

Рис. 5. Тангенциальное напряжение элементарных слоев стенки при исходной весовой влажности 5,7%: в начальный момент времени —  $\diamond$ —, после 2 —  $\square$ —, после 4 —  $\Delta$ —, после 6 —  $+$ —, после 8 —  $\text{ж}$ —, после 10 —  $\circ$ —, после 12 —  $\times$ — часов сушки.

Изменение параметров окружающей среды, физико-механических и теплотехнических свойств материала стенки приводит к заметным изменениям количественной и качественной стороны изучаемого явления. Так, при снижении температуры сушки на  $20^{\circ}\text{C}$  в увлажненной до 8,4% стенке максимальные растягивающие напряжения на поверхности снижаются более чем в два раза. Если уменьшить ординаты кривой десорбции на 15%, то тангенциальные растягивающие напряжения на поверхности стенки увеличатся примерно в 1,6 раза. Не составляет большого труда оценить влияние и других варьируемых факторов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный вычислительный эксперимент показал, что разработанная модель может быть использована для оценки полей влагосодержания и напряжений в ограждающих конструкциях зданий и сооружений. Варьируя значениями параметров окружающей среды, физико-механическими и теплотехническими свойствами материала имеется возможность получать разнообразные данные о распределении влажности и напряжений по толщине стенки, что создает основу для выработки требований, которые необходимо предъявлять к материалу наружных слоев стен.

*Работа выполнена в рамках договора о сотрудничестве между Брестским государственным техническим университетом и Политехником Белостоцкой.*

УДК 624.012.4.35

**Леонович С.Н., Аль-Факих О.А.М.**

## ПРАКТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### 1. Введение.

Работа посвящена актуальной проблеме оценки остаточной морозостойкости железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях циклического замораживания и оттаивания ЦЗО. Выполнена апробация модели и алгоритма расчетов на реальных конструкциях при ЦЗО.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. Изд. 2-е, переработ. и доп. М.: Стройиздат, 1973 — 432 с.
2. Baroghel-Bouny V., Mainguy M., Lassabatere T., Coussy O. Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials, Cement and concrete research 29 (1999) 1225-1238.
3. Kowalski S.J., Rybicki A. Pola temperatury, koncentracji wilgoci i naprężeń w zawilżonej przegrodzie wywołane zmiennymi parametrami powietrza po obu stronach// Materiały konferencyjne IX Polskiej Konferencji Naukowo-Technicznej "Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce", Łódź 2003 — 327 — 340.
4. Никитин В.И., Ракецкий В.М., Лапко А., Прусел И.А. Имитация тепло- и влагопереноса в теплоизоляционных материалах// Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология.— 2001.— №2(8).— с. 56-60.
5. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ./Под ред. Г.С. Шапиро. — 2-е изд. — М.: Наука. 1979, 560 с.
6. Никитин В.И., Ракецкий В.М., Лапко А., Прусел И.А. Гигротермические воздействия на цилиндрические стенки железобетонных силосов// "Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: Сборник трудов VII Международного научно-методического семинара/ Под ред. Блещика Н.П., Борисевича А.А., Пецольда Т.М. — Брест, БГТУ, 2001 — 550 с.

### 2. Состояние проблемы.

Проблема определения морозостойкости бетона в эксплуатируемых железобетонных конструкциях подобно оценке прочности неразрушающими методами еще ожидает своего решения. Это объясняется, с одной стороны, отсутствием приемлемых экспериментальных методик, с другой стороны, отсутствием инновационных моделей морозной деструкции бетона и корректных критериев ее оценки. Оценка морозо-

стойкости по потере прочности на сжатие возникла более века назад в эпоху первых шагов в развитии поргланцементного бетона и прочно укоренилась в нормативной базе СНГ до сегодняшнего дня. Эта методика удобна для производственного контроля морозостойкости бетона ввиду унификации опытных образцов и прессового оборудования, как и для прочностных испытаний. Огромную ценность представляет накопленный за многие годы экспериментальный и производственный материал по морозостойкости бетона, определенной по вышеуказанной методике. Однако в последние три-четыре десятилетия эта методика совершенствовалась исключительно путем изменения (ужесточения) количественного критерия потери прочности при циклическом замораживании-оттаивании (25%, 15 %, 5%), хотя каждое изменение приводило к потере значимости предыдущего экспериментального материала. В последние годы большинство исследований сфокусировалось на ускоренной оценке морозостойкости, основанной на реальной или мнимой корреляции предлагаемых критериев с критерием потери прочности. При этом не развиваются физические модели морозной деструкции и физические критерии ее оценки, а значит не решается столь актуальная для Республики Беларусь проблема требуемой стойкости бетона при воздействии циклического замораживания-оттаивания в водонасыщенном состоянии.

### 3. Рабочая гипотеза.

Конструктору для расчета несущей способности эксплуатируемой железобетонной конструкции относительно бетона достаточно знать прочность бетона на сжатие. Для оценки прочности бетона конструкции, подвергающейся циклическому замораживанию и оттаиванию, сделать выбор приемлемого неразрушающего метода не просто. Методы пластической деформации и упругого отскока дают завышенные значения прочностных характеристик замороженного бетона. Ультразвуковой импульсный метод завышает прочность водонасыщенного бетона. Одновременно, разрушенная под воздействием ЦЗО поверхность затрудняет качественный контакт ультразвуковых датчиков с бетоном, что может искажать оценку. Целесообразно в такой ситуации использовать метод отрыва со скалыванием с последующей корректировкой полученных значений прочности с учетом параметров отрицательной температуры и влажности бетона конструкций. Серьезным аргументом в пользу отрыва со скалыванием является возможность одновременного определения этим методом коэффициента интенсивности напряжений - силового параметра, характеризующего способность бетона сопротивляться образованию и развитию трещин. Это идеальный параметр для оценки остаточной морозостойкости бетона, поскольку учитывает структуру бетона и особенности развития трещин при морозной деструкции.

### 4. Экспериментальные данные.

#### 4.1. Объект исследования.

Выполнена диагностика железобетонных конструкций холодильника Минского хладокомбината №1 в осях 1-12. Комплекс инженерных обследований проводился при эксплуатационной отрицательной температуре в помещениях и холодильных камерах.

Уровень морозной деструкции за время эксплуатации определяется тем, что железобетонные конструкции в холодильных камерах эксплуатируются перманентно при отрицательной температуре (от - 22 °С до - 27 °С) с очень редкими и короткими периодами оттаивания. Дефекты, зафиксированные в вестибюлях, проявились более значительно. Причиной этого является частое и резкое изменение температуры и влажности (циклическое замораживание и оттаивание) ввиду частого перемещения продукции из холодильных камер к лифтам и обратно.

Таким образом, конструкции в холодильных камерах и вестибюлях подвергались различному, однако достаточно точно определенному за весь период эксплуатации количеству циклов замораживания и оттаивания. Этим объект исследования положительно отличается от достаточно неопределенных знакопеременных температурных воздействий при экспозиции железобетонных конструкций при атмосферных условиях.

#### 4.2. Методика экспериментальных исследований.

Комплекс экспериментальных исследований включал следующие мероприятия: определение трещиностойкости и прочности бетона методом отрыва со скалыванием прибором ГПНС; отбор проб бетона для определения степени его водонасыщения и особенностей микро- и макроструктуры; высверливание кернов на различной глубине колонн и перекрытий (от сильно поврежденного ЦЗО на периферии, до практически неразрушенного в середине массива бетона) и их последующие климатические и прочностные испытания.

В данной работе определение прочности производилось в соответствии с [1] методом отрыва со скалыванием.

При испытании методом отрыва со скалыванием участки располагались в зоне наименьших напряжений, вызываемых эксплуатационной нагрузкой или усилием обжатия предварительно напряженной арматуры.

Испытания проводились в регламентированной последовательности. Поскольку, анкерное устройство не было установлено до бетонирования, в бетоне сверлились шпур, размер которых был выбран в соответствии с инструкцией по эксплуатации прибора в зависимости от типа анкерного устройства; в шпуре закреплялось анкерное устройство на глубину, предусмотренную инструкцией по эксплуатации прибора, в зависимости от типа анкерного устройства; прибор соединялся с анкерным устройством; нагрузку увеличивали со скоростью 1,5 - 3,0 кН/с; были зафиксированы показания силоизмерителя прибора и глубина вырыва с точностью не менее 1 мм.

Если наибольший и наименьший размеры вырванной части бетона от анкерного устройства до границ разрушения по поверхности конструкции отличались более чем в два раза, а также если глубина вырыва отличалась от глубины заделки анкерных устройств более чем на 5%, то результаты испытаний не учитывались.

Использовался прибор ГПНС-4 с анкерным устройством III типа. Глубина заделки анкера: 35 - 42 мм в соответствии с [1]. Испытания производились при отрицательных температурах ( 1 этаж : - 20 °С; 3 этаж : -25°С; 5 этаж:-27 °С).

### 5. Анализ результатов экспериментальных исследований.

Градуировочная зависимость для расчета прочности имеет вид

$$R = m_1 \cdot m_2 \cdot P, \quad (1)$$

где  $m_1$  - коэффициент, учитывающий максимальный размер крупного заполнителя в зоне вырыва;

$m_2$  - коэффициент пропорциональности при переходе от усилия вырыва, кН, к прочности бетона, МПа;

$P$  - усилие вырыва анкерного устройства, кН.

Задаемся распределением главных напряжений по длине образующей конуса разрушения в виде параболы пятой степени, нормальные напряжения  $\sigma_r$  при старте трещины определяется из [2]

$$\sigma_r = \frac{3P(\cos^2(90 - \alpha) - \sin 2(90 - \alpha))}{2\pi l^3 \left(1 + \frac{r}{l \operatorname{tg} \alpha}\right)}, \quad (2)$$

где  $P$  - усилие вырыва;  $\alpha$  - угол между образующей конуса разрушения и осью шпура;  $\alpha = \arctg(R/l)$ .

**Таблица 1.** Прочность бетона колонн, определенная методом отрыва со скалыванием бетона в замороженном состоянии и коэффициент интенсивности напряжений

Этаж	Оси	Прочность в замороженном состоянии, МПа	Температура, °С	Весовая влажность, %	Коэффициент интенсивности напряжения, МПа√м
1 этаж	Е/4	42.3	-20 °С	От 1.5	0.64
1 этаж	Е/6	64.7	-20 °С	До 5.5	0.98
1 этаж	Г/6	54.8	-20 °С		0.83
1 этаж	Д/4	59.8	-20 °С		0.90
1 этаж	В/4	64.7	-20 °С		0.98
1 этаж	Б/6	-	-20 °С		—
1 этаж	Б/10	49.8	-20 °С		0.75
3 этаж	Д/5	44.8	-25 °С		0.68
3 этаж	Г/5	39.8	-25 °С		0.6
3 этаж	Д/6	39.8	-25 °С		0.6
3 этаж	Г/6	49.8	-25 °С		0.75
5 этаж	Е/6	44.8	-27 °С		0.68
5 этаж	Е/4	34.9	-27 °С		0.53

**Таблица 2.** Влажность бетона и показатели пористости

№ образца	$W_{max}$ , % по массе	$W_{об min}$ , %	$W_{max}$ , %	$X_1$	$\lambda$	$\alpha$
1-1	5.5	3.0	3.7	1.05	1.0	0.3
1-2	1.5	0.6	0.66	0.5	0.5	0.01
1-3	4.1	2.3	2.3	0.85	0.85	0.01
1-4	2.8	1.3	1.3	0.6	0.6	0.01
1-5	2.6	1.5	1.6	0.95	0.6	0.1

Примечание:  $X_1$  - показатель среднего размера пор;  $\lambda$  - показатель пор с учетом  $\alpha$ ;  $\alpha$  - степень однородности пор по размерам.

Величину  $K_{lc}$  рекомендуется [2, 3] определять на основе решения о полукруговом диске с краевой трещиной, когда круговая граница заземлена, по зависимости

$$K_{lc} = \sigma_r \sqrt{2\pi l} [0,8 / ((R/l)^3 - 1) + 0,7] \quad (3)$$

Определены «эксплуатационные» прочностные и деформационные характеристики бетона в замороженном и оттаявшем состоянии. Произведен пересчет этих характеристик при фиксированных значениях температуры и влажности, что позволяет идентифицировать реальное напряженно-деформированное состояние в конструкциях при эксплуатационных условиях (реальной степени водонасыщения бетона и отрицательной температуре) и при оттаивании.

Результаты испытаний по определению прочности методом отрыва со скалыванием и рассчитанные по (3) коэффициенты интенсивности напряжений сведены в табл. 1.

По отобранным в конструкциях опытным образцам были выполнены: определение влажности бетона; анализы пористости бетона, в том числе по кинетике его водопоглощения.

Результаты лабораторных испытаний бетона сведены в табл. 2.

## 6. Методика экспериментальной оценки остаточной морозостойкости бетона на основе фундаментальных положений механики разрушения.

Морозостойкость определяется структурой бетона, интегральными характеристиками которой являются силовые и энергетические параметры механики разрушения - критические коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) при нормальном отрыве  $K_{lc}$  и поперечном сдвиге  $K_{lsc}$ , а также энергия разрушения  $G_c$ . Так как все дефекты в структуре бетона представляют собой трещины (с различными параметрами и радиусами кривизны в вершинах), то каждый такой дефект характеризуется своим значением  $K_I$  и  $K_{II}$ .

Существующие методы определения морозостойкости бетона требуют проведения объемных и, самое главное, длительных экспериментальных исследований, в обязательном

порядке в условиях лаборатории. Сегодня при огромных объемах производства бетона и изделий из него это неприемлемо. Необходимо в производственных условиях оценивать качество изделий или конструкций с позиции обеспечения требуемой морозостойкости, т.е. нужен такой критерий, который корректен при его определении и позволяет судить о стойкости бетона к циклическим низкотемпературным воздействиям. Выполненные экспериментальные исследования показали, что морозостойкость может быть спрогнозирована теоретически по результатам определения критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{lc}$ .

В условиях эксплуатации возможно определение  $K_{lc}$  на основе существующего метода испытаний на отрыв со скалыванием. Используя собственные экспериментальные данные, а также некоторые результаты НИИЖБ, в том числе К.А.Пирадова можно предложить, как пробную, зависимость (4) прогнозируемой морозостойкости бетона эксплуатируемых конструкций от значений коэффициентов интенсивности напряжений, полученных методом отрыва со скалыванием (табл. 3).

$$K_{lc}(200) / K_{lc} = -0,86K_{lc}^2 + 1,44K_{lc} - 0,18 \quad (4)$$

**Таблица 3.** Ожидаемая морозостойкость бетона в зависимости от значения коэффициентов интенсивности напряжений, полученных методом отрыва со скалыванием

Наименование показателя	Ожидаемая марка по морозостойкости F									
	F25	F35	F50	F75	F100	F150	F200	F300	F400	F500
$K_{lc}$ , МПа√м	0,5	0,6		0,7		0,8	0,9	0,95		

### 7. Выводы

1. Предложена методика неразрушающего контроля остаточной морозостойкости бетона эксплуатируемых при циклическом замораживании-оттаивании железобетонных конструкций на основе метода отрыва со скалыванием.

2. В качестве критерия оценки морозостойкости принят коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве, учитывающий структуру бетона и особенности развития трещин при морозной деструкции.

3. Методика апробирована на реальных железобетонных конструкциях, эксплуатируемых при ЦЗО.

УДК 624.012.4.35

Леонович С.Н., Аль-Факих О.А.М.

## РАСЧЕТ СЖАТЫХ И ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ЗАМОРАЖИВАНИИ И ОТТАИВАНИИ

### 1. Введение.

Под воздействием мороза происходит постепенное разрушение или фрагментация на составные части бетонных поверхностей, как результат поверхностного замерзания и оттаивания. В условиях увлажнения и замораживания-оттаивания происходит уменьшение прочности бетона, и около поверхности происходит полное разложение на составные части и полная потеря материала.

Бетон разрушается на составные части в результате замерзания воды в капиллярных порах. Одной из причин разрушения является 9%-е увеличение в объеме, которое происходит при замерзании воды. Другой причиной давления, возникающего в бетоне, является рост кристаллов льда при отрицательной температуре и значительной влажности.

Сопrotивление бетона морозу является свойством материала. Сопrotивление морозу зависит от других свойств бетона, таких, как прочность, плотность, содержание воздуха и т.д. Скорость разрушения зависит, однако, не только от качества бетона, но и от воздействия окружающей среды.

Действие окружающей среды усиливается от воздействия соли, которую применяют для предотвращения обледенения. Типичным для механизма разрушения от соли и мороза является постепенное отслаивание, шелушение тонких слоев бетона.

### 2. Физическая модель послойного снижения прочности бетона при ЦЗО

Полное разрушение от мороза происходит сначала как уменьшение прочности по краям бетонной конструкции. Модель послойного снижения прочности наилучшим образом описывается формулой [1, 2]:

$$R(d) = R_0 [1 - [1 - (d/H)^n]], \quad (1)$$

где  $R(d)$  - кубиковая прочность на сжатие бетона на глубине  $d$ ,

$R_0$  - кубиковая прочность на сжатие неразрушенного бетона

$d$  - глубина от поверхности

$H$  - глубина воздействия

$n$  - индекс, относящийся к числу циклов (или время) замораживания и оттаивания.

В расчете конструкций уменьшение прочности бетона в крайних зонах можно представить либо уменьшением прочности по всей площади поперечного сечения бетона, либо уменьшением размеров поперечного сечения. Последний метод наиболее привлекателен для конструктора и реализуется введением понятия потери сечения бетона

На рисунке 1 дано графическое представление уменьшения прочности согласно уравнению в пределах глубины влия-

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 22690-88. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 25с.
2. Srivastava K.N., Kumar M. A note on the problem of edge crack in a semi-circular plate // Int. J. Fract. – 1976. -12, N4. – p.645-646.
3. Пирадов К.А., Мамаев Т.Л., Кожобеков Т.А. Новый метод определения морозостойкости бетона на основе фундаментальных положений механики разрушения // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь. Сборник трудов VII международного научно-методического семинара. Посвящается 100-летию со дня рождения профессора В.В. Михайлова. Брест, БГТУ, 2001. – С.454-456.

ния  $H$ . Значение индекса  $n$  уменьшается от бесконечности (в момент  $t=0$ ) до 0 (для бесконечно длительного времени). Реальная потеря бетона  $x$  показана на рисунке, как расчетная. Если из ширины конструкции  $a$ , вычтем значение  $x$ , получим ширину конструкции с неразрушенным бетоном. Таким образом, учет реального разрушения бетона производится уменьшением размеров поперечного сечения конструкции. Явной потерей является глубина влияния, деленная на величину  $n+1$ , соотношенную со временем. На рисунках 6.2 и 6.3 приведены зависимости потери бетона от количества циклов замораживания-оттаивания.

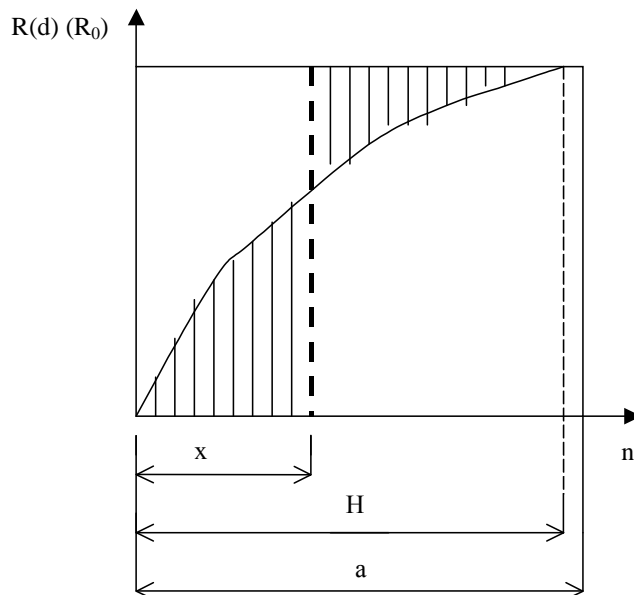


Рис.1. Схема потери сечения бетона.

### 3. Экспериментальные исследования прочностных и деформационных характеристик обычного, модифицированного и напрягающего бетона при ЦЗО.

Исследования проводили на шести составах бетона. Первые три состава (серия 1, 2 и 3) были изготовлены на обычном портландцементе, а остальные – на напрягающем цементе (серия 4, 5 и 6).