

$$f_p = \frac{c}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{R}{W}}, \text{ Гц} \quad (1)$$

где  $R$  - проводимость горла отверстия

$$R = \frac{S}{l_{\text{отв}} + 0.8 \cdot d}, \text{ м} \quad (2)$$

где  $S$  - площадь сечения горла,  $\text{м}^2$

$l_{\text{отв}}$  - длина горла (диаметр теплообменных трубок), м

$$S = \sum_{i=1}^n (a \cdot l), \text{ м}^2 \quad (3)$$

где  $a$  - расстояние между теплообменными трубками, м

$l$  - длина теплообменных трубок, м

$n$  - количество теплообменных трубок, шт.

$d$  - диаметр горла (это эквивалентный диаметр суммы щелей), м

Резонансную частоту с другой стороны можно определить по формуле:

$$f = \frac{c_3}{\mu}, \text{ Гц} \quad (4)$$

где  $c_3$  - скорость звука, м/с

$\mu$  - длина волны, м, определяемая как:

$$\mu = 2 \cdot L_{\text{снз}}, \text{ м} \quad (5)$$

где  $L_{\text{снз}}$  - длина канала, м.

После подстановки (4) в (1) и проведения математических преобразований получаем следующее выражение для объема полости кожуха  $W$ :

$$W = \frac{R}{\left(\frac{\pi}{L_{\text{снз}}}\right)^2}, \text{ м}^2 \quad (6)$$

УДК 697.112 : 624.012.4

**Кофанов В.А., Никитин В.И.**

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, ВЛАЖНОСТИ И НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

### ВВЕДЕНИЕ

При проектировании наружных ограждений зданий и сооружений необходимо обеспечивать нормируемый тепловлажностный режим капиллярно-пористых материалов этих конструкций, от которого зависят теплозащитные характеристики конструкций и их долговечность. В настоящее время представление о тепловлажностном состоянии этих материалов можно сформировать расчетным путем на основе использования довольно сложных математических моделей. При расчетах нестационарных температурно-влажностных полей и соответствующих температурно-влажностных напряжений, возникающих в капиллярно-пористых материалах наружных ограждений от воздействий окружающей среды, необходимо знать значения параметров, характеризующих каждый материал в отношении переноса тепла и влаги. К

этим параметрам относятся коэффициент теплопроводности, паропроницаемости, влажностеплопроводности и т.д., которые в первую очередь зависят от вида материала, характеристик его пористости и влагосодержания.

Уровень снижения шума для данного глушителя можно определить по формуле [3]:

$$\Delta L_k = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{(m - m^{-1})^2}{4} \cdot \sin^2(k \cdot l_k) \right], \text{ дБ} \quad (7)$$

где  $m$  - степень расширения, равная отношению площади сечения кожуха к площади сечения горла;

$l_k$  - длина кожуха, м;

$k$  - волновое число,  $\text{м}^{-1}$ .

Ориентировочно при частоте 140 Гц уровень снижения шума для запроектированной конструкции глушителя составит 17.4 дБ.

По уравнению для определения оптимальных геометрических размеров [4] рассчитана горелка при следующих параметрах:  $S_{\text{зг}}^{\text{max}} = 0.018 \text{ м}^2$ ,  $V_{\text{г}}^{\text{max}} = 80 \text{ м}^3/\text{час}$ ,  $K = 170 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$ ,  $V_2 = 10 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Горелка показана на рис. 2.

При содействии Брестских тепловых сетей автором изготовлен вышеописанный водонагреватель, который предполагается использовать в системах теплоснабжения.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пат. 85 №1837, С1/ Водонагреватель/ Северянин В.С. и др./ АБ № 4(1) / государственное патентное ведомство Республики Беларусь -1997.
2. V.S.Severyanin, V.G.Novoseltsev Fire leader with layer pulsing burning for systems of heating// contributed papers of 4 international school-seminar "Modern problems of combustion and its application" Minsk, 2001. - С. 110-112
3. Карпов Ю.В., Дворянцева Л.А. Защита от шума и вибрации на предприятиях химической промышленности. Москва. "Химия", 1991. - 47-48 с.
4. Новосельцев В.Г. Результаты численных экспериментов по исследованию слоевого пульсирующего горения. Вестник БГТУ, № 2, 2003. - С. 36-38.

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

**Никитин Вадим Иванович**, профессор, д.т.н., профессор Политехники Белостоцкой (Польша) и Брестского государственного технического университета.

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

тельных нормах различных стран для одних и тех же материалов рекомендуемые значения коэффициента паропроницаемости могут отличаться в 2-3 и более раз [2]. При такой неопределенности высока вероятность ошибочных технических решений, связанных с проектированием наружных ограждений зданий. Следует отметить, что при оценке полей напряжений добавляется неопределенность, связанная с определением физико-механических свойств материалов.

В представленной работе расчетным путем определены поля влагосодержания и напряжений в стенке, обе поверхности которой контактируют с воздушной средой. Показано, как может повлиять неопределенность, связанная со значением коэффициента паропроницаемости, на нестационарные поля температуры, влажности и напряжений в капиллярно-пористом материале ограждающей конструкции при изменяющихся параметрах воздушной среды. Неуправляемость этих параметров вносит дополнительную неопределенность в получаемые оценки.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

Для определения температурно-влажностных полей в стенке из капиллярно-пористого материала использована разработанная нами математическая модель [3]. 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 стенки, использована математическая модель [4], учитывающая аддитивность температурных и влажностных деформаций.

В вычислительном эксперименте рассматривается стенка, выполненная из монолитного пенобетона плотностью  $600 \text{ кг/м}^3$ . Толщина стенки, исходя из нормативного сопротивления теплопередаче  $2.2 \text{ (м}^2\cdot\text{°C/Вт)}$  [5], принята равной  $40 \text{ см}$ , внутренний радиус которой составляет  $10 \text{ м}$ . По толщине данная стенка разбивалась на  $11$  элементарных слоев.

Для проведения расчетов требуются данные о параметрах, характеризующих состояние окружающей среды, и значения теплофизических свойств материала стенки. Среди параметров, характеризующих воздействие окружающей среды, учитывались только изменения во времени температуры и относительной влажности воздуха. В приведенном вычислительном эксперименте использованы интернетданные гидроцентра для г. Бреста на десятидневных временных отрезках января и июля 2003 г., согласно которым интересующие нас параметры отслеживались через каждые три часа. При реализации вычислительных экспериментов необходимо оперировать непрерывными данными о параметрах окружающей среды. Поэтому дискретные исходные данные об изменении температуры и влажности наружного воздуха за рассматриваемый отрезок времени были аппроксимированы сплайн-функциями. Результаты этой аппроксимации показаны на рисунке 1, из которого видно, что июльские амплитуды суточных колебаний значений температуры и влажности наружного воздуха значительно превышают январские. Температура  $t_e$  и относительная влажность  $\varphi_e$  внутреннего воздуха для январского периода принята в соответствии с нормами [5] для отопительного сезона:  $t_e=18^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_e=55\%$ . В неотапливаемый период эти параметры не нормируются и нами они приняты близкими к средним значениям наружного воздуха за рассматриваемый отрезок времени:  $t_e=20^\circ\text{C}$  и  $\varphi_e=70\%$ .

Важными параметрами, характеризующими взаимодействие между воздухом и поверхностью ограждения, являются коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  и сопротивление паропроницанию  $R_n$ , которые приняты в соответствии с нормами [5] на внешней поверхности стенки  $\alpha_n=23 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$  и  $R_{nn}=13.3 \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па/г}$ , а на внутренней поверхности

$\alpha_e=8.7 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$  и  $R_{ne}=26.6 \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па/г}$ . На основании анализа данных работ [5, 6, 7] необходимые при расчете значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  и удельной теплоемкости  $c$  определялись в зависимости от влагосодержания материала  $\omega$  по формулам:

$$\lambda = 0.14 + 0.01 \cdot \omega \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)},$$

$$c = 0.837 + 0.041 \cdot \omega \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)}.$$

Считалось, что коэффициент паропроницания  $\mu$  не зависит от влагосодержания материала. В соответствии с данными работ [5, 8] исходное значение этого коэффициента принято равным  $\mu=0.00017 \text{ г/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$ .

Изотерма сорбции материала, используемая в расчетах влагопереноса, взята из работы [8]. По этой изотерме сорбции весовая влажность материала  $\omega$  при относительной влажности воздуха  $\varphi$  равной  $80\%$  и  $100\%$  составляет  $4.8\%$  и  $9.7\%$  соответственно. Значения коэффициентов влагопроводности  $\beta(\omega)$  брались также из работы [8]. При изменении влагосодержания материала от  $9.7\%$  до  $25\%$  значение коэффициента  $\beta(\omega)$  возрастает от  $0$  до  $0.0125 \text{ г/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{°)}$ . Следует отметить, что если использовать данными, полученными другими авторами, например [9], то значения коэффициента  $\beta(\omega)$  увеличенными в  $3-4$  раза.

Полагаем, что в начальный момент времени температура и влагосодержание материала по толщине стенки постоянны и равны:

- для январского периода  $t_e=10^\circ\text{C}$  и  $\omega_e=4.8\%$ ;
- для июльского периода  $t_e=20^\circ\text{C}$  и  $\omega_e=4.8\%$ .

Значение влагосодержания материала  $\omega_e=4.8\%$  соответствует относительной влажности воздуха  $\varphi=80\%$  по использованной изотерме сорбции.

Для построения полей напряжений необходимы данные о значениях модуля упругости  $E$ , коэффициентов линейного температурного расширения  $\alpha$  и усадки  $\beta$  материала стенки. В соответствии с данными работ [6, 10] принимаем, что рассматриваемый материал имеет начальный модуль упругости  $E=2.1 \text{ ГПа}$ , коэффициент линейного температурного расширения  $\alpha=8\cdot 10^{-6} \text{ (1/град)}$  и коэффициент усадки  $\beta=2\cdot 10^{-3} \text{ (1/\%)}$ .

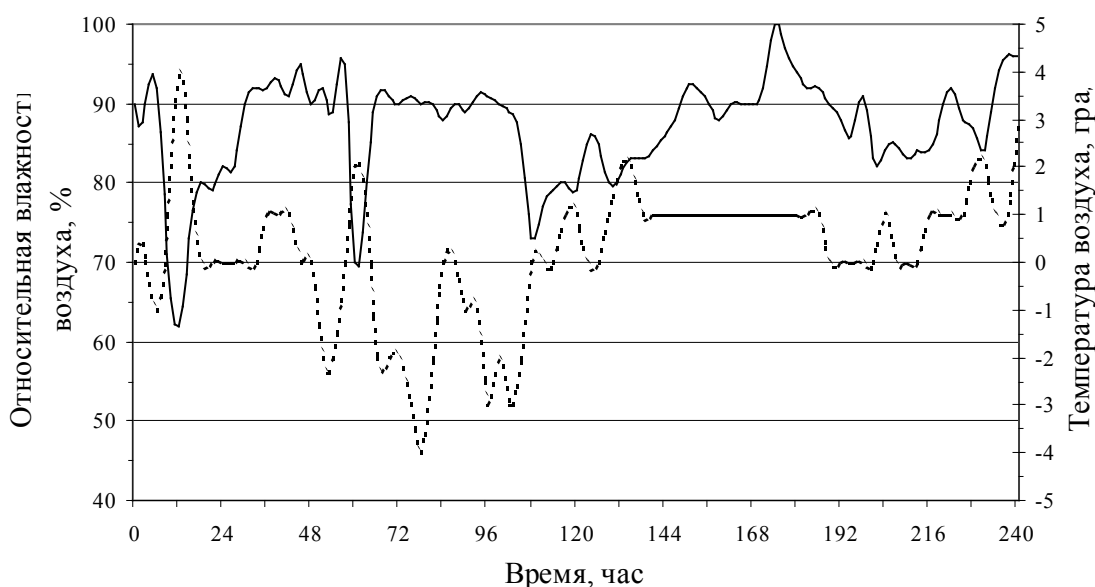
### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты вычислительного эксперимента, отражающие изменения во времени весовой влажности и тангенциальных напряжений в элементарных слоях цилиндрической стенки для десяти январских и июльских дней, показаны на рисунках 2 и 3.

Графическая информация об изменении расчетной температуры в элементарных слоях ограждения не приведена, так как ее характер соответствует представлениям, которые можно получить путем мысленного эксперимента. Так, температура в наружном слое ограждения с разницей не более  $1.5^\circ\text{C}$  воспроизводит температуру наружного воздуха. По мере перехода от наружных слоев ограждения к внутренним амплитуда температурных колебаний затухала и в элементарном слое внутренней поверхности она не превышала  $0.5^\circ\text{C}$ . В зимний период изменение температуры по толщине стенки в любой момент времени можно было описать зависимостью близкой к линейной. В летнее время эта зависимость чаще имела нелинейный характер. Причем днем температурная кривая имела выпуклость вниз, а ночью – вверх.

К сожалению, дать простое и однозначное объяснение ходу кривых, представленных на рисунках 2 и 3, не удалось. Тем не менее, некоторые особенности, выявленные при рассмотрении данных вычислительного экспериментирования, следует отметить.

а)



б)

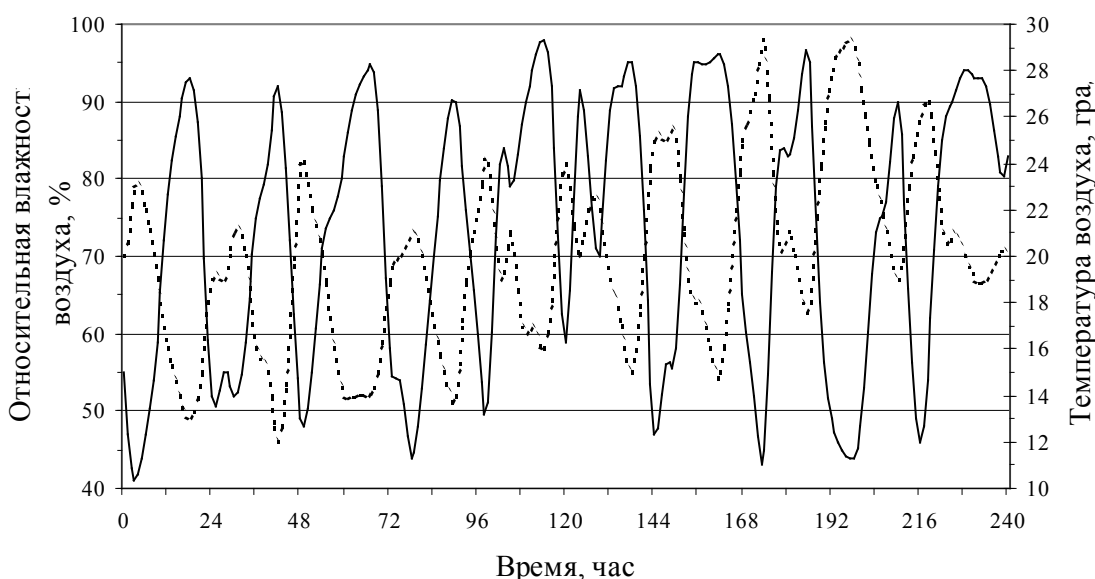


Рис. 1. Изменение ..... температуры и — относительной влажности воздуха в период десяти январских (а) и июльских (б) дней 2003 года.

Из рисунка 2а следует, что за 10 дней января в наружных слоях ограждения влагосодержание повысилось по сравнению с начальным уровнем примерно на 1%, во внутреннем слое оно понизилось и находилось на довольно стабильном уровне. При сопоставлении рисунков 2б и 2а трудно заметить какой либо тесной связи между ходом кривых тангенциальных напряжений и влагосодержания. Тем не менее, при сопоставлении рисунков 1а и 2б можно заметить, что ярко выраженным колебаниям температуры и влажности наружного воздуха соответствуют заметные колебания тангенциальных напряжений с размахом превышающим 0.05 МПа. При этом во внешних слоях ограждения значения тангенциальных растягивающих напряжений могут превышать значения нормативного сопротивления осевому растяжению.

Расчеты показали, что при отрицательных температурах воздушной среды увеличение или уменьшение коэффициента паропроницаемости материала в 3 раза практически не при-

водят к изменению влагосодержания наружного и внутреннего слоя. Однако увеличение коэффициента паропроницаемости материала приводит к снижению влагосодержания во внутренних слоях до 2% весовой влажности.

При выполнении теплотехнических расчетов параметры окружающей воздушной среды обычно принимаются постоянными, значения которых близки средним значениям для рассматриваемого временного отрезка. Среднее арифметическое значение температуры и влажности воздуха за 10 дней января составили:  $t_{cp}=0^{\circ}\text{C}$ ,  $\Phi_{cp}=87\%$ . Сравнение результатов расчетов, выполненных при усредненных и переменных параметрах воздушной среды, показало, что к концу десятидневного январского периода влагосодержание слоев ограждения практически совпало (только для наружного слоя разница достигала 0.3%). В данном случае усреднение параметров внешней воздушной среды с точки зрения оценки влагосодержания материала ограждения оказалось допустимым.

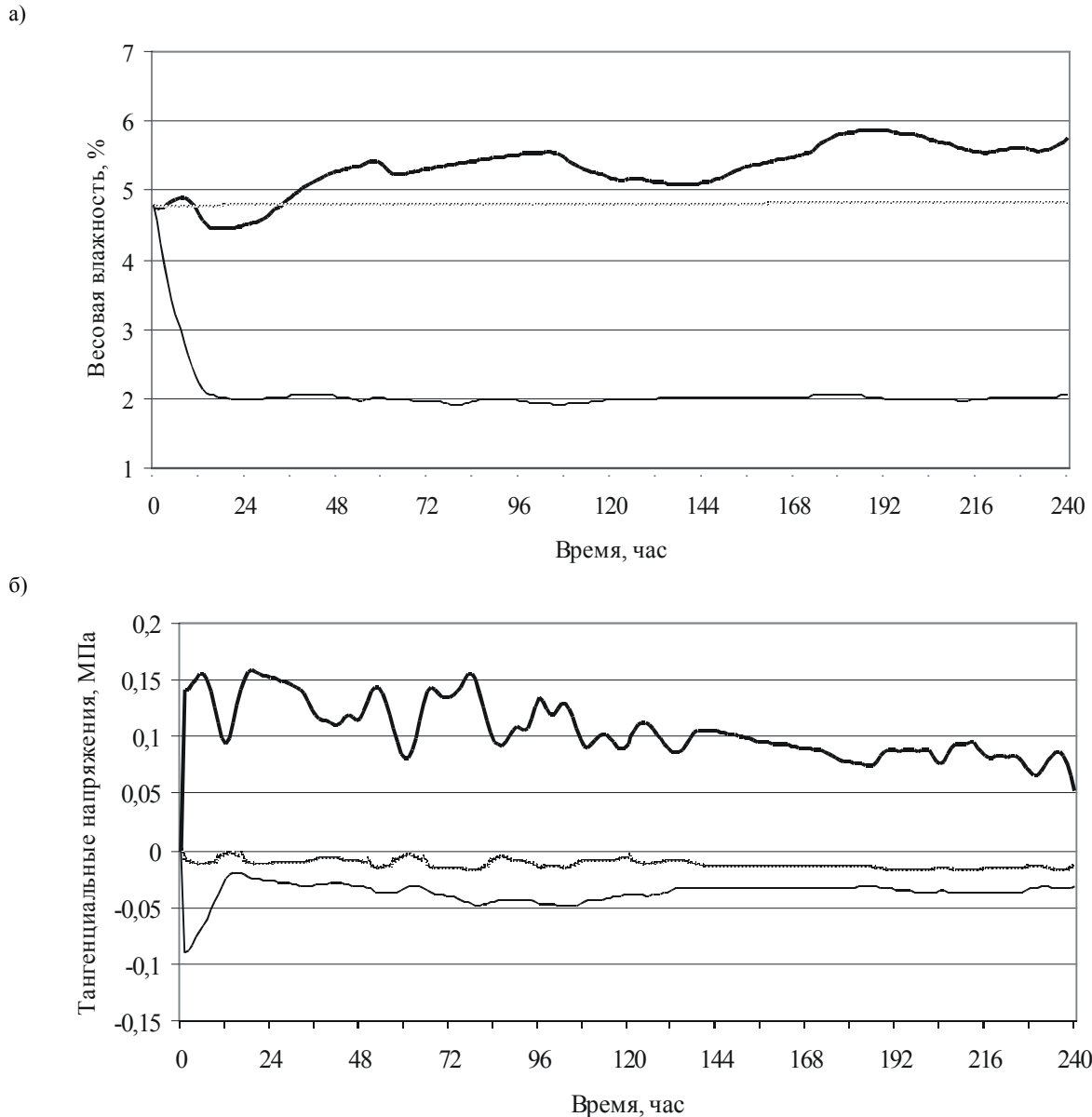


Рис. 2. Изменение влагосодержания (а) и напряжений (б) в период десяти январских дней во ——— внешнем, .....среднем и ——— внутреннем элементарных слоях.

Совместное рассмотрение рисунков 3а и 1б показало, что июльские изменения влагосодержания наружного слоя ограждения тесно связаны с изменениями относительной влажности воздуха. Амплитуда колебаний влагосодержания этого слоя достигла 3%. Просматривается тенденция повышения влагосодержания внутренних слоев ограждения к концу расчетного временного отрезка. Ход кривых тангенциальных напряжений (рисунок 3б) отслеживает ход кривых влагосодержания. При этом во всех слоях ограждения имеют место циклические знакопеременные тангенциальные напряжения. Величина опасных растягивающих напряжений в наружном слое достигает 70-80% от нормативного сопротивления осевому растяжению.

Оценивая влияние значений коэффициента паропроницаемости на влагосодержание материала ограждения, можно отметить, что с увеличением значения этого коэффициента влагосодержания наружных и внутренних слоев может уменьшаться до 1% весовой влажности.

Для рассматриваемых десяти дней июля было найдено среднее значение температуры ( $t_{cp}=20^{\circ}\text{C}$ ) и влажности

( $\Phi_{cp}=75\%$ ) воздуха. При этих условиях на десятый день среднее влагосодержание внутреннего слоя ограждения составило 4%. При переменных параметрах наружного воздуха на десятый день среднее влагосодержание внутреннего слоя ограждения находилось на уровне 5%. Эти результаты ставят под сомнение целесообразность усреднения параметров наружного воздуха при расчетах влажностного состояния материала ограждения. Следует отметить, что усреднение параметров воздушной среды при оценке напряженно-деформированного состояния материалов ограждений не допустимо, так как при этом не отслеживаются циклические изменения этого состояния.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вычислительный эксперимент показал, что неопределенность, связанная со значением коэффициента паропроницаемости и параметрами внешней среды может приводить к существенным погрешностям при оценке полей температуры, влажности и напряжений в материалах ограждающих конструкций.

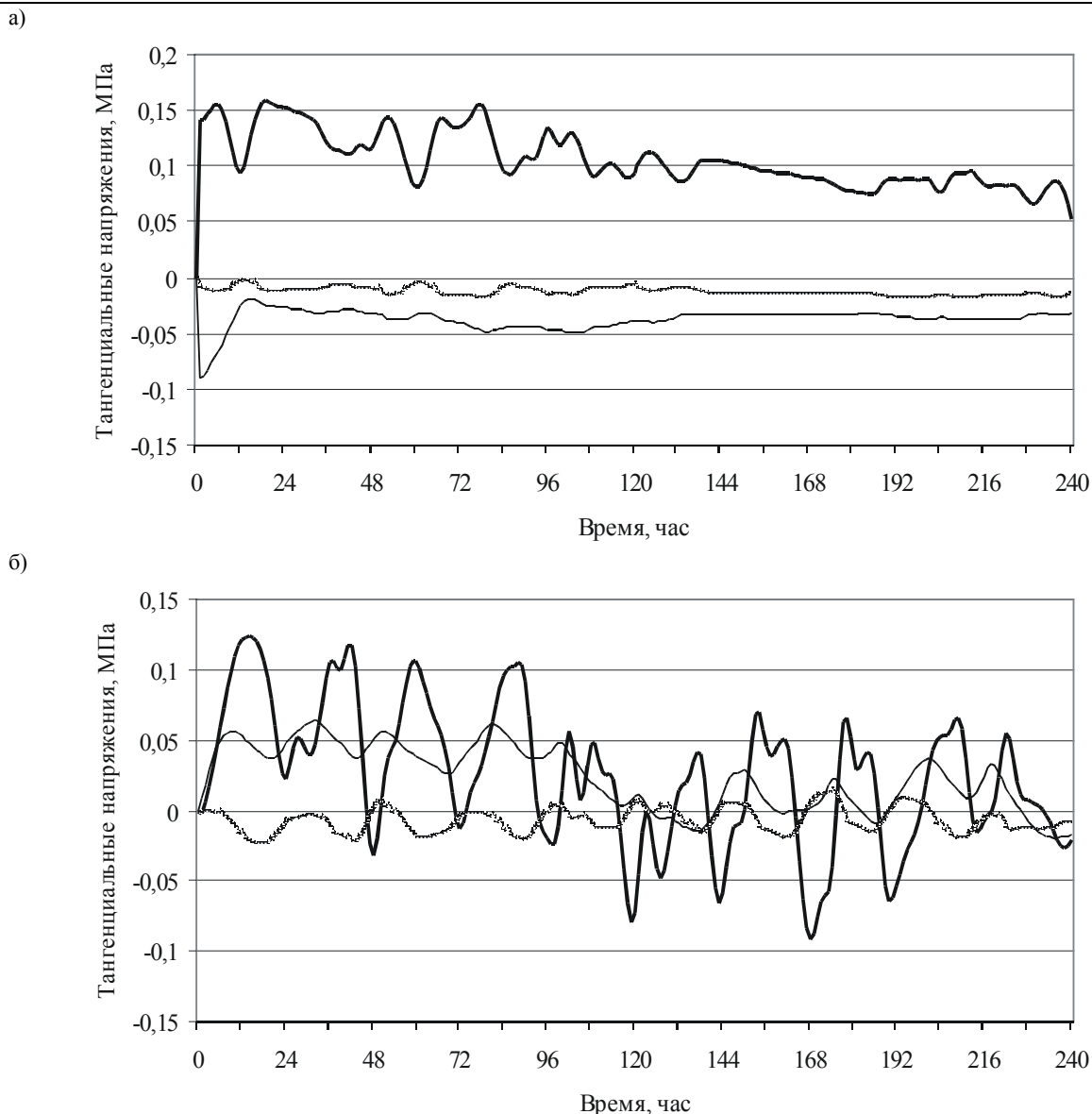


Рис. 3. Изменение влагосодержания (а) и напряжений (б) в период десяти июльских дней во ——— внешнем, ..... среднем и ——— внутреннем элементарных слоях.

Разработанная нами математическая модель позволяет проводить имитационные вычислительные эксперименты, которые создают информационную базу для принятия более обоснованных проектных решений, обеспечивающих необходимые теплозащитные качества и долговечность ограждающих конструкций.

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

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Garbalińska H. Izotermiczne współczynniki transportu wilgoci porowatego materiału budowlanego. Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2002, 262 s.
2. Płoński W. Problem wilgoci w przegrodach budowlanych. Praca ITB №294, Wydawnictwo "Arkady", Warszawa, 1968. – 156 s.
3. 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.
4. Кофанов В.А, Никитин В.И. Поля влагосодержания и напряжений в увлажненной цилиндрической стенке при экзотермической сушке // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2004. – №1.
5. СНБ 2.04.01-97 Строительная теплотехника. Нормы проектирования. – Мн.: Минсктиппроект, 1998. – С. 32
6. Опекунов В.В. Конструктивно-изоляционные бетоны. – Киев: "Академперіодика", 2002. – С. 270.
7. Езерский В.А., Ельчищева Т.Ф. Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности соледержащих стеновых материалов // Современное строительство: Материалы Международной научно-практической конференции/ Под. Ред. А.П. Прошина и Т.И. Барановой. – Пенза, 1998. – С. 67-68.
8. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М.: Стройиздат. –1973. – С. 287.
9. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий / НИИСФ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1984. – С. 168
10. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов (к СНиП 2.03.01- 84). Нормы проектирования. – М.: Стройиздат, 1984.