

УДК 691.55:699.887

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЗЕМЛЕНИХ ЕКРАНІВ ІЗ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ КОМПОЗИЦІЙ ЯК СПОСОБУ ЗАХИСТУ ВІД ЕЛЕКТРОКОРОЗІЇ

Д-р техн. наук А. А. Плугін, канд. техн. наук О. А. Плугін,  
інженери В. В. Касьянов, д-р техн. наук Д. А. Плугін (УкрДУЗТ),  
В. В. Конєв (ПАТ «Укрзалізниця»)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЗЕМЛЕННЫХ ЭКРАНОВ ИЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ КАК СПОСОБА ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИИ

Д-р техн. наук А. А. Плугин, канд. техн. наук Ал. А. Плугин,  
инженеры В. В. Касьянов, д-р техн. наук Д. А. Плугин (УкрГУЖТ),  
В. В. Конев (ПАТ «Укрзалізниця»)

## RESEARCH OF GROUNDED SCREEN FROM CONDUCTIVE COMPOSITIONS AS A STRUCTURES ELECTRO-CORROSION PROTECT

DSc A. A. Plugin, PhD O. A. Pluhin, engineer V. V. Kasyanov,  
engineer V. V. Konev, DSc D. A. Plugin

*Досліджували застосування заземлених екранів-покрить із композицій з графітовим наповнювачем на основі портландцементу і на основі силікату натрію як засобу захисту споруд від електрокорозії струмами витоку. Була розроблена оригінальна методика, що полягає у порівнянні сили струму крізь арматуру і бетон моделей споруди без захисту та із захистом заземленим екраном-покрить. Експериментально підтверджена ефективність заземлених екранів для захисту конструкцій, наприклад пасажирських платформ, від корозії струмами витоку. Установлено, що захисні властивості екрана залежать від відсотка площі контакту сталевого електрода заземлення з ним – зі збільшенням цього відсотка сила струму крізь бетон і арматуру знижується, а крізь захисний екран зростає.*

**Ключові слова:** струми витоку, електрокорозія, захист, портландцемент, силікат натрію, графіт, електропровідна композиція, заземлення.

*Исследовали применение заземленных экранов-покрытий из композиций с графитовым наполнителем на основе портландцемента и на основе силиката натрия как средства защиты сооружений от электрокоррозии токами утечки. Была разработана оригинальная методика, заключающаяся в сравнении величин силы тока через арматуру и бетон модели сооружения без защиты и с защитой заземленным экраном-покрытием. Экспериментально подтверждена эффективность заземленных экранов для защиты конструкций, например пассажирских платформ, от коррозии токами утечки. Установлено, что защитные свойства экрана зависят от процента площади контакта стального электрода заземления с ним – с повышением этого процента сила тока в бетоне и арматуре снижается, а в защитном экране – возрастает.*

**Ключевые слова:** токи утечки, электрокоррозия, защита, портландцемент, силикат натрия, графит, электропроводная композиция, заземление.

*The use of grounded screens — coatings from compositions with graphite filler based on Portland cement and on the basis of sodium silicate as a means of protecting structures from electrocorrosion by leakage currents was investigated. An original technique, which consists in*

*comparing the magnitude of the current through the armature and concrete of the model of the structure without protection and with protection by a grounded shield-coating was developed. The effectiveness of earthed shields to protect structures, such as passenger platforms, from corrosion by leakage currents has been confirmed experimentally. It is established that protection by an earthed shield provides a reduction in the current in the concrete and armature of the model due to the flow of its most part by a protective shield. The protecting properties of the screen depend on the percentage of the contact area of the steel electrode grounding with it - with increasing this percentage, the current strength in concrete and reinforcement decreases, and through the shielding screen increases. If the screen is used with a percentage of the contact area of the earth electrode with it up to 4,3 %, the current in concrete and armature is reduced by 75 - 80 %.*

**Keywords:** leakage currents, electrocorrosion, protection, portland cement, sodium silicate, graphite, conductive composition, grounding.

**Вступ.** Згідно з [1-5] конструкції і споруди на електрифікованих постійним струмом залізницях та біля інших джерел зазнають електрокорозії. Кородують переважно металеві конструкції та арматура залізобетону. У [2] зазначається, що біля арматури корозії зазнає також і бетон. У [6-9] було встановлено, що електрокорозія бетону відбувається не тільки біля арматури, але навіть у неармованих конструкціях і розчині кам'яної кладки та полягає в інтенсивному електроміграційному вилуговуванні цементного каменю під впливом пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу. Цей потенціал створюється під час проходження поїздів електрифікованою постійним струмом залізничною колією.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У [8, 10] було запропоновано для захисту від електрокорозії конструкцій водопропускної труби застосувати діодне заземлення металоін'єкційної сорочки. Така сорочка застосована для ремонту пошкоджених конструкцій труби (рис. 1, а, б). Металоін'єкційна обшивка сорочки захищає бетон і розчин від карбонізації і вилуговування, цементний камінь бетону — обшивку зсередини від електрохімічної корозії. Проте за впливу струмів витоку металева обшивка сорочки зазнає електрокорозії, що відбувається в анодних зонах (рис. 1, в). Її заземлення через діод дає змогу захистити як саму обшивку від електрокорозії за рахунок

перенесення анодних ділянок на заземлення, так і бетон і розчин конструкцій труби від протікання струму (рис. 1, г).

Проте металоін'єкційна сорочка — дорога конструкція, яку доцільно застосовувати за необхідності відновлення несучої здатності споруди із суттєвими пошкодженнями. З метою здешевлення ремонту та захисту споруд в УкрДУЗТ запропоновано замінити металоін'єкційну сорочку заземленим екраном-покриттям із електропровідної композиції на основі мінеральних в'язучих (рис. 2) [11], розроблені склади композицій на основі портландцементу [12] та отвердженого кремнійфтористим натрієм силікату натрію [13], з наповнювачем — графітовим порошком.

В [11] була розроблена методика й виконані експериментальні дослідження ефективності такого захисту від електрокорозії на моделях. Установлено, що у порівнянні з моделлю без захисту величина струму, що протікає через неї, менша: у моделі із заземленим екраном-покриттям із композиції на основі портландцементу — на 49-66 %, а з композиції на основі силікату натрію — на 34-60 %. За результатами досліджень було припущено, що захисні властивості заземленого екрана залежать також від відсотка площі контакту сталевого електрода заземлення з екраном із електропровідної композиції і мають збільшуватися зі збільшенням цього відсотка.

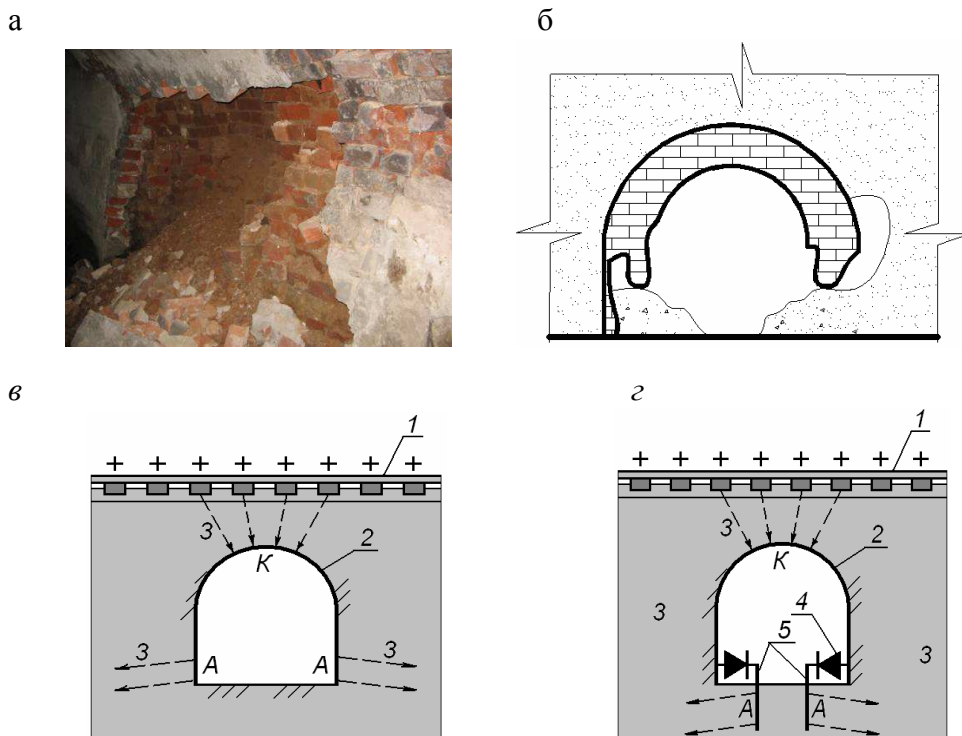


Рис. 1. Ремонт і захист від електрокорозії водопропускної труби у залізничному насипі: *а, б* – пошкодження у вигляді вивалів; *в, з* – схема протікання струму витoku з рейок через незахищену (*в*) і захищену діодним заземленням (*з*) металоін’єкційну сорочку: *1* – рейкова колія; *2* – металоін’єкційна сорочка; *3* – струми витoku; *4* – вентиль (діод) захисного улаштування; *5* – стержень заземлення; *К* – катодна зона; *А* – анодна зона (корозійно небезпечна)

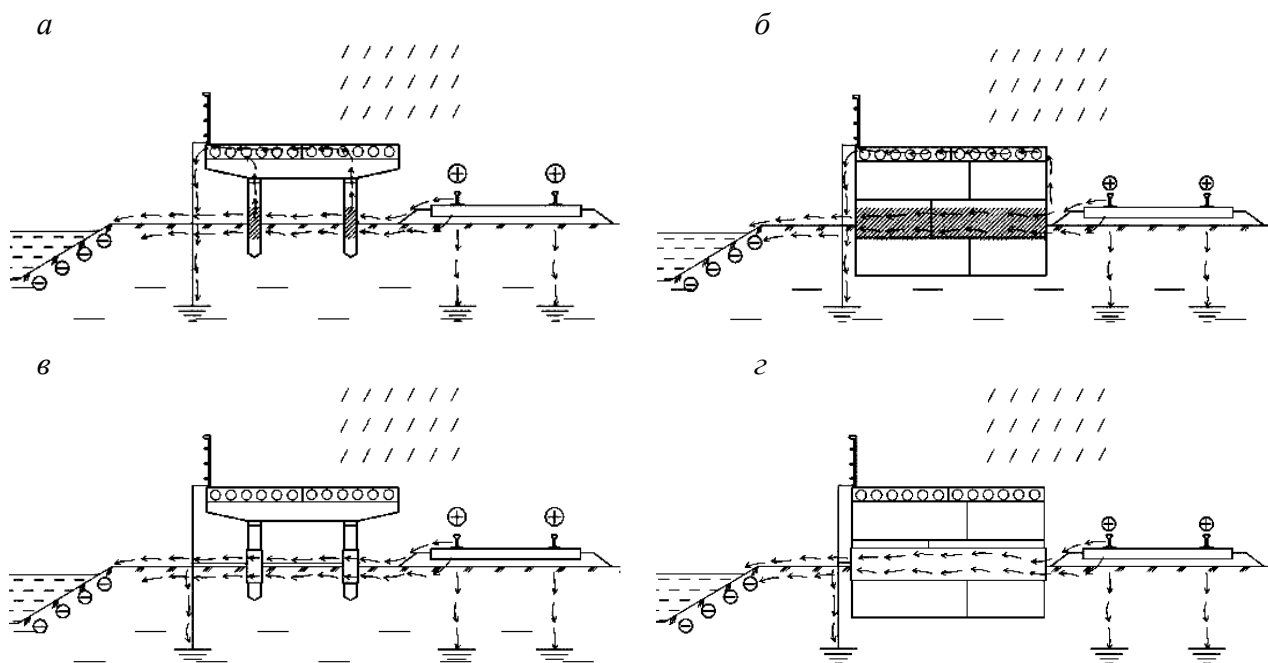


Рис. 2. Схеми протікання струмів витoku з рейкової колії на ділянках з позитивним потенціалом на рейках через конструкції високих пасажирських платформ: *а, в* – на залізобетонних стояках і ригелях; *б, з* – на опорах із бетонних блоків; *а, б* – без захисту; *в, з* – із заземленими екранами-покриттями

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою цього дослідження є встановлення залежності захисних властивостей заземлених екранів із електропровідних композицій на основі портландцементу й отвердженого кремніфтористим натрієм силікату натрію з наповнювачем — графітовим порошком від відсотка площі контакту сталевго електрода заземлення з екраном-покриттям. Для досягнення мети в роботі поставлені такі завдання дослідження: розробити методику експериментального дослідження ефективності заземлених екранів із електропровідних композицій та оригінальну експериментальну установку – модель споруди, що зазнає впливу струмів витоку з рейкової колії на ділянках з позитивним потенціалом на рейках; виконати лабораторні дослідження ефективності заземлених екранів із електропровідних композицій.

**Основна частина дослідження.** Досліджували екрани з електропровідних композицій з наповнювачем – графітовим порошком на основі портландцементу (проникної дії) та отвердженого кремніфтористим натрієм силікату натрію, склади яких прийняли за [12] і [13] відповідно.

Розроблено оригінальну методику експериментального дослідження, яка полягає у порівнянні величини електричного струму, що протікає крізь арматуру і бетон моделі споруди без захисного екрана  $I_{a60}$  і моделі споруди із захисним екраном  $I_{a61}$ . За показник ефективності екрана приймали величину зниження сили струму крізь бетон і арматуру моделі із захистом  $I_{a61}$  у порівнянні з моделлю без захисту  $I_{a60}$

$$\Delta I = (I_{a61} - I_{a60}) / I_{a60} \times 100 \% \quad (1)$$

Моделі споруди розробили на основі аналізу протікання через конструкції пасажирських платформ струмів витоку з рейкової колії на ділянках з позитивним потенціалом на рейках (рис. 2) без захисту (рис. 2, а, б) та із заземленими екранами-

покриттями (рис. 2, в, г). Як видно із рисунків, у дощову погоду струми витоку протікають крізь бетон, арматуру і заземлення платформи без захисту, а з екраном – крізь екран і заземлення, оминаючи бетон і арматуру (або мінімізуючись у них).

Дослідження здійснювали за допомогою оригінальної експериментальної установки (рис. 3).

Установка складається із моделі споруди-призми із важкого бетону з міцністю на стиск 20 МПа 1, у яку забетонований стержень із арматурної сталі з випуском уверх 2. Бетон моделі відповідає бетону споруди між її гранями (рис. 2, а) або бетону захисного шару між заземленою арматурою і гранню споруди (рис. 2, б). Цю модель-призму встановлювали у модель зволоженого ґрунту — дуже дрібний пісок 4, засипаний у металеву ємність 3. Струм, який натікає на споруду від джерел постійного струму, наприклад електрифікованої рейкової колії, створювали (моделювали) прикладанням різниці потенціалів 40 В між ємністю 3 та арматурним стержнем 2 у призмі 1, а його силу визначали за допомогою увімкнутих у ланцюг амперметрів (цифрових мультиметрів Sanwa PC510) 8 і 9.

Відсоток площі контакту сталевго електрода заземлення з екраном-покриттям  $x$ , який змінювали під час дослідження, визначали як відношення площі контакту сталевго електрода з екраном-покриттям  $S_{e3}$  до площі всього екрана-покриття  $S_{en}$

$$x = S_{e3} / S_{en} \times 100 \% \quad (2)$$

Вимірювання починали за сухого стану ґрунту, потім його водонасичували та продовжували вимірювання протягом 240 год з періодичністю спочатку 1 год, потім 6, 12 і 24 год. Результати подавали у вигляді графіків залежності сили струму крізь бетон і арматуру  $I_{a6}$ , сили струму крізь захисний екран  $I_{ze}$  та величини зниження сили струму через бетон і арматуру моделі із захистом порівняно з моделлю без захисту  $\Delta I$  від часу  $t$ .

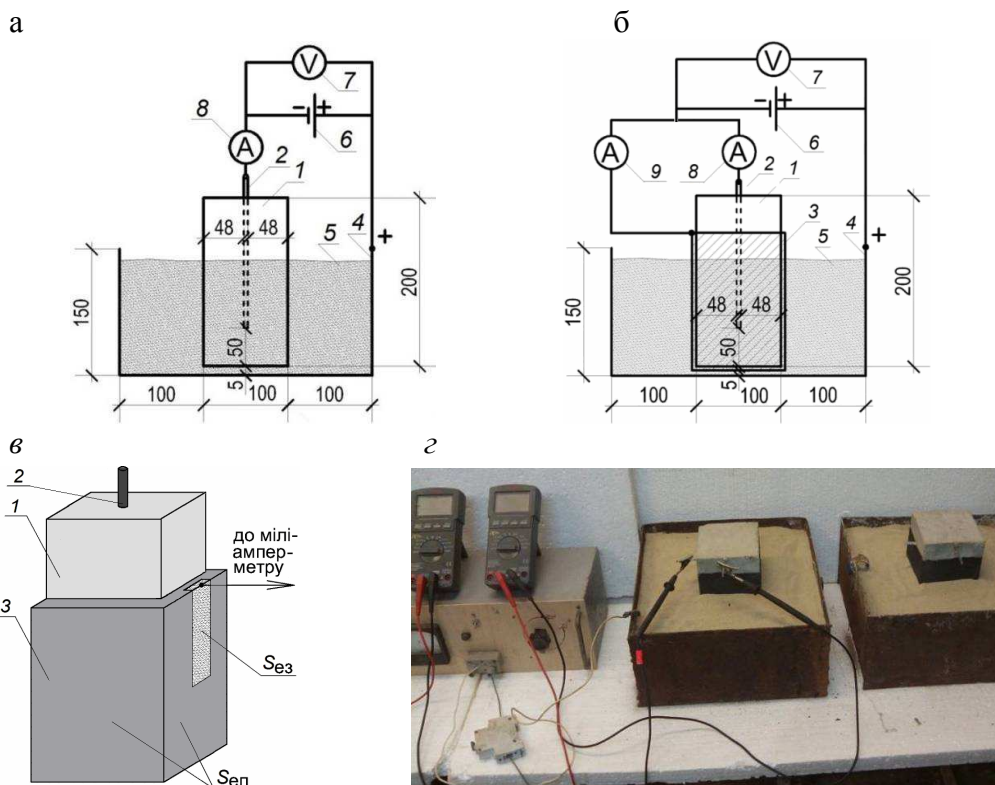


Рис. 3. Установа для експериментального дослідження ефективності екранів із електропровідних композицій для захисту споруд від електрокорозії:  
*а, б, в* – схема установки з контрольним зразком (моделлю споруди) без екрана (*а*) і з досліджуваним зразком (моделлю споруди) з екраном із електропровідної композиції (*б, в*); *г* – вигляд експериментальної установки; *1* – бетон моделі; *2* – арматурний стержень моделі; *3* – захисний екран (покриття); *4* – металева ємність; *5* – зволожений пісок; *б* – джерело струму; *7* – вольтметр; *8* – міліамперметр для вимірювання сили струму, що протікає крізь бетон і арматуру  $I_{аб}$ ; *9* – міліамперметр для вимірювання сили струму, що протікає крізь захисний екран і ґрунт  $I_{зе}$

**Результати дослідження та їх обговорення.** На рис. 4 і 5 наведено результати дослідження ефективності заземлених екранів із електропровідних композицій з наповнювачем – графітовим порошком на основі портландцементу (рис. 4) і отвердженого кремнійфтористим натрієм силікату натрію (рис. 5). Зокрема, залежності від часу з моменту водонасичення ґрунту  $t$  за різних відсотків площі контакту сталевого електрода заземлення з екраном із електропровідної композиції  $x$  наведені: сили струму крізь арматуру і бетон моделі  $I_{аб}$  – на рис. 4, *а, в* і 5, *а, в*; сили струму крізь захисний екран  $I_{зе}$  – на рис. 4, *б, г* і 5, *б, г*; зміни сили струму крізь арматуру і

бетон моделі із захисними екранами у порівнянні з моделлю без захисту  $\Delta I_{аб}$  – на рис. 4, *д* і 5, *д*. На рис. 4, *е* і 5, *е* наведено залежності сили струму  $I_{аб}$  та  $I_{зе}$  від відсотка площі контакту сталевого електрода заземлення з екраном  $x$ .

Як бачимо із рис. 4, *а-г* і 5, *а-г*, у разі сухого стану ґрунту (на початку експерименту за  $t = 0$ ) сила струму  $I_{аб}$  і  $I_{зе}$  мінімальна як у моделі споруди без захисту, так і у моделях із захисними екранами. Після водонасичення ґрунту сила струму зростає втричі.

Як видно із рисунків, захист заземленим екраном забезпечує зниження сили струму крізь бетон і арматуру моделі

$I_{аб}$  (рис. 4, а, в, д і 5, а, в, д) за рахунок протікання частини струму  $I_{зе}$  крізь

захисний екран (рис. 4, б, г, д і 5, б, г, д).

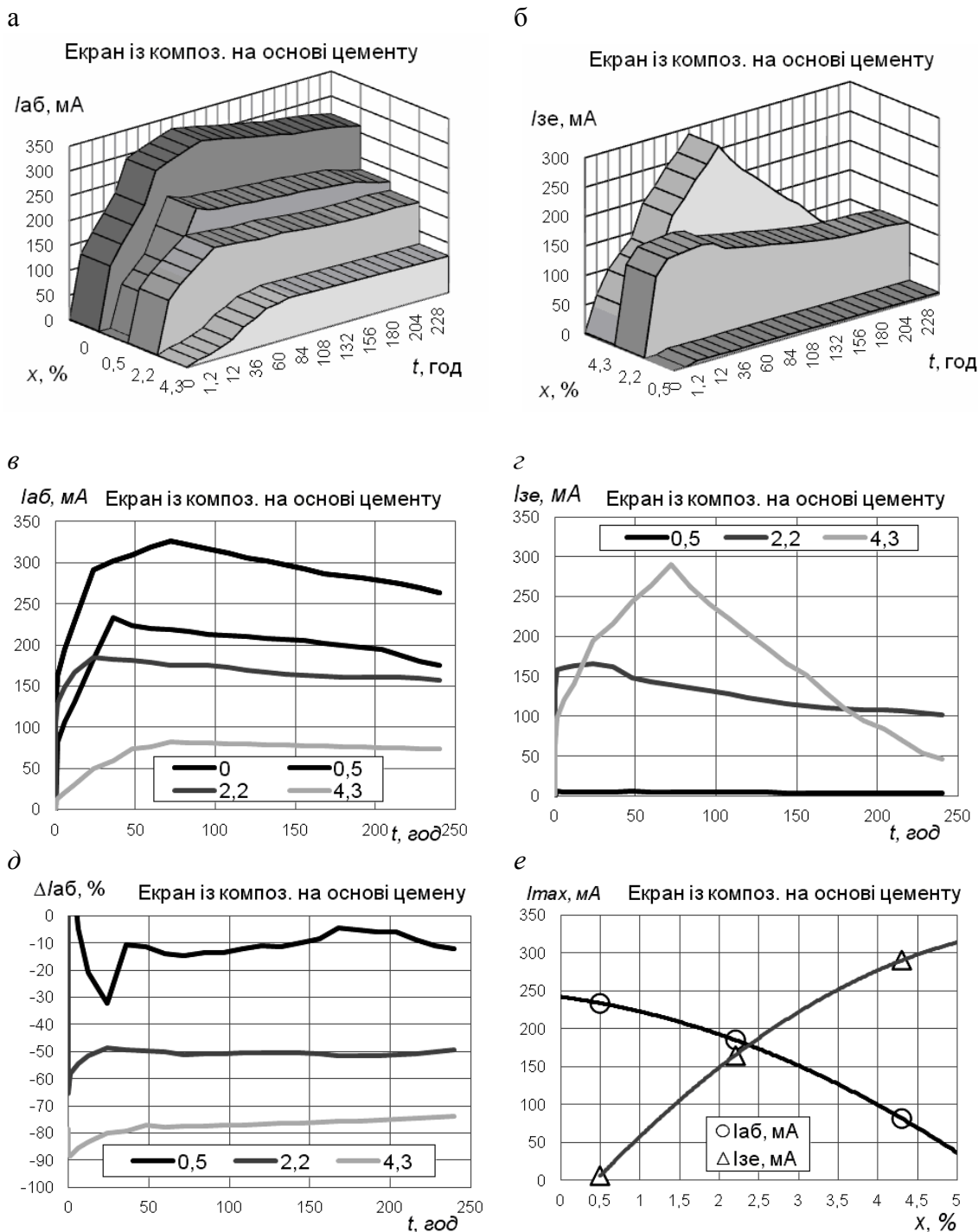


Рис. 4. Залежності показників ефективності заземлених екранів із електропровідної композиції на основі портландцементу за різних відсотків площі контакту сталевго електрода заземлення з екраном  $x$  (0 – без захисного екрана; 0,5; 2,2; 4,3): а - д – залежності сили струму, що протікає крізь арматуру і бетон моделі  $I_{аб}$  (а, в), сили струму, що протікає крізь захисний екран  $I_{зе}$  (б, г), зміни сили струму, що протікає крізь арматуру і бетон моделі  $\Delta I_{аб}$  від часу з моменту водонасичення ґрунту  $t$ ; е – залежності  $I_{аб}$  та  $I_{зе}$  від відсотка площі контакту електрода заземлення з екраном  $x$

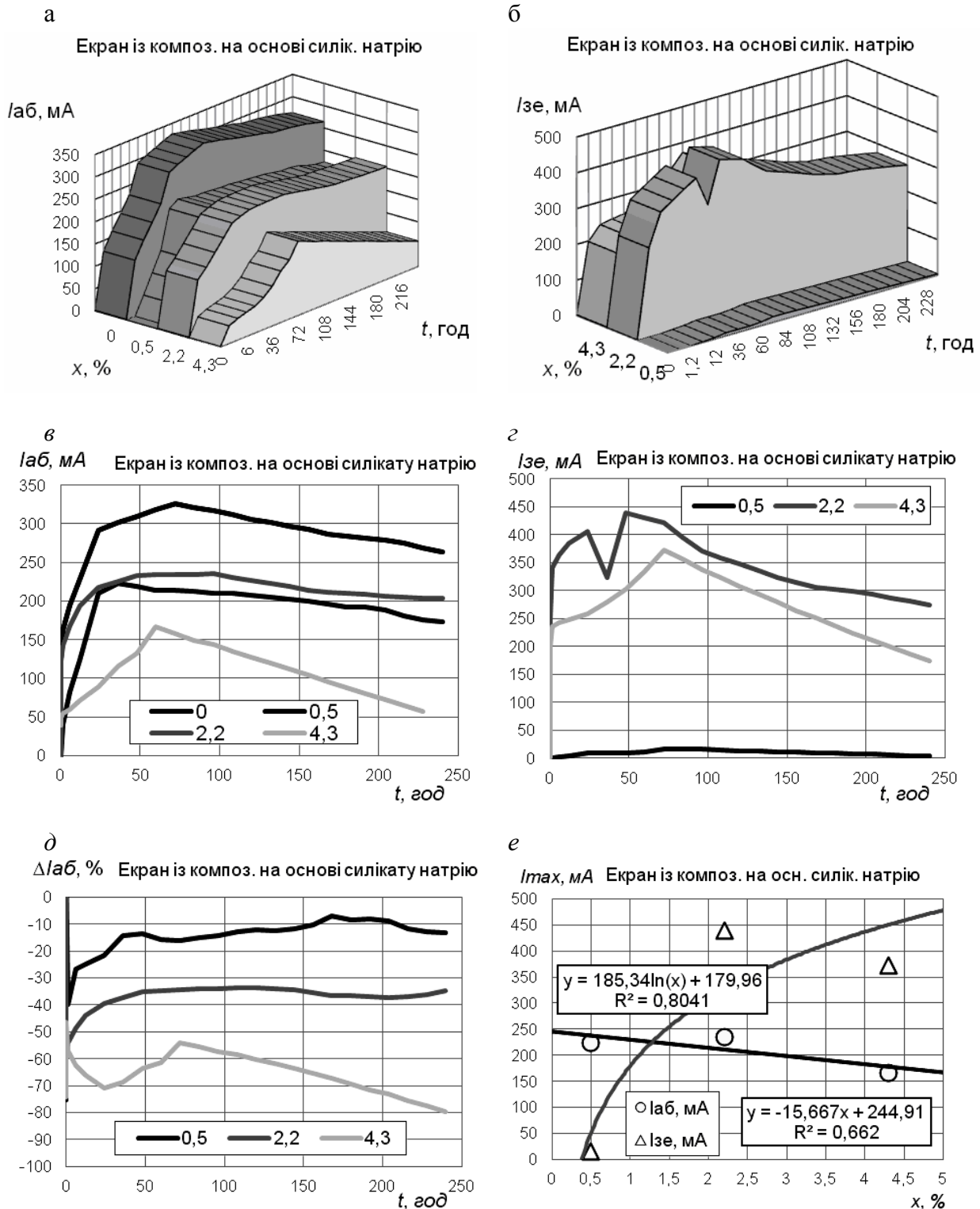


Рис. 5. Залежності показників ефективності заземлених екранів із електропровідної композиції на основі силікату натрію за різних відсотків площі контакту сталевго електрода заземлення з екраном  $x$  (0 – без захисного екрана; 0,5; 2,2; 4,3): а - д – залежності сили струму, що протікає крізь арматуру і бетон моделі  $I_{аб}$  (а, в), сили струму, що протікає крізь захисний екран  $I_{зе}$  (б, г), зміни сили струму, що протікає крізь арматуру і бетон моделі  $\Delta I_{аб}$  від часу з моменту водонасичення ґрунту  $t$ ; е – залежності  $I_{аб}$  та  $I_{зе}$  від відсотка площі контакту електрода заземлення з екраном  $x$



Захисні властивості екрана залежать від відсотка площі контакту сталевго електрода заземлення з ним – зі збільшенням цього відсотка сила струму  $I_{аб}$  знижується, а  $I_{зе}$  зростає (рис. 4, е; 5, е). У разі застосування екрана із композиції на основі портландцементу з відсотком площі контакту електрода заземлення з ним  $x = 0,5\%$  сила струму  $I_{аб}$  знижується на  $\Delta R_{аб} = 10 - 15\%$ ,  $x = 2,2\%$  – на  $50 - 55\%$ ,  $x = 4,3\%$  – на  $75 - 80\%$ , У разі застосування екрана із композиції на основі силікату натрію з  $x = 0,5\%$   $I_{аб}$  знижується на  $\Delta R_{аб} = 10 - 15\%$ ,  $x = 2,2\%$  – на  $35 - 40\%$ ,  $x = 4,3\%$  – на  $65 - 70\%$ .

Це підтверджує ефективність заземлених екранів для захисту конструкцій, наприклад пасажирських платформ, від корозії струмами витоку.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Розроблено методику експериментального дослідження ефективності заземлених екранів із електропровідних силікатних композицій для захисту споруд від електрокорозії струмами витоку, що полягає у порівнянні величини електричного струму, який протікає крізь

арматуру і бетон моделі споруди без захисного екрана  $I_{аб0}$  та моделі споруди із захисним екраном  $I_{аб1}$ , і визначенні величини зниження сили струму крізь бетон і арматуру моделі із захистом  $I_{аб1}$  порівняно з моделлю без захисту  $I_{аб0}$ .

Установлено, що у разі сухого стану ґрунту сила струму як крізь бетон і арматуру мінімальна, як у моделі споруди без захисту, так і у моделях із захисними екранами. Після водонасичення ґрунту сила струму зростає втричі.

Захист заземленим екраном забезпечує зниження сили струму крізь бетон і арматуру моделі  $I_{аб}$  за рахунок протікання частини струму  $I_{зе}$  крізь захисний екран.

Захисні властивості екрана залежать від відсотка площі контакту сталевго електрода заземлення з ним – зі збільшенням цього відсотка сила струму  $I_{аб}$  знижується, а  $I_{зе}$  зростає. У разі застосування заземленого екрана з відсотком площі контакту електрода заземлення з ним до  $4,3\%$  сила струму крізь бетон і арматуру знижується для композиції на основі портландцементу на  $75-80\%$ , на основі силікату натрію – на  $65-70\%$ .

### Список використаних джерел

1. Корнфельд, И. А. Защита железобетонных конструкций от коррозии, вызываемой блуждающими токами [Текст] / И. А. Корнфельд, В. А. Притула. — М.: Стройиздат, 1964. — 73 с.
2. Старосельский, А. А. Электрокоррозия железобетона [Текст] / А. А. Старосельский. — К.: Будівельник, 1978. — 168 с.
3. Котельников, А. В. Блуждающие токи электрифицированного транспорта [Текст] / А. В. Котельников. — М.: Транспорт, 1986. — 278 с.
4. Подольский, В. И. Железобетонные опоры контактной сети. Конструкции, эксплуатация, диагностика [Текст] / В. И. Подольский. — М.: Интекст, 2007. — 152 с.
5. Liu Y.-C. Dynamic Analysis of the Leakage Current Corrosion for the Non-Grounded DC Railway Systems / Y.-C. Liu, E.-C. Chang, J.-L. Shyu, X.-G. Chen // International Journal of Electrical Energy, Vol. 3, No. 4, 2015. - P. 257-261.
6. Plugin A.N. Research of influence of leakage currents and stray currents on railways on buildings and constructions / A.N. Plugin, A.A. Plugin, O. Plugin, O. Dudin, O. Borzyak // 17 Internationale Baustofftagung (17`Ibausil): Tagungsbericht. - Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, 2009. - Band 2. - P. 1151-1156.



7. Пługин, Ал. А. Исследование влияния величины напряжения пульсирующего однонаправленного постоянного электрического поля на электрокоррозию бетона [Текст] / Ал.А. Пługин // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 115. – С. 56-67.
8. Електричні впливи на бетон (електрообробка та захист від електрокорозії бетонів, виробів і конструкцій із них) [Текст] / О. А. Пługін, О. С. Борзяк, В. Б. Мартинова [та ін.]; за ред. А. А. Пługіна і М. М. Зайченка. – Харків: Форт, 2013. – 300 с.
9. Воздействие токов утечки на конструкции пассажирских платформ, расположенных вблизи электрифицированных постоянным током участков пути [Текст] / О. С. Борзяк, Д. А. Пługин, О. С. Герасименко [и др.] // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА; ХОТВ АБУ, 2014. – № 1 (75). – С. 80-85.
10. Защита металлических и железобетонных сооружений железнодорожного транспорта от электрокоррозии с помощью диодного заземления [Текст] / Ал. А. Пługин, О. С. Борзяк, А. А. Дудин [и др.] // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. — Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 127. — С. 204-212.
11. Plugin D. Research into the effectiveness of grounded screens of electroconductive silicate compositions for electrocorrosion protection / D. Plugin, V. Kasyanov, V. Konev, S. Nesterenko, A. Afanasiev // Matec Web of Conferences 116, 01012 (2017). — DOI: 10.1051/mateconf/201711601012.
12. Композиція проникної дії для гідроізоляції та захисту від електрокорозії [Текст] : пат.113600 UA МПК 2016.01 С 04 В 28/00, С 04 В 41/65, С 04 В 111/90, С 04 В 111/20, С 04 В 111/72 / А.А. Пługін, Т.О. Костюк, О.Ю. Прошин, О.А. Пługін, Д.О. Бондаренко, В.В. Касьянов, О.С. Борзяк, В.В. Конєв; заявник та патентовласник Укр. держ. ун-т залізнич. тр-ту. - № а 2016 02005; заявл. 01.03.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. №3. – 6 с.
13. Електропровідна шпаклювальна композиція [Текст]: заявка на винахід № а2017 02778 / А.А. Пługін, О.А. Пługін, В.В. Касьянов, О.С. Борзяк, В.В. Конєв, Ю.Ю. Савчук, Т.О. Костюк, Д.О. Бондаренко; заявник УкрДУЗТ; заявл. 24.03.2017.

---

Пługін Андрій Аркадійович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівельних матеріалів конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-63.

E-mail: plugin\_aa@kart.edu.ua.

Пługін Олексій Андрійович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-70. E-mail: plugin0785@gmail.com.

Касьянов Володимир Володимирович, інженер кафедри будівельних матеріалів конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-63.

E-mail: kasyanow.vladimir@gmail.com.

Конєв Віталій Васильович, інженер, ПАТ «Укрзалізниця». Тел.: +38 063 461-83-86. E-mail: ukrainoslav@ukr.net.

Пługін Дмитро Артурович, д-р техн. наук, доцент, професор кафедри будівельних матеріалів конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-63.

E-mail: plugin.da@gmail.com.

Andrii A. Plugin, DSc, Professor, Head of Building Materials, Constructions and Buildings Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-63. E-mail: plugin\_aa@kart.edu.ua.

Oleksii A. Pluhin, PhD, Associated Professor, Associated Professor of Structural Mechanics and Hydraulics Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-70. E-mail: plugin0785@gmail.com.

Vladimir Kasyanov, engineer of Building Materials, Constructions and Buildings Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-63. E-mail: kasyanow.vladimir@gmail.com.

Vitalii Konev, engineer, Branch «Pivdenna zaliznytsia» (the railways of Southern) Public Joint Stock Company «Ukrainian Railway» («Ukrzaliznytsia»). Tel.: (063) 461-83-86. E-mail: ukrainoslav@ukr.net,

Dmytro A. Plugin, DSc, Associated Professor, Professor of Building Materials, Constructions and Buildings

Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-63. E-mail: plugin.da@gmail.com.

Стаття прийнята 14.08.2017 р.