

$$\begin{aligned}
 s_{q1} &= \frac{t_0}{t_1}; \quad s_{q2} = 1 + \frac{15EJ_z}{c_2 l^3} + \frac{5EJ_z}{c_6 l}; \quad s_{q3} = 1 + \frac{4EJ_z}{c_6 l}; \\
 s_{q5} &= 1 + \frac{15EJ_y}{c_3 l^3} + \frac{5EJ_y}{c_5 l}; \quad s_{q6} = 1 + \frac{4EJ_y}{c_5 l}; \\
 u_1 &= 1 + \frac{3EJ_z}{l^3} \left( \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_8} \right) + \frac{3EJ_z}{c_6 l}; \quad u_2 = 1 + \frac{2EJ_z}{c_6 l}; \\
 u_3 &= 1 + \left( \frac{1}{c_6} + \frac{1}{c_{12}} \right) \frac{EJ_z}{l}; \quad u_4 = 1 + \frac{3EJ_y}{l^3} \left( \frac{1}{c_3} + \frac{1}{c_9} \right) + \frac{3EJ_y}{c_5 l}; \\
 u_5 &= 1 + \frac{2EJ_y}{c_5 l}; \quad u_6 = 1 + \left( \frac{1}{c_5} + \frac{1}{c_{11}} \right) \frac{EJ_y}{l}; \\
 t_0 &= 1 + \frac{3EA}{c_1 l}; \quad t_1 \rightarrow \text{см. (3)}.
 \end{aligned}$$

УДК 539.319

Кофанов В.А., Никитин В.И.

## ПОЛЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ И НАПРЯЖЕНИЙ В УВЛАЖНЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТЕНКЕ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СУШКЕ

### ВВЕДЕНИЕ

При воздействии внешней среды капиллярно-пористые материалы ограждающих конструкций зданий и сооружений непрерывно претерпевают изменения температуры и влажности, вызывающие появление в них температурных и влажностных деформаций. Вследствие неравномерного распределения этих деформаций по объему в материалах конструкции возникают внутренние напряжения, которые приводят к появлению микро- и макротрещин.

Свыше сорока лет назад Александровский С.В. в своей монографии [1] указал на необходимость учета температурно-влажностных воздействий при расчете бетонных и железобетонных конструкций. В настоящее время за рубежом проявляют все большее внимание к этой проблеме. В подтверждение сказанному можно привести, например, работы [2, 3]. Однако в нашей республике работы в данном направлении практически отсутствуют.

В представленной работе расчетным путем определены поля влагосодержания и напряжений в цилиндрической стенке, внутренняя поверхность которой гидроизолирована, а наружная поверхность контактирует с воздушной средой, имеющей постоянную температуру и относительную влажность.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для определения полей влагосодержания в цилиндрической стенке из капиллярно-пористого материала использована разработанная нами математическая модель [4]. В рамках этой модели рассматривается осесимметричная задача для стенки единичной высоты, которая разбивается на ряд слоев одинаковой толщины.

При определении напряжений, возникающих в каждом элементарном слое толщиной  $\Delta r$ , значение температуры  $T$ , влажности  $W$  и модуля упругости  $E$  принимаются для средин-

При задании для выражений векторов (4) и (7) величин жесткостей упругих связей равных бесконечности получим жесткие присоединения КЭ к узлам, а при задании величин  $c_4, c_5, c_6$  и  $c_{10}, c_{11}, c_{12}$ , равными нулю получим шарнирное соединение стержня слева и справа и соответственно вектора узловых нагрузок для этих соединений.

Полученные выражения позволяют выполнять расчеты пространственных стержневых систем методом конечных элементов с учетом упругой податливости соединений элементов в узлах и оценивать влияние такого соединения на величины и распределение усилий в сооружениях.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 423с.
2. Игнатюк В.И., Богомолов Д.В. О формировании разрешающих уравнений МКЭ в расчетах плоских стержневых систем с учетом упругой податливости узловых соединений // Вестник БГТУ. – 2003. – № 1(19): Строительство и архитектура. – С. 71 – 75.
3. Масленников А.М. Расчет строительных конструкций численными методами. – Л.: ЛГУ, 1987. – 224 с.

ной изотермической поверхности. С учетом аддитивности температурных и влажностных деформаций радиальные  $\sigma_r$  и тангенциальные  $\sigma_\theta$  напряжения определяются из соотношений [5]:

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= -E \frac{1}{b^2} \int_a^b (\alpha T + \beta W) r dr + \\
 &+ \frac{E}{1-\nu^2} \left[ C_1 (1+\nu) - C_2 (1-\nu) \frac{1}{b^2} \right], \\
 \sigma_\theta &= E \frac{1}{b^2} \int_a^b (\alpha T + \beta W) r dr - E (\alpha T + \beta W) + \\
 &+ \frac{E}{1-\nu^2} \left[ C_1 (1+\nu) + C_2 (1-\nu) \frac{1}{b^2} \right],
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $E$  – модуль упругости материала, МПа;

$T$  – приращение температуры стенки во времени, °С;

$W$  – приращение относительной влажности стенки во времени, %;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$a$  – внутренний радиус элементарного слоя, м;

$b$  – наружный радиус элементарного слоя, м;

$r$  – радиус срединной изотермической поверхности слоя, м;

$\alpha$  – коэффициент линейного расширения, 1/град;

$\beta$  – коэффициент влажностной усадки, 1/%;

$C_1, C_2$  – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий.

Кофанов Валерий Анатольевич, аспирант каф. строительной механики Брестского государственного технического университета.

Никитин Вадим Иванович, д.т.н., профессор Политехнической Белостоцкой (Польша) и Брестского государственного технического университетов.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

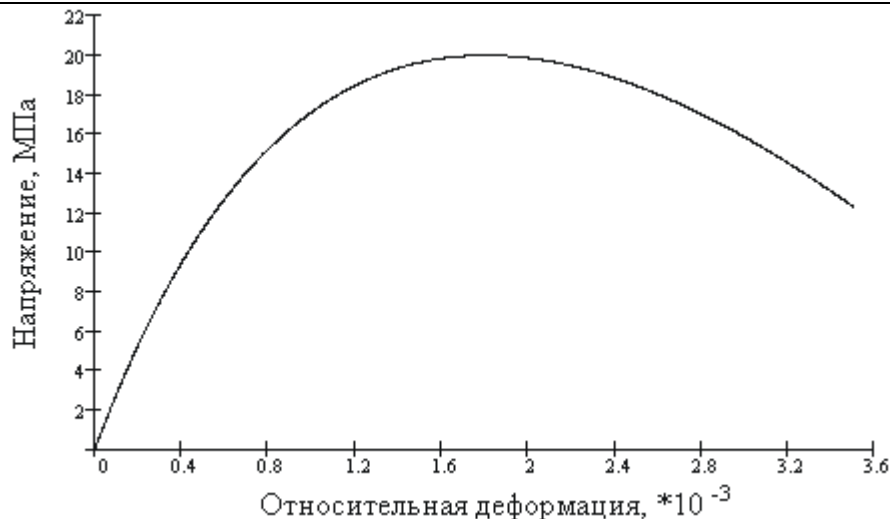


Рис. 1. Зависимость между напряжениями  $\sigma$  и деформациями  $\epsilon$  при осевом сжатии.

При чем эти напряжения удовлетворяют уравнению равновесия

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0. \quad (2)$$

Касательное напряжение равно нулю ввиду симметрии поля деформаций.

Если через  $u$  обозначить радиальное перемещение срединной поверхности, то компоненты деформаций  $\epsilon_r$  и  $\epsilon_\theta$  будут равны

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \epsilon_\theta = \frac{u}{r}. \quad (3)$$

В соответствии с [5] перемещение в радиальном направлении определяется из выражения

$$u = (1 + \nu) \frac{1}{b} \int_a^b (\alpha T + \beta W) r dr + C_1 r + \frac{C_2}{b}. \quad (4)$$

При решении задачи учтены следующие граничные условия:

- на внутренней и наружной поверхностях стенки радиальное напряжение равно нулю;
- на границе двух элементарных слоев относительные деформации в радиальном и тангенциальном направлениях равны между собой.

Для представленной формулами (1)-(4) модели был разработан вычислительный алгоритм, реализованный в компьютерной программе на языке программирования DELPHI 5.

#### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В вычислительном эксперименте рассматривается цилиндрическая стенка, имеющая толщину 4 см и внутренний радиус 10 м, выполненная из цементно-песчаного раствора. При этом данная стенка разбивалась на 11 элементарных слоев. Исходные данные для расчета влажностных полей взяты из работы [6].

Для построения полей напряжений необходимы данные о значениях модуля упругости  $E$ , коэффициентов линейного температурного расширения  $\alpha$  и усадки  $\beta$  материала стенки. Принимаем, что рассматриваемый материал имеет начальный модуль упругости  $E=27$  ГПа, коэффициент линейного температурного расширения  $\alpha=14 \times 10^{-6}$  (1/град), коэффициент усадки  $\beta=3 \times 10^{-2}$  (мм/мм)/(г/г). Принятые значения  $\alpha$  и  $\beta$  под-

тверждаются данными работ [1, 2]. Полагаем, что материал имеет неограниченный предел прочности при растяжении, а прочность при сжатии задана диаграммой, показанной на рисунке 1.

Длительность изотермической сушки составляла 12 часов. Температура окружающей воздушной среды равна 21°C, при относительной влажности воздуха  $\phi=55\%$ . Исходное влаго-содержание материала принимаем постоянным по толщине стенки. Нами выполнено два вычислительных эксперимента. В одном из них исходный уровень увлажнения соответствовал величине водопоглощения и равнялся 8,4%. В другом случае этот уровень был определен по изотерме десорбции при относительной влажности воздуха  $\phi=80\%$  и равнялся 5,7%. Результаты выполненного эксперимента показаны на рисунках 2-5.

При анализе рисунка 2 выяснилось, что в первом эксперименте за рассматриваемый период сушки на открытой поверхности стенки значение влагосодержания практически снизилось до уровня значения максимального сорбционного увлажнения, которое по изотерме десорбции равнялось 6,5%. Следовательно, перенос влаги в стенке протекал преимущественно в жидкой фазе, и при расчетах учитывался только коэффициент влагопереноса. Во втором эксперименте (см. рис. 4) за тот же период значение влагосодержания на наружной поверхности приблизилось к равновесной, значение которой по изотерме десорбции при  $\phi=55\%$  составляло 2,8%. При этом перенос влаги от внутренних слоев стенки к наружным осуществлялся в виде пара и сорбционных пленок и в расчете использовался коэффициент паропроницаемости.

Как следует из рисунков 3 и 5, в процессе сушки стенки во всех увлажненных внутренних слоях возникают сжимающие тангенциальные напряжения, а в наружных слоях имеют место растягивающие напряжения, достигающие максимальных значений на наружной поверхности. В обоих случаях, отличающихся начальным уровнем увлажнения и механизмом переноса влаги, растягивающие напряжения на открытой поверхности стенки значительно превышают предельно допустимые, которые для рассматриваемого материала находятся на уровне примерно 1.6 МПа. При таком уровне напряжений на поверхности реальных конструкций появляются микро- и макро трещины.

Расчеты показали, что в процессе сушки в стенке возникают только сжимающие радиальные напряжения, значения которых на несколько порядков меньше тангенциальных, поэтому в данной работе они не рассматриваются.

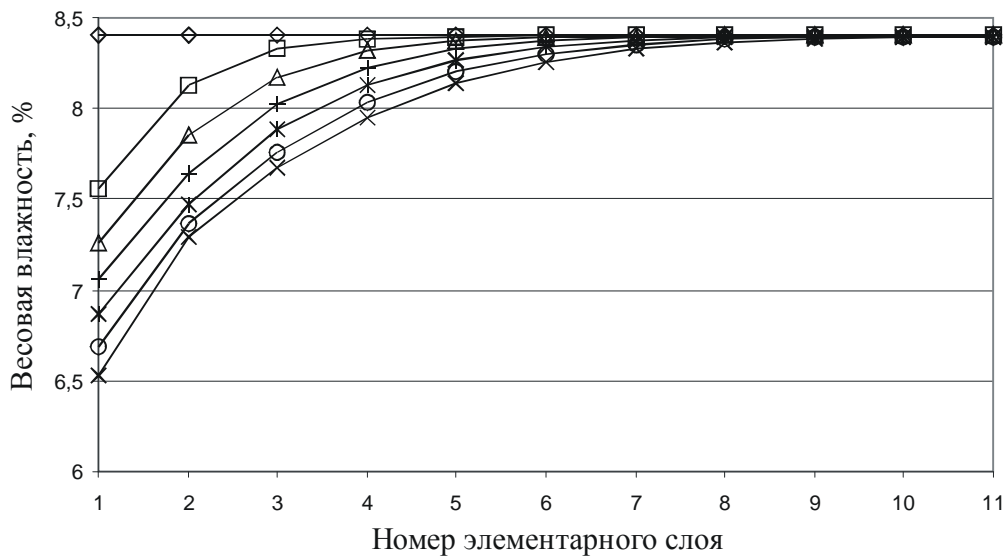


Рис. 2. Влагосодержание элементарных слоев стенки при исходной весовой влажности 8,4%: в начальный момент времени —◇—, после 2 —□—, после 4 —△—, после 6 —+—, после 8 —ж—, после 10 —○—, после 12 —×— часов сушки.

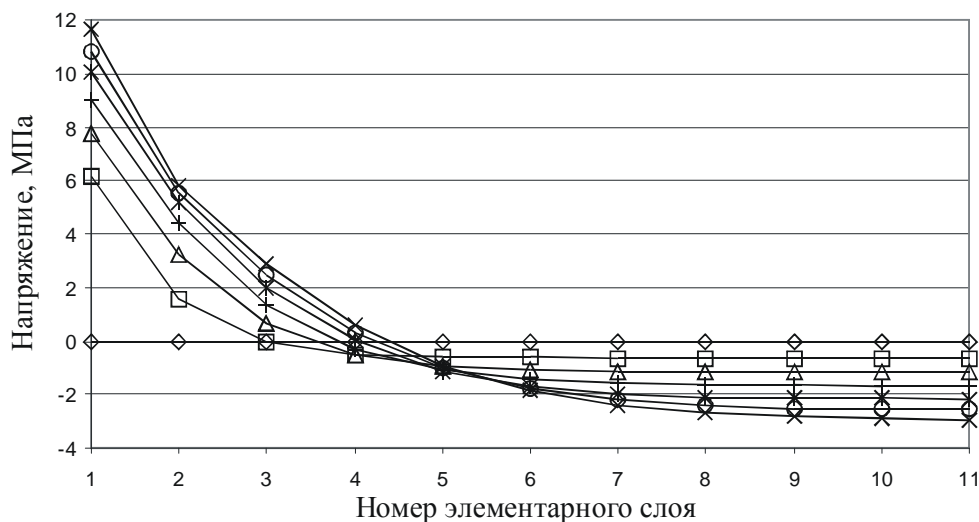


Рис. 3. Тангенциальное напряжение элементарных слоев стенки при исходной весовой влажности 8,4%: в начальный момент времени —◇—, после 2 —□—, после 4 —△—, после 6 —+—, после 8 —ж—, после 10 —○—, после 12 —×— часов сушки.

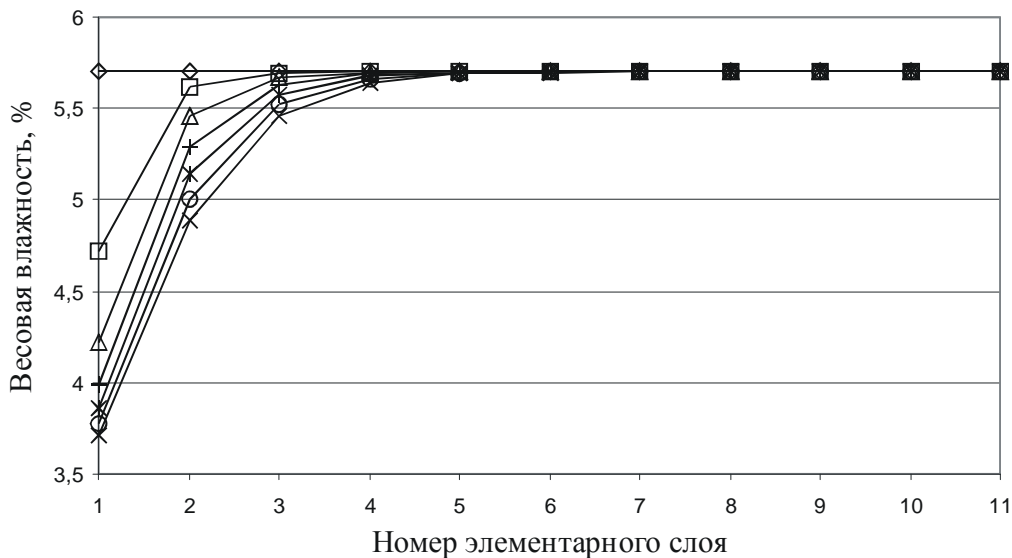


Рис. 4. Влагосодержание элементарных слоев стенки при исходной весовой влажности 5,7%: в начальный момент времени —◇—, после 2 —□—, после 4 —△—, после 6 —+—, после 8 —ж—, после 10 —○—, после 12 —×— часов сушки.

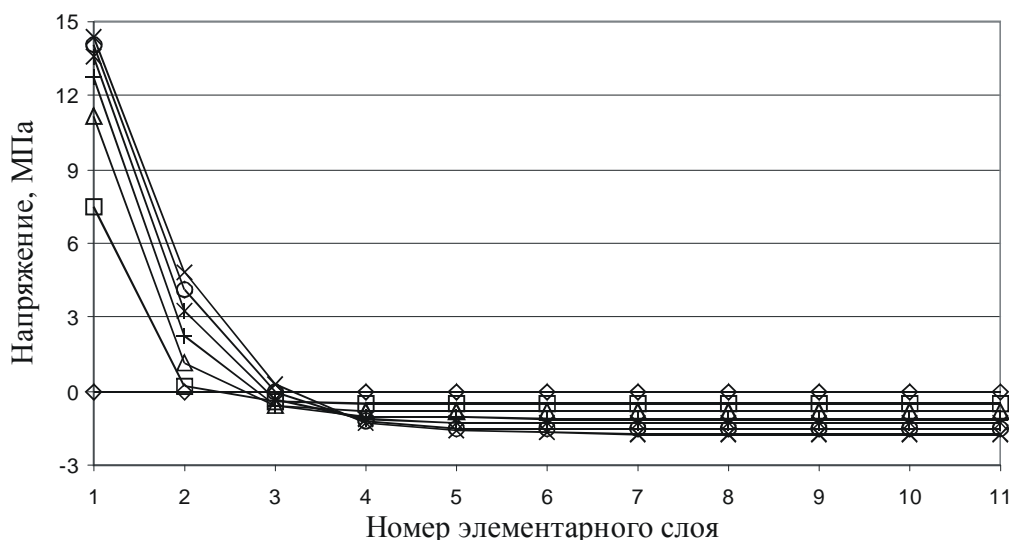


Рис. 5. Тангенциальное напряжение элементарных слоев стенки при исходной весовой влажности 5,7%: в начальный момент времени —  $\diamond$ —, после 2 —  $\square$ —, после 4 —  $\Delta$ —, после 6 —  $+$ —, после 8 —  $\text{ж}$ —, после 10 —  $\circ$ —, после 12 —  $\times$ — часов сушки.

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-