



УДК 691.544:666.941.2

**Н.С. Ступень**

*канд. техн. наук, доц., зав. каф. химии*

*Брестского государственного университета имени А.С. Пушкина*

**АГРЕССИВНЫЕ СРЕДЫ ДЛЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ:  
КЛАССИФИКАЦИЯ, МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ**

*В статье представлен аналитический обзор исследований по изучению влияния различных агрессивных сред на долговечность бетонных и железобетонных конструкций. Представлены результаты по оптимальному соотношению хлорид-, сульфат- и гидрокарбонат-ионов и ионов водорода в бетонных композициях. Даны рекомендации по контролю и устранению возможных причин коррозионных процессов в цементном клинкере и стальной арматуре.*

Несмотря на проведенные в последние годы многочисленные исследования в области коррозии бетона, остаётся немало нерешённых проблем, связанных с разрушениями бетонных и железобетонных конструкций. В большинстве случаев основными причинами повреждений являются коррозионные процессы, развивающиеся в результате неблагоприятного воздействия окружающей среды. Так, большинство путепроводов и мостов городов, дорожные покрытия разрушаются от применения противогололедных реагентов из-за выделения в атмосферу оксидов азота, сернистого и других газов, выбрасываемых двигателями автотранспорта, промышленными предприятиями, от размораживания бетона. Ежегодные аварийные обрушения коммунальных тоннелей, особенно коллекторов сточных вод, происходят в первую очередь в результате газовой коррозии металлических и железобетонных элементов.

Такие повреждения имеются на самых крупных городских коллекторах. В последнее время распространилось поражение конструкций плесневыми грибами. Это, по данным санитарных врачей и экологов, неблагоприятно сказывается на здоровье человека, особенно детей. Большую неприятность доставляют строителям высолы на кирпичных и бетонных конструкциях жилых и гражданских сооружений. Агрессивному воздействию подвергается в разных отраслях народного хозяйства от 15 до 75% строительных конструкций зданий и сооружений.

В условиях роста промышленного и жилищного строительства постоянно растет потребность в получении строительных материалов, отвечающих современным требованиям. В настоящее время бетоны практически всех составов разрабатываются и производятся с химическими или минерально-химическими добавками. Современные добавки позволяют существенно повысить качество бетона, уменьшить сроки схватывания, сэкономить материальные и энергетические ресурсы предприятий. Но при этом зачастую теряется долговечность железобетонных конструкций. Это связано прежде всего с коррозионными процессами, которые идут в цементном камне и стальной арматуре.

Весьма часто наблюдаются разрушения строительных конструкций, соприкасающихся с грунтами, насыщенными или периодически увлажняемыми минерализованными водами. Коррозионные процессы в твёрдой и газообразной средах фактически начинаются и протекают только в присутствии жидкой фазы. Для бетонных и железобетонных конструкций это природные и промышленные растворы, содержащие различное количество растворённых веществ (кислот, солей, щелочей) или некоторые органические жидкости.



Атмосферныя воды, выпадаючыя ў выглядзе асадкаў, змяшчаюць звычайна нічтожнае колькасць солей: хлорид-іонаў, як правіла, у межах 1,5–4 мг/л, а сульфатаў у расліце на  $\text{SO}_3$  – ад 1 да 16 мг/л. Колькасць  $\text{SO}_3$  можа быць значна большае ў раёне гарадоў, дзе паветра забруднюецца дымавымі газамі. Акрамя таго, атмосферныя воды змяшчаюць некаторае колькасць растваранага  $\text{CO}_2$ , зніжаючага рН у выніку ўтварэння ў вады угольнай кіслоты да 5,7.

Адным з асноўных фактараў, вызначаючых скорасць і ступень карозійных працэсаў будавальных збудаванняў, з'яўляецца хімічны склад грунтоўных вод.

Хімічны склад грунтоўных вод залежыць ад многіх фактараў і ў тым ліку ад складу парод і характара пачв, з якімі соприкасается вада, складу паітаючых вод (атмасферных, речных, морскіх і т.д.), блізкасці вод да паверхнасці і кліматычных умоў даннага раёна. У гідрогэалагічных даследаваннях прапанавана некалькі варыянтаў класіфікацыі складу падземных вод у залежнасці ад ступені іх мінералізацыі. Па прапанаваным К.Е. Піцеўвай [1], падземныя воды можна раздзяліць на чатыры групы з рознай ступенню мінералізацыі. Першая група – прэсныя воды са ступенню мінералізацыі < 1 г/л. Гэта пераважна гидрокарбонатныя кальцаево-магніевыя воды. Другая група – слабомінералізаваныя воды са ступенню мінералізацыі 1–10 г/л. Падземныя воды гэтай групы ўключаюць гидрокарбонатны, сульфатны і хлорідны тыпы па аніонам і кальцаевы, магніевы і натрыевы тып па катіонам. У трэцюю групу ўваходзяць мінералізаваныя воды са ступенню мінералізацыі 10–30 г/л. Гэтыя воды хлоріднага тыпу па аніонам і натрыевага тыпу па катіонам. Чвёртая група ўключае воды са ступенню мінералізацыі большае 30 г/л, яны адносяцца да хлоріднага тыпу па аніонам і да натрыеваму, кальцаевому, магніевому па катіонам. Прадэльнае змяшчэнне гидрокарбонатнага іона  $\text{HCO}_3^-$  залежыць ад таго, з якімі катіонамі звязаны сульфатны іон. Змяшчэнне іонаў  $\text{HCO}_3^-$  у грунтоўных водах невялікае. У прэсных грунтоўных водах пры мінералізацыі 5–6 г/л можа змяшчацца да 0,5–0,6 г/л іонаў  $\text{HCO}_3^-$ . У мінералізаваных грунтоўных водах можна выдзяліць як воды са значным колькасцем іонаў  $\text{SO}_4^{2-}$ , так і воды з вельмі малым змяшчэннем гэтых іонаў. Нягледзячы на праведзеныя ў апошнія гады шырокія даследаванні, застаюцца некалькі нерашаных праблем, абумоўленых указаным відам карозіі бетона, колькасцю іона  $\text{Cl}^-$ , звязанага з катіонамі  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  і  $\text{K}^+$ . У глыбінных падземных водах у буйным колькасці прысутствуе раствараны ўглекіслы газ.

Ацаніць ступень агрэсіўнасці вод можна толькі з улікам усяго комплексу паказатэляў, уключаючых хімічны склад грунтоўных вод, прызначэнне збудаванняў, асаблівасці іх канструкцый, тэрмін службы, прымяняемы цэмент і патрабаванні, прад'яўляемыя да бетону.

Дзеянне агрэсіўнай воды трэба ўспрамаваць і не дапускаць узнікнення гэтых разбураючых па сваім выніку працэсаў. Меры абароны маюць комплексны характар і ўключаюцца ў выбар віду і маркі цэмента, запоўніцеляў, падбору і прыгатаванні шчыльных бетонаў, выкарыстанні ў шэрагу выпадкаў канструктыўных мер абароны (у тым ліку гидроізаляцыі бетона). Для таго, каб разгледзець механізм разбураўлення бетона пры дзеянні розных па складу агрэсіўных вод, трэба ўспрамаваць, што бетон мае асновавую асяродку, дзякуючы яму і магчыма ўключэнне ў яго металу сталёвай арматуры пры вытворчасці жалезабетона. Зніжэнне асновавасці бетона ў выніку паступовага вышэлачывання – гэта складаны працэс, на які рашаючае ўплывае жорсткасць вады-асяродку.

Разбураўленне бетона пад уплывам вады, як і любога хімічнага працэсу, у даннаму выпадку гидролітычная дысацыяцыя клінкерных мінералаў і прадуктаў но-



вообразования, составляющих цементный камень, зависит от количества этой воды и поверхности цементного камня, контактирующей с водой. Чем плотнее бетон, тем при прочих равных условиях меньше поверхность контакта, из-за которого возникает коррозия. Исходя из этого обычно выделяют три вида коррозии цементного клинкера [2; 3].

**Коррозия I вида.** Очень мягкая вода способна воздействовать на поверхность бетона, покрытую карбонатом кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), поэтому именно это обстоятельство приводит к кажущемуся различию в растворении ею больших количеств извести по сравнению с жесткой (более минерализованной) водой. При наличии в воде гидрокарбонатов систематически происходит карбонизация бетона и, следовательно, значительное повышение его водостойкости. Соединения, растворяющиеся образовавшиеся карбонатные слои (затвердевшие пленки  $\text{CaCO}_3$ ), будут вызывать выщелачивание – удаление из цементного камня извести. В плотном бетоне разрушение резко замедляется, так как уменьшается вынос извести из цементного камня.

Процесс разрушения бетона происходит еще быстрее очень мягкими водами, если применять вяжущие, в продуктах гидролиза и гидратации которых не присутствует свободная известь (например, при использовании пуццолановых и шлакопортландцементов оптимальных составов, для твердения которых созданы необходимые условия). При одном и том же составе и способах уплотнения бетоны без органических добавок и электролитов по водонепроницаемости можно разместить в следующем порядке (по возрастанию этого показателя, если за эталон взят портландцемент): шлакопортландцемент, пуццолановый портландцемент с гидравлической добавкой трепелом; пуццолановый портландцемент с гидравлической добавкой сиштоффом. С течением времени указанный порядок в получении менее водонепроницаемых бетонов становится еще более разительным, что связано с процессом твердения.

Процессы связывания извести, выделяющейся при гидролизе и гидратации минерала  $\text{C}_3\text{S}$ , можно назвать вторичными. Следовательно, результат уплотнения и повышенная водостойкость цементного камня, а в целом водонепроницаемость бетона скажется лишь с течением времени, большим, чем период, необходимый для первичных процессов между портландцементом и водой. Научные разработки этого вопроса в наше время значительно продвинулись и позволяют скорректировать указанный порядок распределения вяжущих материалов по эффективности получения бетонов высокой водонепроницаемости. Новые виды шлакопортландцемента позволяют получать бетон с высокой водонепроницаемостью, в частности, благодаря возможности получать изопластичные смеси по сравнению со смесями на других цементах, но с меньшим содержанием воды.

По расчетам количество извести, выделяющейся при твердении портландцемента, в среднем таково: на 28 суток – около 10%, на 90 суток – около 15% от массы цемента, содержащегося в бетоне. В случае выщелачивания извести и соответствии со степенью растворимости остальных компонентов цементного камня будет происходить их диссоциация, усиливающая коррозию цементного камня. Вначале начнется диссоциация высокоосновных гидросиликатов кальция (с основностью от 1,5 до 2 молекул  $\text{CaO}$  на 1 молекулу  $\text{SiO}_2$ ) с переходом их в более устойчивый низкоосновный гидросиликат кальция. По окончании диссоциации гидросиликатов в порядке растворимости гидратированных соединений цемента, после того как концентрация  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в бетоне (при ее дальнейшем выщелачивании) достигает предельного значения – четырехкальциевого гидроалюмината (1,08 г/л  $\text{CaO}$ ), начнется диссоциация этого соединения и т. д.



Указанная схема лежыць у аснове працэса карозіі I віда. Яна тыпічная для любога вяжучага, аднак у другіх вяжучых асновай для ўзнікнення разрушэння і скорасці гэтага працэса з'яўляецца іная структура вады і іная шчыльнасць бетону. Сярод іншага трэба ўлічваць, што перанос прадуктаў карозіі ў масу збудаванняў таксама прыводзіць да шчыльнасці бетону. На аснове большага ліку эксперыментаў разроблены нормы, якія ўлічваюць сказанае аб магчымасці шчыльнасці бетону прадуктамі карозіі цементнага камяня, памеры збудаванняў, падвергнутых карозіі, і ўмовы пранікнення м'якай вады ў бетон.

**Карозія II віда.** У адрозненне ад м'якай вады агульнае змяшчэнне іонаў у вадзе з высокай ступенню мінералізацыі дасягае некалькіх дзясяткаў тысяч міліграмм у літры. Такія вады сустракаюцца ў пародах, якія змяшчаюць растворымыя мінералы. Хларыды, сульфаты і бикарбонаты кальцыя, магназія і натрыя (іоны  $\text{Cl}^-$ ;  $\text{SO}_4^{2-}$ ;  $\text{HCO}_3^-$ ;  $\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{Mg}^{2+}$ ;  $\text{Na}^+$ ) у рознай колькасці змяшчаюцца ў грунтовых, падземных, рэчных, океанскіх і морскіх водах. Трэба вельмі ўважліва адносіцца да выбару цэменту і складу бетону пры будаўніцтве ў солончакіх ґрунтах і забалочаных месцах [4].

Вады кембрыйскай сістэмы, якія маюць высокую (ад 2 000 да 5 000 мг/л) мінералізацыю, змяшчаюць многа хларыстага натрыя. У водах сілурыйскай сістэмы, якія знаходзяцца ў вапняках, пераважаюць бикарбонаты кальцыя і магназія пры адносна невялікай мінералізацыі (ад 300 да 500 мг/л). Ступень мінералізацыі і склад вады дэвонскай сістэмы розныя. Вада морскіх адкладаў, пермскай сістэмы пры высокай мінералізацыі змяшчае значнае колькасць сульфатаў і хларыдаў. Ступень мінералізацыі ўказаных вод тым вышэй, чым яны глыбей размяшчаныя адносна паверхні.

Асаблівае ўважэнне трэба адрозніваць і на вады забалочаных месцаў, якія маюць нізкія значэнні pH; прысутнасць арганічных гуміновых кіслот аказвае спецыфічнае (тормозящее) дзеянне на затвердванне бетону. Змяшчэнне ў вады-срэды торфа можа не толькі значна затармазіць працэс затвердвання бетону (раствору), але і выклікаць яго разрушэнне. Пералічаны іонны склад вады (акрамя сульфата іонаў) выклікае карозію II віда.

Апытанні з выкарыстаннем драбненага торфа ў складзе пяску паказалі: пры яго змяшчэнні да 1,3% трываласць зразкаў падае прыкладна ў 2 разы, а пры змяшчэнні да 2,52% трываласць зніжаецца ў 6 разоў.

Улічваючы магчымасць разрушэння бетону (раствору), вельмі важна дакладна дозіраваць гіпс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Магчымы наступныя два выпадкі разрушэння бетону пры ўздзеянні сульфатных вод:

1. Чыста сульфалюмінатнае, калі ў вады-срэды канцэнтрацыя іона  $\text{SO}_4^{2-}$  незначыцельна.

2. Камплекснага ўздзеяння, дзе акрамя іона  $\text{SO}_4^{2-}$  пры яго значыцельных канцэнтрацыях у вады-срэды разрушэнне выклікаецца таксама крystalізацыяй гіпсу. Вынікі дзеяння сульфатнай карозіі на бетон неаднаковыя і залежаць не толькі ад канцэнтрацыі іона  $\text{SO}_4^{2-}$ , але і ад солевага складу вады, што адражана ў нормах [4].

Корродуючы дзеянне солей сернай кіслаты, дысоцыіраваных у вадняй срэды, такіх як катыёны ўсіх металоў, аснованія (гідраты аксідоў), якія маюць меншую па адношэнні да  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  растварымасць у вадзе, звязана з іх растварымасцю. Напрыклад, калі катыёны  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  з аналагічнай ім па ўказанаму прызнаку растварымасцю, запоўняюць капіляры бетону пры падсохненні вады, злучаюцца з ёй (з гідроксільным аніёнам вапняку  $\text{OH}^-$ ) у стабільныя для гэтых умоў злучэння,



то резко снизится в цементном камне ее содержание (этот случай типичен для коррозии бетона сточными промышленными водами).

**Коррозия III вида.** Она наступает при насыщении определенными солями натрия, часто являющимися комплексными соединениями. Это могут быть даже т.н. тетрагидроксиалюминаты, которые являются очень хрупкими. Когда в бетоне появляются такие участки, то он становится чрезвычайно уязвимым к механическим вибрациям. Также часто при использовании воды с переменной жесткостью возможно образования гидроксида магния, который также является очень мягкой субстанцией. Единственный способ противостоять этому типу коррозии – это следить за составом воды, но использовать при этом дистиллированную воду категорически запрещено.

Оценка степени агрессивного воздействия твердых сред на конструкции определяется стойкостью материала, характеристикой твердой среды и относительной влажностью воздуха. Характеристикой агрессивных твердых сред является их растворимость и гигроскопичность. Малорастворимыми солями считаются соли с растворимостью менее 1 г/л. К малогигроскопичным солям относятся те, которые имеют при температуре +20 °С равновесную относительную влажность 60% и более, а к гигроскопичным – менее 60%.

При одновременном развитии коррозионных процессов, различных по своему характеру, например, при совместном воздействии на бетон водных растворов солей и мороза или попеременном их воздействии, степень агрессивности среды определяется экспериментом в натуральных условиях, т.е. определяется снижение прочности и изменение внешнего вида образцов, находившихся в исследуемой среде в течение года.

По воздействию на бетон среды делят на три типа: неагрессивная, слабоагрессивная, среднеагрессивная.

Неагрессивной считается среда, которая не вызывает снижения прочности материала и не способствует появлению внешней коррозии.

Слабоагрессивная среда вызывает снижение прочности материала не более чем на 5% и слабое поверхностное разрушение материала.

Среднеагрессивной считается среда, снижающая прочность бетона в зоне коррозии на 5–20% и вызывающая повреждение углов или образование волосяных трещин. Сильноагрессивная среда вызывает снижение прочности материала более чем на 20% с ярко выраженным разрушением материала.

Основным типом грунтовых вод на большей части территории стран СНГ и Беларуси в том числе является сульфатно-гидрокарбонатная вода, которая содержит катионы  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  а также анион  $\text{Cl}^-$ .

Ранее [5] нами были установлены закономерности изменения фазового и минералогического состава в системе  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$  под действием сульфат-ионов, а также под влиянием совместного действия сульфат- и гидрокарбонат-ионов. Установлено, что в присутствии гидрокарбонат-ионов в сульфатном растворе в системе  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$  заметно уменьшается содержание гидросульфатоалюмината кальция. Совместное влияние хлорид- и сульфат-ионов зависит от количественного соотношения между ними. Экспериментально установлено, что при концентрациях сульфат-ионов 3 и 5 г/л и при соотношении  $\text{SO}_4^{2-} : \text{Cl}^- = 1 : 1$  степень выщелачивания гидроксида кальция в системе уменьшается [5; 6].

Установлено также, что хлориды натрия, кальция, магния являются сильноагрессивным фактором, вызывающим процесс сульфатной коррозии цементного клинкера и стальной арматуры в железобетонных конструкциях. Но при определенных соотношениях сульфат и хлорид-ионов, хлориды металлов не оказывают заметного агрессив-





ного влияния по отношению к цементному клинкеру. Снижение агрессивности хлоридов связано с наличием в грунтовых водах гидрокарбонат-ионов. При совместном воздействии гидрокарбонатных и хлоридных ионов образование гидросульфатоалюмината кальция в трехсульфатной форме значительно замедляется, а это значит, что замедляется процесс коррозии цементного клинкера [6].

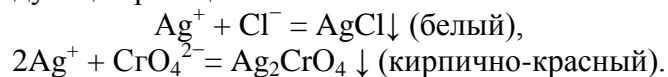
Наиболее часто коррозионные повреждения арматуры возникают в результате действия хлорид-ионов, обладающих способностью разрушать пассивирующие пленки на поверхности стали. В результате этого образуются гальванические пары. Коррозионные поражения анодных участков приводят к возникновению «язв» на поверхности стальной арматуры.

При попадании в бетон хлорид-ионов коррозия стальной арматуры наступает в результате двух идущих параллельно процессов:

- 1) коррозии цементного камня и карбонизации защитного слоя;
- 2) хлоридной коррозии арматуры.

Таким образом, для оценки агрессивности грунтовых вод по отношению к железобетонным конструкциям необходимо рассматривать совместное влияние катионов и анионов данной среды на устойчивость цементного клинкера и стальной арматуры к процессам коррозии.

Контроль содержания хлорид-ионов в цементном клинкере, а также их влияние на интенсивность процессов коррозии цемента и стальной арматуры можно проводить доступными аналитическими методами [7]. Для этого готовят водную вытяжку из цемента. Испытание фильтрата на хлорид-ионы можно проводить аргентометрией (методом Мора) с индикатором раствора хромата калия  $K_2CrO_4$ . При титровании по методу Мора протекают следующие реакции:



Ионы  $CrO_4^{2-}$  реагируют с ионами  $Ag^+$  с образованием осадка кирпично-красного цвета, но окрашенный осадок в определенных условиях начинает выделяться лишь после того, как ионы  $Cl^-$  практически нацело осаждены в виде хлорида серебра  $AgCl$ .

Это возможно вследствие того, что растворимость осадка хромата серебра (ПР ( $Ag_2CrO_4 = 2 \times 10^{-12}$ )) выше растворимости галогенидов серебра (ПР ( $AgCl = 1,7 \times 10^{-10}$ )). Осадок хромата серебра в точке эквивалентности образуется при концентрации индикатора 0,01 н. Титрование необходимо проводить в нейтральной среде, так как в кислой среде резко снижается чувствительность индикатора, а в щелочных растворах выделяется гидроксид серебра.

Количественное определение сульфат-ионов можно проводить гравиметрическим методом, используя в качестве осадителя горячий раствор 5%-ного раствора хлорида бария в присутствии 2–3 мл 2 н соляной кислоты.

Известно, что при соотношении сульфат- и хлорид-ионов 1 : 2 в бетоне даже замедляется сульфатная коррозия. Поэтому, определив содержание хлорид- и сульфат-ионов в затвердевшем цементном клинкере, в качестве рекомендации в технологической схеме можно учитывать химический состав добавки-ускорителя, подбирая необходимые концентрации сульфат- и хлорид-ионов [7].

Исследование фазового состава бетонных смесей с фосфата натрия добавкой, показало, что в структуре цементного клинкера с добавкой присутствует крупнокристаллическая фаза ортофосфата кальция и мелкокристаллическая фаза гидрофосфата кальция. Данные рентгенофазового анализа подтверждаются исследованием шлифов образцов. Основную поверхность шлифа образцов с фосфатной добавкой составляют



округлые зерна и их гроздевидные совокупности с четкими, а иногда размытыми границами. Зерна бесцветные, прозрачные, с показателем преломления 1,70–1,71. Более размытые зерна имеют показатель преломления 1,65–1,67. Оптические характеристики и внешний вид этих кристаллов соответствуют фосфату и гидрофосфату кальция. Свободный (несвязанный) оксид кальция в образцах без добавки фосфата натрия содержится в клинкерах в количестве, обычно не превышающем 0,75–1%. Это свидетельствует о неполноте реакций образования силикатов кальция. Свободный оксид кальция в клинкере представлен в виде скоплений или отдельных округлых зерен, часто примерно одинакового с белитом размера; его трудно обнаружить в прозрачном шлифе клинкера, но он хорошо виден в полированном шлифе, так как благодаря округлой форме заметно выделяется на поверхности шлифа. Содержание свободного оксида кальция в образцах с добавкой фосфата натрия, исходя из соотношения концентраций ионов  $\text{SO}_4^{2-} : \text{PO}_4^{3-} = 1 : 2$  уменьшается до 0,3%, а это влечет за собой уменьшение степени выщелачивания и стабилизации pH на высоком уровне (pH = 12) [8].

Для надежной защиты арматуры в бетоне необходимо, чтобы щелочность среды бетона была не ниже pH = 11,8. При меньших значениях pH возможна коррозия арматуры в бетоне. Сталь в щелочной среде пассивна. Наступление пассивности характеризуется резким облагораживанием электродного потенциала металла. Так, железо в активном состоянии имеет потенциал –0,40 В, а в пассивном его потенциал поднимается до +1 В. Пассивность обеспечивается покрытием оксидных пленок  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  или  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

В твердеющей бетонной смеси смещение потенциала стали в положительную сторону происходит не сразу. Значение потенциала стали, зависит от влажности и от проницаемости бетона для кислорода. Начальное значение pH в бетонной смеси велико. Со временем оно изменяется вследствие химизма процессов твердения. Поэтому важен нижний диапазон значений pH, при котором коррозия стали не идет, – 11,5–11,8 (по некоторым источникам pH = 12). Опытным путем установили, что диапазон потенциалов стали в бетоне при pH = 12–12,5 находится в области пассивности и коррозионные процессы не идут [3].

Понижение pH среды в бетоне наблюдается при уменьшении концентрации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  вследствие выщелачивания его проточной водой или в случае использования активных минеральных добавок. Вместе с тем в поверхностных слоях бетона может наблюдаться снижение щелочности вследствие нейтрализации гидроксида кальция кислотными жидкостями и газами (карбонизация). Активные минеральные добавки в составе портландцемента связывают гидроксид кальция, и концентрация извести в среде может снизиться настолько, что произойдет растворение гидроалюмината кальция. Гидроалю-минат в этом случае будет образовываться в присутствии сульфат-ионов в жидкой фазе, и его кристаллизация не вызовет разрушающих напряжений в цементном камне. Это может даже в какой-то степени способствовать уплотнению цементного камня.

Поэтому значения pH водных вытяжек из цементного клинкера дает информацию о степени выщелачивания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  под действием различных добавок. Для приблизительного определения pH можно использовать универсальную индикаторную бумагу. Точное измерение pH проводят pH-метром [7].

Таким образом, долговечность бетонных и железобетонных конструкций определяется условиями внешней среды, т.е. климатом местности, составом воздуха, воды и грунта, а также особенностями контакта между внешней средой и наружными поверхностями конструкции.



Один из основных путей повышения долговечности бетонных конструкций при воздействии различных агрессивных сред – создание плотного бетона. Высокопрочные бетоны, имеющие, как правило, достаточно однородную структуру и повышенную плотность, более устойчивы при работе в таких условиях.

При этом очень важно обеспечить получение эффективного защитного слоя (в конструкциях, предназначенных для работы в агрессивных условиях, толщина защитного слоя должна быть не менее 20 мм) и повышение трещиностойкости железобетонных конструкций. Одним из радикальных средств защиты конструкций от воздействия агрессивных сред является применение различного вида покрытий [2]. Покрытия, нанесенные после распалубки на поверхность конструкции, способствуют нормальному процессу твердения бетона и в значительной степени предупреждают появление и развитие усадочных трещин.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Питьева, К. Е. Гидрохимия / К. Э. Питьева. – М. : Наука, 1971. – 336 с.
2. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин [и др.]. – М. : Стройиздат, 1980. – 536 с.
3. Бетон. Часть 1: Общие технические требования, производство и контроль качества: EN 206-1. – Введ. 12.05.2000. – СЕН/ТС 104 (секретариат при DIN). – 103 с.
4. Москвин, В. М. О роли ионного и солевого состава раствора при сульфатной коррозии бетона / В. М. Москвин, Г. В. Любарская // Бетон и железобетон. – 1982. – № 9. – С. 16–18.
5. Ступень, Н. С. Исследование системы  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$  в присутствии ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{HCO}_3^-$  / Н. С. Ступень, Б. С. Шевченко, Ю. В. Волыничук // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. прыродазн. навук. – 2003. – № 2 (34). – С. 55–61.
6. Ступень, Н. С. Исследование совместного влияния хлорид-ионов и реакции среды на течение процессов коррозии в цементном камне стальной арматуре / Н. С. Ступень, М. В. Лукашевич // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2010. – № 2. – С. 19–25.
7. Ступень, Н. С. Исследование процессов коррозии в железобетонных композициях аналитическими методами / Н. С. Ступень // Химическая наука: современные достижения и историческая перспектива : материалы III Всерос. науч. интернет-конф. с междунар. участием, Казань, 31 марта 2015 г. – Казань, 2015. – С. 118–122.
8. Ступень, Н. С. Влияние фосфатных добавок на устойчивость магниезальных вяжущих / Н. С. Ступень // Менделеевские чтения 2014 г. : материалы Междунар. науч.-практ. конф. по химии и хим. образованию, Брест, 28 февр. 2014 г. – Брест, 2014. – С. 88–95.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 03.10.2016

#### **Stupen N.S. Aggressive Environment for Concrete: Structures Classification, Mechanisms of Action**

*The article presents an analytical review of studies on the impact of various corrosive environments on the durability of concrete and reinforced concrete structures. The results on optimum ratio chloride, sulfate and carbonate ions and hydrogen ions in concrete compositions. Recommendations to control and eliminate the possible causes of corrosion processes in the cement clinker and steel reinforcement.*