

УДК 691.3

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.138.2013.102369>

*Д-р хим.наук А.Н. Плугин,
д-р техн. наук А.А. Плугин,
канд. техн. наук Ал.А. Плугин,
асп. А.А. Конев (УкрГАЗТ),
инж. А.А. Забияка (Укрзализныця)*

*A.N. Plugin, A.A. Plugin, Al.A. Plugin,
A.A. Konev, A.A. Zabyaka*

**ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В БЕТОНЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ НА НЕГО:
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**INTERNAL STRESSES IN THE CONCRETE DUE TO THE ELECTRIC
IMPACT ON HIM: AN EXPERIMENTAL STUDY**

Введение. Как известно [1, 2], на электрифицированном постоянным током рельсовом пути железных дорог, трамвайных линий и путях метрополитенов возникает пульсирующий однопольсовый постоянный ток утечки, оказывающий сильное разрушающее

воздействие на бетон обводненных конструкций зданий и сооружений, которые близко расположены к путям.

Одним из таких разрушений является образование в бетоне опасных трещин в результате возникновения в нем растягивающих напряжений при

выщелачивании продуктов гидратации цементного вяжущего.

Цель и задачи исследования.

Настоящая статья посвящена исследованию влияния пульсирующего однонаправленного постоянного тока утечки на напряжения и деформации обводненного бетона.

Для исследования влияния пульсирующего однонаправленного постоянного тока на возникновение в обводненном бетоне напряжений и трещин выполнены соответствующие исследования. Методика исследований заключается в пропускании указанного тока через бетонный образец (куб, призма), погруженный в проточную воду, и одновременном измерении напряжений и деформаций в образце с помощью мостовой измерительной схемы, рис. 1 [3].

В этой схеме (рис. 1) сопротивление R_x – проволоочный датчик линейных деформаций, R_2 и R_3 – постоянные

сопротивления в плечах измерительного моста, R_1 – переменное сопротивление (магазин сопротивлений) для уравнивания моста, $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление мультиметра. Сопротивления R_2 и R_3 могут быть изготовлены из такой же константовой проволоки или набраны на магазинах сопротивления.

Проволоочный датчик линейных деформаций R_x изготавливается путем наматывания константовой проволоки в 5 витков на поверхности исследуемого бетонного образца-куба 100x100x100 мм с оклеиванием проволоки эпоксидной смолой (рис.2). Общая длина рабочего участка проволоки равна, соответственно, 200 см. На питающую диагональ AD подается напряжение питания $U_0 = 4,8$ В от источника постоянного тока. В измерительную диагональ включается мультиметр Sanwa PC-510 с высоким входным сопротивлением, измеряющий ток I в микроамперах.

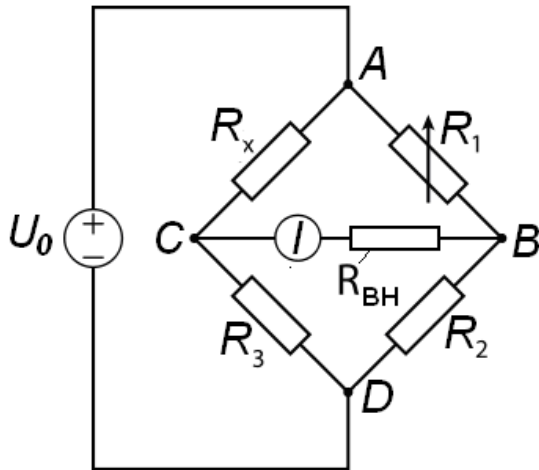


Рис. 1. Мостовая измерительная схема



Рис. 2. Датчик из константовой проволоки

Мост является неравновесным, он выставлен перед экспериментом в равновесное состояние с помощью магазина сопротивлений R_1 и показывает величину тока, возникающего при увеличении сопротивления R_x .

Увеличение этого сопротивления возникает при деформировании бетонного куба, испытываемого под прессом или в результате растягивающих напряжений внутри цементного камня под воздействием постоянного тока, при этом датчик

растягивается, приобретая дополнительное сопротивление ΔR , Ом.

Соответственно, на измерительной диагонали возникает пропорциональное по величине напряжение

$$U_{\text{ИЗМ}} = I_{\text{ИЗМ}} \cdot R_{\text{ВН}}. \quad (1)$$

Величина $U_{\text{ИЗМ}}$ определяется известным уравнением

$$U_{\text{ИЗМ}} = U_0 \cdot \left(\frac{R_x}{R_3 + R_x} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right). \quad (2)$$

$$I_{\text{ИЗМ}} \cdot R_{\text{ВН}} = U_0 \cdot \left(\frac{R_0 + \Delta R}{R_0 + R_0 + \Delta R_x} - \frac{R_0}{R_0 + R_0} \right) \quad (4)$$

Величина ΔR пренебрежимо мала по сравнению с R_0 , в связи с чем

$$\begin{aligned} U_{\text{ИЗМ}} &= I_{\text{ИЗМ}} \cdot R_{\text{ВН}} = U_0 \cdot \left(\frac{R_0 + \Delta R}{R_0 + R_0} - \frac{R_0}{R_0 + R_0} \right) = \\ &= U_0 \cdot \left(\frac{R_0 + \Delta R - R_0}{R_0 + R_0} \right) = U_0 \cdot \left(\frac{\Delta R}{R_0 + R_0} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Следовательно,

$$I_{\text{ИЗМ}} = \frac{\Delta R \cdot U_0}{(R_0 + R_0) \cdot R_{\text{ВН}}}. \quad (6)$$

Как видим, напряжение на измерительной диагонали $U_{\text{ИЗМ}}$ и соответствующий ему ток $I_{\text{ИЗМ}}$ пропорциональны величине дополнительного сопротивления ΔR , в свою очередь пропорционального деформации датчика.

Для количественной оценки измеряемых деформаций датчика найдена зависимость между измеренным током и его сопротивлением. С этой целью вместо

Мостовая схема собрана на сопротивлениях R_2 и R_3 в плечах моста одинаковой величины R_0 . Начальное сопротивление R_x и магазина сопротивлений R_1 имеют близкие к ней величины.

Для упрощения обозначим

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_x = R_0, \quad (3)$$

а изменяющуюся величину сопротивления датчика ΔR . С учетом этого и равенства (3) уравнение (2) приобретает вид

датчика в мостовую схему включали магазин сопротивления, и на нем набирали различные сопротивления R_1 в пределах от 0,01 Ом до 100 Ом (меньше и больше сопротивления R_0), имитируя этим сопротивление датчика.

Данные измерений представлены в таблице и на графике, рис. 3.

Согласно этому графику наблюдается линейная зависимость в интервале от 10 до 100 Ом, а при сопротивлениях менее 1 Ом ток становится постоянным и пересекает ось ординат в точке, которой соответствует сопротивление 12,8 Ом. Это и есть внутреннее сопротивление мультиметра (Sanwa PC-510) $R_{\text{ВН}} = 12,8$ Ом.

Таблица

Данные напряжений сжатия в бетонном образце-кубе и измеренного тока

Сопротивление в плече моста, Ом	Измеренный ток, мкА	Расчетное сопротивление $R=U/I \cdot 10^6$, Ом
100	45000	106,67
50	87000	55,17
10	344000	13,95
1	373000	12,87
0,1	375000	12,80
0	375100	12,79

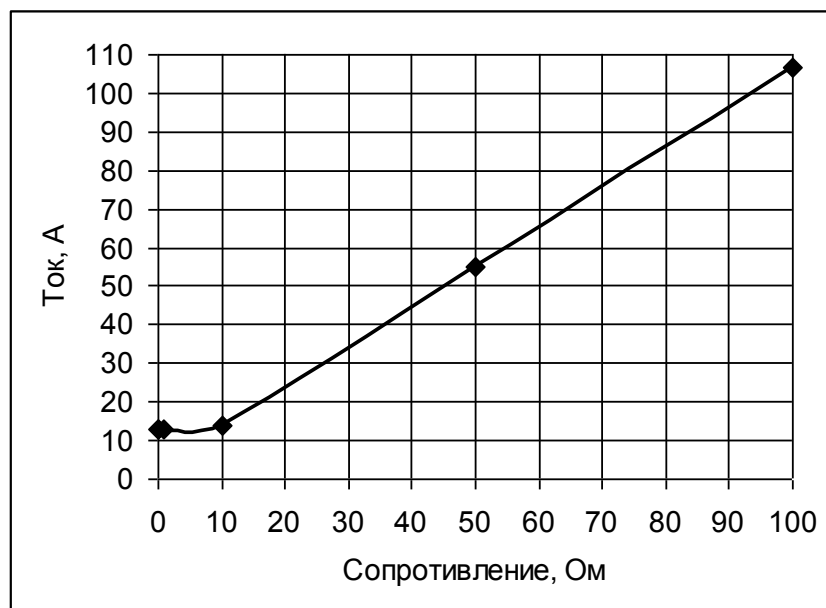


Рис. 3. Зависимость между сопротивлением в плече моста R_1 и измеренным током в измерительной диагонали

Для тарировки датчика по механическим напряжениям бетонный образец-куб с датчиком посередине его высоты нагружали различными усилиями под прессом, рис. 4, а, и определяли возникающий в образце и, соответственно, в измерительной диагонали моста ток, рис. 4, б.

По данным измерений построили график зависимости тока от напряжений сжатия, рис. 5, а. Как видно, при увеличении напряжения сжатия ток возрастал по восходящей кривой. При достижении напряжения 33,9 МПа и тока 21 мкА датчик из константановой

проволоки разорвался, чему соответствует резкий рост тока за пределы рабочей шкалы.

Подобный характер зависимости между напряжением и током с разрывом проволоочного датчика повторился и для бетонных образцов более низкой прочности, рис. 5, б. Это однозначно свидетельствует о высокой информативности проволоочного тензодатчика в виде намотанной константановой проволоки и возможности его использования для измерения напряжений, деформаций и трещинообразования в бетоне от действия тока.



Рис. 4. Тарировка датчика из константановой проволоки: а) нагружение бетонного образца куба под прессом; б) регистрация изменения сопротивления при деформировании бетонного куба под прессом

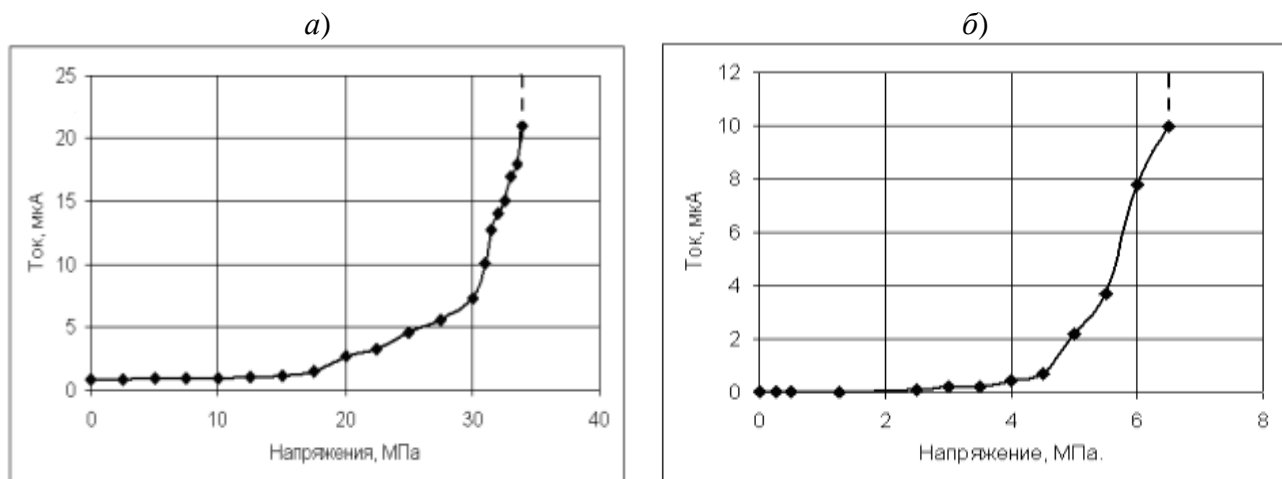


Рис. 5. Зависимость между напряжением сжатия под прессом и током в бетонном образце 100x100x100 мм

Для исследования влияния электрического напряжения на деформации бетонных образцов-кубов при их формировании на открытую поверхность бетона устанавливали стальную пластину-электрод с отверстиями. На затвердевшие образцы-кубы наматывали и обклеивали эпоксидной смолой по три аналогичных константановых датчика – сверху, посередине и внизу куба, обозначая эти положения в маркировке датчиков: верх – 1,

середина – 2 и низ – 3. Боковые поверхности кубов покрывали в два слоя водонепроницаемым электрокоррозионно-стойким защитным составом ЗС-3 (каменноугольная смола, эпоксидная смола и цемент в отношении 0,6:0,4:1). Каждый приготовленный таким образом образец помещали в металлическую емкость с проточной водой из водопровода, присоединяя концы проволоочного датчика в соответствующее плечо мостовой

измерительной схемы. Исследования деформаций в бетонных образцах от приложенного к ним напряжения выполнены путем наложения на бетонный образец пульсирующего постоянного

напряжения величиной 80 В, рис. 6, создаваемого с помощью специальной автоматической установки [4], в течение длительного времени.



Рис. 6. Бетонный образец-куб: а) контрольный, в емкости со стоячей водой; б) исследуемый, в емкости с проточной водой

На рис. 7 представлен график изменения во времени тока, возникающего в измерительной диагонали образца.

Изменение тока в пределах 220 часов для всех датчиков имеет одинаковый характер, а также дальнейшее изменение тока до 350 часов для датчиков 3-2 (середина) и 3-3 (верх), рис. 7, б и в, имеет в общем тоже одинаковый характер и синхронность. Однако после 350 часов ток в датчике 3-2 (середина образца) уменьшается до минимума, и остается таковым вплоть до 680 часов. В это же время ток в датчике 3-3 растет, а значит, растяжение в нижней части образца продолжает увеличиваться. После этого в обоих датчиках ток резко двумя синхронными скачками возрастает. Характерно при этом, что скачкообразное изменение в среднем датчике происходило вокруг первичного тока (в начальной стадии обработки), в то время как в нижнем датчике ток постоянно возрастал и значительно превышал его начальные

значения колебания. К 900 часам проволока датчика 3-2 разорвалась, а датчик 3-3 продолжал оставаться целым. В течение дальнейших примерно 1000 часов, или около 1,5 месяцев, рис. 7, г, он показывал ток и деформации образца, которые периодически изменялись с достаточно большой амплитудой вокруг среднего уровня тока (около 140 мкА). К 1975 часам воздействия на образец напряжения оборвалась проволока и этого датчика.

Характерно, что при резком возрастании ток достигал в различных датчиках различных образцов одной и той же величины – примерно 25000 мкА. Кроме того, ток $I_{изм}$ для датчика 3-1 резко увеличивался до максимума трижды, каждый раз возвращаясь к исходным значениям, рис. 8, а. Происходило также резкое возрастание сопротивления этого датчика, с той лишь разницей, что его максимальные величины не были одинаковыми, а изменялись в пределах 1-1,8 МОм, рис. 8, б.

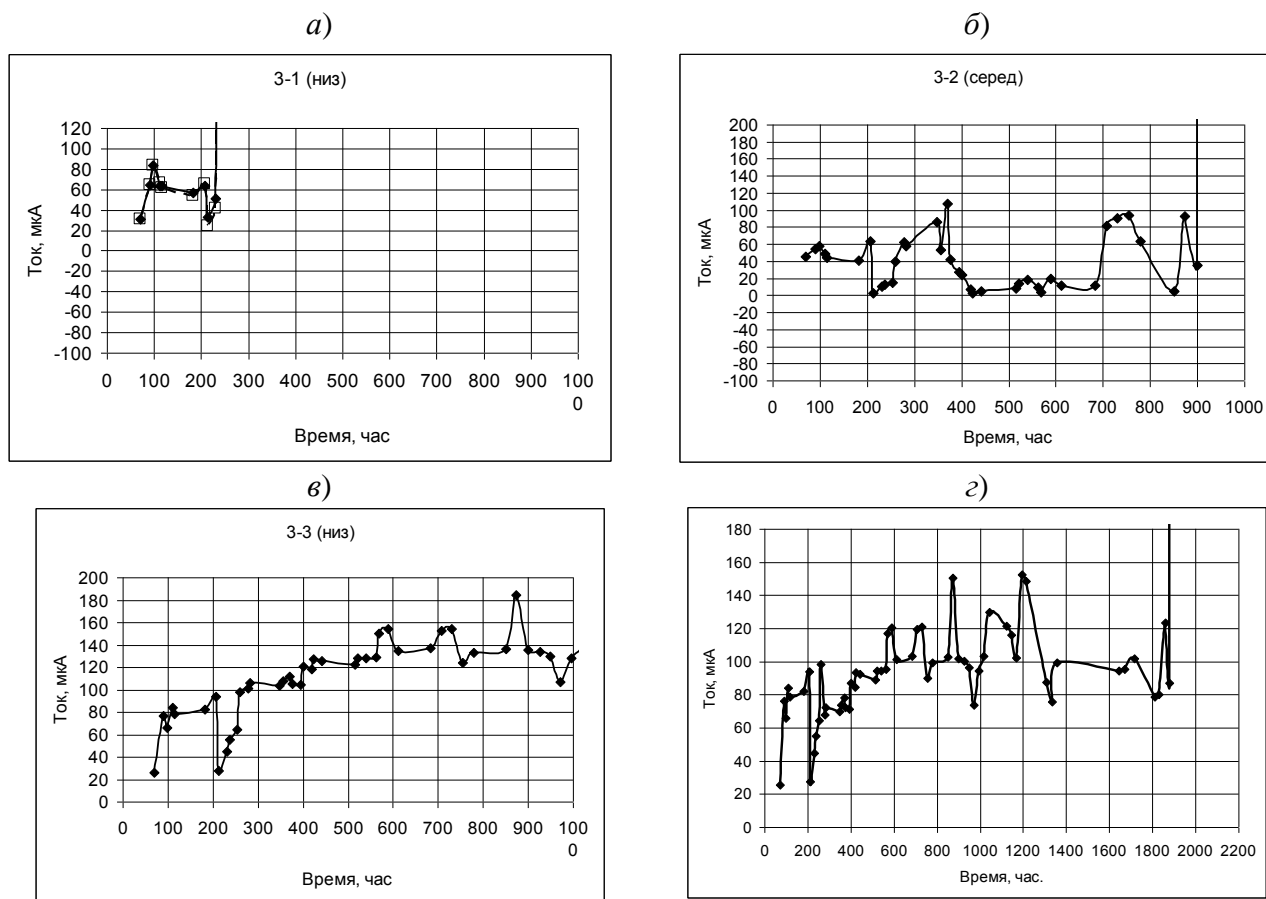


Рис. 7. Изменение тока в измерительной диагонали моста с датчиками, установленными на бетонном образце 100x100x100 мм при наложении на него пульсирующего постоянного напряжения в течение длительного времени: а) 3-1 – датчик вверх образца; б) 3-2 – датчик посередине образца; в), г) 3-3 – датчик внизу образца

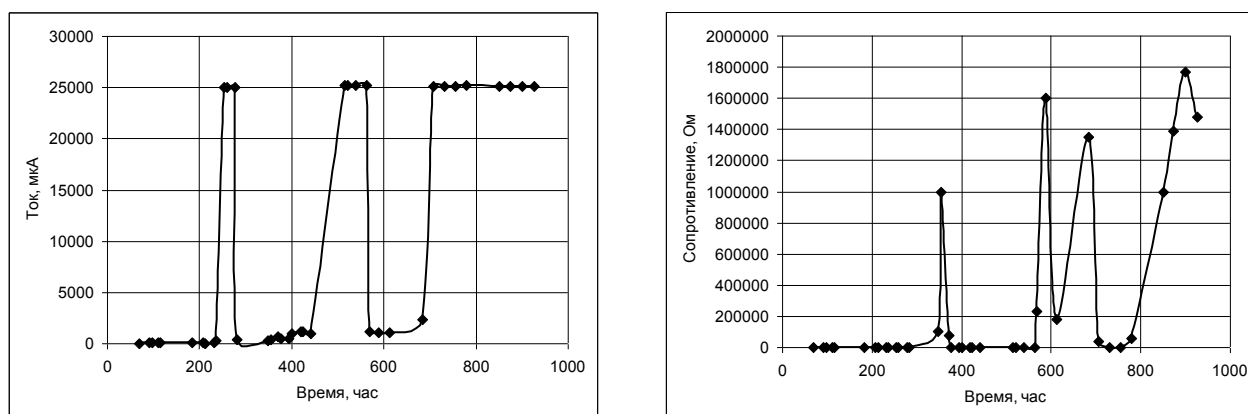


Рис. 8. Резкое увеличение и спад до прежних значений измеряемого тока и сопротивления для датчика 3-1

Резкий скачок измеряемого тока до одной и той же максимальной величины 25000 мкА у различных образцов может свидетельствовать о разрыве проволоки датчика R_X , при котором ток в измерительную диагональ поступает через другие участки цепи, сопротивления в которых являются постоянными. Однако при разрыве сопротивление R_X должно стать бесконечным, в то же время оно не является бесконечным. Еще более примечательным является неоднократный возврат тока в измерительной диагонали и сопротивления датчика R_X к прежним небольшим величинам.

Это может быть обусловлено тем, что образующийся разрыв между концами проволоки заполняет вода, имеющая проводимость и намного большее, чем константовая проволока, сопротивление. Восстановление малых значений

сопротивления и тока в измерительной диагонали может быть обусловлено лишь сращиванием концов проволоки. Это, в свою очередь, обусловлено гальваническим процессом растворения медной составляющей проволоки в очень тонком зазоре между ее оборванными концами. При этом ионы меди на положительно заряженном конце проволоки отрываются с ее поверхности под влиянием огромной напряженности электрополя (из-за очень малой толщины зазора) и оседают на конце с отрицательным потенциалом, закорачивая вновь проволоку.

Проверим это предположение соответствующими расчетами.

При обрыве датчика ток в измерительной диагонали проходит через сопротивления R_1 , R_{BH} и R_3 по схеме на рис. 9.

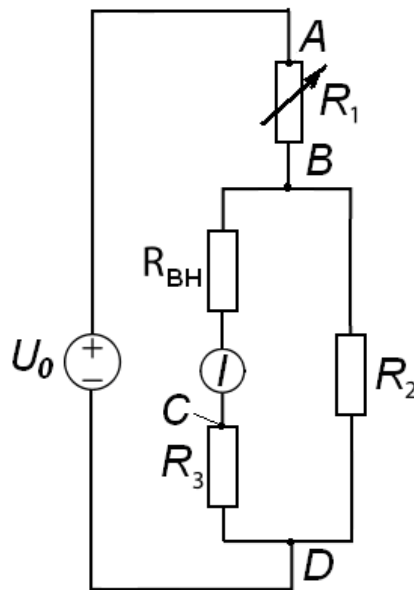


Рис. 9. Схема мостовая измерительная при обрыве проволоки в датчике R_X

В соответствии с этой схемой измерительным становится участок BCD, включенный в контур, состоящий из двух параллельных сопротивлений – сопротивление участка BCD $R_{BCD} = R_{BH} + R_3$ (с индикатором между ними) и

сопротивление R_2 . Общее сопротивление этого контура R_{BCDB} равно

$$R_{BCDB} = \frac{(R_{BH} + R_3) \cdot R_2}{R_{BH} + R_3 + R_2}. \quad (7)$$

Общий ток, протекающий по всей цепи,

$$I_0 = \frac{U_0}{R_1 + R_{BCD} + R_2} . \quad (8)$$

На измерительный контур поступает напряжение U_{BD}

$$U_{BD} = U_0 - I_0 R_1 . \quad (9)$$

Соответственно, ток, протекающий по участку BCD,

$$I_{BCD} = \frac{U_0 - I_0 R_1}{R_{BCDB}} \cdot \frac{R_2}{R_{BH} + R_3 + R_2} . \quad (10)$$

Определим отдельные составляющие этого уравнения

$$R_{BCDB} = \frac{(12,8 + 55) \cdot 55 \left(\frac{O_M \cdot O_M}{O_M} \right)}{12,8 + 55 + 55} = \frac{67,8 \cdot 55}{122,8} = 30,36(O_M),$$

$$U_{ИЗМ} = U_0 \cdot \left(\frac{R_X}{R_3 + R_X} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right),$$

$$I_0 = \frac{4,8}{55 + 30,36} \left(\frac{B}{O_M} \right) = \frac{4,8}{85,36} = 0,0562(A).$$

Подставляя эти величины в (10), получим

$$I_{BCD} = 0,0562 \cdot \frac{55}{12,8 + 55 + 55} = 0,0562 \cdot \frac{55}{122,8} = 0,025(A) = 25000(\mu A).$$

Эта величина в точности соответствует показываемой мультиметром.

Конечная величина сопротивления датчика R_X (1-1,6 МОм), а не бесконечная, обусловлена, как отмечалось, заполнением

зазора водой. Удельная электропроводность питьевой воды, по [5], равна 100÷1300 мСм/см. Преобразуем эти величины

$$\lambda = 100 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1}{O_M \cdot m} \right) \frac{1}{O_M \cdot m} = 10^{-4} \left(\frac{1}{O_M \cdot m} \right),$$

$$\lambda = 1300 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1}{O_M \cdot m} \right) \frac{1}{O_M \cdot m} = 1,3 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{O_M \cdot m} \right).$$

Удельное сопротивление воды

$$\rho = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{10^{-4}} \left(\frac{1}{\frac{1}{Om \cdot m}} \right) = 10^4 (Om \cdot m),$$

$$\rho = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{1,3 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{1}{\frac{1}{Om \cdot m}} \right) = 7,7 \cdot 10^2 (Om \cdot m).$$

Длина разрыва определяется растяжимостью бетона. Примем ее, по [6], равной $(1-1,5) \cdot 10^{-4}$.

При длине стороны куба 10 см = 0,1 м длина зазора составит $(1-1,5) \cdot 10^{-5}$ м.

Определим сопротивление воды в зазоре между концами оборванной проволоки по формуле

$$R_3 = \rho \cdot \frac{l}{S} \left(Om \cdot m \cdot \frac{m}{m^2} = Om \right). \quad (11)$$

При диаметре проволоки датчика $d = 0,15$ мм = $1,5 \cdot 10^{-4}$ м площадь ее сечения S равна

$$S = \pi \cdot \frac{d^2}{4}, \quad (12)$$

или численно

$$S = 3,14 \cdot \frac{1,5^2 \cdot 10^{-8}}{4} = 1,77 \cdot 10^{-8} (m^2).$$

С учетом величин l и S сопротивление воды в зазоре по (11) равно

$$R_3 = 10^4 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-5}}{1,77 \cdot 10^{-8}} = 5,7 \cdot 10^6 (Om) = 5,7 (MOm),$$

$$R_3 = 7,7 \cdot 10^2 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-5}}{1,77 \cdot 10^{-8}} = 4,35 \cdot 10^5 (Om) = 0,44 (MOm),$$

а при длине зазора $1,5 \cdot 10^{-4}$ м

$$R_3 = 7,7 \cdot 10^2 \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{-5}}{1,77 \cdot 10^{-8}} = 6,52 \cdot 10^5 (Om) = 0,65 (MOm).$$

Как видим, измеренные величины сопротивления $(1-1,6)$ МОм находятся в интервале этих граничных значений $(0,65-5,7)$ МОм.

Следует также отметить, что в контрольном образце №4, который не подвергался воздействию электрического

напряжения, резкое возрастание тока и сопротивления не происходило даже за еще больший период времени (2629 часов по сравнению с 1975 часов и намного менее для датчика 3-1). Это свидетельствует о том, что резкое увеличение тока и сопротивления действительно обусловлено

разрывом проволоки датчика, которое обусловлено деформацией растяжения бетонного образца под влиянием пульсирующего постоянного напряжения.

Вместе с тем в ряде мест над проволокой тензодатчиков через некоторое время обработки образца напряжением появляются ярко-голубые пятна, как, например, на рис. 10. Это может быть обусловлено образованием гидроксида меди $\text{Cu}(\text{OH})_2$, характеризующегося ярко-голубым цветом. Возникновение гидроксида меди за счет коррозии константана исключается, т.к. константан является коррозионно-стойким сплавом [7]. Следовательно, образование $\text{Cu}(\text{OH})_2$ обусловлено разрывом проволоки с образованием очень тонкого зазора, в пределах которого между концами разорвавшейся проволоки возникла высокая напряженность электрополя. Это

привело к возникновению гальванической меди, при котором катионы меди отрываются от анода, перемещаются к катоду и, восстанавливаясь, превращаются в атомы и чистую медь. Часть катионов меди выходит диффузионно в воду из зазора и трещины. Постепенно вода в этих трещинах становится щелочной (за счет жидкой фазы бетона), что приводит к образованию $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ярко-голубого цвета.

Медь, которая нарастает на катоде, постепенно приводит к зарастанию зазора (достаточно даже частичного), что приводит к восстановлению прежнего сопротивления и тока в измерительной цепи.

Разрыв проволоки в датчике 3-1 вверху образца подтверждается увеличением ширины куба поверху, рис. 11, 12.

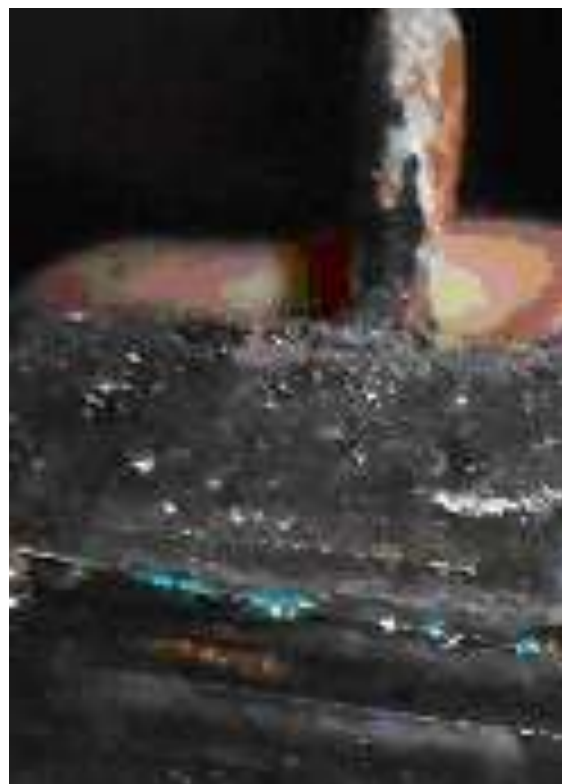


Рис. 10. Фото образца-куба №3 после обработки напряжением в течение 46 сут (слева) и увеличенный фрагмент с голубыми пятнами над проволочным верхним датчиком из константана (справа)

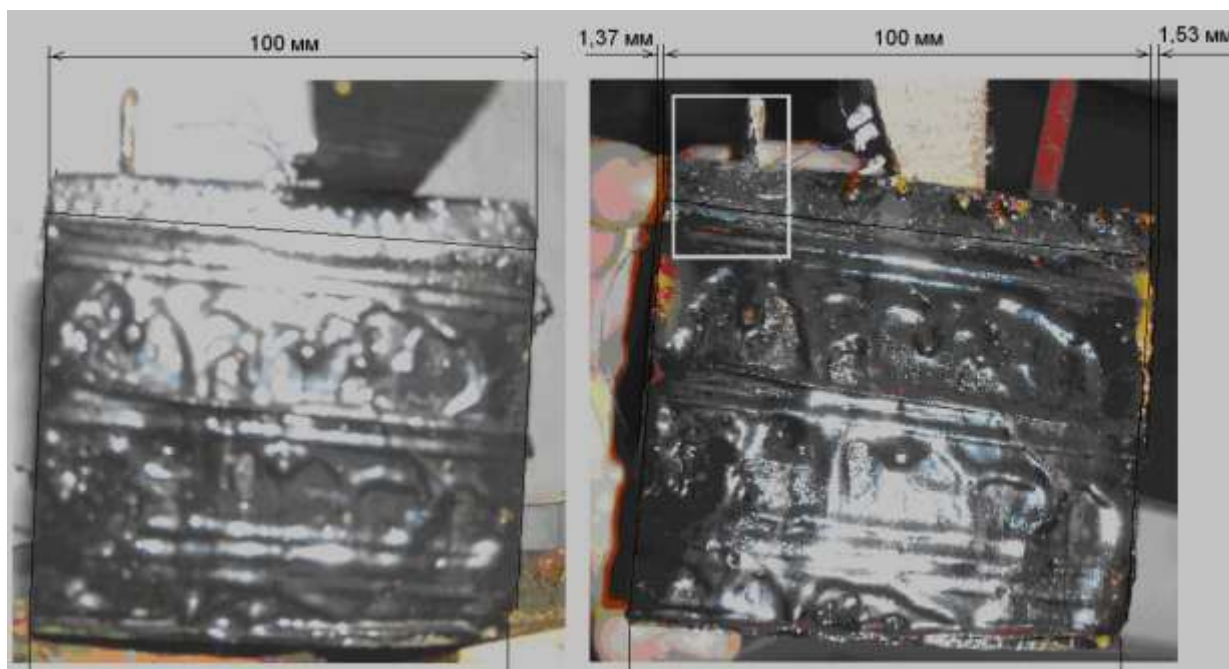


Рис. 11. Сопоставительные размеры образца-куба № 3 до обработки напряжением (слева) и после (справа)

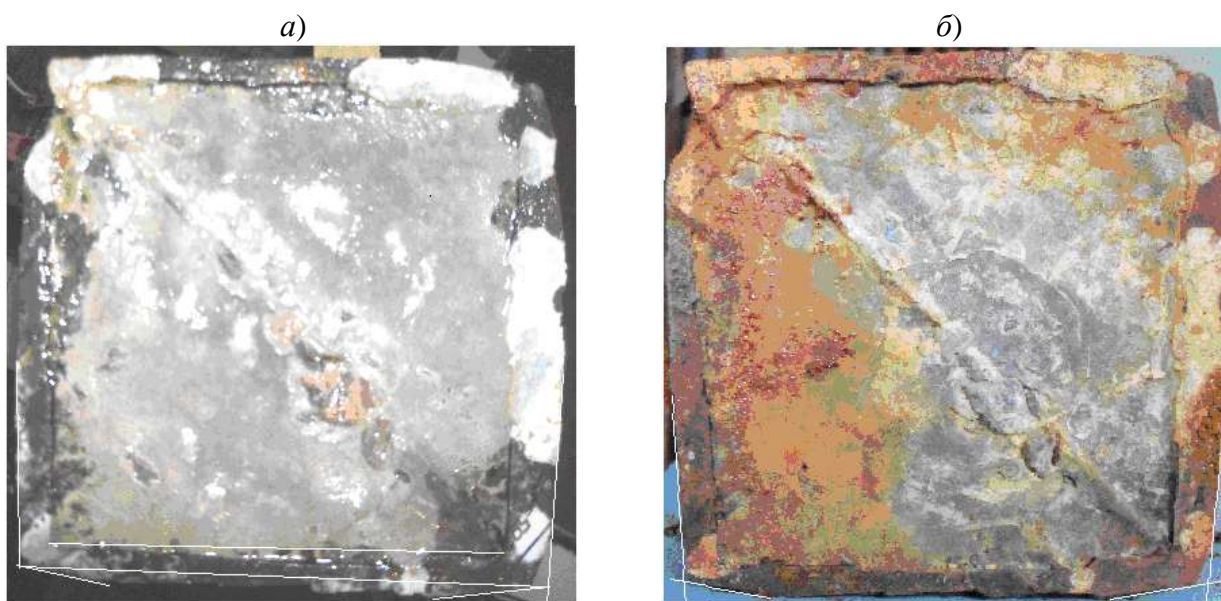


Рис. 12. Фото образца-куба № 3 снизу до обработки напряжением (а) и после обработки (б) в течение 82 сут (31.01.13)

Подобные ярко-голубые пятна возникли и над проволокой датчика 6-1 образца № 6, рис. 13. Из оптико-микроскопического снимка, рис. 14, а, и увеличенного фрагмента, рис. 14, б, видно,

что голубое пятно возникло на месте трещины в частице эпоксидной смолы ЭД и ЗС-3 и распространилось в прилегающей к ней зоне.

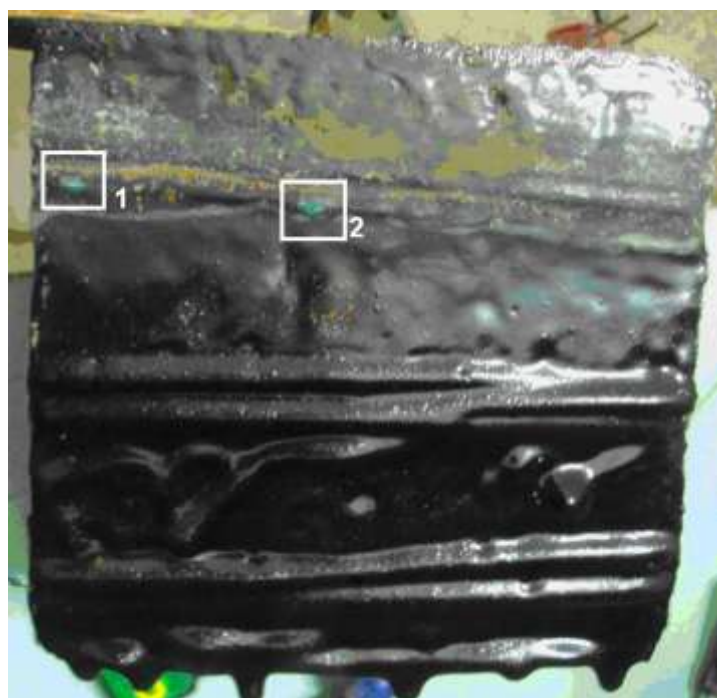


Рис. 13. Фото боковой грани образца-куба № 6 после обработки напряжением в течение 44 сут с выделенными окнами 1 и 2 с голубыми пятнами над константовой проволокой

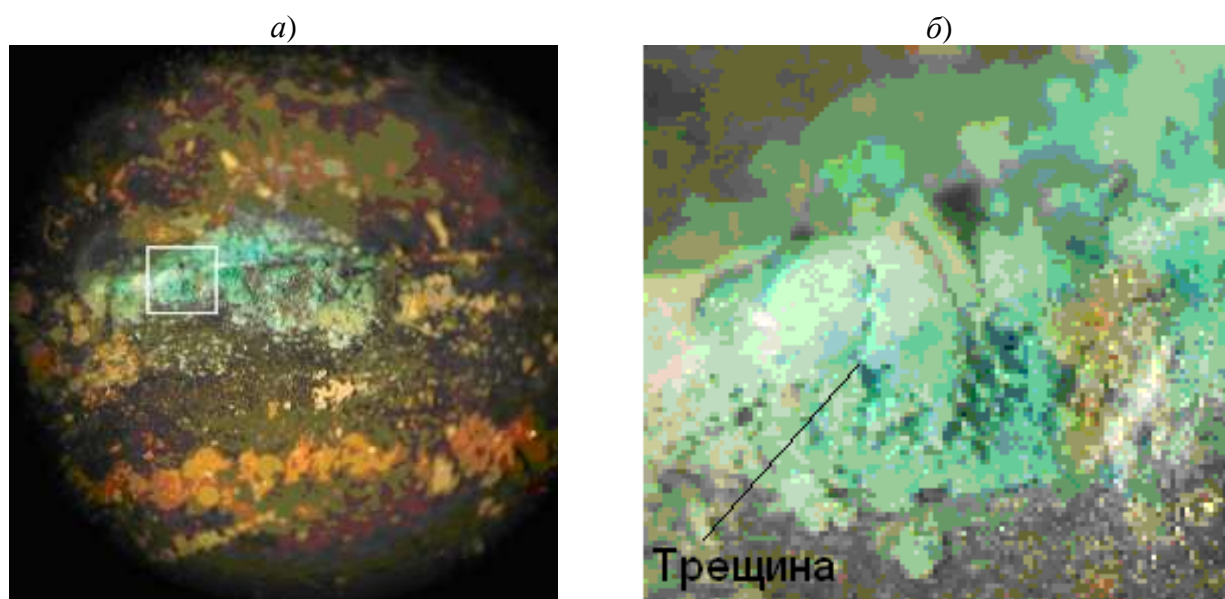


Рис. 14. МС из окна 1 (а), $\times 12$, и увеличенный ($\times 130$) фрагмент из него с трещиной в частице эпоксидной смолы ЭД и ЗС-3

Прямым подтверждением возникновения трещин в бетоне от воздействия пульсирующего постоянного напряжения является возникновение трещин в бетоне

внизу бетонной призмы 10x10x40 см при длительном (23 мес) воздействии на нее указанного напряжения, рис. 15, 16, четко видимые на МС, рис. 17, 18.

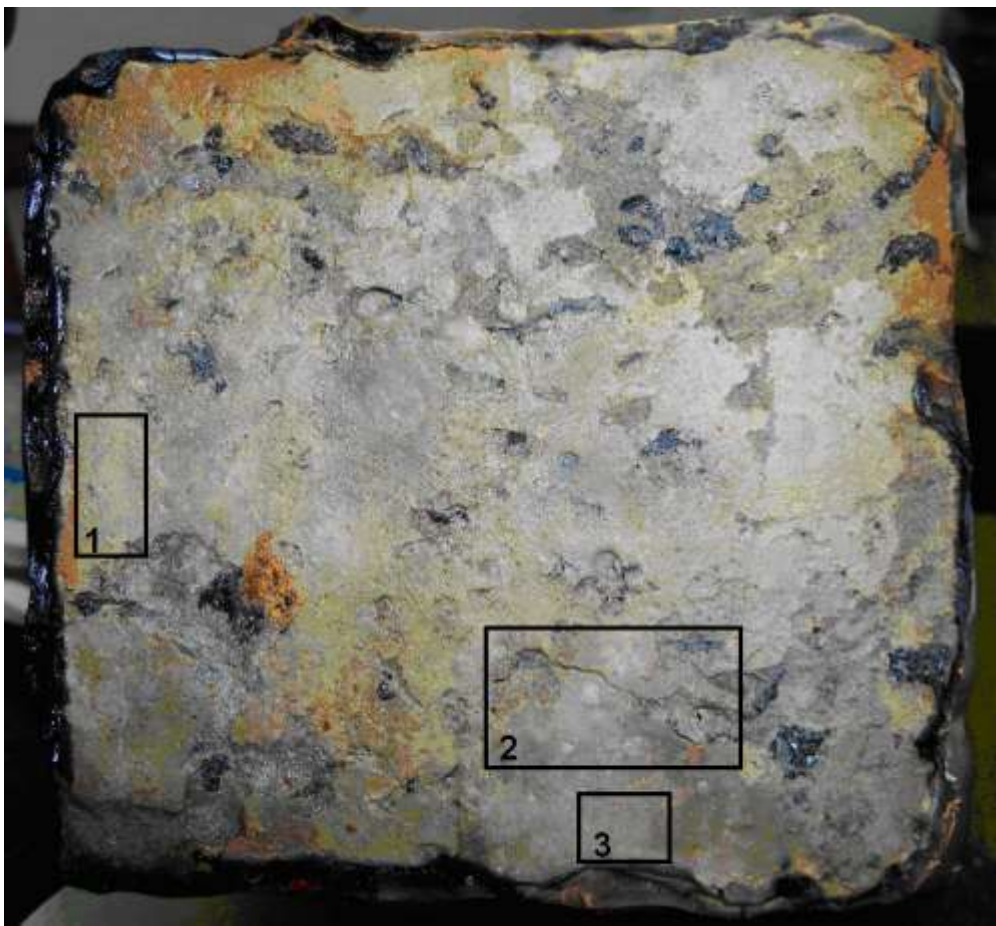


Рис. 15. Трещины в бетоне снизу призмы (10x10x40 см) после 700 сут обработки пульсирующим постоянным напряжением 30 В

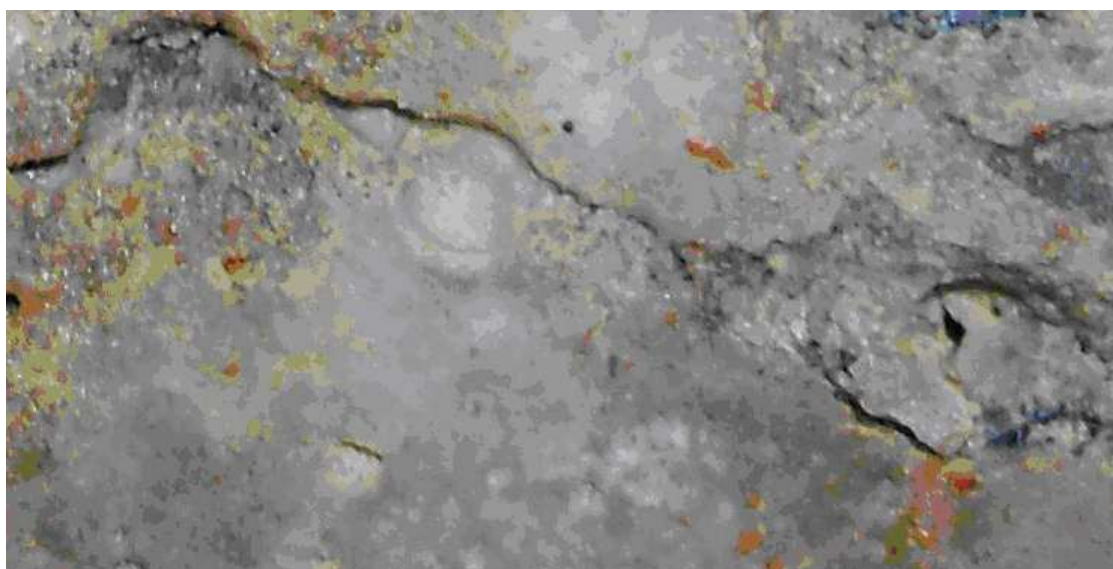


Рис. 16. Увеличенный фрагмент 2 с трещиной из фото на рис. 15 (29.03.2013)



Рис. 17. МС из фрагмента 1 с трещиной из рис. 15 (29.03.2013) $\times 50$



Рис. 18. МС из фрагмента 3 с трещиной из рис. 15 (29.03.2013) $\times 25$

Описанный характер изменения тока, а следовательно, растягивающих напряжений, деформаций и трещин в бетоне свидетельствует о следующем. Сразу с наложением пульсирующего постоянного напряжения в капиллярах бетонного образца начинается преобладающий электромиграционный перенос катионов кальция Ca^{2+} из ДЭС частиц гидросиликатного геля и капилляров бетона в целом. Вынесенные катионы подхватываются потоком воды, так что тормозящего мембранного потенциала не возникает, и поток катионов не прекращается. Соответственно, понижается концентрация катионов Ca^{2+} в растворе, в бетоне возникает избыточный отрицательный заряд, растут растягивающие деформации образца и проволочных датчиков, а следовательно, измеряемый ток.

Скачкообразное изменение тока свидетельствует о протекании процессов растворения, сменяющихся кристаллизацией портландита, при которых концентрация катионов кальция увеличивается и уменьшается, соответственно, увеличивая и уменьшая этим ток.

Вместе с тем в верхней части образца портландит преобразуется в кальцит, видимый невооруженным глазом (рис. 19), уже через несколько дней воздействия напряжения. У кальцита величина равновесного электроповерхностного потенциала равна 0,2 В, что значительно меньше, чем у портландита (0,54 В). Это, а также возникновение избыточного отрицательного заряда приводит к снижению прочности и возникновению растягивающих напряжений, и в бетоне возникает микротрещина, приводящая к разрыву проволоки датчика вверху образца, например, рис. 14.



Рис. 19. Образование кальцита на поверхности бетонного образца через некоторое время после начала воздействия образца напряжением

По мере увеличения времени воздействия напряжения избыточный заряд

накапливается в средней зоне образца, туда же проникает углекислый газ, образуется

кальцит, что приводит к разрыву проволоки датчика.

Длительное сохранение неповрежденным проволочного датчика в нижней зоне образца обусловлено длительностью процесса электромиграционного перемещения Ca^{2+} из верхней и средней зон образца и компенсацией выщелачивания бетона растворением портландита.

Выводы. Таким образом, выполненные экспериментально-теоретические исследования подтверждают реальность возникновения растягивающих напряжений, деформаций и трещин в обводненном бетоне под действием пульсирующего постоянного напряжения и тока.

Список литературы

1. Плугин, А.Н. Электрокоррозия железобетонных мостов и других искусственных сооружений [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Скорик, А.А. Плугин и др. // Залізничний транспорт України. – 2004. – № 1. – С. 11-13.
2. Плугин, А.Н. Электроосмотический перенос как фактор разрушения железобетонных и каменных опор железнодорожных мостов на водотоках [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, С.В. Мирошниченко и др. // Зб. наук. праць ЛНАУ. Серія «Технічні науки». – Луганськ: ЛНАУ, 2007. – №71 (94). – С. 189-196.
3. Схема измерительного моста. – Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [ru.wikipedia.org/wiki/ Измерительный мост](http://ru.wikipedia.org/wiki/Измерительный_мост).
4. Исследование влияния переменного электрического поля в бетоне на его электрокоррозию [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, А.А. Дудин, Ал.А. Плугин, О.С. Борзяк, А.А. Конев // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2010. – Вип. 43. – С. 517-524.
5. Кондуктометры карманные – PitVoda Екатеринбург [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.pitvoda.ru/catalogue.php?sid=22.
6. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон [Текст] / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М.: Госстройиздат, 1971. – 208 с.
7. Константан – сплав с неизменным удельным электросопротивлением... [Электронный ресурс]. – Режим доступа: ukrnichrom.com.ua/content/view/403/45/lang,ru.

Ключевые слова: электрифицированная железная дорога, электрические потенциалы, бетон, внутренние напряжения, трещины.

Аннотации

Розглянуті експериментально-теоретичні дослідження, які підтверджують реальність виникнення розтягуючих напружень і деформацій в обводненому бетоні і виникнення мікротріщин в ньому під дією пульсуючої однонаправленої напруги і струму. В лабораторних дослідженнях застосовувались константановий дріт як датчик, здатний фіксувати напруження, та мостова вимірювальна схема для реєстрації цих напружень. Відмічено, що електроміграційний перенос катіонів кальцію Ca^{2+} з ПЕШ частинок гідросилікатного гелю та капілярів бетону знижує концентрацію катіонів Ca^{2+} в розчині, внаслідок чого в бетоні виникає надлишковий негативний заряд, ростуть розтягуючі деформації зразка і дрютяних датчиків, і відповідно, вимірювальний струм. Дія вказаного напруження буде приводити до вилугування бетону на контакті з водою і його електрокорозійного руйнування.

Рассмотрены экспериментально-теоретические исследования, подтверждающие реальность возникновения растягивающих напряжений и деформаций в обводненном бетоне и возникновение микротрещин в нем под действием пульсирующего однонаправленного напряжения и тока. В лабораторных исследованиях применялись константовая проволока как датчик, способный фиксировать напряжения, и мостовая измерительная схема для регистрации этих напряжений. Отмечено, что электромиграционный перенос катионов кальция Ca^{2+} из ДЭС частиц гидросиликатного геля и капилляров бетона понижает концентрацию катионов Ca^{2+} в растворе, вследствие чего в бетоне возникает избыточный отрицательный заряд, растут растягивающие деформации образца и проволоочных датчиков, а следовательно, измеряемый ток. Воздействие указанного напряжения будет приводить к выщелачиванию бетона на контакте с водой и его электрокоррозионному разрушению.

The experimental and theoretical studies that confirm the reality of the tensile stress and strain in the concrete and watered appearance of microcracks in it under the influence of a pulsating unidirectional voltage and current. In laboratory studies used constantan wire, the sensor is capable of clamping voltage and bridge measuring circuit, for the registration of these stresses. Noted that electromigratory transfer of calcium cations Ca^{2+} electric double layer (EDL) particles of gel and capillary hydrosilicate concrete lowers the concentration of Ca^{2+} cations in solution, resulting in concrete occurs excess negative charge, grow tensile deformation of the specimen and wire gauges, and, therefore, the measured current. The impact of this tension will lead to leaching of concrete on contact with water and elektrokorrozionnomu destruction.