УДК 691.3

Троян В.В., кандидат технічних наук, доцент,
Сова Н.О., пров. інж.,КНУБА,
м. Київ, 03680, Повітрофлотський пр-т, 31
Тел. 067-8822861, e-mail: s_troy@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ МОРОЗОСТІЙКОСТІ БЕТОНУ

Запропоновано методологію моделювання методом кінцевих елементів морозостійкості бетонних конструкцій.
Ключові слова: бетон, морозостійкість, моделювання.

Вступ

Сучасний рівень розвитку будівельних технологій зумовлює необхідність використання структурно-імітаційного моделювання, що дозволяє без тривалих і коштовних експериментів оцінити довговічність і надійність композиційних матеріалів як функцію їх внутрішньої будови та зовнішніх умов експлуатації. При цьому, найбільш розвиненим і апробованим чисельним методом рішення диференціальних рівнянь, що описують поводження суцільних середовищ, є метод кінцевих елементів (МКЕ). Не зважаючи на значну кількість існуючих гіпотез морозостійкості їх практична реалізація для моделювання довговічності бетону в заданих кліматичних умовах відсутня.

Метою даної роботи є розробка методології моделювання морозостійкості з використанням МКЕ, що дозволить ефективно вирішувати задачі практичного спрямування. Така методологія повинна враховувати процеси тепло-массопереносу, опиратися на дані про характер порового простору бетону і утворення в ньому льоду.

Морозостійкість бетону визначену за стандартним (першим) методом [1] можна розглядати як накопичення ушкоджень, що спричинені циклами об'ємних деформацій бетону внаслідок замерзання в його порах льоду при -18±2 °С, до початку руйнування бетону. В реальних умовах цикли заморожування-відтавання відбуваються при більш широкому спектрі температур навколишнього середовища, що супроводжується утворенням в порах бетону різної кількості льоду. Для зручності аналізу, при моделюванні весь спектр імовірних циклів заморожування-відтавання бетону може бути аналітично зведений до еквівалентної за руйнівною дією кількості «стандартних» циклів (з заморожуванням до мінус 18±2 °С), шляхом врахування кількості льоду, що утворюється в порах бетону при різних температурах.

На залежності морозостійкості бетону від значення одиничної деформації зразка внаслідок утворення льоду (рис.1) базується дилатометричний метод визначення морозостійкості бетону [2]. Цей метод передбачає однократне заморожування при -18±2 °С водонасиченого зразка з вимірюванням різниці об'ємних деформацій, що спричинені утворенням льоду та визначення за залежністю приведеною на рис.1 морозостійкості. Наведену на рис.1 залежність можна використовувати при моделюванні впливу на бетон заморожування-відтавання, для врахування деструктивного впливу льоду, що утворюється за різних температур заморожування по перетину бетону конструкції.

Для моделювання морозостійкості бетону дилатометричний метод може бути модифікований за рахунок використання методу диференціальної скануючої калориметрії (ДСК) [3], приймаючи лінійним зв'язок між кількістю льоду, що утворюється, і різницею об'ємних деформацій бетону при його заморожуванні. .Використання ДСК дозволяє при різних значеннях водонасичення бетону та розподілах циклів перепаду температури моделювати вплив заморожування-відтавання по перетину бетонної конструкції.

Моделювання морозостійкості

Як видно з результатів ДСК досліджуваного бетону на рис.2, загальний об'єм льоду при охолодженні до температури -25°С не перевищує 14 г/дм^3. При -18±2 °С замерзає 8-10 г/дм^3 льоду,

що відповідає 200 «стандартним» циклам морозостійкості бетону за рис.1. При -10°С замерзає до 7 г/дм^3 льоду, що відповідає 250 циклам морозостійкості за рис.1. При -5°С замерзає 4 г/дм^3 льоду, що відповідає 350 циклам морозостійкості. Відтавання бетону, внаслідок наявності гістерезису, відбувається в діапазоні -3 - 0°С.

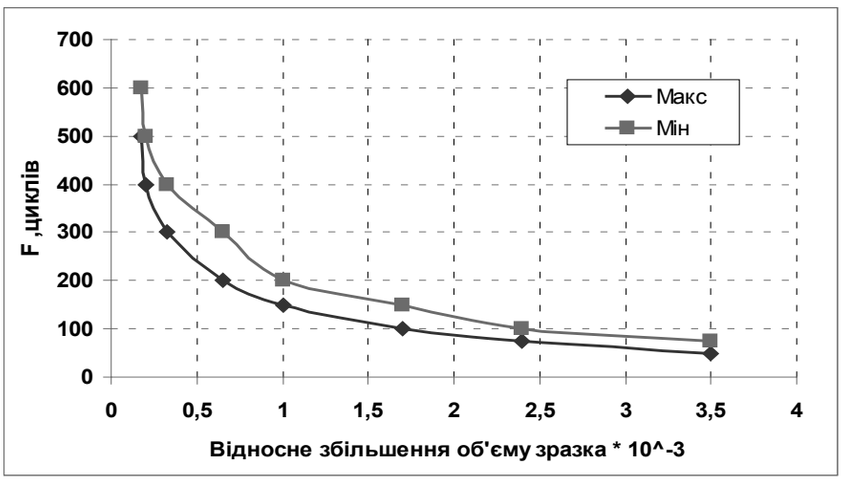

Рисунок 1. Залежність морозостійкості бетону від об’ємних деформацій внаслідок утворення льоду [2]

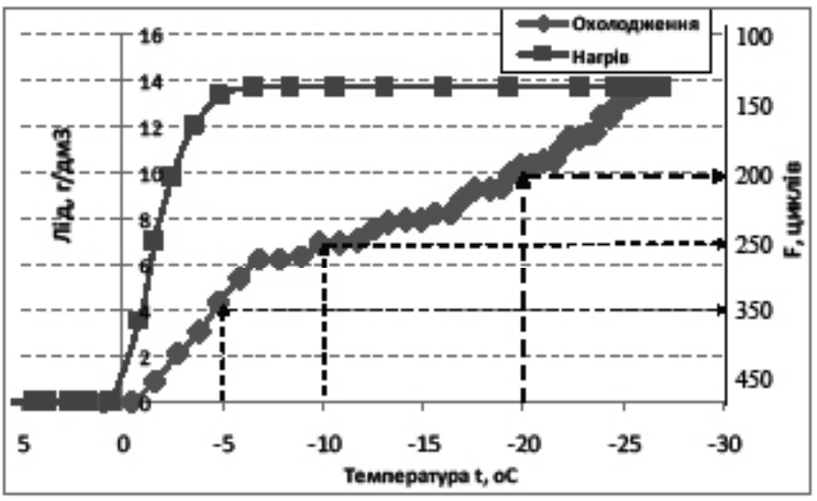

Рисунок 2. Замерзання льоду та морозостійкість досліджуваного бетону в залежності від температури за даними ДСК

Як видно з (табл.1), мінімальна середня місячна негативна температура повітря в районі об’єкта будівництва становить -6,1 °С із одним сезонним циклом заморожування-відтавання. Для врахування впливу екстремальних значень температури при розрахунках додатково використовували середні екстремальні мінімуми температури (табл.1), і враховували до 2 тижневих циклів перепаду температури навколишнього середовища за сезон внаслідок відлиг і наступних заморозків.

У відповідності до ГОСТ 16350-80, у Києві 99,4 доби в рік з негативною температурою, при цьому, число діб у році із середньою добовою температурою повітря від -29,9 до -20,0 °С -1 доба; від -19,9 до -10,0 °С - 18,3 доби; від -9,9 до 0,0 °С - 80,1 доби. Загальне число діб з переходом температури через нульове значення становить 66,7. Однак тільки частина цих коливань температури приводить до змінного заморожування-відтавання льоду в бетоні конструкції.

Таблиця 1

Кліматичні параметри за даними метеостанції в районі об'єкта будівництва

Параметри	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
Середньомісячна температура, °С	-6,1	-5	0,2	8,3	14,9	17,9	18,9	18,2	13,3	7,4	1,7	-2,8	7,2
Середні екстремальні мінімуми температури, °С	-21	-20	-13	-2,4	1,8	6,6	9,4	6,8	1,5	-4,4	-9,1	-17	-
Середньомісячна швидкість вітру, м/с	3,8	3,7	3,5	3,4	3	2,9	2,8	2,7	2,9	3,1	3,6	3,6	3,3

Відповідно до даних ГОСТ 16350-80 [4] імовірність добового перепаду температури повітря понад 16 °С становить менше 1%, імовірність добового перепаду 13-16 °С – менше 10%, а імовірність добових перепадів 10-13 °С, 7-10 °С та 4-7 °С – менше 24% для кожного інтервалу відповідно. Таким чином, імовірний розподіл циклів добових перепадів температури повітря в перерахунку на 66,7 діб переходу температури через нуль буде мати вигляд наведений на рис. 3.

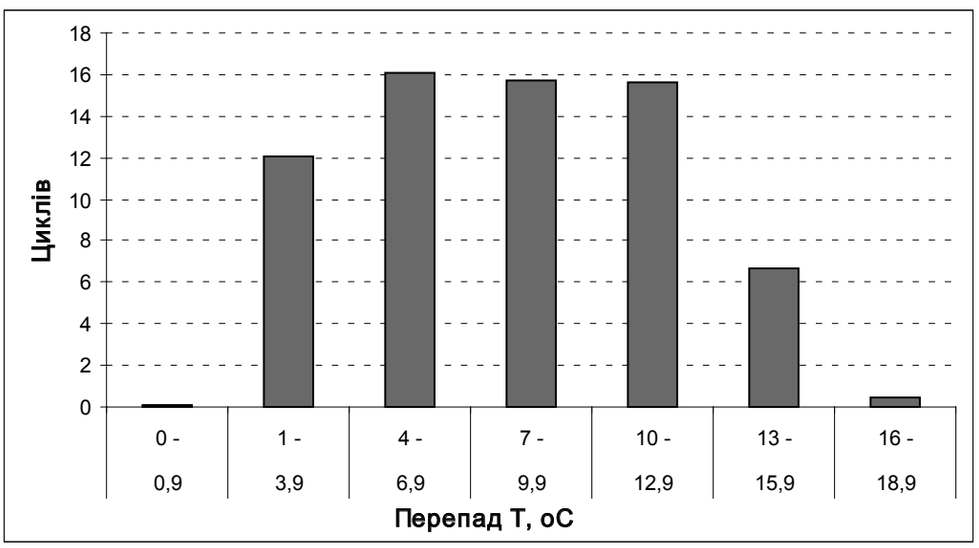

Рисунок 3. Імовірний розподіл циклів добових перепадів температури повітря в перерахунку на 66,7 діб переходу температури через нуль

Для оцінки впливу сезонних коливань температури навколишнього середовища на бетон фундаменту за умов експозиційного класу XF3, у професійному програмному комплексі «Elcut» були змодельовані середньомісячні сезонні коливання температури (рис.4, а) та середні екстремальні коливання температури (рис.4, б) у відповідності з табл.1. Як видно з рис. 5, середньомісячні сезонні коливання температури не приводять до заморожування бетону фундаменту на ділянці Т4 всередині споруди. Внаслідок екстремальних сезонних коливань температури можливий один сезонний цикл замерзання бетону на ділянці Т4, при цьому перепад температури бетону не перевищить 10°С.

При тижневих циклах перепаду температури навколишнього середовища до 20°С, перепади температури бетону фундаменту на ділянці Т4 не перевищують 2°С, при цьому тижневі перепади температури бетону фундаменту на ділянці Т3 можуть досягати 14 °С. За даними рис.2 морозостійкість досліджуваного бетону при заморожуванні бетону до -14 °С перевищує 200 циклів. Імовірність виникнення тижневих циклів менше 2 раз за рік.

а) б)

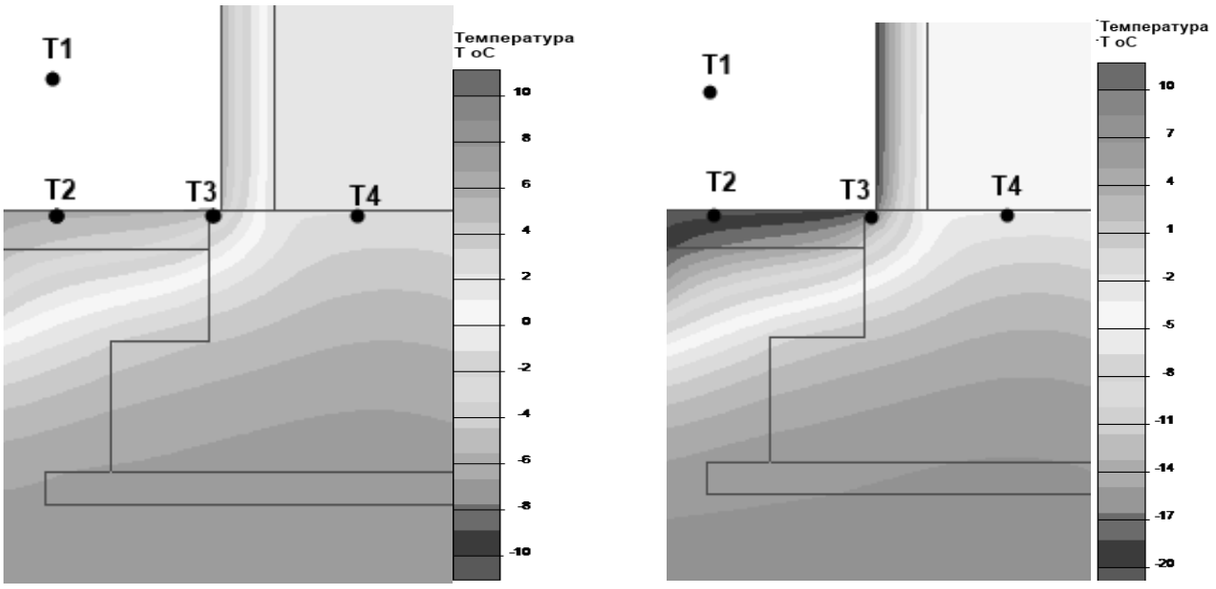

Рисунок 4. Модель сезонного промерзання бетонної конструкції в січні за умови:
а) середньомісячних коливань температури (табл. 1);
б) середніх екстремальних коливань температури (табл. 1).

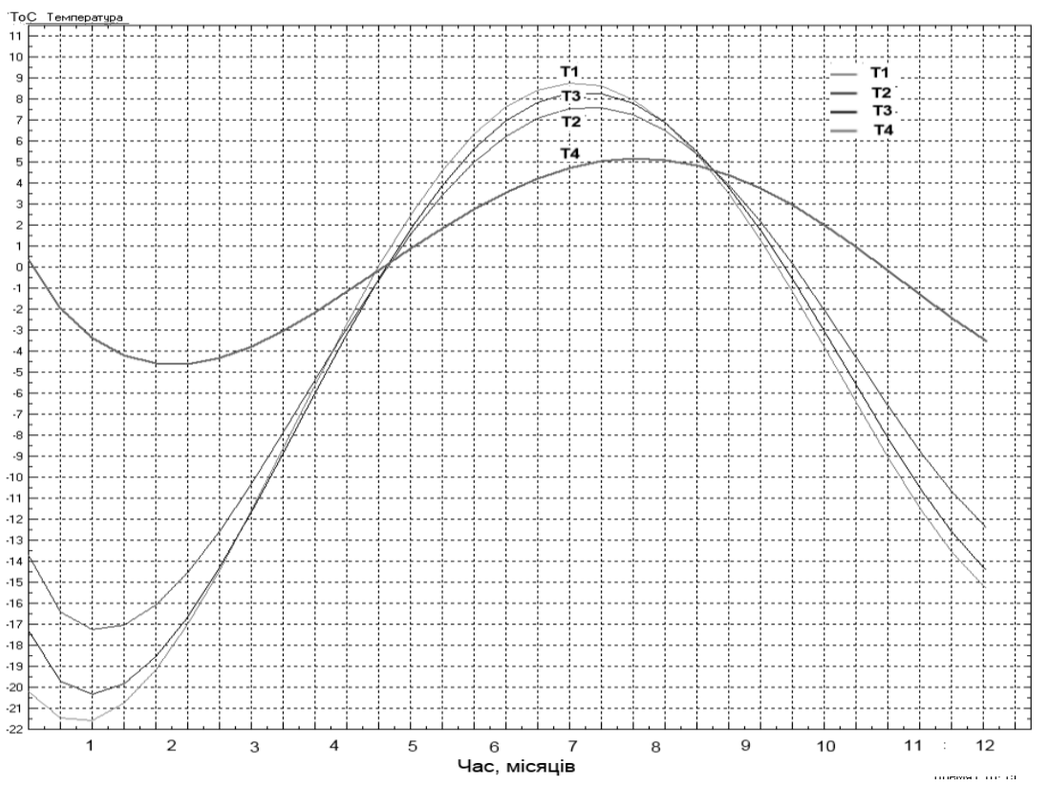

Рисунок 5. Модель впливу середньомісячних сезонних коливань температури навколишнього середовища на бетонну конструкцію

Як видно з рис.6, при добових перепадах температури навколишнього середовища до 20°С, перепади температури бетону фундаменту на ділянці Т4 всередині споруди практично відсутні,

а добові перепади температури бетону фундаменту на ділянці Т3 досягають 7°С з відтаванням (промерзанням) поверхні на 8см. Морозостійкість досліджуваного бетону (рис.2) при заморожуванні до -7°С перевищує 250 циклів, імовірність таких циклів менше 1 за рік. При добових перепадах температури навколишнього середовища до 15°С, перепади температури бетону фундаменту на ділянці Т3 досягають 5 °С з відтаванням (промерзанням) поверхні на 5см. Морозостійкість досліджуваного бетону (рис.2) при заморожуванні до -5 °С перевищує 350 циклів, імовірність таких циклів менше 6,7 за рік, що за руйнівною дією еквівалентно 4 «стандартним» циклам заморожування-відтавання бетону при температурі -18±2°С. При добових перепадах температури навколишнього середовища до 10°С, перепади температури бетону фундаменту на ділянці Т3 досягають 3 °С з відтаванням (промерзанням) поверхні на 1см. Морозостійкість досліджуваного бетону (рис.2) при заморожуванні до -3 °С перевищує 400 циклів, імовірність таких циклів менше 16 за рік, що за руйнівною дією еквівалентно 8 «стандартним» циклам заморожування-відтавання.

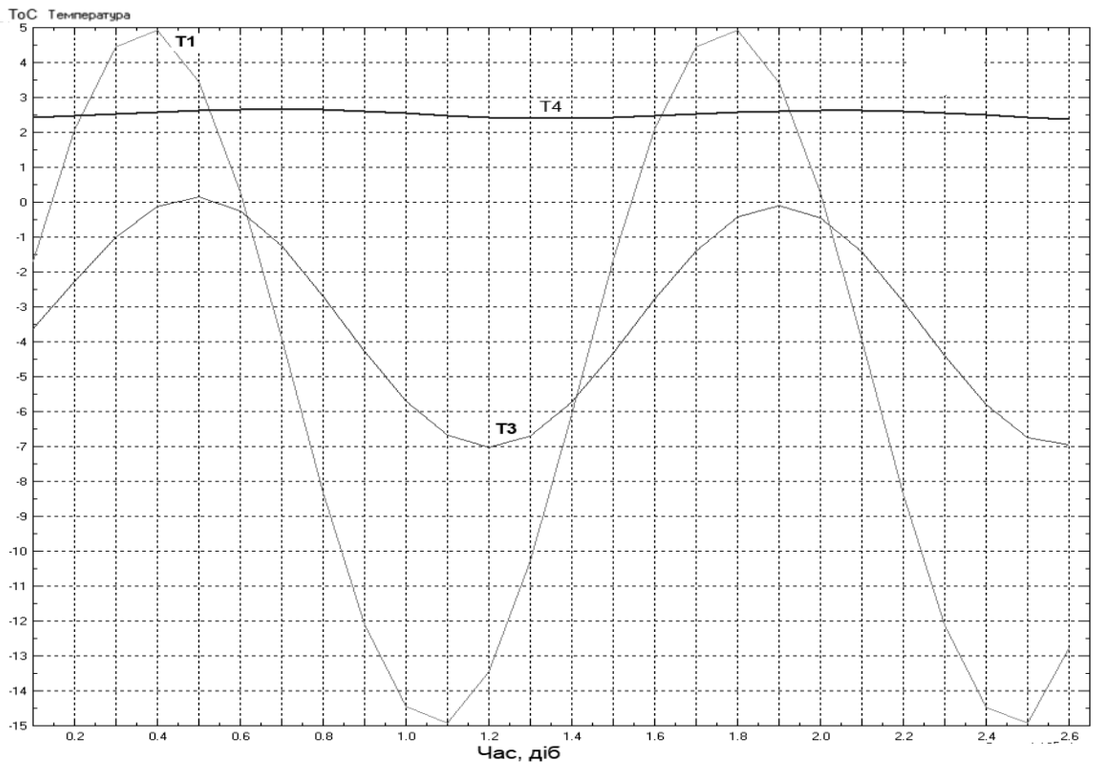

Рисунок 6. Модель впливу добових коливань температури навколишнього середовища на бетонну конструкцію

Виходячи з середньої місячної інтегральної поверхневої щільності потоку сонячного випромінювання при відсутності хмар, середньої негативної температури повітря і швидкості вітру [4] враховувалось циклічне відтавання бетону під впливом прямого сонячного випромінювання, що еквівалентне ~3 «стандартним» циклам на рік. Таким чином, за умов експозиційного класу XF3 циклічні коливання температури поверхні бетону конструкції, що викликають утворення-відтавання льоду, під впливом прямого сонячного випромінювання, еквівалентні ~3 «стандартним» циклам на рік, а під впливом добових коливань температури повітря, еквівалентні ~12 «стандартним» циклам на рік. Розподіл імовірної сумарної кількості циклів заморожування-відтавання досліджуваного бетону по глибині за умов експозиційного класу XF3 наведено на рис.7.

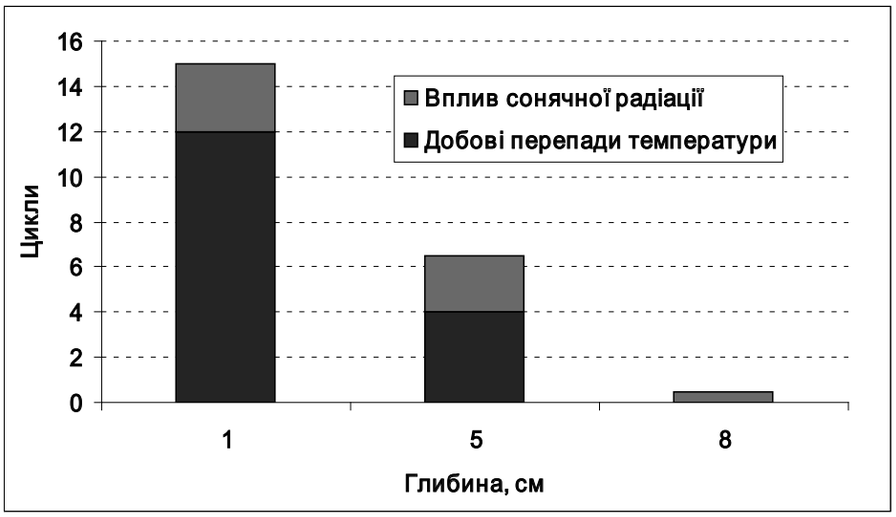

Рисунок 7. Розподіл імовірної сумарної кількості річних циклів заморожування-відтавання по глибині досліджуваного бетону за умов експозиційного класу XF3

Висновки

Внаслідок добових та середньомісячних сезонних коливань температури бетон фундаменту на ділянці Т4 всередині споруди не замерзає, однак внаслідок екстремальних сезонних коливань температури, можливий один сезонний цикл замерзання бетону.

За умов експозиційного класу XF3, на ділянці Т3 вичерпання 200 циклів заморожування-відтавання захисного шару бетону на глибині 1 см відбудеться за 13 років, а на глибині 5 см – за 30 років. В масиві бетону фундаменту на глибині понад 5 см, за 100 років кількість стандартних циклів заморожування-відтавання не перевищить 200.

Запропонована методологія моделювання методом кінцевих елементів морозостійкості враховує процеси тепло-массопереносу, характер порового простору бетону і утворення в ньому льоду та дозволяє ефективно вирішувати практичні задачі.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ Б В.2.7-48-96 Бетони. Базовий (перший) метод визначення морозостійкості
2. ДСТУ Б В.2.7-50-96 Бетони. Дилатометричний метод прискореного визначення морозостійкості
3. Ушеров-Маршак А.В. Калориметрия цемента и бетона / ред. В.П.Сопов. - Х.: Факт, 2002. - 183 с.
4. ГОСТ 16350-80 Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА

© Троян В. В., Сова Н. А.

Предложена методология моделирования методом конечных элементов морозостойкости бетонных конструкций.

Ключевые слова: бетон, морозостойкость, моделирование

MODELING FROST RESISTANCE OF CONCRETE

© Troyan Vyacheslav, Sova Nadezhda

The methodology by the finite element method modeling of frost resistance of concrete structures proposed.

Keywords: concrete, frost resistance, modeling