

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В БЕТОНЕ, НАХОДИВШЕМСЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

Представил д-р техн. наук, профессор А.А. Плугин

Введение. Практика натуральных наблюдений показала, что воздействие электрического тока на бетонные, железобетонные и каменные конструкции искусственных сооружений, подрельсовых оснований, а также конструкции зданий и сооружений, расположенных вблизи электрифицированных железнодорожных путей вызывает значительные разрушения, особенно при совместном воздействии с проточной водой. На сегодняшний день особое значение указанная проблема приобретает в связи с интенсивным расширением электрификации железнодорожного транспорта, расширением сети метрополитенов. При этом увеличиваются темпы электрокоррозионных повреждений элементов верхнего строения пути, железобетонных конструкций мостов, тоннелей, водопропускных труб и др.

Анализ предыдущих публикаций и исследований. Первые исследования электрокоррозионных процессов показали характерные черты, которые были присущи этому виду коррозии: интенсивная коррозия металлической арматуры, являющейся анодом, с последующим развитием трещин в теле бетона. Большинство имеющихся теоретических представлений об электрокоррозионном процессе основываются на гипотезе, высказанной еще в начале XX века и до настоящего времени практически не уточнявшейся: электрокоррозия железобетона – это процесс коррозии арматуры при электрических воздействиях с

последующим разрушением бетона за счет давления продуктов растворения металла [1].

Одним из недостатков современных представлений об электрокоррозии является то, что большинство исследователей считают, что постоянный ток, как и переменный, практически не оказывает влияния на бетон и не вызывает его коррозию. Однако согласно исследованиям, проведенным в УкрГАЗТе [2-4], разрушению подвержены не только арматура железобетонных конструкций, но и бетон в них, а также неармированный бетон и кирпичная кладка.

Нами установлен механизм и разработаны физико-математические модели действия внешнего электрического поля на фазовый состав цементного камня и прочность бетона [5-7]. Кроме того, разработана оригинальная лабораторная установка, которая имитирует реальный режим попадания электрического потенциала на бетон [8].

Целью исследования являлось проведение комплексных лабораторных физико-химических исследований, подтверждающих или уточняющих разработанный механизм электрокоррозии бетона.

Методы исследования. Для проверки теории о выносе продуктов гидратации цемента из бетона под влиянием пульсирующего однонаправленного электрического потенциала (ПОЭП) проведены лабораторные исследования с помощью специально разработанного и

изготовленного комплекса оборудования [8]. Лабораторная установка включает: ячейки для обработки током и проточной водой бетонных образцов-кубов ($10 \times 10 \times 10$ см), блок управления с подачей разности электрических потенциалов 40 В на испытуемые образцы, измерительные приборы. Методика проведения исследований описана в работе [8]. Образцы бетона: основные, которые подвергались воздействию ПОЭП в течение 3600 ч, К1 – контрольные образцы, находившиеся в проточной воде, К2 – контрольные образцы, находившиеся в стоячей воде.

Фазовый состав цементного камня в бетоне (исходном и подвергшемся воздействию электрического потенциала) определялся с помощью физико-химических методов: рентгенографического (РГ) и инфракрасной спектроскопии (ИКС). Макро- и микроструктуру цементного камня и бетонных образцов изучали методом

люминесцентной дефектоскопии и оптической микроскопии.

Результаты исследований

Исследования с помощью метода инфракрасной спектроскопии. На ИК-спектрах проб цементного камня из бетона, подвергнутого влиянию ПОЭП (рис. 1), полосы поглощения, характерные для гидроксида кальция (около 3620 см^{-1}) или для других кристаллогидратов, не проявились. Сильно уменьшилась широкая полоса в области высокоосновных и среднеосновных гидросиликатов кальция ($800 \div 1100 \text{ см}^{-1}$) и проявились полосы, характерные для самых низкоосновных гидросиликатов кальция: тоберморитоподобного $5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 1635, 1206, $1173 \div 1027$, $675 \div 610 \text{ см}^{-1}$; ксонотлита $5\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – $670 \div 610 \text{ см}^{-1}$, остальные совпадали с тоберморитоподобными гидросиликатами кальция.

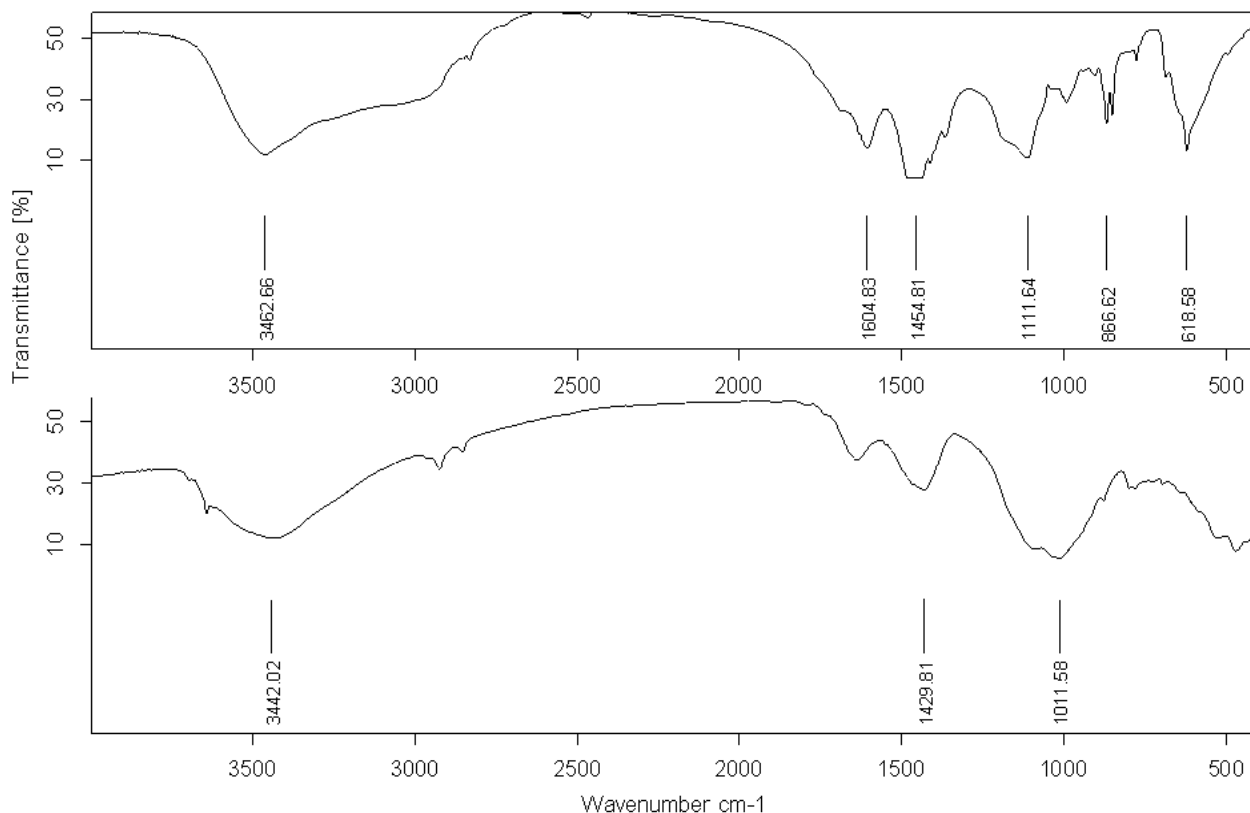


Рис. 1. Инфракрасные спектры поглощения цементного камня после 3600 ч циклического электровоздействия при напряжении 40 В (верхний спектр) и некорродированного цементного камня (нижний спектр)

Рентгенографические исследования.

На рентгенограмме цементного камня из бетона, подвергнутого влиянию ПОЭП (рис. 2), линии C_3S – 0,275 нм (2,78 Å); 0,261 нм (2,61 Å) и C_2S – 0,219 нм (2,19 Å) практически отсутствуют. Это свидетельствует о полном удалении выщелачиванием из цементного камня бетона негидратированных частиц цемента.

Наряду с этим на рентгенограммах отсутствуют также линии, характерные для кристаллогидратов: гидроксида кальция $Ca(OH)_2$ – 0,492 нм (4,92 Å); 0,263 нм (2,63 Å); 0,192 нм (1,92 Å); гидромосульфатоалюмината кальция $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 19H_2O$ – 0,89 нм (8,9 Å); 0,79 нм (7,9 Å); 0,446 нм (4,46 Å); гидроалюмината кальция $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$ – 0,79 нм (7,9 Å).

Вместе с тем, рентгенограмма содержит интенсивные линии кальцита $CaCO_3$ – 0,304; 0,291; 0,201; 0,188 нм (3,04; 2,291; 2,099; 1,915; 1,879 Å). Это свидетельствует также о выщелачивании из бетона кристаллогидратных продуктов гидратации. При выносе из бетона гидроксида

кальция в поверхностных слоях разрушающегося бетона образовывался кальцит.

Однако на рентгенограммах проявляются линии, характерные для очень низкоосновных гидросиликатов кальция типа ксонотлита $6CaO \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$ – 0,705 нм (7,05 Å); 0,365 нм (3,65 Å). Остальные возможные гидросиликаты кальция на рентгенограммах не проявились из-за их рентгеноаморфности.

Исследование микроструктуры бетона с помощью оптической микроскопии. Оптико-микроскопические снимки ОМС при увеличении $\times 100$ представлены на рис. 3. Как видим, в верхней зоне заметных отличий в структуре бетонных образцов не наблюдается.

В нижней зоне, контактирующей с водой, структуры образцов К2 и К1 также заметно не отличаются, однако в основном образце достаточно четко видно отсутствие продуктов гидратации на значительной части поверхности щебня (как в разрезе, так и на поверхности).

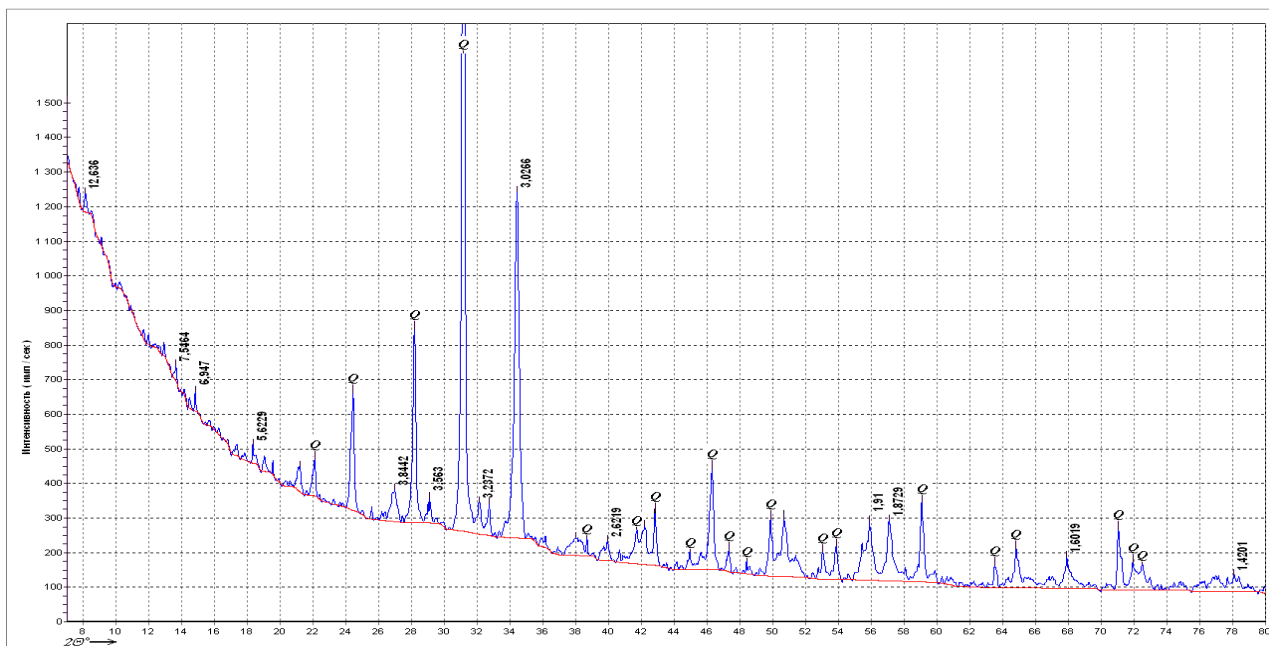


Рис. 2. Рентгенограммы цементного камня после 3600 ч циклического электрического воздействия

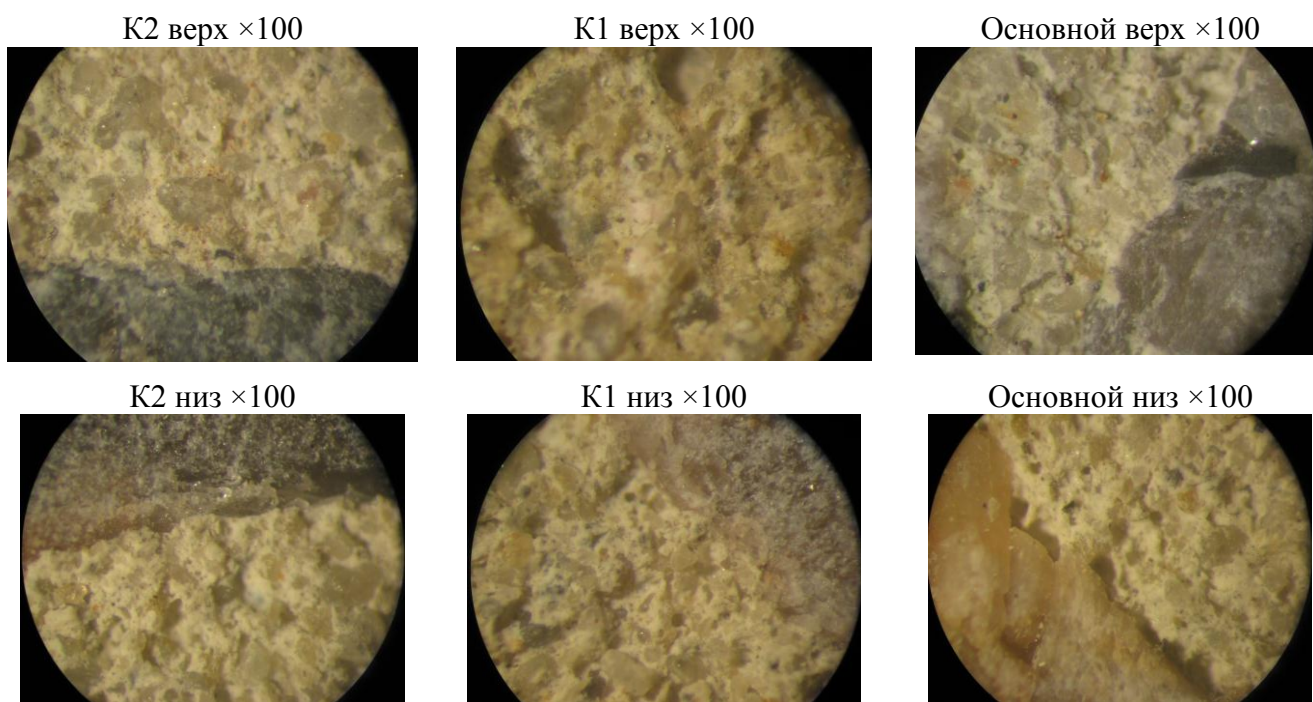


Рис. 3. Оптико-микроскопические снимки ОМС

Отсутствие видимых разрушений на образце К1, находившемся в проточной воде, по сравнению с К2, находившемся в стоячей воде, свидетельствует о том, что выщелачивание бетона в проточной воде имеет поверхностный характер, толщина слоя выщелачивания не превышает 1 см за 3600 ч нахождения образца в воде.

Исследование макроструктуры бетона с помощью люминесцентной дефектоскопии. Макроструктура бетонных образцов исследована с помощью люминесцентной дефектоскопии. Фотографии этих образцов представлены на рис. 4. Исследования проводились с помощью люминесцентного состава – органического люминофора желто-зеленого свечения.

На поверхности образцов К1 и К2 люминофор распределен равномерно. В основном образце на контакте со щебнем наблюдается повышенная концентрация люминофора, трещин на контакте цементного камня с зернами щебня больше, чем на образцах К2 и К1.

Таким образом, результаты физико-химических исследований показали, что

при длительном воздействии пульсирующего постоянного тока и контакте с водой кристаллогидраты цементного камня полностью выщелачиваются, сохраняются лишь гидросиликаты кальция очень низкой основности типа тоберморита и ксонотлита.

На основе проведенных ранее исследований и разработанной количественной теории прочности цементного камня и бетона [9] оценить остаточную прочность цементного камня

$R_{ЦК}^{ЭК}$ можно в соответствии с уравнением

$$R_{ЦК}^{ЭК} = 14,2(1 - 2,34A^{ЭК}),$$

где $A^{ЭК}$ – доля кристаллогидратов, растворившихся за счет электрокоррозии, которая определяется по соотношению количества кристаллогидратов в цементном камне поврежденного и неповрежденного бетона.

Рассмотрим пример количественного влияния электрокоррозии на прочность бетона. Для выявления основного фактора

и механизма разрушений мостовой опоры из бутовой кладки с каменной облицовкой из бутовой кладки (с глубины 1,5 м) были отобраны образцы-керна с помощью сверлильной установки, которые подвергались физико-механическим и физико-химическим исследованиям в лаборатории.

На основании анализа интенсивности основных пиков рентгенограмм и ИК-

спектров цементного камня, отобранного из раствора бутовой кладки опоры, установлено, что $A^{\text{ЭК}}$ составляет 0,35. Это позволило оценить ориентировочно остаточную прочность цементного камня $R_{\text{ЦК}}^{\text{ЭК}}$ на растяжение и раствора бутовой кладки $R_{\text{Б}}$ на сжатие в месте отобранного образца по приведенному уравнению

$$R_{\text{ЦК}}^{\text{ЭК}} = 14,2(1 - 2,34A^{\text{ЭК}}) = 14,2(1 - 2,34 \cdot 0,35) = 2,57[\text{МПа}].$$

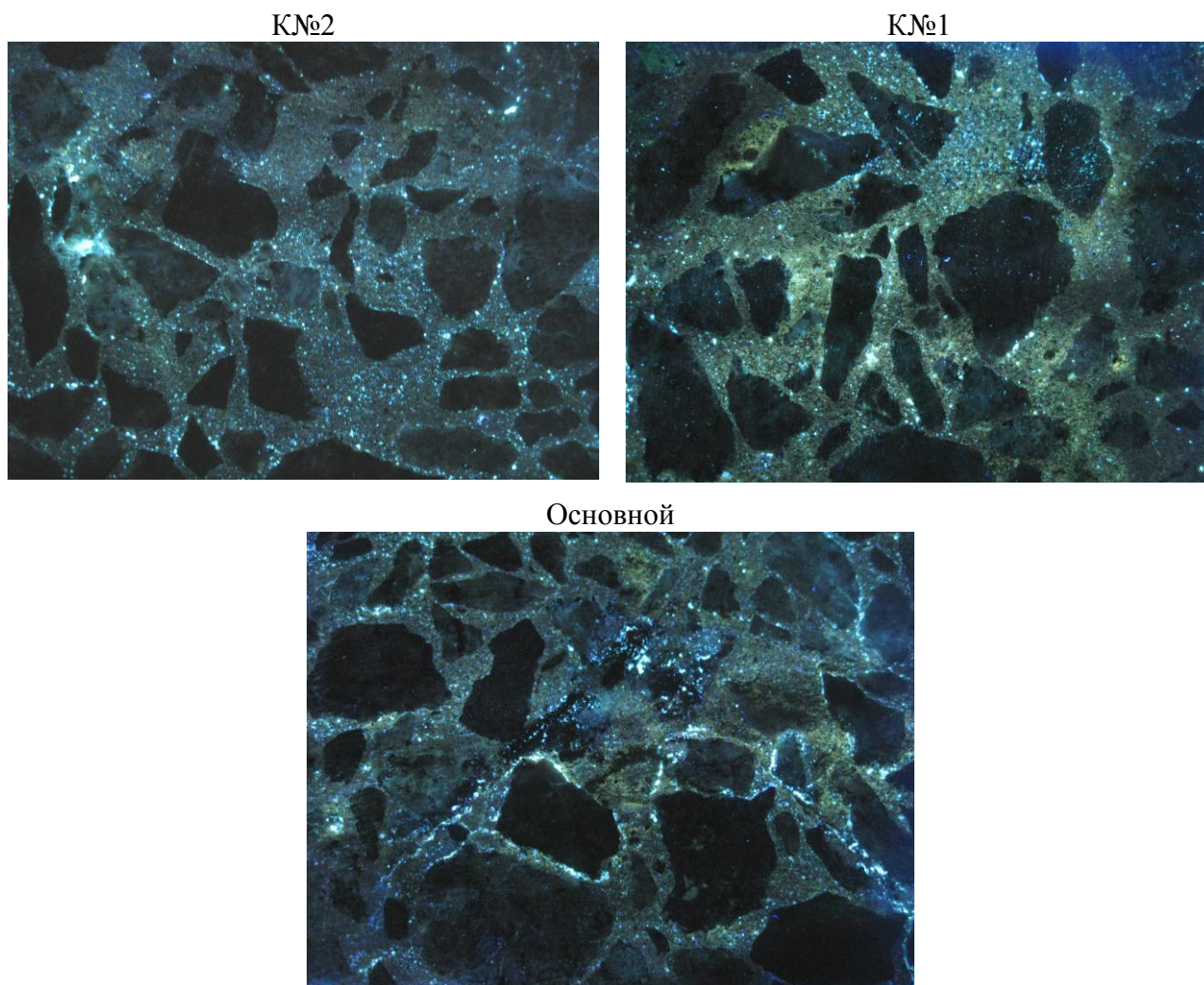


Рис. 4. Люминесцентная дефектоскопия

Согласно работе [9] соотношение $\frac{R_{\text{Ц}}}{R_{\text{ЦК}}} \approx 2$.

$$R_B = R_{Ц} \cdot A \left(\frac{Ц}{B} - 0,5 \right) = \frac{25,7}{2} \cdot 0,6(1,75 - 0,5) = 9,6 \text{ [МПа]},$$

что соответствует данным физико-механических испытаний.

Выводы и перспективы использования. Экспериментальные исследования подтвердили корректность разработанных представлений о механизме электрокоррозии бетона в бетонных и железобетонных конструкциях, эксплуатируемых в обводненных условиях

на участках пути, электрифицированных постоянным током.

Результаты исследования могут быть использованы для проведения корректной оценки электрокоррозионного состояния бетона в конструкциях. Результаты физико-химических исследований при обследовании можно применить для оценки остаточной прочности и долговечности конструкций.

Список литературы

1. Старосельский, А. А. Коррозия и долговечность железобетона в условиях электрических воздействий [Текст]: дис... д-ра техн наук: 05.23.05 / Старосельский Александр Александрович. – М., 1989. – 282 с.
2. Электрокоррозия железобетонных мостов и других искусственных сооружений [Текст] / А.Н. Плагин, А.А. Скорик, А.А. Плагин и др. // Залізничний транспорт України. – 2004. – № 1. – С. 11-13.
3. Основные факторы трещинообразования и разрушения опор мостов через реки на электрифицированных участках железных дорог [Текст] / А.Н. Плагин, А.А. Плагин, С.В. Мирошниченко и др. // Дороги і мости: зб. наук. праць. – К., 2007. – Вип. 7. – Т. II. – С. 121-127.
4. Исследование влияния токов утечки и блуждающих токов на здания и сооружения, расположенные возле электрифицированных железнодорожных путей [Текст] / А.Н. Плагин, Ал.А. Плагин, О.С. Борзяк и др. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: Тематичний випуск «Хімія, хімічна технологія та екологія». – Харків, 2009. – № 40. – С. 88-104.
5. Электроосмотический перенос как фактор разрушения железобетонных и каменных опор железнодорожных мостов на водотоках [Текст] / А.Н. Плагин, А.А. Плагин, С.В. Мирошниченко и др. // Зб. наук. праць ЛНАУ: Серія «Технічні науки». – Луганськ, 2007. – № 71 (94). – С. 189-196.
6. Механизм электрокоррозии бетонных конструкций пульсирующим однонаправленным блуждающим током или током утечки [Текст] / А.Н. Плагин, А.А. Плагин, С.В. Мирошниченко и др. // Науковий вісник будівництва. – Харків, 2007. – Вип. 42. – С. 106-111.
7. Борзяк, О.С. Развитие представлений о механизме электрокоррозии бетона в обводненных конструкциях [Текст] / О.С. Борзяк // Науковий вісник будівництва. – Харків, 2010. – Вип. 45. – С. 100-106
8. Research of influence of leakage currents and stray currents on railways on buildings and constructions / A. N. Plugin, O. Plugin, O. Borzyak [та ін.]. // 17 Internationale Baustofftagung, 23-26 September 2009, Bundesrepublik Deutschland: Tagungsbericht. – Weimar, 2009. – Band 2. – P.1151-1156.

9. Уточнение количественной теории прочности бетона и закона водоцементного отношения [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.С. Борзяк, О.А. Калинин // Проблемы надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті. – Харків, 2009. – Вип. 109. – С. 8-37.

Ключевые слова: электрокоррозия, цементный камень, рентгенофазовый анализ, инфракрасная спектроскопия, оптическая микроскопия, люминесцентная дефектоскопия.

Аннотації

Наведено результати лабораторних досліджень бетонних зразків, які перебували в проточній воді під впливом пульсуючого односпрямованого потенціалу, і контрольних зразків. Фазовий склад цементного каменю в бетоні (основному і тому, що піддавався впливу електричного поля) визначався за допомогою фізико-хімічних методів: рентгенографічного (РГ) та інфрачервоної спектроскопії (ІКС). Структура цементного каменю бетонних зразків вивчалася методом люмінесцентної дефектоскопії та оптичної мікроскопії.

Проведені дослідження підтвердили, що проточна вода і струм, обумовлений пульсуючим односпрямованим електричним потенціалом, викликають сильне вилугування цементного каменю в бетоні, особливо при їх спільній дії. При цьому проточна вода призводить до вилугування в поверхневому шарі бетону, а пульсуюча односпрямована напруга – глибинне вилугування по всій товщині бетону (конструкції).

Приведены результаты лабораторных исследований бетонных образцов, находившихся в проточной воде под воздействием пульсирующего однонаправленного потенциала, и контрольных образцов. Фазовый состав цементного камня в бетоне (основном и подвергшемся воздействию электрического поля) определялся с помощью физико-химических методов: рентгенографического (РГ) и инфракрасной спектроскопии (ИКС). Структура цементного камня бетонных образцов изучалась методом люминесцентной дефектоскопии и оптической микроскопии.

Проведенные исследования подтвердили, что проточная вода и ток, обусловленный пульсирующим однонаправленным электрическим потенциалом, вызывают сильное выщелачивание цементного камня в бетоне, особенно при их совместном действии. При этом проточная вода приводит к выщелачиванию в поверхностном слое бетона, а пульсирующее однонаправленное напряжение – глубинное выщелачивание по всей толщине бетона (конструкции).

The results of laboratory tests of concrete samples that were in the running water under the influence of a pulsating unidirectional potential and control samples. The phase composition of cement in concrete (the source and subjected to an electric field) was determined by means of physico-chemical methods: X-ray (RG) and infrared spectroscopy (IR). The structure of cement concrete specimens was studied by fluorescence microscopy and optical inspection.

Studies have confirmed that running water and the current due to the pulsating unidirectional electrical potential to cause a strong leaching of cement paste in concrete, especially when their joint action. At the same time running water leads to leaching of the surface layer of concrete, and a pulsating unidirectional voltage - deep leaching over the entire thickness of the concrete (construction).