

УДК 666.982.24: 620.192.4

**ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ ФАКТОРОВ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ  
ОБЫЧНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ  
ВОЗДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНОЙ ЖИДКОЙ ХЛОРИДСОДЕРЖАЩЕЙ  
СРЕДЫ И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА**

*Мигунов Виктор Николаевич*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г. Пенза*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и  
архитектура»*

**Аннотация**

Представлены результаты длительных экспериментальных исследований, полученные на прямых моделях изгибаемых железобетонных элементов, по изучению влияния внутренних факторов на коррозию арматуры в расчётных поперечных трещинах бетона при периодическом воздействии жидкой хлоридсодержащей среды в атмосферных газовойздушных условиях. С помощью разработанной физической модели сделан теоретический расчёт определения временного периода заполнения полости поперечной трещины углекислым газом.

**Ключевые слова:** железобетон, трещины, депланация, хлоридсодержащая среда, арматура, коррозия.

**THE INFLUENCE OF INTERNALFACTORS ON  
LONGEVITYCONVENTIONALCONCRETEELEMENTSIN CONDITIONS  
OFAGGRESSIVE LIQUIDCHLORIDE-CONTAINING  
ENVIRONMENTSAND CARBON DIOXIDE**

*Migunov Viktor Nikolaevich,*

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*Candidate of Sciences, Associate Professor of the department “Urban construction and architecture”.*

## **Abstract**

The results of long-term experimental studies, obtained in the direct model of bent reinforced-concrete elements, on the impact of external factors on the corrosion of reinforcement in the design of transverse cracks in the concrete impact of periodic liquid chloride-containing environments in atmospheric-gas conditions. With the developed physical model made a theoretical calculation of a certain time period of filling the cavity transverse crack carbon dioxide.

**Keywords:** reinforced concrete, cracks, warping, chloride-containing environments, reinforcement, corrosion.

Наибольшую опасность для коррозии железобетонных конструкций представляют жидкие среды, содержащие хлорид-ионы. Они в отличие от ионов сульфатов и магния в процессе диффузии во внутренний объём бетона связываются в малорастворимые соединения лишь частично [1,2].

В России восемнадцать тысяч автодорожных мостов в результате воздействия на них различных агрессивных сред в процессе эксплуатации имеют ограниченное трудоспособное состояние с ежегодным однопроцентным обрушением от их общего количества [3]. В результате хлоридной коррозии в США в 1982 году было повреждено 213 тысяч мостовых железобетонных конструкций со стоимостью ремонта 41,1 миллиардов долларов, а в 1986 году – 244 тысячи аналогичных конструкций со стоимостью ремонта 51,4 миллиардов долларов [4].

В процессе эксплуатации практически все железобетонные конструкции имеют расчётные силовые поперечные трещины в защитном слое бетона. Они являются легитивными конструктивными источниками поступления к поверхности арматуры агрессивной среды.

Ширина раскрытия поперечных трещин и их геометрическая форма (депланация) по толщине защитного слоя бетона характеризуют проницаемость влаги, кислорода и различных агрессивных реагентов к арматуре и, в конечном счёте, её коррозионную сохранность. Депланация бетона в поперечных трещинах определяет фактическую ширину раскрытия трещин на поверхности бетона в зависимости от толщины защитного слоя бетона.

Действующие нормативные документы по расчёту железобетонных конструкций СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» и СП 52-101-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры» определяют среднюю ширину раскрытия трещин нормальных к продольной оси элемента на поверхности арматуры. Однако, такой подход не согласуется с положениями действующего нормативного документа по защите железобетонных конструкций от коррозии СНиП 2.03 11-85\* «Защита строительных конструкций от коррозии», где нормативная ширина раскрытия поперечных трещин рассматривается на поверхности защитного слоя бетона конструкции с его толщиной  $\delta_{з.с.б} = 25$  мм в зависимости от вида и степени агрессивности среды.

В настоящее время в неагрессивных условиях испытания известны многочисленные экспериментальные исследования депланации торцов растянутых железобетонных элементов [5] и незначительное количество опытов, проведённых на прямых моделях железобетонных конструкций [6].

В изгибаемых железобетонных балках с рабочей арматурой периодического профиля изменение ширины раскрытия поперечной трещины по всему сечению имеет линейную математическую зависимость от толщины защитного слоя бетона [6].

Характер депланации бетона в поперечных трещинах зависит от вида профиля арматуры. Величина раскрытия поперечных трещин в бетоне непосредственно у поверхности арматуры периодического профиля в железобетонных конструкциях в три раза меньше ширины раскрытия

поперечных трещин в железобетонных элементах с гладкой арматурой при тех же напряжениях [7]. Результаты экспериментальных исследований, полученные на прямых моделях изгибаемых железобетонных элементов в неагрессивной среде, показывают, что в балках с гладкими стержнями депланация наблюдается только на участках непосредственно прилегающих к арматуре, то есть на расстоянии 5-10 мм от её поверхности [6]. При напряжениях близких к пределу текучести в гладкой арматуре ширина раскрытия поперечных трещин по всей толщине защитного слоя бетона остаётся величиной постоянной, за счёт нарушения сцепления арматуры с бетоном.

По степени опасности коррозионного поражения стали в расчётных поперечных трещинах бетона железобетонных конструкций горячекатаная арматура гладкого и периодического профиля классов А-I и А-III располагаются в одной группе в СНиП 2.03.11-85\* и в межгосударственном стандарте по защите железобетонных конструкций от коррозии ГОСТ 31384-2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования». Различная величина депланации стенок бетона поперечных трещин для арматуры гладкого и периодического профиля является основанием для уточнения нормативных значений ширины раскрытия поперечных трещин для этих арматурных сталей с помощью дополнительных экспериментальных исследований коррозионного состояния арматуры в поперечных трещинах бетона.

Необходимо отметить, что представления о деталях механизма коррозии арматуры в поперечных трещинах бетона и его контролирующих факторов в настоящее время имеют качественный характер, из-за недостаточного объёма научных данных о нём [7, 8, 9, 10]. Поэтому объективными научными результатами для эксплуатирующихся в агрессивной среде железобетонных конструкций, состоящих из многокомпонентных материалов, являются данные экспериментальных исследований коррозионного процесса арматуры в поперечных трещинах бетона, полученные на прямых моделях железобетонных конструкций, по сравнению с теоретическими исследованиями [11].

Экспериментальные исследования влияния деформации бетона поперечных трещин на коррозионное поражение рабочей арматуры различного профиля проведены на двадцати четырёх изгибаемых прямых моделях железобетонных конструкций при действии жидкой хлоридсодержащей среды [12]. Программа исследований предусматривала анализ величин характеристик коррозии арматуры гладкого и периодического профиля классов А-1 и А-111 в поперечных трещинах бетона с соответствующими значениями  $a_{crc}$  на изгибаемых железобетонных элементах с размерами 2000x200x70мм и классом бетона В-30.

Образцы испытывали воздействие постоянной нагрузки. Для стимуляции коррозии арматуры в трещинах бетона использовался 3% раствор  $NaCl$ , которым два раза в сутки увлажнялась поверхность бетона. Эксперимент проводился в атмосферных условиях в течение двух лет до появления на образцах, на уровне рабочей арматуры между расчётными поперечными трещинами волосяных коррозионных продольных трещин.

При ускорении коррозии арматуры в поперечных трещинах бетона с  $a_{crc} = 0,20$  мм в 10 раз ( $K_k = 10$ ) [13] при заданной в эксперименте концентрации хлорид-ионов в растворе фактическая долговечность железобетонных прототипов прямых моделей с  $a_{crc}^{max} = 0,20$  мм в слабоагрессивной среде, содержащей хлорид-ионы, при действии постоянной нагрузки может составить не более 20 лет, что в 2,5 раза меньше нормативной долговечности несущих обычных железобетонных конструкций из тяжелого бетона в капитальных зданиях [11].

При средней глубине коррозионного поражения  $\delta_{cp} = 300$  мкм арматуры  $\varnothing 14$  мм класса А-111 практически не отмечено уменьшение несущей способности железобетонных образцов и арматуры. Предельной 15%-ой величиной снижения диаметра арматуры равного 14мм является средняя глубина коррозии  $\delta_{cp} = 1050$  мкм [14]. Экспериментальная средняя глубина коррозионного поражения стальных стержней, при которых возникали

продольные трещины, составляла от  $\delta_{cp} = 240$  мкм до  $\delta_{cp} = 350$  мкм в зависимости от толщины защитного слоя бетона и класса арматуры. Следовательно, принимая во внимание величину критического снижения диаметра арматуры, долговечность железобетонных конструкций по условию возникновения продольных трещин при средней глубине коррозионного поражения стержня  $\delta_{cp} = 300$  мкм определяется только длиной участка коррозионного поражения на арматуре.

В разработанной методике экспериментального исследования коррозионная стойкость арматуры в поперечных трещинах бетона определялась коэффициентом  $K_0 = K_2 / K_1$ , где  $K_1$  и  $K_2$  – соответственно глубины коррозионного поражения арматуры в трещинах бетона со стороны защитного слоя бетона и противоположной стороны. Результаты эксперимента показывают, что величина  $K_0$  зависит от класса арматуры, значений  $a_{сгс}$  и  $\delta_{зс}$  (рисунки 1 и 2). Шириной раскрытия трещин, при которой  $K_0 = 0$ , является соответствующая величина  $a_{сгс}$ : для гладкой арматуры класса А-I – 0,005мм и ( $\delta_{зс} = 15$ мм), 0,025мм ( $\delta_{зс} = 20$ мм) и 0,050 ( $\delta_{зс} = 25$ мм); для арматуры периодического профиля класса А-III-0,050мм ( $\delta_{зс} = 15$ мм), 0,10 ( $\delta_{зс} \geq 20$ мм).

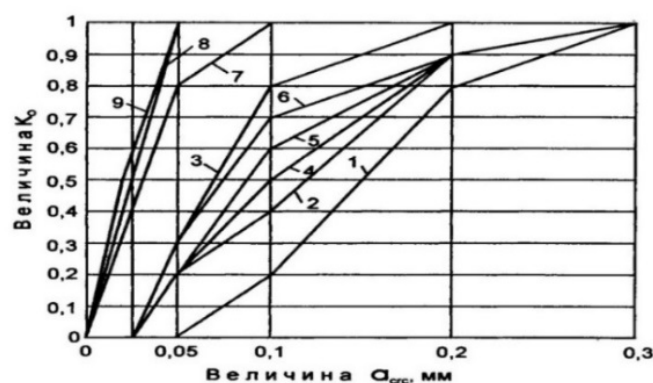


Рисунок 1 – Показатель коррозионной стойкости арматуры класса А-I в трещинах бетона  $K_0$ : 1 –  $d_a = 18$ мм и  $\delta_{зс} = 25$ мм; 2 –  $d_a = 14$ мм и  $\delta_{зс} = 25$ мм; 3 –  $d_a = 10$ мм и  $\delta_{зс} = 25$ мм; 4 –  $d_a = 18$ мм и  $\delta_{зс} = 20$ мм; 5 –  $d_a = 14$ мм и  $\delta_{зс} = 20$ мм; 6 –  $d_a = 10$ мм и  $\delta_{зс} = 20$ мм; 7 –  $d_a = 18$ мм и  $\delta_{зс} = 15$ мм; 8 –  $d_a = 14$ мм и  $\delta_{зс} = 15$ мм; 9 –  $d_a = 10$ мм и  $\delta_{зс} = 15$ мм

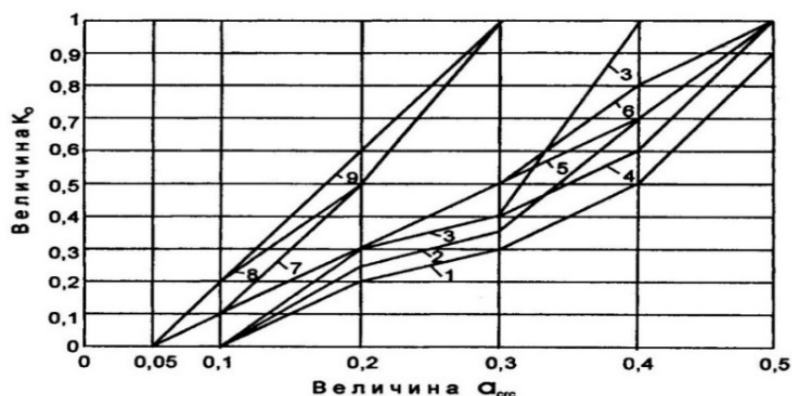


Рисунок 2 – Показатель коррозионной стойкости арматуры класса А-III в трещинах бетона  $K_0$ : 1 –  $d_a=18\text{мм}$  и  $\delta_{zc}=25\text{мм}$ ; 2 –  $d_a=14\text{мм}$  и  $\delta_{zc}=25\text{мм}$ ; 3 –  $d_a=10\text{мм}$  и  $\delta_{zc}=25\text{мм}$ ; 4 –  $d_a=18\text{мм}$  и  $\delta_{zc}=20\text{мм}$ ; 5 –  $d_a=14\text{мм}$  и  $\delta_{zc}=20\text{мм}$ ; 6 –  $d_a=10\text{мм}$  и  $\delta_{zc}=20\text{мм}$ ; 7 –  $d_a=18\text{мм}$  и  $\delta_{zc}=15\text{мм}$ ; 8 –  $d_a=14\text{мм}$  и  $\delta_{zc}=15\text{мм}$ ; 9 –  $d_a=10\text{мм}$  и  $\delta_{zc}=15\text{мм}$

Глубина ( $\delta$ ) и длина ( $l$ ) участка коррозионного поражения арматуры определяются классом арматуры, значением  $a_{\text{crs}}$  и величиной  $\Phi$  ( $\Phi = d_a / \delta_{zc}$  – отношение диаметра арматуры к толщине защитного слоя бетона) (рисунки 3 и 4).

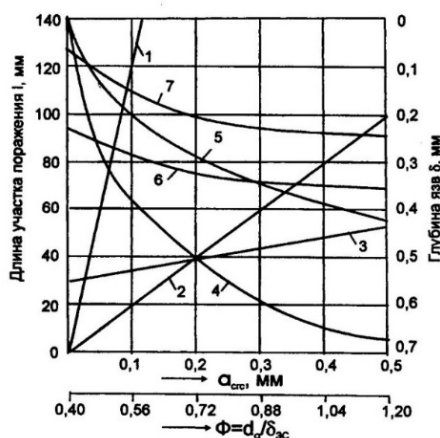


Рисунок 3 – Показатель коррозионного поражения арматуры класса А-I в зоне трещин бетона: 1 –  $l_{\text{max}}(a_{\text{crs}})$ ; 2 –  $l_{\text{cp}}(a_{\text{crs}})$ ; 3 –  $l_{\text{cp}}(\Phi)$ ; 4 –  $\delta_{\text{max}}(l_{\text{crs}})$ ; 5 –  $\delta_{\text{cp}}(a_{\text{crs}})$ ; 6 –  $\delta_{\text{max}}(\Phi)$ ; 7 –  $\delta_{\text{cp}}(\Phi)$

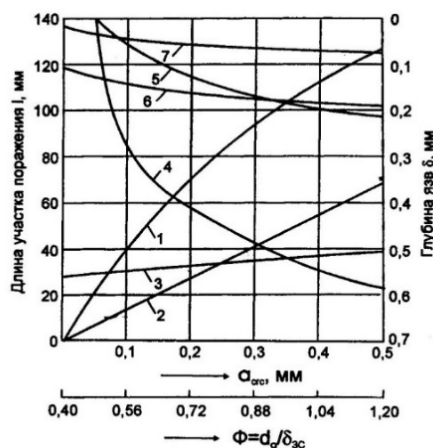


Рисунок 4 – Показатель коррозионного поражения арматуры класса А-III в зоне трещин бетона 1 –  $l_{\max}(a_{\text{срс}})$ ; 2 –  $l_{\text{ср}}(a_{\text{срс}})$ ; 3 –  $l_{\text{ср}}(\Phi)$ ; 4 –  $\delta_{\max}(l_{\text{срс}})$ ; 5 –  $\delta_{\text{ср}}(a_{\text{срс}})$ ; 6 –  $\delta_{\max}(\Phi)$ ; 7 –  $\delta_{\text{ср}}(\Phi)$

В СНиП 2.03.11-85\* и ГОСТ 31384-2008 приняты различные значения нормативной ширины продолжительного раскрытия трещин в железобетонных конструкциях при воздействии сильноагрессивной жидкой среды, соответственно равные  $a_{\text{срс}} = 0,10\text{мм}$  и  $a_{\text{срс}} = 0,05\text{мм}$ . Результаты эксперимента показывают, что при действии постоянной нагрузки для арматуры периодического профиля, экономически обоснованной нормативной шириной раскрытия поперечных трещин в сильноагрессивной жидкой среде является величина  $a_{\text{срс}} = 0,10\text{мм}$ .

Коррозионное поражение арматуры в железобетонных элементах при хлоридной коррозии возрастает в карбонизированном бетоне, в котором критическая концентрация хлоридов, при которой начинается коррозия арматуры, уменьшается в два раза. В этих условиях раскрытие коррозионных продольных трещин и отслоение защитного слоя бетона наблюдается уже после 2 лет эксплуатации железобетонной конструкции в агрессивной среде [15]. Карбонизация бетона, предшествующая прониканию хлоридов в бетон, значительно ускоряет скорость и интенсивность коррозии арматуры, по сравнению с обратной последовательностью [1]. Поэтому исследование влияния углекислого газа на карбонизацию бетона в поперечных трещинах



имеет большое значение для обеспечения нормативной долговечности изгибаемых железобетонных элементов, в условиях воздействия на них агрессивных хлоридсодержащих сред.

Содержание углекислого газа в обычном чистом воздухе составляет около  $600\text{мг/м}^3$ . В промышленной атмосфере эта величина может возрасти в десятки раз. Другие кислые газы присутствуют в ней в значительно меньшем количестве. В зависимости от вида газа их предельные допустимые по санитарным нормам концентрации составляют  $0,1-10\text{ мг/м}^3$  [9,16]. Поэтому в реальных условиях эксплуатации ведущая роль в нейтрализации бетона принадлежит углекислому газу [9, 16].

Проницаемость поперечных трещин для кислых газов намного выше, чем у бетона без трещин. Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в поперечной трещине бетона с шириной раскрытия  $a_T = 0,20\text{мм}$  равен коэффициенту диффузии его в воздухе  $D_{\text{CO}_2} = 0,14\text{ см}^2/\text{с}$ , что на три порядка выше, чем для бетонов средней плотности [9].

Большое значение для установления фактической долговечности железобетонных конструкций из-за условия коррозионной сохранности арматуры, является определение количества углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), поступающего к поверхности арматуры за определённое время с учётом его поглощения бетоном в стенках поперечных трещин. Предлагается наиболее благоприятный случай для повышения долговечности железобетонных элементов, когда скорость проникания  $\text{CO}_2$  в зону поперечных трещин является соизмеримой со скоростью поглощения его бетоном стенками поперечных трещин. Благодаря этому физико-химическому процессу концентрация углекислого газа в полости поперечной трещины в течение длительного времени может иметь низкое значение. Методика расчёта, основанная на использовании первого закона Фика [8, 9], разработанная физическая модель, сам расчёт и его результаты приведены в работе [17].

С помощью математических расчётов получены следующие функциональные

зависимости  $C_x$  при заданных значениях  $K$ , где  $K = \left[ \frac{8D_B m_0 \delta^4}{D_B^2 a_T^2 T} \right]$ :

$$K_1 = 0 \rightarrow C_{1x} = C_0; \quad K_2 = 0,2 \rightarrow C_{2x} = 0,786 C_0;$$

$$K_3 = 0,4 \rightarrow C_{3x} = 0,540 C_0; \quad K_4 = 0,6 \rightarrow C_{4x} = 0,470 C_0;$$

$$K_5 = 0,8 \rightarrow C_{5x} = 0,420 C_0; \quad K_6 = 1 \rightarrow C_{6x} = 0,380 C_0;$$

$$K_7 = 2,0 \rightarrow C_{7x} = 0,270 C_0; \quad K_8 = 4,0 \rightarrow C_x = 0,170 C_0.$$

В функциональных зависимостях приводятся следующие условные обозначения:  $C_x$  – концентрация углекислого газа в полости трещины на границе карбонизации (относительные единицы);  $C_0$  – содержание углекислого газа в воздухе (относительные единицы);  $D_B$  – эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в карбонизированном слое бетона, см<sup>2</sup>/с;  $D_B$  – коэффициент диффузии CO<sub>2</sub> в воздухе, см<sup>2</sup>/с;  $m_0$  – реакционная способность бетона, характеризующая объём газа, поглощаемый единицей объёма бетона;  $\delta$  – толщина защитного слоя бетона, см;  $a_T$  – ширина раскрытия трещины, см;  $T$  – время поступления газа в полость трещины, с.

Время (с), за которое в полости трещины получается соответствующее  $K$  соотношение  $C_x/C_0$ :

$$T = \left[ \frac{8D_B m_0 \delta^4}{D_B^2 a_T^2 K} \right]. \quad (1)$$

Результаты расчётов, выполненные по формуле (1) с учётом принятых значений ( $m = 50$ ,  $D_B = 1 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с,  $D_B = 0,14$  см<sup>2</sup>/с) показывают, что повышение концентрации углекислого газа в полости трещины происходит постепенно и тем быстрее, чем выше плотность бетона [12]. Однако, сравнительно небольшие значения времени достижения соответствующей относительной концентрации газа, по сравнению с нормативным сроком эксплуатации зданий и сооружений, позволяет сделать вывод об их нерешающей роли по влиянию в эксплуатационных условиях на увеличение долговечности железобетонных конструкций.

Образующиеся продукты электрохимической реакции на поверхности арматуры и механическая колющая нагрузка полости поперечных трещин твёрдым составом агрессивной среды способствуют затуханию коррозионных процессов на арматуре в постоянно раскрытых поперечных трещинах бетона с шириной раскрытия до 0,4 мм [7, 18]. Изменение диффузионной проницаемости поперечных трещин, по СНиП 2.03.11-85\*, определяет сохранение нормативных сроков службы железобетонных конструкций с шириной раскрытия поперечных трещин от 0,15 мм до 0,30 мм.

В результате воздействия эксплуатационной нагрузки на железобетонные конструкции в силовых поперечных трещинах бетона на границе «бетон – арматура», возникают микротрещины в бетоне по обе стороны от поперечных трещин, образующие зону влияния поперечных трещин [7]. При переменном воздействии нагрузки происходит нарушение оксидной пассивирующей плёнки на поверхности арматуры [8].

Циклическое переменное раскрытие ширины поперечной трещины вызывает снижение щелочности не только бетона стенок поперечных трещин, но и бетона вдоль поверхности арматурного стержня периодического профиля со скоростью 1-2 мм в год [10].

Необходимо отметить, что отсутствие обоснованной количественной оценки коррозии арматуры в силовых поперечных трещинах бетона способствует образованию коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона, наличие которых приводит железобетонную конструкцию в предаварийное состояние [8, 19]

Для исследования влияния переменной и постоянной нагрузки на коррозионное поражение арматуры в зоне поперечных трещин проведён длительный эксперимент на прямых моделях железобетонных элементов с размерами 1500×200×70 мм с рабочей арматурой диаметром 12 мм класса А-III при периодическом воздействии на половину образцов от общего их количества 3 %-го раствора хлористого натрия.

Полученные результаты экспериментального исследования показывают, что длина участка карбонизации контактного слоя бетона с арматурой в зоне влияния поперечных трещин зависит от ширины их раскрытия  $a_{\text{срс}}$ . На рисунке 5 приведены значения длин участков карбонизации бетона в зонах поперечных трещин, полученные в зоне чистого изгиба на 27 опытных образцах, испытанных в агрессивных и неагрессивных условиях при действии переменной и постоянной нагрузки в течение одного года [20].

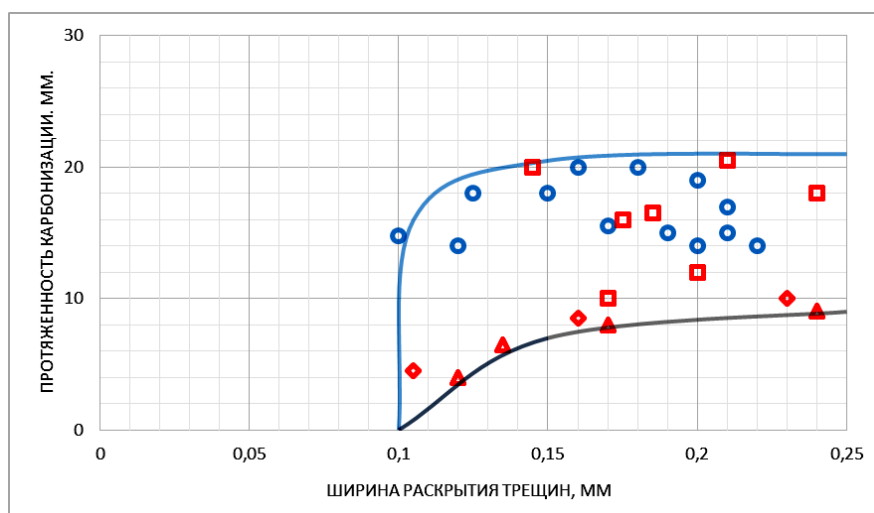


Рисунок 5 – Протяженность участка карбонизации контактного слоя бетона в зоне влияния трещин при переменном и постоянном их раскрытии после окончания испытания образцов: квадраты – неагрессивные условия испытания при переменной нагрузке; окружности – агрессивные условия испытания при переменной нагрузке; треугольник – агрессивные условия испытания при постоянной нагрузке; ромб – неагрессивные условия испытания при постоянной нагрузке.

При действии постоянной и переменной нагрузки и агрессивной среды, содержащей хлорид-ионы, в полости поперечных трещин в бетоне вокруг арматурного стержня при  $a_{\text{срс}} < 0,10\text{мм}$  сохраняется щелочная среда. Следовательно, только значения ширины раскрытия поперечных трещин с  $a_{\text{срс}} < 0,10\text{ мм}$  при рассмотренных условиях испытания могут предлагаться как

нормативные величины, обеспечивающие коррозионную сохранность арматуры.

Результаты экспериментального исследования карбонизации контактного бетонного слоя с арматурой в зоне влияния поперечных трещин свидетельствуют о том, что переменная нагрузка в два раза увеличивает длину участка карбонизации по сравнению с постоянной, что является косвенным доказательством более интенсивного микроразрушения бетона в приарматурной зоне и нарушения усилий сцепления бетона с арматурой при воздействии переменной нагрузки, по сравнению с постоянной.

Результаты проведённых экспериментально- теоретических исследований показывают:

- отсутствие в основных действующих нормативных документах по расчёту и защите железобетонных конструкций от коррозии единого системного подхода к назначению нормативной ширины раскрытия расчётных поперечных трещин;
- наличие линейной зависимости коэффициента депланации бетона поперечных трещин от толщины защитного слоя бетона для арматуры периодического профиля;
- существенное влияние депланации бетона в расчётных поперечных трещинах на коррозионное поражение арматуры периодического профиля;
- необходимость проведения дифференциации нормативной ширины раскрытия расчётных поперечных трещин для арматуры различного профиля;
- определяющее влияние продольных коррозионных трещин в защитном слое бетона на долговечность обычных железобетонных элементов, испытывающих воздействие сильноагрессивной жидкой хлоридсодержащей среды.

### **Библиографический список:**

1. Zivica V. Corrosion of reinforcement induced by environment containing chloride and carbon dioxide // Bulletin of Materials Science. 2003. Vol. 26. №6. P. 605-608.
2. Bob C. Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures // Proceedings of the International Conference. Scotland: University of Dundee, 1996. P. 17-28.
3. Маринин А.Н., Гарибов Р.Б., Овчинников И.Г. Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации. Саратов: Рата, 2008. 259с.
4. Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкая проницаемости: моногр. М: ФГУП ЦПП, 2006. 520с.
5. Оатул А.А., Кутин Ю.Ф., Пасешник В.В. Сцепление арматуры с бетоном (обзор исследований по разработке основ теории) // Известия Вузов. Строительство и архитектура. 1977. №5. С. 3-16.
6. Фартушный А.Г. Влияние деформации сечения бетона на закрытие трещин железобетонных конструкций // Труды ЦНИИЭПсельстроя. Конструкции и технология строительства сооружений силосного типа. М., 1977. №19. С. 17-25.
7. Трещины в железобетоне и коррозия арматуры / В.М. Москвин, С.Н. Алексеев, Г.П. Вербецкий и др. М.: Стройиздат, 1971. 144 с.
8. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры и др. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
9. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин и др. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
10. Степанов С.Н. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций, работающих в агрессивных средах с учётом коррозионного износа рабочей арматуры: дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород: НГАСУ, 2005. 180 с.

11. Мигунов В.Н., Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Экспериментально-теоретическое моделирование армированных конструкций в условиях коррозии: монограф. Пенза: ПГУАС, 2014. 352с.

12. Мигунов В.Н. Экспериментально-теоретическое исследование коррозии и долговечности железобетонных конструкций с трещинами: монограф. Пенза: ПГУАС, 2013. 304с.

13. Мигунов В.Н. Влияние переменной нагрузки и амплитуды изменения ширины раскрытия трещин на коррозионное поражение арматуры в трещинах железобетонных конструкций // Известия Вузов. Строительство. 2002. № 10. С. 134–137.

14. Рекомендации по обеспечению надёжности и долговечности железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений при их реконструкции и восстановлении / Харьковский Промстройниипроект. М.: Стройиздат, 1990. 9с.

15. Ванникова Д.М. Исследование процессов коррозии и защита стен производственных зданий, эксплуатируемых в условиях хлорной агрессии: автореф. дис.... канд. техн. наук // М.: МАРХИ, 1962. 22 с.

16. Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости: дис. ... д-ра техн. наук. М.: НИИЖБ, 2004. 432 с.

17. Мигунов В.Н. Коррозия арматуры в трещинах железобетонных конструкций в газовой атмосфере производственных зданий // Известия Вузов. Строительство. 2008. №8. С. 4-9.

18. Пухонто Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен). М.: АСВ, 2004. 424 с.

19. Мигунов В.Н., Овчинников И.Г. Длительные экспериментальные исследования влияния продольных трещин в защитном слое бетона на изменение долговечности, кратковременной жёсткости и прочности внецентренно сжатых с малым эксцентриситетом строительных обычных

железобетонных элементов // Известия Вузов. Строительство. 2010. №2. С. 125-130.

20. Мигунов В.Н. Влияние переменной ступенчато-повторной нагрузки и агрессивной среды на несущую способность изгибаемых железобетонных конструкций и рабочей арматуры // Известия Вузов. Строительство. 2000. № 4. С. 129-132.