

УДК 691.32

*Канд. техн. наук Ал.А. Плугин,
аспиранты А.А. Забияка., В.В. Перестюк,
соискатель С.Г. Нестеренко,
д-р техн. наук А.А. Плугин*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Актуальность темы. Исследования влияния постоянного электрического поля на бетон и железобетон в ХИИТе – УкрГАЗТе проводятся с 1960-х гг. по настоящее время. В результате этих исследований защищен ряд диссертаций [1, 2, 3]. А.А. Старосельский [1] установил, что при приложении внешнего постоянного электрического поля в бетоне в результате сил притяжения или отталкивания заряженных частиц внутри капилляров цементного камня его полюсами происходят процессы массопереноса. В результате более поздних исследований [2, 3, 4] было установлено, что процессы массопереноса при обводненности цементного камня и бетона приводят к их разрушению. Был раскрыт и подтвержден независимыми физико-химическими и физико-механическими методами исследований механизм такого разрушения. В результате натуральных экспериментов подтверждено наведение электрических потенциалов на поверхность бетона конструкций и сооружений, находящихся

вблизи источника постоянного тока – электрифицированного рельсового транспорта, городского электротранспорта, трансформаторных подстанций, электродвигателей различных механизмов, гальванических цехов и т. п. Было установлено, что наиболее разрушительным для бетона является однонаправленное пульсирующее электрическое поле, которое возникает, например, при проходе электротранспорта вблизи бетонной или железобетонной конструкции [4]. При этом в условиях обводнения под действием внешнего электрического поля в бетоне происходит не только процесс переноса ионов, а и их вынос за пределы конструкции, откуда они уносятся далее, например, потоком воды. Данный процесс был впервые интерпретирован как электрокоррозия бетона.

Также было установлено, что с момента начала воздействия постоянного электрического поля на бетон наблюдается процесс его поляризации, обусловленный перемещением катионов и анионов

диффузної частини подвійних електричних шарів до протилежно заряджених полюсів зовнішнього джерела електричного поля. Поляризація відбувається поступово і через певний час, залежний від різних факторів, час встановлюється. При цьому всередині конструкції утворюються дві протилежно заряджені зони – полюси, в яких утворюються скоплення відповідних іонів. В роботах [2, 5] було передбачено, що такі скоплення одноіменно заряджених іонів можуть призвести до зниження міцності бетону і тріщиностійкості конструкцій внаслідок виникнення додаткових розтягуючих напружень, обумовлених кулоновими силами відштовхування між ними. Однак тільки від таких напружень бетон руйнуватися не може, – може лише зменшитися його міцність. Т. е. руйнівний вплив електричного поля і струму відбувається лише при одночасному з ним прикладанні зовнішнього навантаження. Практично в умовах одночасного впливу постійних і тимчасових навантажень і зовнішнього електричного поля можуть знаходитися бетонні, залізобетонні, каменні конструкції штучних споруд залізничного транспорту. Зниження міцності бетону конструкції, не враховане при розрахунках за групами граничних станів, – небезпечний фактор, який може призвести не тільки до передчасних ремонтів, але і до раптового руйнування конструкції. В зв'язі з викладеним дослідження впливу електричного постійного поля на міцність цементного каменю і бетону є актуальними.

Теоретичні передумови для розробки методики досліджень

1. В роботах [2, 3] встановлено, що процес поляризації відбувається поступово і для водонасичених бетонних зразків-кубів з розміром ребра

100 мм завершується приблизно через 1–3 хвилини після накладання зовнішнього електричного поля. Зразки для експериментальних досліджень прийняли повністю водонасиченими. Час від початку прикладання електричного поля до початку прикладання навантаження на зразок прийняли рівним 2 хвилини.

2. Зміна міцності при прикладанні електричного поля може бути незначальною, тому для підвищення точності експерименту застали не випробування на стиск зразків-кубів, а випробування на вигин зразків-балочок розміром 160×40×40 мм, передбачивши, що надлишковий заряд в їх розтягнутій зоні буде впливати на зниження міцності на вигин, а також значальна кількість зразків в кожній серії.

3. Для досліджень прийняли цементно-піщаний розчин складу, відповідного розчинної частини бетону з розрахунковою міцністю 10 МПа і бетону оптимального складу [6]. Склади бетону наведені в роботі [2].

4. Для створення електричного поля в бетоні застали електроди з нержавіючої сталі, різниця потенціалів між якими прийняли 40 В. Густина електричного контакту електродів з бетоном забезпечували тканиною, змоченою насиченим водним розчином мідного купоросу.

Обладнання і матеріали: обладнання і оснастка для виготовлення і випробування зразків-балочок розміром 160×40×40 мм за ДСТУ EN 196-1:2007 [7], включаючи лабораторну пропарочну камеру і преси гідравлічні 2,5 т з оснасткою для їх випробування на вигин і стиск; джерело живлення постійного струму; цифровий мультиметр; електроди з нержавіючої сталі; провід електричний; тканина хлопчатобумажна; насичений розчин мідного купоросу; матеріали для виготовлення зразків – портландцемент ПЦ ІІ А/Ш-400; пісок

кварцевый с модулем крупности 1,1; добавка-суперпластификатор нафталин-формальдегидного типа СП-1; вода водопроводная.

Методика испытания. Образцы-балочки из цементно-песчаного раствора размером 160×40×40 мм изготавливали и испытывали по методике [7]. Составы раствора приняли соответствующими растворной части бетона с расчётной прочностью 10 МПа и бетона оптимального состава (табл. 1). Образцы изготавливали сериями по 36 шт.: 2 серии – из состава, соответствующего растворной части бетона с расчётной прочностью 10 МПа, 1 серию – из состава, соответствующего растворной части бетона оптимального состава, всего 108 шт. После формования образцы

подвергали тепловлажностной обработке и водонасыщали до постоянной массы.

Каждую серию образцов подвергали испытанию на изгиб – 18 образцов без воздействия электрического поля, 18 – при воздействии электрического поля с разностью потенциалов 40 В. Электрическое поле создавали с помощью накладываемых на образец электродов-пластин, нижнего – сплошного, верхнего – составного из двух половинок (рис. 1, 2). Схема расположения электродов предполагала их электрическую изоляцию от деталей прессы для исключения короткого замыкания. Схема испытания образцов представлена на рис. 2. После испытания образцов-балочек на изгиб их половинки испытывали на сжатие.

Таблица 1

Составы цементно-песчаного раствора для изготовления образцов-балочек

Компонент	Расход, кг/м ³ , для состава:	
	с расчетной прочностью 10 МПа	оптимального
Цемент	3308	1047
Песок	1319	805
Вода	396	358
С-3	–	3,35

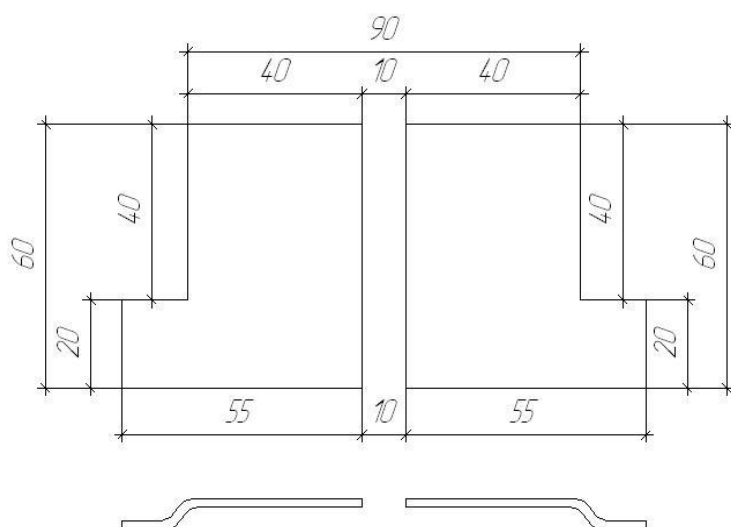
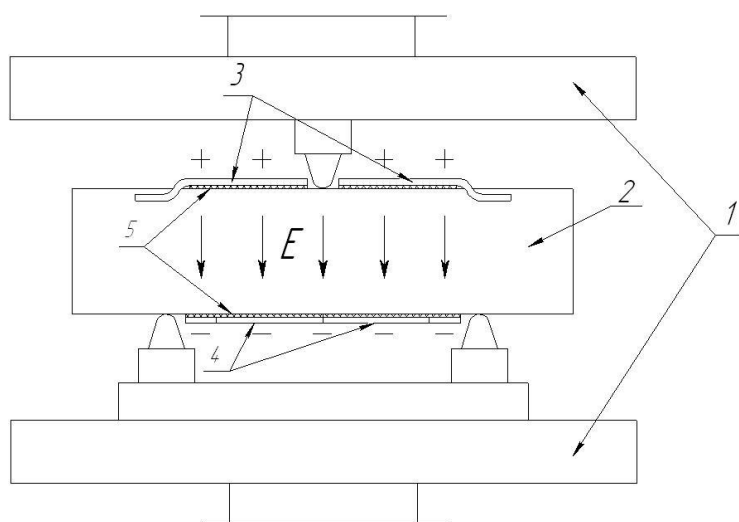


Рис. 1. Верхний составной электрод из нержавеющей стали для создания электрического поля в образце

Результаты экспериментальных исследований. По результатам испытаний [8] был выполнен статистический анализ по ГОСТу 18105 [9] с определением средних значений прочности при изгибе R_f и сжатии R_c и коэффициента вариации прочности при

изгибе ν для каждой серии образцов. Результаты приведены в табл. 2, на гистограммах распределения прочности (рис. 3), характеризующими наряду с коэффициентом вариации прочности разброс результатов испытаний, а также на рис. 4.

а)



б)



Рис. 2. Испытание образцов на изгиб при воздействии внешнего электрического поля: а – схема испытания: 1 – плиты пресса; 2 – образец-балочка; 3 – составной электрод «+»; 4 – электрод «-»; 5 – ткань, пропитанная насыщенным раствором медного купороса; б – разрушенный в результате испытания образец

Таблица 2

Результаты испытаний образцов-балочек из раствора, соответствующего растворной части бетона с расчётной прочностью 10 МПа (серии №№ 1 и 2) и бетона оптимального состава (серия № 3)

№ серии (состав)	Показатель	Ед. изм.	Величина при разности потенциалов		Изменение величины в результате воздействия поля, %
			0 В	40 В	
1 (10 МПа)	Прочность при изгибе R_f	МПа	1,76	2,18	+23,9
	Прочность при сжатии R_c	МПа	8,58	9,64	+12,4
	Коэффициент вариации прочности при изгибе ν	%	19,91	11,92	
2 (10 МПа)	Прочность при изгибе R_f	МПа	1,3	1,46	+12,3
	Прочность при сжатии R_c	МПа	6,03	5,9	-2,2
	Коэффициент вариации прочности при изгибе ν	%	12,13	9,53	
3 (Оптим.)	Прочность при изгибе R_f	МПа	5,48	4,82	-13,7
	Прочность при сжатии R_c	МПа	31,44	33,29	+5,9
	Коэффициент вариации прочности при изгибе ν	%	16,25	15,5	

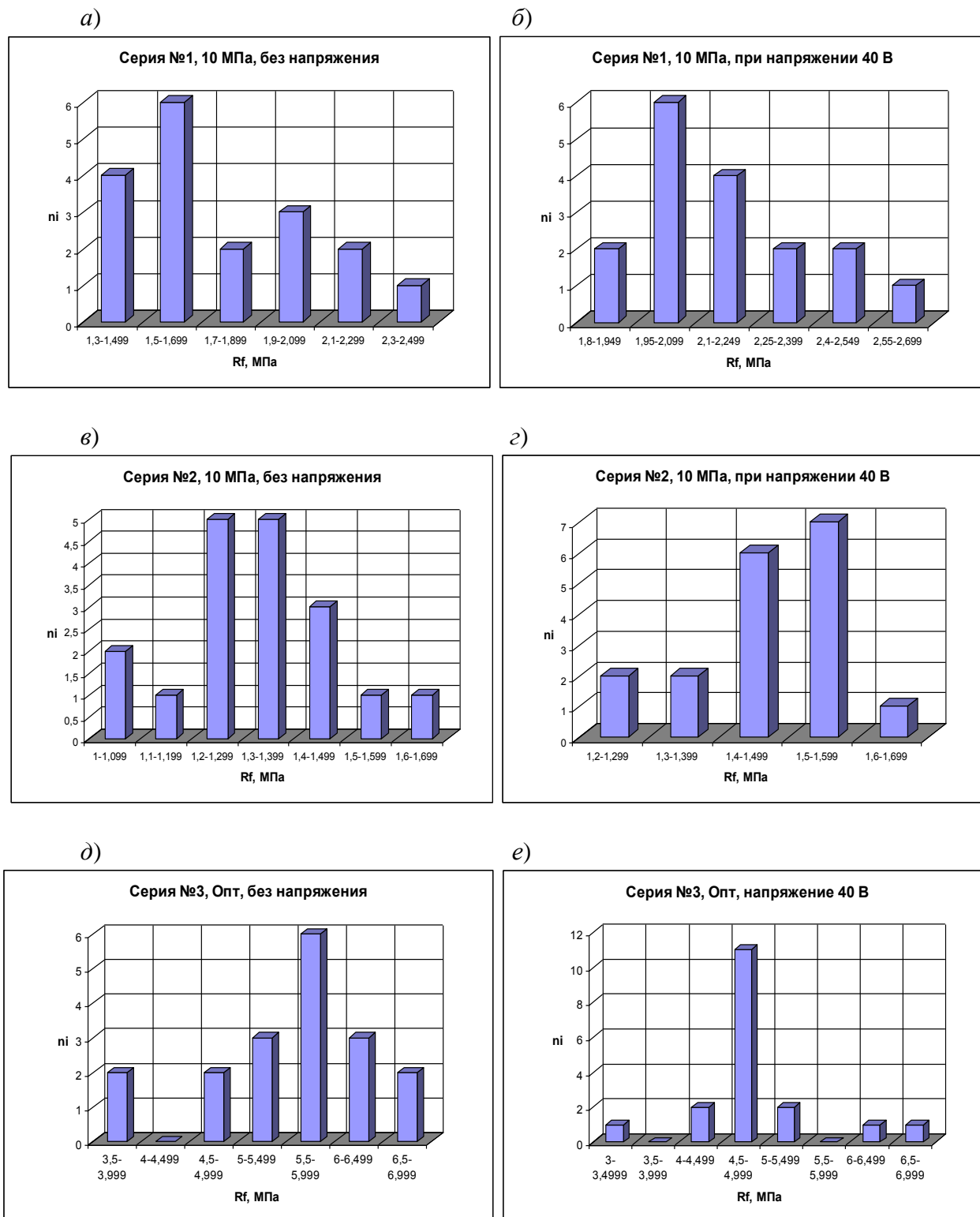


Рис. 3. Гистограмма распределения прочности при изгибе образцов-балочек из раствора, соответствующего растворной части бетона с проектной прочностью 10 МПа (серии №№ 1 и 2; а–г) и бетона оптимального состава (серия № 3; д, е) без воздействия электрического поля (а, в, д) и при воздействии электрического поля с разностью потенциалов 40 В (б, г, е)

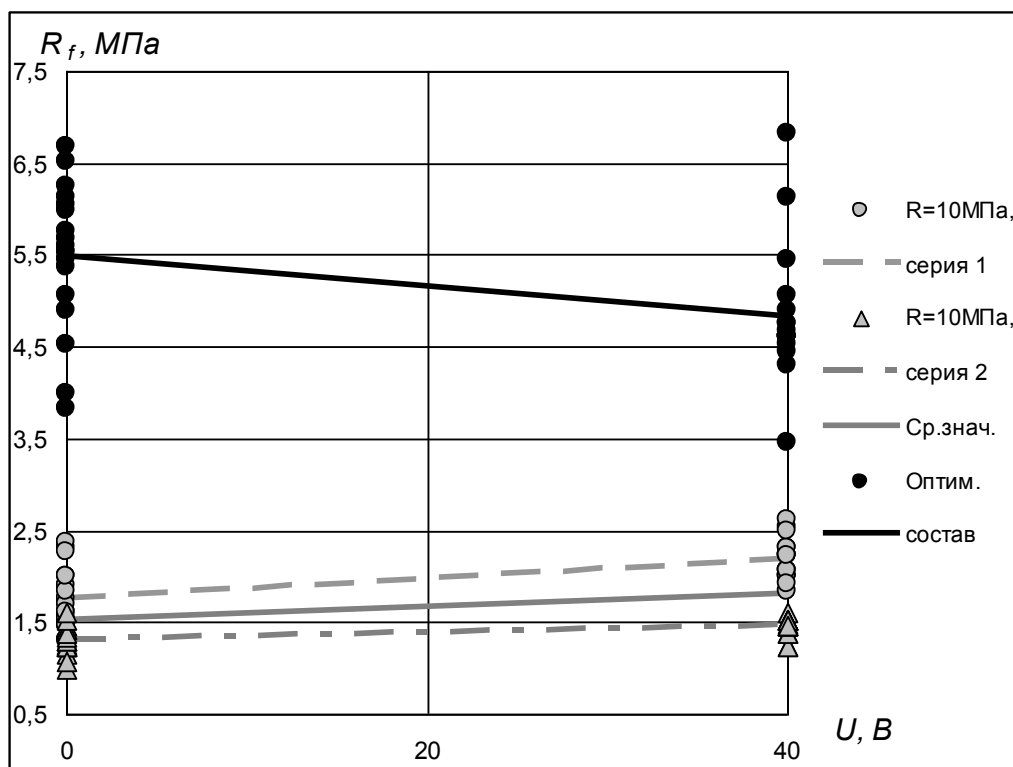


Рис. 4. Залежність сили при вигині R_f образцов-балочек из раствора, соответствующего растворной части бетона с расчётной прочностью 10 МПа ($R = 10$ МПа) и бетона оптимального состава (Оптим.) от наложенной на образец разности потенциалов U

Анализ результатов экспериментальных исследований. Для образцов-балочек серий №№ 1 и 2, изготовленных из раствора, соответствующего растворной части бетона с проектной прочностью 10 МПа, в результате воздействия на них электрического поля наблюдали прирост прочности при изгибе на 23,9 и 12,3% соответственно. Данный состав имеет высокое водоцементное отношение 1,2 и, соответственно, значительную капиллярную пористость. Повышение прочности возможно объяснить следующим образом. При воздействии постоянного электрического поля катионы Ca^{2+} диффузной части двойного электрического слоя гелевых частиц перемещаются из верхней зоны образца в нижнюю. Повышение их концентрации в нижней зоне образца приводит к увеличению электроповерхностного потенциала частиц кристаллогидратов

$Ca(OH)_2$ за счет достройки кристаллической решетки катионами Ca^{2+} , увеличению поверхностной концентрации потенциалопределяющих ионов на частицах портландита, увеличению концентрации единичных электрогетерогенных контактов $Ca^{2+}-H_2O-OH^-$ между потенциалопределяющими ионами гелевых и кристаллогидратных частиц и, как следствие, наблюдаемому возрастанию прочности на изгиб при приложении электрического поля.

Для образцов-балочек серии № 3, изготовленных из раствора, соответствующего растворной части бетона оптимального состава, в результате воздействия на них электрического поля наблюдали уменьшение прочности при изгибе на 13,7%. В растворе такого состава обеспечены низкое водоцементное отношение ($В/Ц = 0,32$), незначительная капиллярная пористость, оптимальное

соотношение кристаллогидратных и гелевых частиц $КГ^+/Г^-$, обуславливающие связанность частиц геля электрогетерогенными контактами. При приложении электрического поля в связи с малой толщиной водных прослоек и тонкими плотными слоями противоионов в двойном электрическом слое перемещение противоионов Ca^{2+} по капиллярам значительно меньше, чем у раствора с высоким В/Ц. Электрическое поле приводит к поляризации всех частиц (и кристаллогидратных, и гелевых) с возникновением однонаправленных параллельных диполей и накоплением за счет этого избыточного отрицательного заряда в верхней зоне образца и положительного в нижней. Частично эти избыточные заряды могут возникать и за счет электромиграционного (в электрическом поле) перемещения противоионов в плотной части двойных электрических слоев на участках поверхности частиц, не образовавших электрогетерогенные контакты. Отталкивание между избыточными зарядами в нижней зоне образца приводит к возникновению дополнительных растягивающих напряжений и снижению прочности при изгибе.

Выводы и рекомендации:

1. Экспериментально установлено, что наложение постоянного электрического поля на конструкцию из бетона невысокой прочности с высокими В/Ц не оказывает отрицательного воздействия на прочность бетона при растяжении и трещиностойкость конструкции. Наложение электрического поля на конструкцию из бетона высокой прочности с низким В/Ц может привести к снижению прочности бетона при растяжении (приблизительно на 14%) и соответственно трещиностойкости конструкции. Дано объяснение этому явлению с позиций физико-химической механики.

2. Анализ величин коэффициентов вариации прочности при изгибе и гистограмм распределения прочности при изгибе образцов показывает высокую неоднородность результатов испытаний. В связи с этим приведенный механизм разрушения образцов следует считать требующим последующего уточнения после усовершенствования методики экспериментальных исследований и проведения дополнительных экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Старосельский, А.А. Коррозия и долговечность железобетона в условиях электрических воздействий [Текст]: дис... д-ра техн. наук: 05.23.05 / А.А. Старосельский. – М.: НИИЖБ, 1989. – 282 с.
2. Плугин, Ал.А. Влияние постоянного тока на бетон обводненных конструкций и сооружений, расположенных вблизи электрифицированных железнодорожных путей [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.23.05 / Ал.А. Плугин. – Харьков: ХГТУСА, 2010. – 256 с.
3. Борзяк, О.С. Механизм электрокоррозии бетона железобетонных конструкций в сложных условиях эксплуатации [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.23.05 / О.С. Борзяк. – Харьков: УкрГАЗТ, 2010. – 240 с.
4. Механизм электрокоррозии бетонных конструкций пульсирующим однонаправленным блуждающим током или током утечки [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, С.В. Мирошниченко и др.// Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2007. – Вип. 42. – С. 106–111.
5. Аналіз впливу потенціалів від струмів витоку на утворення тріщин в плитах безбаластного мостового полотна на електрифікованих ділянках залізниць [Текст] /

А.А. Плугін, О.А. Забіяка, Г.О. Линник // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 115. – С. 75-82.

6. Спосіб визначення складу високоміцного, тріщиностійкого і водонепроникного бетону [Текст]: пат. 62613 UA: МПК 7C04B28/12 / А.М. Плугін, О.А. Калінін, С.В. Мірошніченко та ін. – №2003043396; заявл. 15.04.2003; опубл. 15.06.2005, Бюл. №6.

7. ДСТУ EN 196-1:2007 (EN 196-1:2005, IDT). Методи випробування цементу. Частина 1. Визначення міцності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://document.ua/metodi-viprobuvannja-cementu.-chastina-1.-viznachennja-micno-nor9705.html>.

8. Воробей, А.С. Капітальний ремонт моста на 312 км дільниці Рівне – Ковель Львівської залізниці з укладанням залізобетонних плит безбаластового мостового полотна з кріпленням PRS-4 [Текст]: комплексний дипломний проект на здобуття ОКР магістр / Харків: УкрДАЗТ, 2011.

9. ГОСТ 18105-86. Бетоны. Правила контроля прочности [Текст]. – М.: Изд. стандартов, 1986. – 7с.

Ключевые слова: цементный камень, электрическое поле на прочность.

Аннотації

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що накладення постійного електричного поля на конструкцію з бетону невисокої міцності з високими В / Ц не має негативного впливу на міцність бетону при розтягуванні і тріщиностійкість конструкції. Накладення електричного поля на конструкцію з бетону високої міцності з низьким В/Ц може призвести до зниження міцності бетону при розтягуванні і відповідно тріщиностійкості конструкції. Дано пояснення цього явища з позицій фізико-хімічної механіки.

В результате экспериментальных исследований установлено, что наложение постоянного электрического поля на конструкцию из бетона невысокой прочности с высокими В/Ц не оказывает отрицательного воздействия на прочность бетона при растяжении и трещиностойкость конструкции. Наложение электрического поля на конструкцию из бетона высокой прочности с низким В/Ц может привести к снижению прочности бетона при растяжении и соответственно трещиностойкости конструкции. Дано объяснение этому явлению с позиций физико-химической механики.

As a result of experimental studies it was found that the induction of direct electric field onto the construction of the low-strength concrete with high W/C ratio does not realize the negative influence onto the tension of concrete and crack resistance of constructions. The induction of an electric field on the constructions of high-strength concrete with low W/C ratio may reduce the tension of concrete and, respectively, crack resistance of the construction. An explanation for this phenomenon from the standpoint of physico-chemical mechanics was done.