

Разработаны эффективные вычислительные процедуры для расчета распределения размера сечений в плоском срезе системы по заданному (объемному) гранулометрическому составу дисперсных частиц и, наоборот, объемного распределения – по известному «плоскому». Исходные данные могут задаваться как в аналитической форме, так и в виде статистических эмпирических результатов – гистограмм и полигонов частот.

Достоверность установленных закономерностей и корректность вычислительных процедур подтверждена на примере цементных паст с известными эмпирическими характеристиками, заимствованными из надежных источников.

Предложенная методика может непосредственно использоваться для определения (восстановления) объемных структурно-топологических характеристик различных дисперсных систем на основе данных, получаемых методами растровой электронной или оптической микроскопии плоских шлифов твердотельных образцов дисперсной системы.

УДК 539.319

**Кофанов В.А., Никитин В.И.**

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДВУХСЛОЙНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ГОРОДА БРЕСТА

### ВВЕДЕНИЕ

Очень часто наружные стены зданий выполнены с использованием цементосодержащих защитно-отделочных покрытий. В результате сложного взаимодействия этих покрытий с окружающей средой и материалом защищаемой конструкции они довольно быстро теряют способность выполнять свои функции и разрушаются с наружной поверхности или отслаиваются по ослабленным зонам.

Считается [1, 2 и др.], что для обеспечения длительной совместной работы стыкуемых материалов конструкции в заданных условиях эксплуатации они должны быть близкими по своим свойствам. Однако при этом достаточно сложно ответить на вопрос о том, в какой мере и какие свойства соединяемых материалов должны совпадать.

Деградация капиллярно-пористых материалов ограждающих конструкций тесно связана с их температурно-влажностным и напряженно деформированным состояниями, которые формируются в толще конструкции при нестационарных процессах переноса тепла и влаги. Поэтому долговечность совместной работы соединяемых материалов слоистой конструкции при заданных условиях эксплуатации, в основном, будут определяться соотношением показателей, отражающих их теплотехнические, физико-механические и капиллярные свойства, а также толщиной слоев.

В данной работе расчетным путем с помощью разработанных нами моделей [3, 4], выполнена оценка влияния отмеченных факторов на температурно-влажностное и напряженно-деформированное состояние выбранной двухслойной ограждающей конструкции, эксплуатируемой в климатических условиях г. Бреста. В указанные модели были введены дополнительные зависимости, учитывающие влияние атмосферных осадков.

### ОСОБЕННОСТИ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

Для учета влияния атмосферных осадков на влагосодержание материалов ограждающих конструкций необходимо располагать данными о количестве жидкой влаги, попадающей на поверхность ограждения во время дождя. Количество жидкой влаги, попадающей на эту поверхность, зависит от

Результаты настоящего исследования, кроме того, имеют важнейшее значение для обеспечения адекватности двухмерных представлений при имитационном моделировании кинетики физико-химических и структурных превращений в сложных объектах с неупорядоченной топологией, в том числе – в дисперсных системах и композитных материалах.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Н.Б. Урьев. Структурированные дисперсные системы // Социологический образовательный журнал. - 1998, № 6. - С. 42-47.
2. Bentz D.P. Three-dimension computer-simulation of Portland-cement hydration and microstructure development // Journal of the American Ceramic Society. - 1997, Vol. 80, No 1. - P. 5-21.
3. Scrivener K.L. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification // Cement & Concrete Composites. - 2004, Vol. 26. - P.935-945.

интенсивности дождевого потока на эту поверхность, который в свою очередь зависит от различных факторов, среди которых следует отметить скорость ветра и положение поверхности ограждения относительно поверхности земли.

Интенсивность дождевого потока на вертикальную поверхность материала  $g_{wv}$  будем определять по формуле:

$$g_{wv} = K \cdot g_{wh}, \quad (1)$$

где  $g_{wh}$  – интенсивность дождевого потока на горизонтальную поверхность материала,  $кг/(м^2 \cdot с)$ ;

$K$  – переходной коэффициент, учитывающий соотношение между  $g_{wv}$  и  $g_{wh}$  и принимающий значение от 0 до 1. По данным работы [5] значение этого коэффициента для г. Бреста равно 0,6.

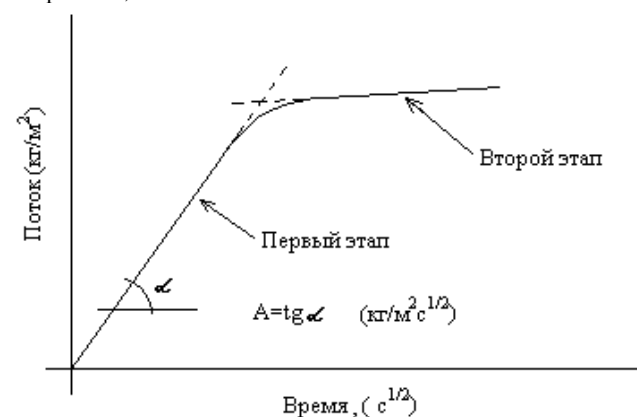


Рис. 1. Зависимость потока воды при одномерном капиллярном впитывании от корня квадратного из времени.

Количество жидкой влаги, поглощаемой через наружную поверхность, определяется с использованием коэффициента сорбции воды  $A$   $кг/(м^2 \cdot с^{0.5})$  [6], который вычисляется по экспериментальным данным одномерного капиллярного впитывания воды сухими образцами материала. Типичное графическое

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

**Никитин Вадим Иванович**, доктор технических наук, профессор Политехники Белостокской (Республика Польша) и Брестского государственного технического университета.

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

Строительство и архитектура

Таблица 1. Свойства материалов конструкции

Показатель	Размерность	Цементно-известковый раствор	Ячеистый бетон
Теплопроводность	Вт/(м·°С)	0,8+0,064·W	0,14+0,0042·W
Теплоемкость	кДж/(кг·°С)	0,85+0,042·W	0,85+0,042·W
Коэффициент сорбции воды	кг/(м <sup>2</sup> ·с <sup>0,5</sup> )	0,03	0,1
Коэффициент паропроницаемости	г/(м·ч·Па)	0,9·10 <sup>-4</sup>	1,7·10 <sup>-4</sup>
Начальный модуль упругости	ГПа	20	2,1
Коэффициент линейного температурного расширения	(1/град)	12·10 <sup>-6</sup>	8·10 <sup>-6</sup>
Коэффициент усадки	(1/%)	0,6·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>

Примечание: W – массовое отношение влаги, %.

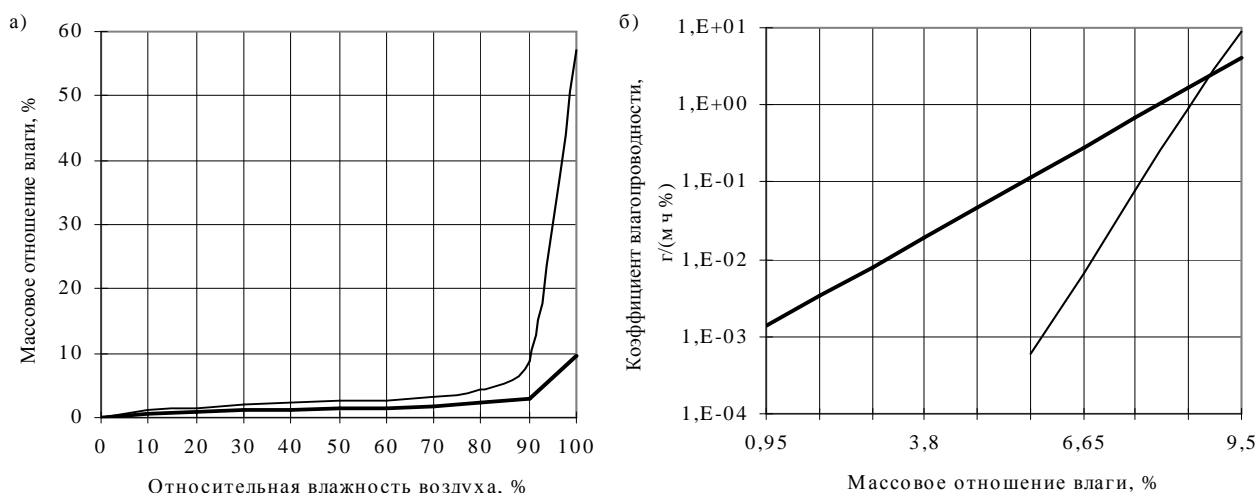


Рис. 2. Изотерма сорбции (а) и зависимость коэффициента влагопроводности от влагосодержания (б) цементно-известкового раствора (—) и ячеистого бетона (---).

представление результатов таких опытов показано на рис. 1. Из рисунка видно, что процесс влагопоглощения можно разбить на два этапа. На первом этапе происходит довольно быстрый процесс капиллярного впитывания, продолжительность которого зависит от высоты образца и может длиться от десятков секунд до нескольких часов и даже суток. Второй этап происходит очень медленно и связан с растворением воздуха из пор, которые не участвовали в процессе капиллярного впитывания, в воде.

Текущее содержание влаги  $W(t)$  в наружном расчетном слое отслеживалось с учетом интенсивности дождевого потока  $g_{wv}$ , коэффициента сорбции воды  $A$  и коэффициента влагопроводности  $\beta$ .

Максимально возможный прирост влагосодержания в поверхностном слое  $\Delta W$ , имеющим некоторое массовое отношение влаги  $W$ , за промежуток времени  $\Delta\tau$  можно определить по формуле:

$$\Delta W_{max} = \frac{A \cdot 100\%}{d \cdot \rho} \cdot (\sqrt{\tau + \Delta\tau} - \sqrt{\tau}), \quad (2)$$

$$\tau = \left( \frac{W \cdot d \cdot \rho}{A \cdot 100\%} \right)^2, \quad (3)$$

где  $A$  – коэффициент сорбции воды, кг/(м<sup>2</sup>·с<sup>0,5</sup>);

$d$  – толщина элементарного расчетного слоя, контактирующего с дождевой водой м;

$\rho$  – плотность материала поверхностного слоя, кг/м<sup>3</sup>;

$W$  – текущее массовое отношение влаги поверхностного слоя, %;

$\tau$  – время, которому соответствует текущее массовое отношение влаги  $W$ , с;

$\Delta\tau$  – приращение времени впитывания, с.

Если принять, что все капли дождя попавшие на поверхность материала впитываются им, то прирост влагосодержания в поверхностном слое определяется по формуле:

$$\Delta W_g = \frac{g_{wv} \cdot \Delta\tau \cdot 100\%}{d \cdot \rho}. \quad (4)$$

Фактический прирост влагосодержания определяется наименьшим значением из двух  $\Delta W_{max}$  и  $\Delta W_g$ . При этом должно выполняться соотношение:

$$W + \Delta W_{max} \leq W_f \quad \text{если} \quad \Delta W_{max} < \Delta W_g; \quad (5)$$

$$W + \Delta W_g \leq W_f \quad \text{если} \quad \Delta W_g < \Delta W_{max},$$

где  $W_f$  – влагосодержание материала в состоянии насыщения.

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

В качестве примера рассматривалась конструкция, состоящая из двух материалов: цементно-известковый раствор – наружный слой и ячеистый бетон – внутренний слой. Необходимые для выполнения расчетов значения свойств этих материалов, полученные путем обобщения данных работ [7, 8, 9, 10, 11, 12], представлены в таблице 1.

Используемые изотермы сорбции представлены на рис. 2а. Зависимость коэффициента влагопроводности  $\beta$  от влагосодержания представлена на рис. 2б.

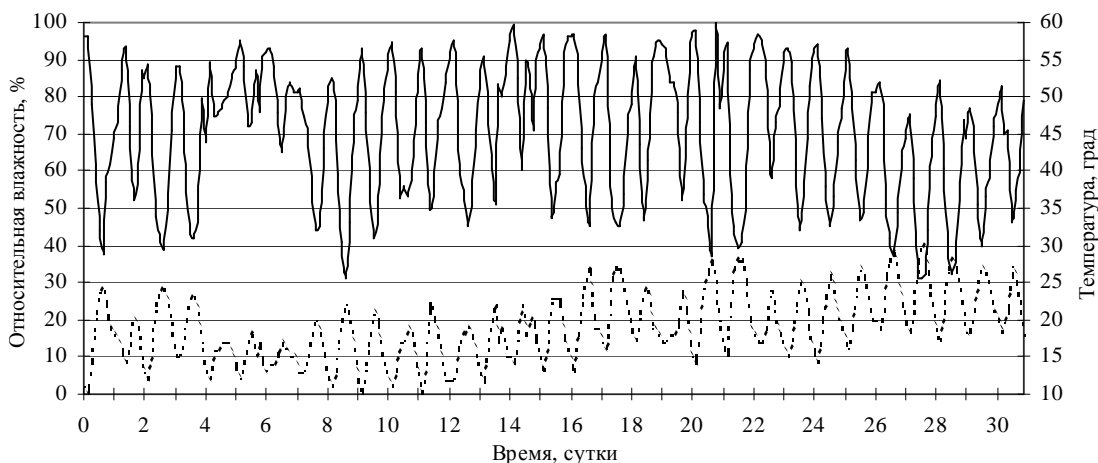


Рис. 3. Изменение (—) относительной влажности и (-----) температуры воздуха за июль месяц

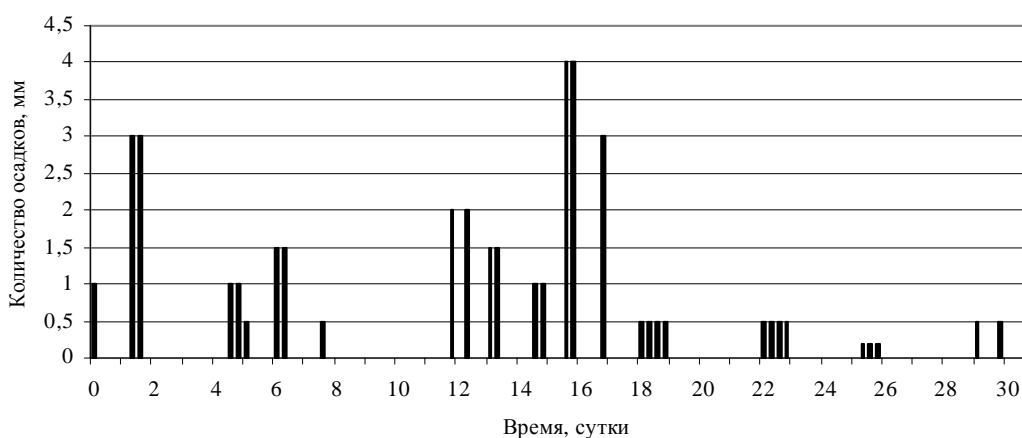


Рис. 4. Изменение количества осадков за июль месяц.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  и сопротивление паропрооницанию  $R_{п}$  по данным работ [10, 13] на наружной поверхности ограждения соответственно равны  $\alpha_{н}=23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  и  $R_{пн}=13,3 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{г}$ , а на внутренней –  $\alpha_{в}=8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  и  $R_{пв}=26,6 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{г}$ .

Опираясь на результаты работы [14], в качестве расчетного периода был выбран июль месяц. В течение этого месяца наружная поверхность стенки находилась под воздействием внешней среды, характеризуемой тремя параметрами (относительная влажность и температура воздуха, а также количество осадков), изменение которых во времени показано на рис. 3 и 4. Такие условия погоды наблюдаются в городе Бресте в июле месяце с обеспеченностью 80% [5].

Начальная температура всех материалов конструкции задавалась равной  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , а начальное массовое отношение влаги соответствовало относительной влажности воздуха  $\varphi=80\%$  по изотерме сорбции. Температура и относительная влажность воздуха на внутренней поверхности на протяжении всего месяца принимались постоянными и равными:  $t_{в}=20^\circ\text{C}$ ,  $\varphi=70\%$ .

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для сравнительной оценки влияния дождевых осадков была учтена ситуация характерная для второй декады июля (рис. 3). При этом рассматривалась однослойная конструкция из ячеистого бетона. Результаты расчета, показывающие изменения влагосодержания и тангенциальных напряжений в наружном слое этой конструкции с учетом и без учета дождя, показаны на

рис. 5 и 6. Как видно из рис. 5, во время дождя наружная поверхность стенки значительно увлажняется, что приводит к увеличению сжимающих тангенциальных напряжений, показанных на рис. 6. Так на седьмые сутки влагосодержание в наружном слое увеличилось до 23% массового отношения влаги и тангенциальные сжимающие напряжения достигли  $0,8 \text{ МПа}$ , что составляет половину величины предельно допустимых сжимающих напряжений  $R_{б}=1,6 \text{ МПа}$  [15]. В случае увеличения интенсивности и продолжительности дождя тангенциальные сжимающие напряжения могут достигнуть предельных напряжений. Следовательно, при расчетах температурных, влажностных и напряженно-деформационных полей необходимо учитывать осадки в виде дождя.

При использовании защитно-отделочного слоя основную долю дождевой влаги на поверхности конструкции впитывает этот слой, в котором будут иметь место значительные значения влагосодержания и напряжений (рис. 7 и 8). Поэтому отделочный слой быстро растрескивается с поверхности. Расчеты показали, что за июль месяц трещины могут распространиться на  $1 \text{ см}$  слоя толщиной  $2 \text{ см}$ . Влагосодержание защищенного ячеистого бетона уменьшится, что и видно при сопоставлении рис. 5 и 7.

Очевидно, что для увеличения срока службы слоя отделки целесообразно в первую очередь уменьшить модуль упругости материала, коэффициент сорбции воды за счет гидрофобизации и сопротивление паропрооницанию. Эффективность этих мероприятий подтверждается выполненными расчетами и данными работы [1], в которой отмечается, что отделка, выполненная из цементно-песчаного раствора, уступает по долговечности отделке декоративного поризованного раствора.

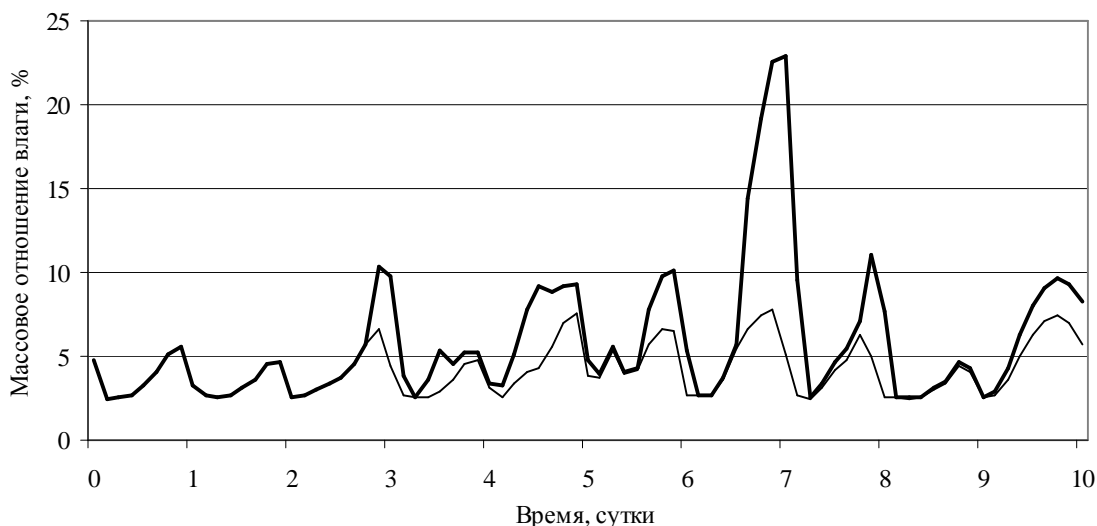


Рис. 5. Изменение весовой влажности в наружном слое ячеистого бетона на протяжении десяти июльских дней (—) с учетом и (---) без учета дождя.

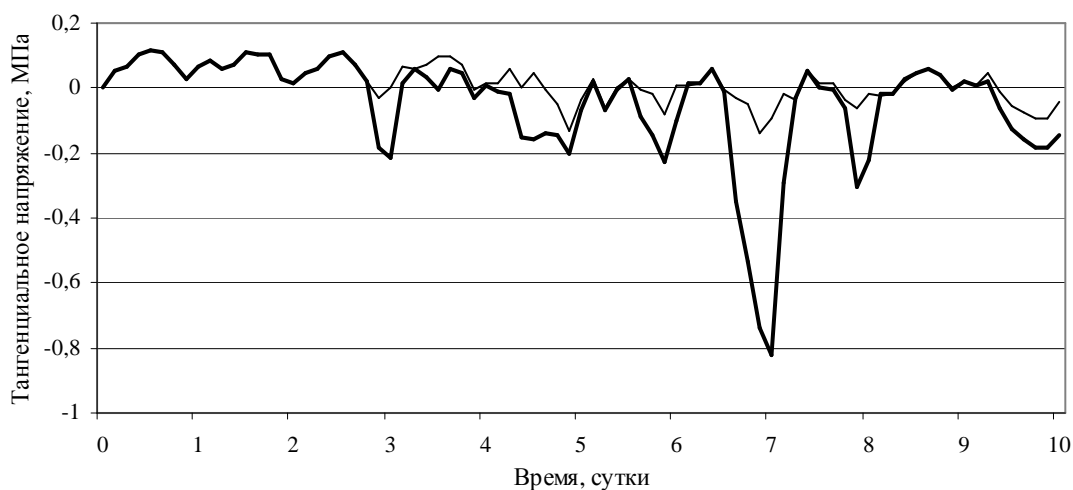


Рис. 6. Изменение тангенциальных напряжений в наружном слое ячеистого бетона на протяжении десяти июльских дней (—) с учетом и (---) без учета дождя.

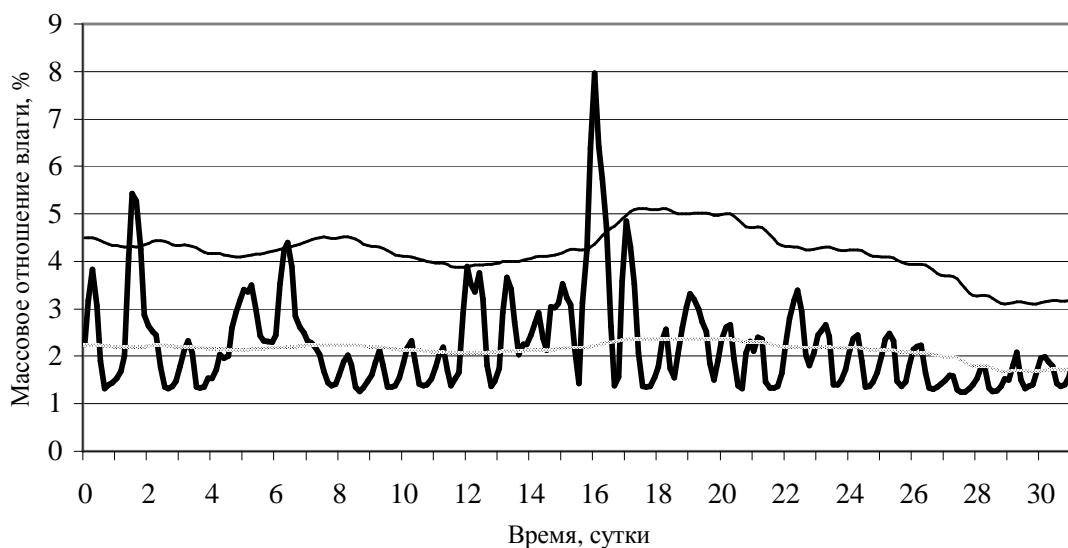


Рис. 7. Изменение весовой влажности (—) в наружном и (·····) внутреннем слое цементно-известкового раствора толщиной 2 см, а также (---) в приграничном слое ячеистого бетона на стыке двух материалов на протяжении июля месяца.

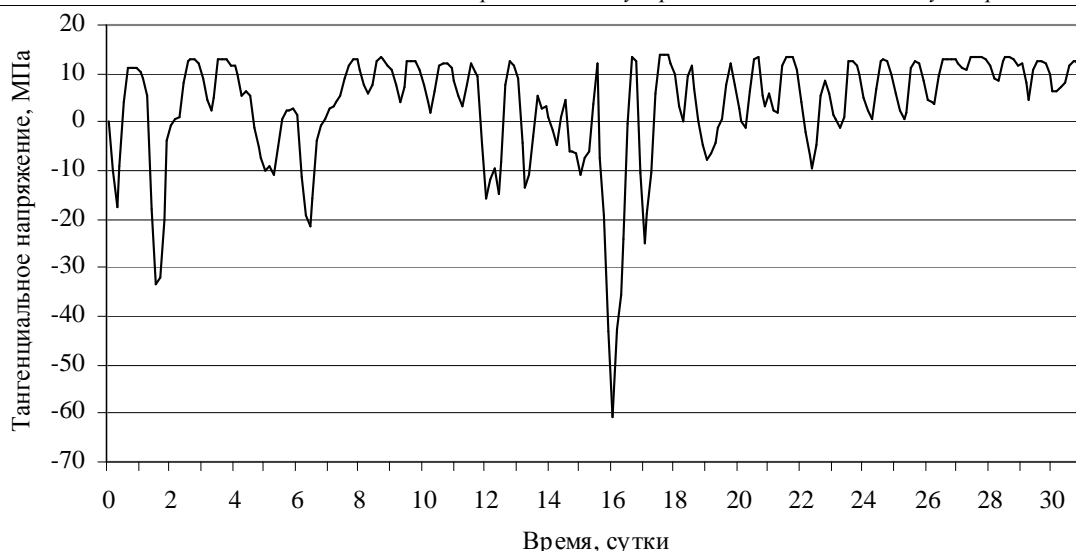


Рис. 8. Изменение тангенциальных напряжений в наружном слое цементно-песчаного раствора на протяжении июля месяца.

Были выполнены расчеты при толщине отделочного слоя 1 см, 2 см и 4 см. Оказалось, что с увеличением толщины отделочного слоя на стыке материалов значение напряжений и их амплитуда уменьшаются. Следовательно, с увеличением толщины слоя покрытия адгезионная прочность будет сохраняться более длительное время, что подтверждается экспериментальной оценкой, приведенной в работе [16].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вычислительный эксперимент показал, что разработанную математическую модель можно использовать при выполнении вариантных расчетов, связанных с выбором эффективных защитно-отделочных покрытий при проектировании новых и проведении ремонтных работ.

#### СПИСОК ИСПОЛЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Макарова Н.А. Сравнительная оценка стойкости фактурных отделок в районах с суровым климатом // Совершенствование технологии изготовления конструкции методом строительства транспортных зданий: Сб. научн. тр. ЦНИИС. – М., 1984. – С. 28-40.
- Таратуга В.Д. Долговечность каменных конструкций памятников архитектуры в послереставрационный период. автореф. дис... канд. техн. наук. – М., 1984. – С. 24.
- 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.
- Кофанов В.А., Никитин В.И. Поля влагосодержания и напряжений в увлажненной цилиндрической стенке при изотермической сушке // Вестник БГТУ. – 2004. – №1(25): Строительство и архитектура. – С. 122-125.
- Климат Бреста / под ред. Ц.А. Швер, И.А. Савиковского. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – С. 159.
- Jans M. Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels. Report TVBM – 3076, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology (in Swedish), 1997, p. 73.
- Künzel H.M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters // IRB Verlag Stuttgart, – 1995. – 66 s.
- Salonvaara M., Karagiozis A, Holm A. Stochastic building envelope modeling – the influence of material properties.
- Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М.: Стройиздат. – 1973. – 287 с.
- СНБ 2.04.01-97. Строительная теплотехника. – Мн.: Минстройархитектуры РБ, 1998. – С. 32.
- Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ. /Под ред. Г.С. Шапиро. – 2-е изд. – М.: Наука. 1979, С. 560.
- Опекунов В.В. Конструкционно-изоляционные бетоны. – Киев: "Академперіодика", 2002. – С. 270.
- Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий / НИИСФ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1984. – С. 168.
- Кофанов В.А., Никитин В.И. Влияние теплотехнических параметров на поля температуры, влажности и напряжений в материале ограждающей конструкции // Вестник БГТУ. – 2004. – №2(26): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология.
- Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов (к СНиП 2.03.01- 84). Нормы проектирования. – М.: Стройиздат, 1984.
- Никитин В.И., Таратуга В.Д. Оценка долговечности отделочных слоев при реставрации каменных памятников архитектуры // Работоспособность композиционных строительных материалов в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов: Меж. –вуз. сб. КХТИ. – Казань, 1985. – С. 38-40.

УДК 624.012.4

**Малиновский В.Н.**

## К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ОПОРНЫХ УЗЛОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФЕРМ В СООТВЕТСТВИИ С СНБ 5.03.01-02

Обследованием несущих конструкций спортивных залов школ, возведенных по типовому проекту №222-1-475.86, раз-

работанному п/и «Белпромпроект», зафиксировано наличие трещин в опорных узлах ферм серии 1.463-3, вып. IX. При

*Малиновский Василий Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.*

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

*Строительство и архитектура*