптимальну концентрацію електропровідного

компонента, за якої вибраний тиск пресування забезпечує досягнення необхідної електропровідності.

Перевірка (21), яка була проведена для сумішей гідросилікату кальцію з мідним порошком, спресованих при тисках 100...1000 МПа, показала відповідність розрахованих і вимірених величин з точністю до 15%.

## Висновки

Отримано рівняння для розрахунку електропровідності бетелів, які допомагають призначити концентрацію електропровідних добавок у діапазоні 10–20% за об'ємом, що забезпечують задану електропровідність бетелів на портландцементі в межах  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>.

Для бетелів, що виготовляються методом пресування, отримано рівняння залежності електропровідності від тиску пресування, за допомогою якого можна призначити оптимальну концентрацію провідного компонента, при якій вибраний тиск пресування забезпечує досягнення необхідної електропровідності.

Перевірка теоретичних залежностей, яка була проведена для дрібнозернистого бетону на портландцементі та гідросилікату кальцію з добавками мідного порошку, показала відповідність розрахованих і вимірених величин з точністю до 15%.

Отримані рівняння дають змогу оптимізувати склад і технологію приготування бетелів на основі гідравлічних в'язучих із заданою електропровідністю, що забезпечує зниження вартості за рахунок економії провідного компонента і підвищення якості матеріалу.

## Список літератури

1. Горелов С.В. Применение электрических неоднородных композитов в электросетевых конструкциях. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 359 с.
2. Пугачев Г.А. Технология производства изделий из электропроводных бетонов / Г.А. Пугачев., Отв. ред. В.Е. Накоряков. –Новосибирск, Институт теплофизики АН СССР, 1988. – 198 с.
3. Chung, D.D.L. Electrically Conductive Cement-based Materials // Adv. Cem. Res. –2004. –v. 16. –№4. –P. 167–176.
4. Краснянський Г.Ю., Азнаурян І.О., Кузнецова І.О. Екрануючі властивості металосилікатних облицювальних матеріалів у діапазоні нвч. // Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. збірник / Відпов. ред. М.М.Осетрін. – К.: КНУБА, 2015. – Вип.58. – С. 118 – 122.
5. Запорожець О.І. Сучасні підходи до моделювання просторових змін геомагнітного поля у будівлях та спорудах [Текст] / О.І. Запорожець, В.І. Клапченко, Л.О. Левченко, О.В. Панова // Управління розвитком складних систем. – 2015. – № 21. – С. 133 – 138.
6. Панова О.В. Екранування електромагнітних полів для електромагнітної безпеки та електромагнітної сумісності обладнання [Текст] // Управління розвитком складних систем. – 2015. – № 22 (1). – С. 207–213.
7. Efros A.L. Critical Behaviors of Conductivity and Dielectric Constant Near the Metal-nonmetal Transition / Efros A.L., Shklovskii B.I. // Phys. Status Solidi B. – 1976. – V.76, №2. – P. 475.
8. Балагуров Б.Я. К теории дисперсии проводимости двухкомпонентных сред // ЖЭТФ. – 1985. – Т.88. – №5. – С. 1664 – 1675.

9. Манчук Р.В. Применение теории протекания к расчету электропроводности бетэла // Изв. вузов. Строительство. – 2003. – № 8. – С.42 – 50.

10. Хархардин А.Н. Перколяционная модель электропроводности строительных композитов / А.Н. Хархардин, В.В. Строкова, И.В. Жерновский // Изв. вузов. Строительство. – 2007. – №9. – С. 105 – 111.

11. Kirkpatrick S. Percolation and Conduction // Rev. Mod. Phys. – 1973. – v.45. – №4. – P. 574 – 588.

Стаття надійшла до редколегії 10.09.2019

**Краснянский Григорий Ефимович**

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, [orcid.org/0000-0002-2421-1270](https://orcid.org/0000-0002-2421-1270)

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

**Клапченко Василий Иванович**

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой физики, [orcid.org/0000-0002-4093-5500](https://orcid.org/0000-0002-4093-5500)

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

**Азнаурян Ирина Александровна**

Доцент кафедры физики, [orcid.org/0000-0002-7085-7291](https://orcid.org/0000-0002-7085-7291)

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

**Кузнецова Ирина Александровна**

Ассистент кафедры физики, [orcid.org/0000-0003-1800-1733](https://orcid.org/0000-0003-1800-1733)

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЕТЭЛОВ**

**Аннотация.** Электропроводящие бетоны (бетэлы) находят все большее применение в гидротехническом, энергетическом и транспортном строительстве, а также для защиты людей и электронного оборудования от электромагнитных полей. Оптимизация процесса изготовления бетэлов заключается, в частности, в точном назначении минимального количества электропроводящей добавки, необходимой для получения материала с заданной электропроводностью. В работе на основе аналогии с теорией фазовых переходов (гипотезы подобия) и теории протекания получены уравнения для расчета электропроводности бетэлов при концентрациях электропроводящих добавок ниже порога протекания. Полученные соотношения позволяют назначать концентрацию добавок в диапазоне 10–20% по объему, что обеспечивает заданную электропроводность материала в пределах  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>. Для бетэлов, изготавливаемых методом прессования, расчеты по предлагаемой методике дают возможность определять давление прессования, необходимое для достижения заданной электропроводности. Установлено соответствие рассчитанных и измеренных величин с точностью до 15%. Полученные уравнения позволяют оптимизировать состав и технологию приготовления бетэлов на основе гидравлических вяжущих, что обеспечивает снижение их стоимости за счет экономии электропроводящего компонента и повышения строительно-технических характеристик материала.

**Ключевые слова:** бетэлы; электропроводность; электропроводящие добавки; оптимизация технологии; теория протекания; гипотеза подобия

**Krasnyansky Grigory**

PhD (Eng.), Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-2421-1270](https://orcid.org/0000-0002-2421-1270)

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

**Klapchenko Vasily**

PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Physics, [orcid.org/0000-0002-4093-5500](https://orcid.org/0000-0002-4093-5500)

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

**Aznauryan Irina**

Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-7085-7291](https://orcid.org/0000-0002-7085-7291)

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

**Kuznetsova Irina**

Assistant, [orcid.org/0000-0003-1800-1733](https://orcid.org/0000-0003-1800-1733)

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

**ELECTRICALLY CONDUCTIVE CONCRETES TECHNOLOGY OPTIMIZATION**

**Abstract.** Electrically conductive concretes find their application in hydraulic engineering, energy and transport construction, to protect people and electronic equipment from electromagnetic fields. Optimization of the process of manufacturing electrically conductive concretes consists, in particular, in the precise assignment of the minimum amount of electrically conductive additive, which is necessary to obtain a material with a specified electrical conductivity. In the work, equations are obtained for

calculating the electrical conductivity of electrically conductive concrete with additive concentrations below the percolation threshold based on the analogy with the theory of phase transitions (similarity hypothesis) and percolation theory. The obtained ratios allows to assign the concentration of additives in the range of 10-20% by volume, which provides the specified electrical conductivity of the material in the range of 10<sup>-3</sup>-10<sup>-2</sup> (Ohm·m)<sup>-1</sup>. For electrically conductive concretes manufactured by the pressing method, calculations by the proposed technique make it possible to determine the pressing pressure required to achieve a specified conductivity. The verification of the theoretical dependences showed the compliance of the calculated and measured values with an accuracy of 15%. In general, the equations obtained allow optimizing the composition and technology of preparation of electrically conductive concretes based on hydraulic binders, which ensures cost reduction due to saving of the electrically conductive component and increasing the construction and technical characteristics of the material.

**Keywords:** *electrically conductive concretes; electrical conductivity; electricallyconductive additives; technology optimization; percolation theory; similarity hypothesis*

#### References

1. Gorelov, S.V., (2016). *The Use of Electrical Inhomogeneous Composites in Power Grid Structures*. Moscow, Berlin: Direct-Media, 359.
2. Pugachev, G.A., (1988). *Production Technology of Products from Electrically Conductive Concretes*. Novosibirsk: Institute of Thermal Physics, USSR Academy of Sciences, 198.
3. Chung, D.D.L., (2004). *Electrically Conductive Cement-based Materials*. *Adv. Cem. Res.*, 16(4), 167 – 176.
4. Krasnyansky, G.Yu., Aznuryan, I.O. & Kuznetsova, I.O., (2015). *Screening Properties of Metallosilicate Facing Materials in the Microwave Range*. *Urban Planning and Territorial Planning*, 58, 118 – 122.
5. Zaporozhets, O.I., (2015). *Modern Approaches to Modeling Spatial Changes of Geomagnetic Field in Buildings and Structures* / O.I. Zaporozhets, V.I. Klapchenko, L.O. Levchenko, O.V. Panova // *Management of Development of Complex Systems*, 21, 133 – 138.
6. Panova, O.V., (2015). *Screening of Electromagnetic Fields for Electromagnetic Safety and Electromagnetic Compatibility of Equipment*. *Management of Development of Complex Systems*, 22, 207 – 213.
7. Efros, A.L., & Shklovskii, B.I., (1976). *Critical Behaviors of Conductivity and Dielectric Constant Near the Metal-nonmetal Transition*. *Phys. Status Solidi B*, 76(2), 475.
8. Balagurov, B.Ya., (1985). *On the Theory of the Dispersion of Conductivity of Two-component Media*. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 88(5), 1664 – 1675.
9. Manchuk, R.V., (2003). *Application of Percolation Theory to the Calculation of the Electrical Conductivity of Betel*. *News of Universities. Building*, 8, 42 – 50.
10. Kharkhardin, A.N., Strokova, V.V. & Zhernovskiy, I.V., (2007). *Percolation Model of the Electrical Conductivity of Building Composites*. *News of Universities. Building*, 9, 105 – 111.
11. Kirkpatrick, S., (1973). *Percolation and Conduction*. *Rev. Mod. Phys.*, 45(4), 574 – 588.

#### Посилання на публікацію

- APA Krasnyansky, Grigory, Klapchenko, Vasily, Aznuryan, Irina & Kuznetsova, Irina, (2019). *Electrically Conductive Concretes Technology Optimization*. *Management of Development of Complex Systems*, 39, 206 – 210; [dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.11340743](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11340743).
- ДСТУ Краснянський, Г.Ю. Оптимізація технології бетелів [Текст] / Г.Ю. Краснянський, В.І. Кlapchenko, І.О. Азнаурян, І.О. Кузнецова // *Управління розвитком складних систем*. – 2019. – № 39. – С. 206 – 210, [dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.11340743](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11340743).