

УДК 624.012.45:627.2.03(571.642)

УПЛЫЎ МАРОЗНЫХ ПАШКОДЖАННЯЎ У РАСТВОРАХ СОЛЯЎ
НА МІКРАСТРУКТУРУ І ХЛАРЫДАПРАЊІКАЛЬНАСЦЬ БЕТОНУ:
АНАЛІЗ ЭКСПЕРЫМЕНТАЛЬНЫХ ДАСЛЕДАВАННЯЎ

С.М. Леановіч¹, Jijun Miao², Liu Junwei², А.У. Каладзеі¹

¹Беларускі нацыянальны тэхнічны ўніверсітэт, Мінск, Рэспубліка Беларусь;

²Тэхналагічны ўніверсітэт Ціндао, Кітай

e-mail: leonovichsn@tut.by

Жалезабетонныя канструкцыі павінны праектавацца для супрацьстаяння ўсім магчымым нагрузкам і ўсім прагназуемым уздзеянням навакольнага асяроддзя і іх камбінацыям на працягу праектнага тэрміна службы. Хларыдная карозія з'яўляецца на практыцы адным з асноўных механізмаў, які абмяжоўвае тэрмін службы жалезабетонных канструкцый.

Пранікненне хларыду ў бетон паскараецца камбінаванымі дзеяннямі механічнай напругі і ўздзеяннямі хларыдаў. Да гэтага часу звесткі аб уплыве марозу на пранікненне хларыдаў даволі абмежаваныя. Марозаўстойлівасць бетону пры кантакце з вадой ці з солевымі растворамі, такімі як марская вада, мае асаблівае значэнне для прагназавання тэрміну службы ў халодных рэгіёнах. У вадзе і ў водным растворе ацэньваліся пашкоджанні бетону з рознымі вода-цэментнымі адносінамі, з уцягнутым паветрам і без яго. Да і пасля індукванага марознага пашкоджання мікраструктура цэментавага каменя ў бетоне даследавалася метадамі ртутнай інтрузійнай параметрыі і сканавальнай электроннай мікраскапіі. Акрамя таго, вызначалася пранікненне хларыду да і пасля марознага ўздзеяння. Атрыманыя вынікі паказваюць, што страта масы бетону пасля цыклічнага замарожвання-адтавання ў солевым растворе значна вышэй, чым у вадзе. Пры ўцягванні паветра ствараюцца штучныя поры з сярэднім дыяметрам каля 50 мкм. Павелічэнне колькасці штучных пор уцягнутага паветра запавольвае пранікненне хларыдаў у бетон, паколькі капілярныя поры перарываюцца. Як следства, канцэнтрацыя хларыдаў зблізку павярхоўнай зоны павялічваецца, а глыбіня пранікнення памяншаецца.

Тут прааналізаваны вынікі серыі выпрабаванняў з трыма рознымі відамі бетону. Былі выбраны тры розныя вода-цэментныя адносіны. Тры розныя віды бетону былі пратэставаны з уцягваннем паветра і без яго. Даследавана дэградацыя бетону ў цыклах замарожвання-адтавання ў вадзе або ў водных растворах хларыдных соляў. Прааналізаваны мікраструктуры і пранікальнасць хларыдаў. Аналіз вынікаў гэтых эксперыментальных даследаванняў неабходзен для прагназавання тэрміна службы жалезабетонных канструкцый у халодных рэгіёнах.

Ключавыя словы: *цыклы замарожвання-адтавання, марозаўстойлівасць у вадзе, марозаўстойлівасць у солевых растворах, мікраструктура, паравы раствор, пранікненне хларыду.*

INFLUENCE OF FROST DAMAGE IN SALT SOLUTIONS ON MICROSTRUCTURE AND CHLORIDE
PERMEABILITY OF CONCRETE: ANALYSIS OF EXPERIMENTAL RESEARCH

S. Leonovich¹, Jijun Miao², Liu Junwei², A. Kaladzei¹

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus;

²Qingdao University of Technology, China

e-mail: leonovichsn@tut.by

Reinforced concrete structures must be designed to withstand all possible loads and all foreseeable environmental influences and their combinations during the design life. Chloride corrosion is in practice one of the main mechanisms that limits the service life of reinforced concrete structures.

The penetration of chloride into concrete is accelerated by the combined action of mechanical stress and the effects of chlorides. So far, information on the effect of frost on chloride penetration is quite limited. The frost resistance of concrete in contact with water or saline solutions, such as seawater, is of particular importance for predicting service life in cold regions. Damage to concrete with different water-cement ratios, with and without entrained air, was evaluated in water and aqueous solution. Before and after induced frost damage, the microstructure of cement stone in concrete was investigated by mercury intrusion parameters and scanning electron microscopy. In addition, chloride penetration was determined before and after frost exposure. The obtained results show that the mass loss of concrete after cyclic freeze-thaw in salt solution is much higher than in water. When air is drawn in, artificial pores with an average diameter of about 50 μm are created. Increasing the number of artificial entrained air pores slows the penetration of chlorides into the concrete, as the capillary pores are interrupted. As a result, the concentration of chlorides near the surface zone increases, and the depth of penetration decreases.

The results of a series of tests with three different types of concrete are analyzed here. Three different water-cement ratios were chosen. Three different types of concrete were tested with and without air entrainment. Degradation of concrete in freeze-thaw cycles in water or in aqueous solutions of chloride salts was studied. Analyzed microstructures and permeability of chlorides. Analysis of the results of these experimental studies is necessary for predicting the service life of reinforced concrete structures in cold regions.

Keywords: *freeze-thaw cycles; frost resistance in water; frost resistance in salt solutions; microstructure; pore solution; chloride penetration.*

Увядзенне. Марознае пашкоджанне бетону з'яўляецца найскладанай з'явай і не можа быць растлумачана адным дамінантным механізмам. Шэраг зусім розных механізмаў спрыяе пашкоджанню бетону і бетонных канструкцый. Да пачатку сістэматычных даследаванняў пашкоджанні марозам была прапанавана спрошчаная гіпотэза Хіршфельда. Добра вядома, што вада пашыраецца прыкладна на 9% пры замарожванні ніжэй за 0 °C. Таму лічылася, што бетон пашкоджаецца марозным дзеяннем толькі ў тым выпадку, калі больш за 91% аб'ёму пор запоўнена вадой. Пазней было ўстаноўлена, што вада ў дробных капілярах замярзае пры вельмі нізкіх тэмпературах, якія наўрад ці калі-небудзь дасягаюцца пры звычайных кліматычных умовах. Значная колькасць вады ў паравой прасторы бетону ніколі не замярзае ў натуральна-кліматычных умовах. На падставе вынікаў апошніх даследаванняў аб механізмах пашкоджання марозам знос бетону пры нізкіх тэмпературах можна падпадзяліць на два асноўныя працэсы: лушчэнне і аб'ёмныя пашкоджанні ад марозу. Як лушчэнне, так і аб'ёмнае пашкоджанне марозам абумоўлены побач розных характэрных механізмаў пашкоджання.

Калі астуджаецца масіўны канструктыўны элемент з бетону, усталёўваецца цеплавы градыент. З разліку вынікае, што халодная знешняя зона падвяргаецца высокаму расцягваючаму напружанню. Гэтая напруга дасягае значэння трываласці бетону на расцяжэнне, у выніку чаго ўтворацца расколіны. Калі бетонны элемент зноў награвецца сонечным святлом, вонкавы пласт будзе выпрабуйваць высокую сціскальную напругу. Гэта прывядзе да выгібу зблізку павярхоўнай зоны і лушчэнню пад прыкладзенай сціскаючай напругай. Пры награванні павярхні элемента канструкцыі вада можа выпарацца з паравай прасторы. Гэты працэс можа прывесці да крышталізацыі раствараных хімічных злучэнняў, такіх як хларыд або сульфат. За-

тым ціск крышталізацыі спрыяе фарміраванню расколін вонкавага пласта. Тэмпература замярзання паравой вады паніжаецца ў прысутнасці раствараных іёнаў, такіх як хларыд ці сульфат. Можна здарыцца так, што зблізку паверхні ўтрыманне хларыдаў будзе высокім і водны раствор солі не змерзне пры дадзеным градыенце тэмпературы [1]. Аднак на крытычнай адлегласці ад паверхні канцэнтрацыя солі можа быць дастаткова нізкай, каб водны раствор зацвярдзеў пры замарожванні. Крышталі лёду, якія ўтвараюцца за павярхоўным пластом без лёду, могуць быць у пачатку распылення соляў-антыабледзяняльнікаў. Гэта толькі некаторыя з найболей актуальных механізмаў дэградацыі паверхні.

Размеркаванне пор па памерах у цэментавым камені ахоплівае надзвычай шырокі дыяпазон ад нанаметраў да міліметраў. Тэмпература замярзання вады ў вельмі тонкіх трэшчынах значна паніжаная. Гэта азначае, што значная колькасць вады ніколі не змерзне ў бетоне пры звычайных кліматычных умовах. Калі вада замярзае ў вялікіх трэшчынах, з-за розніцы ў ціску вада пачынае міграваць з больш тонкіх пор, у якіх вада ўсё яшчэ вадкая, у большыя або ў штучныя поры паветра, дзе будзе спрыяць росту ўжо існых крышталяў лёду. Пакуль у вялікіх порах досыць месца, растучыя крышталі лёду не аказваюць ціскі на сценкі пор. Поруісты матэрыял не пашкоджваецца. Гэта, па сутнасці, функцыя штучных пор, якія ствараюцца уцягваннем паветра. Аднак, калі поры паступова запаўняюцца крышталямі лёду, далейшы рост крышталяў будзе пачаткам пашкоджання марозам.

Акрамя таго, існуе чыста механічная з'ява пашкоджання, якое спрыяе як трэшчынаўтварэнню, так і аб'ёмнаму пашкоджанню марозам. Гэта розніца тэрмічнай дылатацыі цэментавага каменя і звычайных запаўняльнікаў. Кэфіцыент тэрмічнай дылатации цэментавага каменя амаль у два разы вышэй гэтага паказчыка запаўняльнікаў. Кожны раз, калі бетон падвяргаецца ўздзеянню асяроддзя з паніжанай тэмпературай, матрыца – цэментавы камень будзе падвяргацца нарастальнай расцягвалай напрузе. Як следства, у кампазіцыйным матэрыяле ўтвараюцца мікратрэшчыны. Паколькі мяжа паміж запаўняльнікамі і зацвярдзелай матрыцай – цэментавым каменем, межфазная пераходная зона асабліва слабая, становіцца бачнай голая паверхня запаўняльнікаў зблізку павярхоўнага пласта. Тут будуць прадстаўлены вынікі серыі выпрабаванняў з трыма рознымі відамі бетону. Былі выбраны тры розныя вода-цэментныя адносіны. Тры розныя віды бетону былі пратэставаны з уцягваннем паветра і без яго.

2. Эксперыментальныя даследаванні

2.1 Падрыхтоўка бетонных узораў

Для гэтых выпрабаванняў былі падрыхтаваны тры розных серыі бетону тыпу А, Б і В. Выкарыстоўваліся звычайны партландцэмент OPC 42.5, пясок з максімальным памерам зерняў 5 мм і тонкасцю 2,7 і дробнены жвір з бесперапыннай сартаваннем ад 5 да 25 мм. Полікарбаксілатная дабаўка ўводзілася ў свежы бетон для паляпшэння зручнаўкладальнасці. З усіх трох тыпаў бетонаў былі падрыхтаваны ўзоры АБ, ББ і ВБ з уцягваннем паветра. Прапорцыі сумесі і ўтрыманне паветра складалі: выдатак цэменту 320-410 кг/м³; В/Ц = 0,35 - 0,5; утрыманне паветра 1,6 - 4,4%.

З усіх шасці сумесяў былі адфармаваны бетонныя прызмы з памерамі: 100 x 100 x 400 мм. Яны цвярдзелі на працягу 24 гадзін у формах, пакрытых пластыкавым лістом. Пасля распалубкі бетонныя прызмы захоўвалі ў вадзе пры тэмпературы 20 ± 2 °С да дасягнення імі ўзросту 28 дзён.

2.2 Цыклічнае замарожванне - адтаванне, маштабаванне і характарыстыка мікраструктуры

Пасля цвярдзення на працягу 28 дзён палова узораў падвяргалася ўздзеянню 25, 50, 100 і 200 цыклаў замарожвання-адтавання ў вадзе. У той жа час другая палова узораў падвяргалася ўздзеянню 25, 50, 100 і 200 цыклаў замарожвання-адтавання ў водным раствору хларыду з канцэнтрацыяй 5%.

Пасля зададзенага ліку цыклаў замарожвання-адтавання страту масы з-за лушчэння вызначалі гравіметрычна. Акрамя таго, размеркаванне часу па памерах вымяралі з дапамогай ртутнай інтрузійнай параметрыі. Структура часу была вывучана на паверхнях сколаў метадам сканавальнай электроннай мікраскапіі.

2.3 Вызначэнне профіляў хларыдаў

Пасля зададзенай колькасці цыклаў замарожвання-адтавання тонкія пласты таўшчынёй ад 1 да 2 мм паслядоўна здрабнелі, пачынальна з зыходнай паверхні. З атрыманага драбненнем парашка тытраваннем вызначалі ўтрыманне вадараспушчальнага хларыду.

3. Вынікі эксперыментальных даследаванняў

3.1 Маштабаванне

Страта масы як функцыя колькасці цыклаў замарожвання-адтавання вызначана гравіметрычна (табліца 1). Маштабаванне прагрэсуе з павелічэннем колькасці цыклаў замарожвання-адтавання. Відавочна, што шкода ад цыклічнага замарожвання-адтавання ў вадзе значна менш, чым у раствору хларыду натрыю. Дэградацыя ўзрастае з павелічэннем вода-цэментнага стаўлення. Страты масы значна зніжаюцца для бетонаў тыпу А і Б са штучнымі парамі паветра, хоць існуе значны роскід у эксперыментальных значэннях. Страта масы ў бетоне тыпу В, наадварот, малаважна зніжаюцца за кошт паглынання паветра. Гэта можа быць злучана з тым, што штучныя поры паветра ў паверхні будуць запоўненыя вадой.

Табліца 1. – Страта масы бетону ў залежнасці ад колькасці цыклаў замарожвання-адтавання ў вадзе і ў раствору хларыдаў (%)

| Код | Цыклы замарожвання-адтавання ў вадзе | | | | Цыклы замарожвання-адтавання ў раствору хларыдаў | | | |
|-----|--------------------------------------|------|------|------|--|------|------|------|
| | 25 | 50 | 100 | 200 | 25 | 50 | 100 | 200 |
| А | 0.17 | 0.40 | 1,48 | 2,34 | 0.2 | 1,17 | 2,44 | 3,57 |
| АБ | 0.10 | 0.34 | 0.87 | 1,10 | 0.13 | 0.68 | 1,84 | 1,75 |
| Б | 0.20 | 0.45 | 3,45 | - | 0.63 | 3,81 | 5,52 | - |
| ББ | 0.22 | 0.64 | 1,17 | 2,52 | 0.17 | 0.49 | 2,27 | 3,07 |
| В | 0.20 | 0.54 | - | - | 1,17 | 9,39 | - | - |
| СБ | 0.32 | 0.83 | 1,68 | 3,48 | 2,17 | 2,74 | 1,72 | - |

Паглыннанне бетонам у раствору солі важнейшае, чым бетонам у вадзе. З даследаванняў [2, 3, 4] вядома, што пашкоджанне марозам становіцца больш сур'ёзным, калі вада змяшчае умераную колькасць раствораных іёнаў (1-3%).

Гэта было знойдзена эксперыментальна і мадэльным аналізам. Распрацавана [5] мадэль мікралінзаў, якая тлумачыць механізм насычэння бетону падчас цыклаў замарожвання-адтавання. У бетоне [6] вада мігруе з меншых у буйнейшыя поры падчас цыклаў замарожвання-адтавання. Пасля крытычнай колькасці цыклаў замарожвання-адтавання буйнейшыя поры насычаюцца. Вялікія поры ў прыпаверхневай зоне могуць быць запоўненыя вадой з навакольнага асяроддзя.

Цалкам відавочна, што бетон з найменшымі водацэментавымі суадносінамі (тып А, В/Ц = 0,35) найменш пашкоджаны трэшчынаўтварэнню. Наадварот, бетон тыпу Ў са параўнальна высокім вода-цэментавым стаўленнем сур'ёзна пашкоджваецца пры трэшчынаўтварэнні.

3.2 Мікраструктура бетону

Выкананы і прааналізаваны мікраздымкі сканіруючай электроннай мікраскапіі з расколінай звычайнага бетону тыпу N і са штучнымі парамі ўцягнутага паветра. Сярэдні дыяметр штучных пор можна ацаніць прыкладна ў 50μ m.

Такім чынам, быў атрыманы сярэдні памер і сярэдняя адлегласць штучных пор уцягну- тага паветра. Адпаведныя значэнні прыведзены ў табліцы 2.

Табліца 2. – Сярэдні памер паветраных пустэч і сярэдняя адлегласць паміж імі

| Код | Сярэдні дыяметр паветраных пустэч, мкм | Сярэдняя адлегласць паветраных пустэч, мкм |
|-----|--|--|
| АБ | 26 | 105 |
| ББ | 64 | 135 |
| СБ | 85 | 131 |

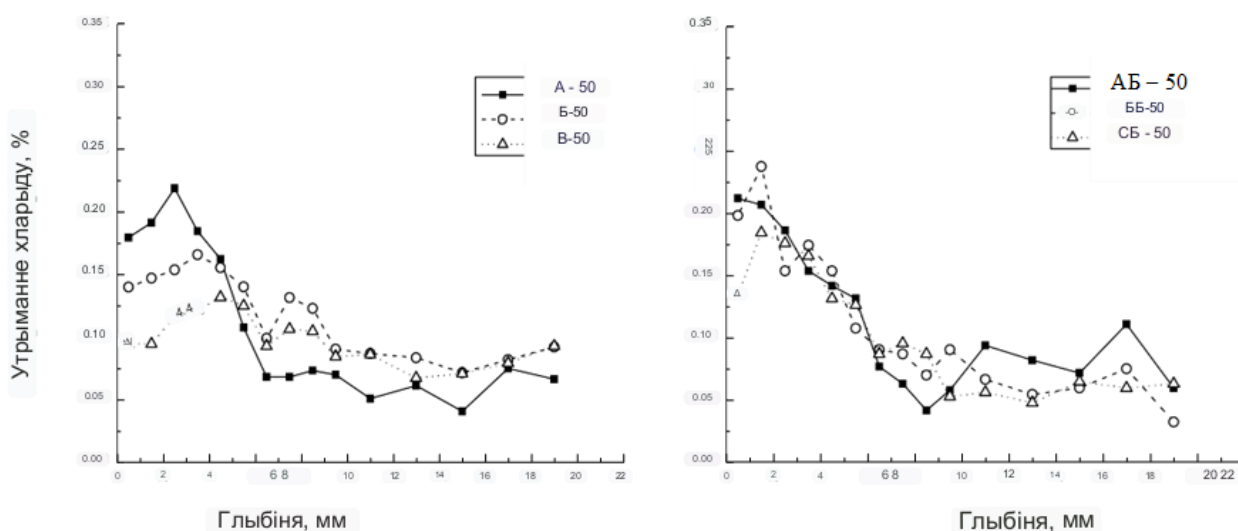
У пазбяганне пашкоджання марозам [7] сярэдні памер пор не павінен перавышаць кры- тычнага значэння ў дыяпазоне 200-250 μm . Рэкамендавана максімальная адлегласць ад штуч- ных пор парадку 250 μm . У звычайным бетоне гэтай адлегласці дастаткова для міграцыі да- статковай колькасці вады ў бліжэйшую штучную паветраную пору. Такім чынам, лёд будзе ўтва- рацца ў вялікіх порах, а мелкія поры разгружацца. Эксперыментальна зафіксавана [8], што сярэд- няя адлегласць паміж паветранымі пустэчамі менш за 240 μm забяспечвае марозаўстойлівасць. Выяўлена, што сярэдні радыус штучных пор павінен быць менш за 150 μm . Тыпы бетону з па- ветразацягваннем адказваюць вышэйпаказаным патрабаванням.

3.3 Пранікненне хларыдаў

Падчас цыклаў замарожвання-адтавання ў солевым раствору хларыд можа пранікаць у поравую прастору бетону. На малюнку 1 профілі хларыдаў па хімічным аналізе з парашка тонкага памолу паказаны з паверхні. На левай дыяграме паказаны профілі хларыдаў у бетоне А, Б і В без штучных пор, і на правай дыяграме паказаны адпавядаючыя хларыдныя профілі ў бетоне з уцягнутым паветрам АБ, ББ і ВБ пасля 50 цыклаў замарожвання-адтаванні.

Відаць, што бетон тыпу N з нізкімі водоэментнымі суадносінамі паглынае больш за ўсё хларыду на працягу 50 цыклаў замарожвання-адтавання ў адрозненні ад бетону тыпу У з водо- цементным суадносінамі 0,5, паглынаючага мінімум хларыду.

Гэты эффект выкліканы самаасушэннем з-за працягвання гідратацыі.



Малюнак 1. – Хларыдныя профілі пасля 50 цыклаў замарожвання адтавання ў звычайным бетоне тыпу А, Б і В (злева) і бетоне с уцягнутым паветрам тыпу АБ, ББ і ВБ (справа)

Тры профілі хларыдаў у правай частцы мал.1 былі зафіксаваныя ў бетоне з уцягнутым паветрам. Хларыдныя профілі ідэнтычныя ў дыяпазоне статыстычнага расейвання без уліку блізкіх да паверхні кропак. Там глыбіня пранікнення крыху большая ў параўнанні з бетомам без уцягнутага паветра. Значэнні, атрыманыя на адлегласці 1 мм ад паверхні, не могуць лічыцца рэпрэзентатыўнымі, бо хларыдзмяшчальны цэментавы камень паміж зернямі запаўняльніка быў выдалены пры лушчэнні. Тры тыпу бетону АБ, ББ і ВБ маюць амаль аднолькавы аб'ём пор паглынутага паветра. Гэтыя поры застаюцца часткова запоўненымі вадой з-за вельмі нізкага капілярнага ціску ў сферычных сітавінах з параўнальна вялікім радыусам. Гэтыя поры падобны да тых, якія апаражняюцца ў бетонах тыпу А, Б і В з-за самаасушэння. Аб'ём газу ў порах мяншаецца кожны раз, калі бетон астуджаецца. Як следства, пад уздзеяннем больш высокага атмасфернага ціску звонку бетонных прызм вада задушваецца ў паравую прастору. У гэтым выпадку перанос хларыдаў кантралюецца спалучэннем дыфузіі, капілярнага паглынання і паніжанага ціску ў параўнальна вялікіх штучных порах. Уяўляецца, што эфект штучных порах паветра супастаўны з эфектам самаасушэння бетону тыпу А.

Уплыў 70 цыклаў замарожвання-адтавання на хларыдныя профілі [9, 10, 11] невялікі. У наш час выконваюцца даследаванні, каб высветліць у якой ступені эфект будзе больш выяўленым пры большай колькасці цыклаў і ў бетоне з больш высокімі вода-цэментавымі суадносінамі. [12, 13, 14, 15].

Высновы. Страта вагі бетону з-за лушчэння павялічваецца з павелічэннем вода-цэментных суадносін. Калі бетон змешчаны ў водны солевы раствор і схільны ўздзеянню цыклаў замарожвання, страта вагі з-за лушчэнні значна вышэй у параўнанні са стратай вагі таго ж тыпу бетону, але змешчанага ў чыстую ваду.

Высокатрывалы бетон з нізкімі вода-цэментавымі суадносінамі паглынае больш хларыду падчас цыклаў замарожвання-адтавання, чым бетон з больш высокім водацэментным стаўленнем. Гэта назіранне можна растлумачыць аўтагенным высыханнем высокатрывалага бетону. У папярэдне высушаных бетонных узорах цыклічнае паніжэнне ціску ствараецца падчас кожнага цыклу замарожвання-адтавання.

ЛИТЕРАТУРА

1. Янг К., 2005. Фактары, якія ўплываюць на ціск утварэння лёду ў растворы NaCl (на кітайскай мове). Часопіс будаўнічых матэрыялаў, 8(5), 495-498.
2. Чопуроглу О., Шланген Э., 2008. Мадэляванне шумавіння марознай солі. Даследаванні цэменту і бетону, 38, 27-39.
3. Валенца ІІ Дж. Дж., Шерер Г. В., 2007. Агляд солевых шумавіння: І. Фенаменалогія. Цэмент і бетон. Даследаванні, 37, 1007-1021.
4. Валенца ІІ Дж. Дж., Шерер Г. В., 2005. Механізмы утварэння солевых накіпаў. Матэрыялы і канструкцыі, 38, 479-488.
5. Зетцер М. Дж., 2001. Адукацыя мікра-ледзяных лінзаў у сітаватым цвёрдым целе. Часопіс навукі аб калоідах і інтэрфейсах, 243 (1), 193-201.
6. Му Р., Цянь В. Чжоў М., 2010. Міграцыя вільгаці ў бетоне, які падвяргаецца цыклам замарожвання-адтавання. Часопіс Кітайскага керамічнага таварыства, 38 (9), 1713-1717.
7. Пауэрс Т.К., Хельмут Р.А., 1953. Тэорыя змены аб'ёму зацвярдзелай партландцэментнай пасты пры замярзанні. Матэрыялы Рады па даследаваннях аўтамабільных дарог, (32), 285-297.
8. Чэн Х., Ян Х., Чжоў С. і інш., 2011. Даследаванне трываласці бетону пры замярзанні і адтаванні і характарыстычных параметраў бурбалак (на кітайскай мове). Часопіс будаўнічых матэрыялаў, 11(2), 257-262.
9. Феррэйра М., Лейва М., Куоса Х. і інш., 2014. Залежнасць пранікнення хларыдаў ад цыклаў замарожвання-адтавання, XII. Канферэнцыя па даўгавечнасці будаўнічых матэрыялаў і кампанентаў, 68-ты тыдзень, Сан-Паўлу, Бразілія.

10. Лі Б., 2009. Перанос хларыдаў у бетоне пад дзеяннем марозу - эксперыментальнае даследаванне. Магістарская дысертацыя. Тэхналагічны ўніверсітэт Чалмерса Гётэборг.
11. Лі Б., Тан Л., 2007. Пранікненне хларыдаў у партландцэментны бетон пры ўздзеянні марозу. Мат. 5-ы семінар па транспарце ў бетоне: ад нана- да макраструктуры, 251 - 262.
12. В.У. Малюк, В.Д. Малюк, С.М. Леановіч. Аналіз вынікаў абследавання жалезабетонных канструкцый партовых збудаванняў (а. Сахалін, 1927-2018 г.г.) // Бетон і жалезабетон 2022. №1 (609) с.3-9. Doi : <https://doi.org/10.31659/005-9889-2022-609-1-3-9>.
13. Леановіч С.М. Мадэляванне капілярнага ўсаджвання і трэшчынаўтварэнне бетону ў раннім узросце // Навука і тэхніка 2018. Т.17, №4 с.265-277.
14. Леановіч С.М. Алгарытм разліку трэшчынаўстойлівасці бетону ў раннім узросце пры капілярным ўсаджванні па абагульненым крытэрыі // Навука і тэхніка 2018. Т.17 №6 з .502-507.
15. Polonina EN, Leonovich SN, Lahayne O., Eberhardsteiner J., Potapov VV, Zhdanok SA // Journal of Engineering Physics and Thermophysics 2021. Т.94 № 5 з .1194-1207.