

УДК 691.32:539.3/4.001.57

## УПЛЫЎ КАРБАНІЗАЦЫІ НА КАНЦЭНТРАЦЫЮ ХЛАРЫДАЎ У ПОРАВАМ РАСТВОРЫ БЕТОНУ: АНАЛІЗ ВЫНІКАЎ ЭКСПЕРЫМЕНТАЛЬНЫХ ДАСЛЕДАВАННЯЎ

*С.М. Леановіч<sup>1</sup>, Jijun Miao<sup>2</sup>, Liu Junwei<sup>2</sup>, А.У. Каладзеў<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Беларускі нацыянальны тэхнічны ўніверсітэт, Мінск, Рэспубліка Беларусь;

<sup>2</sup>Тэхналагічны ўніверсітэт Ціндао, Кітай

e-mail: leonovichsn@tut.by

*Утрыманне хларыдаў і значэнне рН поравога раствора ў кантактнай зоне сталёвай арматуры з'яўляюцца галоўнымі параметрамі для ініцыявання і хуткасці карозіі. Поравая вадкасць цэментавога каменя была сцэджана з поравай прасторы высокім ціскам. Уплыў вода-цэментных суадносін, узросту і даданні хларыду ў свежую сумесь на ўтрыманне хларыдаў у поравым растворе ацэньвалася метадам іённай хромаціграфіі. Пры гэтым вызначана значэнне рН поравога раствора. Устаноўлена, што ўтрыманне свабоднага хларыду памяншаецца з ростам вода-цэментнай адносін і павялічваецца з колькасцю хларыду, які дадаецца ў свежую сумесь. Колькасць хімічна звязанага хларыду з часам павялічваецца, але зніжаецца з памяншэннем зместу растваранага хларыду ў поравым растворе. Адзначана значны ўплыў карбанізацыі на ўтрыманне хларыдаў у поравым растворе. Пасля поўнай карбанізацыі цэментавога раствора і цэментавога каменя з розным вода-цэментавой суадносінай ( $W/C = 0,5$  і  $0,7$ ) і з рознай колькасцю хларыду, дададзенага ў свежую сумесь (0%, 0,5% і 1%), змест растваранага хларыду павялічваецца ў 2-12 разоў. Адначасова хімічна звязаны хларыд значна памяншаецца з-за карбанізацыі. Як і чакалася, значэнне рН памяншаецца са значэнняў 13,2 да значэнняў 8,0. Можна зрабіць выснову, што карбанізацыя не толькі змяняе значэнне рН, але ў той жа час вызваляе хімічна злучаны хларыд. Гэта адна з відавочных прычын, чаму камбінаванае дзеянне пранікнення хларыдаў і карбанізацыі паскарае карозію сталі і скарачае тэрмін службы жалезабетонных канструкцый*

*Ключавыя словы: хларыды, бетон, іённая хромаціграфія, карбанізацыя.*

## THE INFLUENCE OF CARBONIZATION ON THE CONCENTRATION OF CHLORIDES IN THE VOLUME SOLUTION OF CONCRETE: ANALYSIS OF THE RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH

*S. Leonovich<sup>1</sup>, Jijun Miao<sup>2</sup>, Liu Junwei<sup>2</sup>, A. Kaladzev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus;

<sup>2</sup>Qingdao University of Technology, China

e-mail: leonovichsn@tut.by

*The chloride content and the pH value of the pore solution in the contact zone of the steel reinforcement are the main parameters for the initiation and rate of corrosion. The pore fluid of the cement stone was drained from the pore space under high pressure. The effect of water-cement ratio, age and addition of chloride to the fresh mixture on the content of chlorides in the pore solution was estimated by the method of ion chromatography. At the same time, the pH value of the pore solution was determined. It was found that the content of free chloride decreases with increasing water-cement ratio and increases with the amount of chloride added to the fresh mix. The amount of chemically bound chloride increases with time but decreases with decreasing dissolved chloride content in the pore solution. A significant effect of carbonation on the content of chlorides in the steam solution was noted. After complete carbonation of cement mortar and cement stone with different water-cement ratios ( $W/C = 0.5$  and  $0.7$ ) and with different amounts of chloride added*

to the fresh mix (0%, 0.5% and 1%), the content of dissolved chloride increases by 2-12 times. At the same time, chemically bound chloride is significantly reduced due to carbonation. As expected, the pH value decreases from a value of 13.2 to a value of 8.0. It can be concluded that carbonation not only lowers the pH value, but at the same time releases chemically bound chloride. This is one of the obvious reasons why the combined action of chloride penetration and carbonation accelerates steel corrosion and shortens the service life of reinforced concrete structures.

**Keywords:** chlorides, concrete, ion chromatography, carbonization.

**Увядзенне.** Складаная поравая структура цэментавага каменя ў бетоне складаецца з нанопор з максімумам каля 2 нм, мікрапор з максімумам ад 0,1 да 1 мкм і буйнейшых капілярных сітавін да 1 мм. У звычайных кліматычных умовах поравая прастора часткова запаўняецца вадой у залежнасці ад адноснай вільготнасці навакольнага асяроддзя. Водны раствор у поравой прасторы змяшчае катыёны  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  і  $\text{Ca}^{2+}$  і аніёны  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SiO}_4^{4-}$ ,  $\text{SiO}_4^{3-}$  і  $\text{AlO}_2$  [1, 2, 3]. Хімічны склад поравога раствора ў зыходным стане вар'іруецца, бо залежыць ад тыпу цэменту, вода-цэментнай суадносіны і ступені гідратацыі. На пазнейшай стадыі некаторыя іёны могуць пакідаць поравую прастору пры вылугаванні, а іншыя іёны, такія як хларыд, сульфат або амоній, могуць пранікаць. Акрамя таго,  $\text{CO}_2$  можа пранікаць у поравую прастору альбо раствораным у вадзе, альбо ў выглядзе газу з навакольнага асяроддзя.

Канцэнтрацыя хларыдаў і значэнне pH поравой вадкасці бетону кантактнай зоны ў сталёвай арматуры з'яўляюцца вызначальнымі параметрамі для ініцыявання і хуткасці карозіі. Працэс пранікнення хларыду ў поравую прастору бетону вельмі складаны і яшчэ не да канца вывучаны. Калі бетонная паверхня датыкаецца з марскою вадой ці з вадой, утрымоўваючай процігалалёдную соль, водны раствор спачатку хутка паглынаецца капілярным усмоктваннем. Калі хуткасць капілярнага паглынання становіцца малаважнай, хларыд можа пераносіцца ўглыб бетону падчас павольнай дыфузіі. Але гэты працэс дыфузіі цяжка прагназаваць, паколькі ён процідзейнічае канвектыўнаму патоку іёнаў хларыду да паверхні падчас працяглага працэсу сушкі. Акрамя таго, дыфузія хларыдаў з'яўляецца рэакцыйназдольным працэсам. Частка іёнаў будзе хімічна злучана падчас пераносу да арматуры, а іншая частка будзе трывала замацавана адсорбцыяй на ўнутранай паверхні цэментавага каменя.

Падчас гідратацыі цэменту ў прысутнасці хларыднай солі Фрыдэля,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  і солі Кузеля,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0.5\text{CaSO}_4 \cdot 0.5 \cdot 10(11)\text{H}_2\text{O}$ , яны могуць быць звязаны ў бетоне. Стабільнасць і крышталічная структура солі Кузеля былі даследаваны Глассерам [4] і Месбахам [5]. Акрамя таго, некаторыя хларыды могуць быць хімічна звязаныя іншымі прадуктамі гідратацыі цэменту шляхам замяшчэння. Нарэшце, частка хларыду будзе шчыльна адсарбаваная на ўнутранай паверхні розных прадуктаў гідратацыі.

Вывучана звязанне хларыду ў розных цэментных камянях у прысутнасці  $\text{NaCl}$  і  $\text{CaCl}_2$  [6]. Вынікі даследаванняў паказалі, што існуе хімічная раўнавага паміж канцэнтрацыямі хларыду ў прадуктах гідратацыі ў поравым раствору.

Вызначана канцэнтрацыя хларыду ў поравым раствору цэментавага каменя. Паравы раствор быў выняты пад высокім ціскам. Вода-цэментнае стаўленне і ўзрост былі рознымі. Некаторыя ўзоры былі выраблены з дабаўленнем хларыду ў свежую сумесь. Акрамя таго, быў даследаваны ўплыў карбанізацыі на ўтрыманне свабодных хларыдаў. Вольныя іёны хларыду ў поравым раствору вызначалі метадам іённай хромаціграфіі.

2 Эксперыментальныя даследаванні

### 2.1 Падрыхтоўка узораў

Адна растворная сумесь (М) і дзве сумесі цэментавага каменя з вода-цэментавым стаўленнем 0,5 (НСП1) і 0,7 (НСП2) былі абраныя для гэтых даследаванняў з выкарыстаннем звычайнага портландцементу РО 42,5.

Для выраба ўзораў раствора выкарыстоўваўся стандартны пясок. Да некаторых узораў дадавалі 0,5% ці 1% рэагента хларыду натрыю па масе цэменту. Хімічны склад і дадатковыя характарыстыкі цэменту прыведзены ў табліцах 1 і 2. Састаў усіх сумесяў раствора і цэментнай пасты прыведзены ў табліцы 3.

Для гэтых эксперыментаў былі адфармаваны два тыпы цыліндраў дыяметрам  $\varnothing = 50$  мм. Адзін тып цыліндру меў вышыню 50 мм. Гэтыя цыліндры выкарыстоўвалі для выдушвання паравога раствора праз 3 і 7 дзён.

Табліца 1. – Хімічны склад цэменту, М%

|                  |                                |                                |                  |                               |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|
| SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO              | MgO                           |
| 22,69            | 4,21                           | 7,79                           | 61,03            | 4,54                          |
| SO <sub>3</sub>  | K <sub>2</sub> O               | Na <sub>2</sub> O              | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
| 1,91             | 0,51                           | 0,56                           | 0,41             | 0,14                          |

Табліца 2. – Дадатковыя характарыстыкі цэменту

| Свабодны СаО, % | Агульнае ўтрыманне хларыдаў, % | Удзельная паверхня, м <sup>2</sup> /кг | Змяншэнне пры гартаванні, % |
|-----------------|--------------------------------|--|-----------------------------|
| 1,26            | 0,1773                         | 338,92                                 | 2,31                        |

Табліца 3. – Састаў сумесі ўзораў, кг/м<sup>3</sup>

| Сумесь | Цэмент | Пясок | Вада | W/C | NaCl, % |
|--------|--------|-------|------|-----|---------|
| М      | 789    | 523   | 552  | 0,7 | 0       |
|        |        |       |      |     | 0,5     |
|        |        |       |      |     | 1       |
| НСР1   | 1243   | -     | 621  | 0,5 | 0       |
|        |        |       |      |     | 0,5     |
|        |        |       |      |     | 1       |
| НСР2   | 1096   | -     | 768  | 0,7 | 0       |
|        |        |       |      |     | 0,5     |
|        |        |       |      |     | 1       |

Другі тып меў вышыню 10 мм. Гэтыя тонкія дыскі падвяргаліся паскоранай карбанізацыі да таго, як быў экспрэсаваны паравы раствор.

Распалубку выраблялі праз 24 гадзіны пасля фармоўкі бетону і ў раннім узросце дадаткова захоўвалі ў вадзе з тэмпературай  $20 \pm 3$  °С на працягу 2 або 6 дзён. Ва ўзросце 3 ці 7 дзён паравы раствор даследавалі спецыяльным прыборам. Частка тонкіх дыскаў сушылі пры 50 °С на працягу 2 дзён, а затым змяшчалі ў атмасферу з утрыманнем вуглякіслага газу 20% пры адноснай вільготнасці 70% да поўнай карбанізацыі дыскаў. Ход карбанізацыі правяралі распыленнем раствора фенолфталеіну на свежасколатай паверхні. Пасля завяршэння карбанізацыі дыскі зноў насычалі дыстыляванай вадой у кантэйнеры. Кантэйнер быў больш, чым дыскі, каб звесці да мінімуму рызыку значнага вылугавання ў працэсе насычэння. Пасля насычэння 5 дыскаў укладвалі адзін на іншы, утвараючы цыліндр вышыняй 50 мм. Затым таксама быў даследаваны паравы раствор гэтага кампазітнага цыліндру.

Змест агульнага хларыду можа быць разлічана як сума зыходнага хларыду ў цэменце (табліца 2) і хларыду, дададзенага асобна. Акрамя таго, утрыманне вады ў насычаным узору можа быць вызначана шляхам сушкі. Тады можна атрымаць канцэнтрацыю хларыду ў паравой вадкасці. Утрыманне хімічна злучанага хларыду разлічваецца з розніцы агульнага і растворавага хларыду. Для параўнання ўтрыманне хларыду заўсёды паказваецца як колькасць хларыду ў адным цыліндры, мл / V<sub>c</sub> (V<sub>c</sub> = 98125 мм<sup>3</sup>).

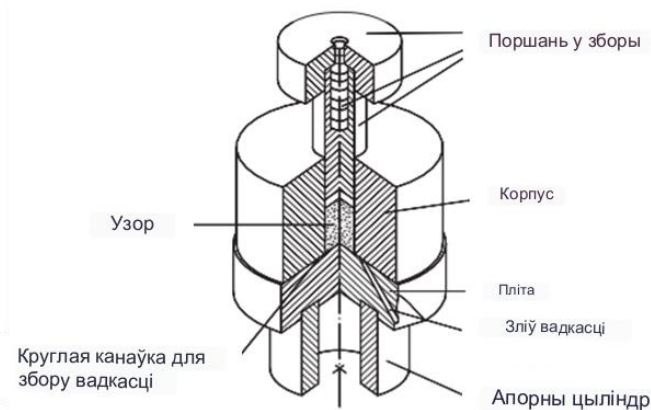
## 2.2 Выцяжка паравога раствора

Распрацаваны метад выдушвання паравой вадкасці з зацвярдзелага раствора і бетону [7]. Пазней было паказана [8], што хімічны склад вадкасці, атрыманай гэтым спосабам, можна лічыць бліжкім да складу рэальнага паравога раствора ў бетоне. Варта, аднак, адзначыць, што гэты метад мае свае абмежаванні. Узоры павінны быць спецыяльна падрыхтаваны, і вода-цэментныя адносіны не могуць быць ніжэй вызначанай мяжы. Колькасць воднай выцяжкі з цэментавага матэрыялу застаецца невялікім. Таму як і ў мінулым прымяняліся альтэрнатыўныя метады, такія як вылугаванне [9, 10, 11].

Калі доўгія цыліндры цвярдзелі, і карбанізацыя кароткіх цыліндраў была завершана, узоры змяшчалі ў прыладу экспрэсіі паравога раствора, якое паказана на мал. 1. Прылада загрузалася ў выпрабавальнай машыне з сталай хуткасцю. Узровень нагрузкі паміж 1600 і 1800 кН падтрымліваўся пастаянным на працягу 3-5 мін. Пры прыкладзенай высокай нагрузцы паравая вадкасць пачынала цячы праз зліў вадкасці і магла быць сабрана ў невялікую шклянку. З кожнага ўзору можна атрымаць ад 4 да 6 мл паравога раствора з дапамогай гэтай прылады для хімічнага аналізу.

## 2.3 Аналіз паравога раствора

Раствораныя хларыд-іёны ў паравой вадкасці вызначалі метадам іённай храматаграфіі. Экспрэсаваны паравы раствор фільтравалі праз мембрану 0,45 мкм. Затым утрыманне хларыду ў паравым растворе вызначалі метадам іённай храматаграфіі.



Малюнак 1. – Прылада для выцяжкі паравога раствора

Значэнне рН паравой вадкасці вымяралі з дапамогай калібраванага лічбавага рН-метра.

З Вынікі і абмеркаванні

## 3.1 Утрыманне хларыдаў у паравым растворе

Утрыманне растваранага хларыду ў паравой прасторы раствора (М) і цэментавага каменя з двума рознымі вода-цэментнымі адносінамі В/Ц = 0,5 (НСР1) і В/Ц = 0,7 (НСР2) паказана ў табліцы 4. У колькасцях 0%, 0,5% і 1% NaCl былі дададзены ў свежую сумесь. Гэта абазначана ў табліцы 4 як 0, 0,5 і 1 пасля адпаведнага абазначэння сумесі. Утрыманне растваранага хларыду ў паравым растворе ніжняга В/Ц (0,5) вышэй, чым у паравым растворе больш высокага В/Ц = 0,7. Відавочным чыннікам гэтага эфекту з'яўляецца значная розніца ва ўтрыманні вады ў паравой сістэме і, такім чынам, больш высокае растварэнне хларыду ў НСР2.

Канцэнтрацыя растваранага хларыду (табліца 4) памяншаецца пры працягу гідратацыі. Гэта можна растлумачыць тым фактам, што ўсё больш хларыду хімічна злучаецца па меры гідратацыі. Частка яго будзе знойдзена ў солях Фрыдэля і Кузеля, у той час як частка заменіць іншыя іёны ў звычайных прадуктах гідратацыі. Трэцяя частка будзе трывала адсарбаваная на ўнутранай паверхні прадуктаў гідратацыі і ў нанопорах. Хларыд у нанопорах значна павялічвае ўсаджванне за кошт павелічэння, якое пашырае ціск.

У карбанізаваным стане некаторыя злучэнні становяцца нестабільнымі пры ніжэйшым значэнні рН, а затым хімічна злучаны хларыд вызваляецца зваротна ў паравы раствор. Гэта прыводзіць да вялізнага павелічэння канцэнтрацыі хларыдаў у паравым раствору, як паказана ў табліцы 3.

Агульнае ўтрыманне хларыду, змест растваранага хларыду, якое вызначаецца ў адціснутым раствору ўзораў рознага хімічнага складу, звязаны хларыд прыведзены ў табліцы 5 і на малюнках 2–4. Утрыманне хларыдаў памяншаецца пры працягу гідратацыі, а затым значна павялічваецца падчас карбанізацыі.

Табліца 4. – Раствораны хларыд у паравым раствору, мг / л

| Тып сумесі | Узрост |        |           |
|------------|--------|--------|-----------|
|            | 3д     | 7д     | 7д-карбон |
| М-0        | 129,6  | 106,1  | 1353,3    |
| М-0,5      | 2459   | 1023,1 | 7332      |
| М-1        | 6871   | 4261,6 | 12746,1   |
| НСР1-0     | 484,7  | 444,1  | 1767      |
| НСР1-0,5   | 4865,8 | 2294,3 | 9062,9    |
| НСР1-1     | 9487,6 | 8894,4 | 24384,3   |
| НСР2-0     | 292,3  | 232,7  | 983,1     |
| НСР2-0,5   | 3140,3 | 1174,7 | 6435,6    |
| НСР2-1     | 8372,3 | 3727,6 | 14900,9   |

Табліца 5. – Агульнае ўтрыманне хларыдаў, якое вызначаецца па зыходным месце хларыду і хларыду, дададзенага ў свежую сумесь, колькасці растваранага хларыду і колькасці хімічна звязанага хларыд, мг/V<sub>c</sub>

| Тып сумесі | Агульнае ўтрыманне хларыду | Колькасць растваранага хларыду |     |           | Колькасць хімічна звязанага хларыду |     |           |
|------------|----------------------------|--------------------------------|-----|-----------|-------------------------------------|-----|-----------|
|            |                            | 3д                             | 7д  | 7д-карбон | 3д                                  | 7д  | 7д-карбон |
| М-0        | 138                        | 6                              | 4   | 40        | 132                                 | 134 | 97        |
| М-0,5      | 372                        | 105                            | 34  | 216       | 267                                 | 338 | 156       |
| М-1        | 607                        | 293                            | 141 | 375       | 314                                 | 466 | 232       |
| НСР1-0     | 216                        | 15                             | 9   | 31        | 201                                 | 207 | 185       |
| НСР1-0,5   | 586                        | 152                            | 45  | 159       | 434                                 | 541 | 428       |
| НСР1-1     | 956                        | 297                            | 175 | 427       | 660                                 | 781 | 529       |
| НСР2-0     | 191                        | 11                             | 8   | 32        | 180                                 | 182 | 159       |
| НСР2-0,5   | 517                        | 117                            | 43  | 206       | 400                                 | 474 | 310       |
| НСР2-1     | 843                        | 313                            | 135 | 478       | 530                                 | 828 | 483       |

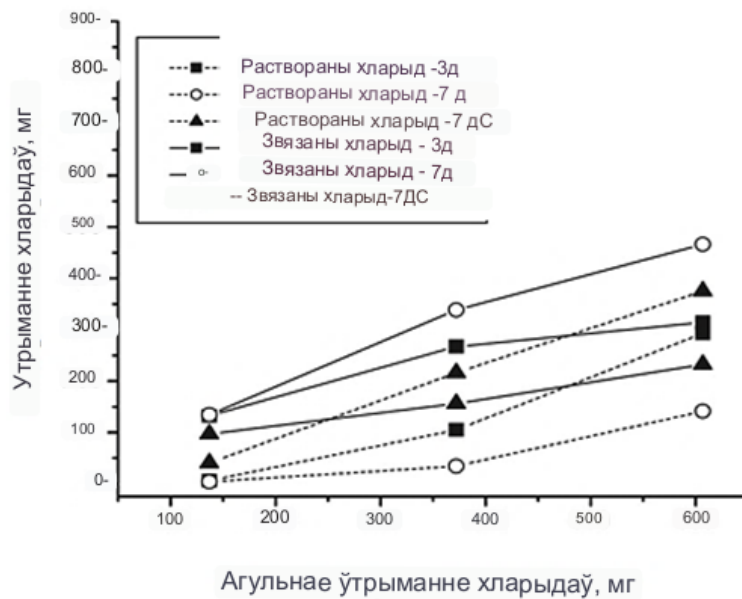
### 3.2 Значэнне рН паравога раствора

Значэнне рН бетону ў раннім узросце высокае, і таму сталь абаронена ад карозіі. Пасля карбанізацыі значэнне рН памяншаецца. Вымераныя значэнні прыведзены ў табліцы 6. Незалежна ад узросту значэнне рН цэментавага каменя вышэй за 13. Пасля карбанізацыі былі зафіксаваны значэнні каля 8.

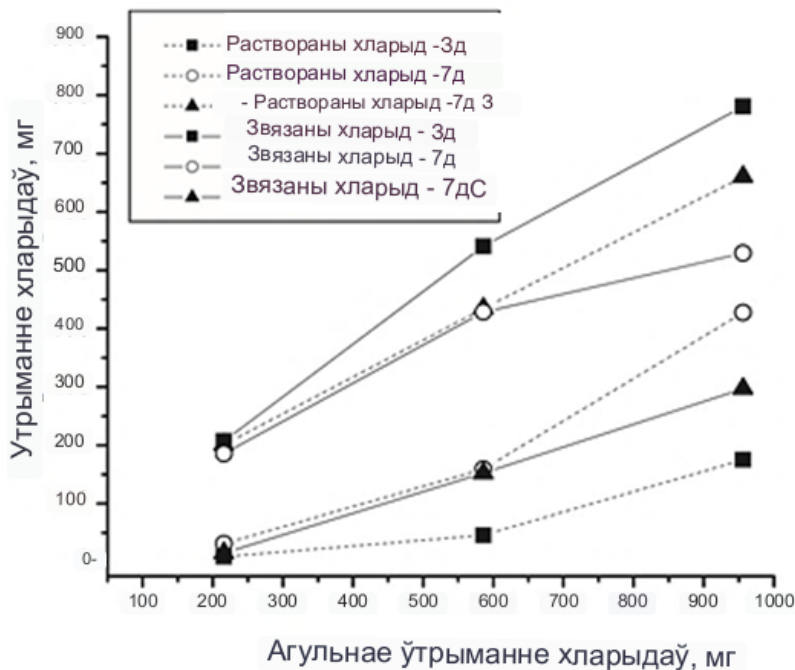
Паколькі значэнне рН паравога раствора памяншаецца да значэнняў ніжэй за 9, некаторыя прадукты гідратацыі становяцца нестабільнымі. Гэта асноўны чыннік, па якой хларыд вызваляецца ў паравы раствор пасля карбанізацыі. Падвышаная канцэнтрацыя хларыдаў пасля карбанізацыі павялічвае розніцу паміж канцэнтрацыяй у вонкавым пласце і ў глыбіні бетону. Дзякуючы гэтаму павелічэнню розніцы канцэнтрацыі хларыдаў дыфузія хларыду ў бок сталёвай арматуры значна паскараецца.

Канцэнтрацыя хларыду ў водным поравым раствору моцна залежыць ад ступені карбанізацыі, таму пранікненне хларыду ў бетон не можа быць правільна апісана простым працэсам дыфузіі. Замест гэтага працэс міграцыі павінен быць змадэляваны лікава з улікам асноўных механізмаў міграцыі.

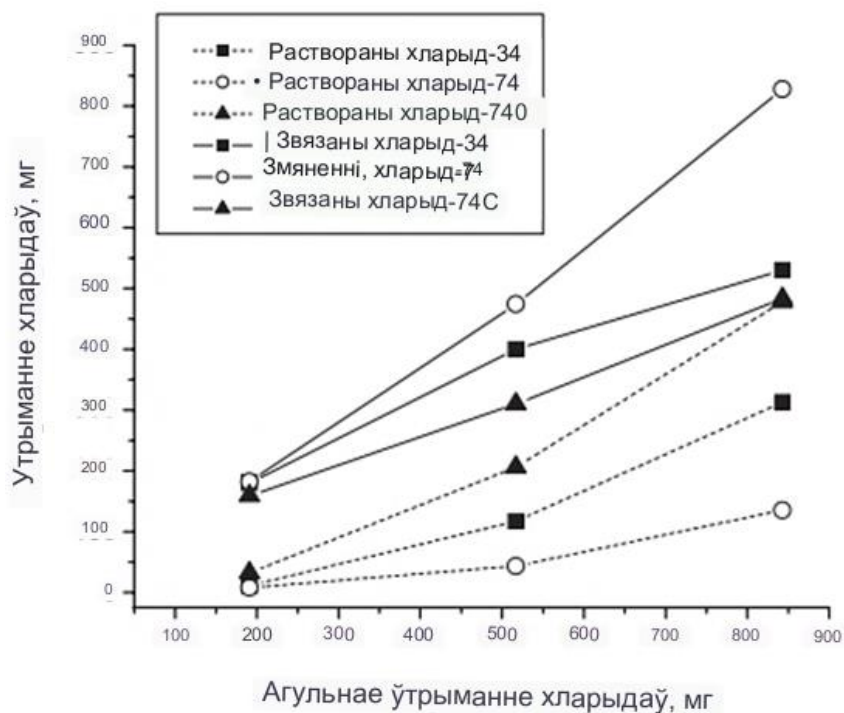
Калі фронт карбанізацыі дасягае сталёвай арматуры, падвышаная канцэнтрацыя хларыду пасля карбанізацыі можа прывесці да ініцыявання карозіі сталі, нават калі колькасць хларыду, праніклага звонку, яшчэ не дасягнула крытычнага значэння. Гэта тыповы прыклад для камбінаваных дзеянняў, якія пагаршаюць сітуацыю па даўгавечнасці і тэрміну службы жалезабетонных канструкцый [12-18].



Малюнак 2. – Размеркаванне хларыдаў у раствору (М) у залежнасці ад агульнага зместу хларыдаў у розным узросце: да і пасля карбанізацыі



Малюнак 3. – Размеркаванне хларыдаў у цэментавым камені з В / Ц = 0,5 (НСР1) у залежнасці ад агульнага ўтрымання хларыдаў у розным узросце і пасля карбанізацыі



Малюнак 4. – Размеркаванне хлорыдаў у цэментавым камені з В / Ц = 0,7 (НСП2) у залежнасці ад агільнага

Табліца 6. – Значэнні рН паровага раствора да і пасля карбанізацыі

|          | 3д    | 7д    | 14д   | 7д/карбанізацыя |
|----------|-------|-------|-------|-----------------|
| НСП1-0   | 13,35 | 13,39 | -     | 8,1             |
| НСП1-0,5 | 13,37 | 13,47 | -     | 7,92            |
| НСП1-1   | 13,42 | 13,47 | -     | 7,67            |
| НСП2-0   | -     | 13,29 | 13,23 | 8               |
| НСП2-0,5 | -     | 13,4  | 13,36 | 7,7             |
| НСП2-1   | -     | 13,19 | 13,39 | 7,68            |

**Высновы.** Аналіз паровага раствора дае нам новае ўяўленне аб размеркаванні хлорыдаў у бетоне.

Размеркаванне хлорыду ў бетоне залежыць ад агільнага зместу хлорыдаў. Як змест хімічна звязанага хлорыду, так і канцэнтрацыя растваранага хлорыду павялічваюцца з павелічэннем агільнага ўтрымання хлорыду пасля хімічнай раўнавагі.

Значная колькасць хімічна звязанага хлорыду вызваляецца ў паравы раствор у выніку карбанізацыі. Пры дадзеных абставінах гэта камбінаванае дзеянне можа скараціць тэрмін службы жалезабетонных канструкцый, што абумоўлена ўзнікненнем карозіі сталі.

Складаны працэс міграцыі хлорыдаў у бетоне не можа быць апісаны раўнаннем дыфузіі. Гэты працэс павінен быць змадэляваны з улікам усіх асноўных механізмаў міграцыі.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Андэрсан К. і інш. 1989. Хімічны склад цэментавых паравых раствораў. Цэмент. Бетон. 19: 327-332.
- Хункелер, Ф. 1996. Удзельны супраціў раствора паравой вады - вырошальны параметр карозіі арматуры і метадаў рамонту. Будаўніцтва і будаўнічыя матэрыялы. 10: 381-389.

3. Пэйдж, К.Л., Веннесланд, О. 1991. Склад паравога раствора і хларыдная злучная здольнасць силикагелевых цэментавых паст. Матэрыялы і структура. 16: 19-25.
4. Глассер, Ф.П., Кінднеса, А., Стронача, С.А. 1999. Суадносіны стабільнасці і растваральнасці ў фазах АСМ: Частка I. Хларыд, сульфат і гідраксід. Цэмент. Бетон. 29: 861-866.
5. Месбах і інш. 2011. Крышталічная структура солі Кузеля  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1/2 \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{CaCl}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$  вызначаецца метадам сінхратрон парашковай дыфракцыі. Цэмент. Бетон. 41: 504-509.
6. Тайсінг, Э.М., Хест-Вардзенне, Э.М., дэ Вінд, Г. 1978. Спалучэнне хларыду натрыю і хларыду кальцыя з дапамогай шэрагу розных зацвярдзелых цэментавых паст. Цэмент. Бетон 8: 683-692.
7. Барнібек, Р.С., Дайманд, С. 1981. Аналіз паравых вадкасцяў з цэментавага каменя і будаўнічых раствораў. Цэмент. Бетон. 11: 279-285.
8. Дзюшэн, Дж., Берубе, М.Б. 1994. Ацэнка абгрунтаванасці метаду вызначэння паравога раствора з цэментавага каменя і будаўнічых раствораў. Цэмент. Бетон. 24: 456-462.
9. Ар'я, С., Буэнфельд, Н.Р. Ньюман, Дж.Б. \_ 1987. Ацэнка простых метадаў вызначэння зместу свабодных хларыд-іёнаў у цэментнай масе. Цэмент. Бетон. 17: 907-918.
10. Ар'я, С., Ньюман, Дж.Б. 1990. Ацэнка чатырох метадаў вызначэння зместу свабоднага хларыду ў бетоне. Матэрыялы і структура, 23: 319-330.
11. Хакве, М.М., Каялі, А.А. 1995. Вольны і водарастваральны хларыд у бетоне. Цэмент. Бетон. 25: 531-542.
12. С.М. Леановіч 2001. Алгарытмы разліку даўгавечнасці жалезабетонных канструкцый пры хларыднай агрэсіі. Сб. тр. VII Між. навукова-метадычнага семінара / пад рэд. Блешчыка Н.П., Барысевіча А.А., Пяцольда Т.М. – Брэст, БДТУ, 2001.
13. С.М. Леановіч 2001. Імавернасная ацэнка карозіі арматуры ў існуючых жалезабетонных канструкцыях пры хларыднай агрэсіі. Сб. тр. VII Між. навукова-метадычнага семінара / пад рэд. Блешчыка Н.П., Барысевіча А.А., Пяцольда Т.М. – Брэст, 2001.
14. С.М. Леановіч, А.У. Прасол 2013. Жалезабетон ва ўмовах хларыднай карозіі: дэфармаванне і разбурэнне. Будаўнічыя матэрыялы с. 94-95.
15. А. Я. Шалы, С. М. Леановіч, Л. У. Кім, У. Я. Румянцава, Н.А. Будрэвіч 2018. Сумеснае дзеянне карбанізацыі і хларыднай агрэсіі на канструкцыйны бетон: імавернасная мадэль. Веснік грамадзянскіх інжынераў с. 123-131.
16. А. Я. Шалы, Л. У. Кім, С. М. Леановіч 2018. Жалезабетон пры ўздзеянні карбанізацыі і хларыднай агрэсіі: імавернасная мадэль разліку-прагнозу тэрміну службы. Веснік Белградскага дзяржаўнага тэхналагічнага ўніверсітэта ім. В.Г. Шухава с. 5-14.
17. А. Я. Шалы, С. М. Леановіч, Л. У. Кім 2019. Дэградацыя жалезабетонных канструкцый марскіх збудаванняў ад сумеснага ўздзеяння карбанізацыі і хларыднай агрэсіі. Будаўнічыя матэрыялы с.67.
18. С. М. Леановіч, А. Я. Шалы, Л. У. Кім 2019. Жалезабетон пры ўздзеянні карбанізацыі і хларыднай агрэсіі: імавернасная мадэль разліку-прагнозу тэрміну службы. Навука і тэхніка с. 284-291.
19. Леановіч С.М. і інш. Прагназаванне даўгавечнасці жалезабетонных канструкцый пры сумесным уздзеянні карбанізацыі і хларыднай агрэсіі і іх аднаўленне.