

УДК 624.012

## **РЕШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

### **THE SOLUTION TEMPERATURE PROBLEMS FOR INHOMOGENEOUS MULTILAYER STRUCTURES**

**Л.В. Гапонова, С.С. Гребенчук (Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н.Бекетова, г. Харьков)**

**L. V. Gaponova, S. S. Grebenschuk (Kharkov National University of Urban Economy named after A. N. Beketov, Kharkov)**

Constructive system "Monofont" can be used in the construction of buildings in the II climatic zone of Ukraine (the calculated ambient air temperature for walling is  $-19^{\circ}\text{C}$ .). In I climatic zones of Ukraine without any additional constructive-technical solution design system "Monofont" with thick walling 260 mm is not recommended. However, they resulted in constructive activities aimed at suppression of "cold bridges", namely the increase in the thickness of the walling and the device expanded polystyrene foam liner in the area of the concrete rib on the outer side of the enclosing structure there is an opportunity to design and construct cost-effective, innovative new quality level.

#### **Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими заданиями.**

Несущие конструкции зданий и сооружений должны отвечать требованиям прочности, жесткости, устойчивости, противопожарной безопасности. Для рассмотрения процессов тепло- и массообмена, происходящих при формировании температурно-влажностного режима помещения, нужно учитывать: требования к характеристикам внутреннего климата и факторы, влияющие на них; законы взаимодействия ограждающих конструкций с внутренними и наружными средами; тепло- и массообменные процессы на обогревающих и охлаждающих поверхностях.

Методы расчетов по предельным состояниям используют для определения прочностных свойств и характеристик строительных конструкций, а предельно допустимые состояния охлаждения и

увлажнения конструкций используются при новых методах технологии возведения зданий, облегчения строительных конструкций и применения новых эффективных материалов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работах [1, 2, 3, 4] исследован характер изменения напряженно-деформированного состояния фрагментов новой конструктивной системы многокритериального соответствия «Монофант», но вопрос изучения поведения конструкции при различных температурных воздействиях является весьма актуальным.

Как известно процесс теплопередачи в плоской ограждающей конструкции смоделирован тремя одномерными дифференциальными уравнениями в частных производных: уравнением теплопроводности, уравнением диффузии водяного пара, уравнением влагопроводности.

Уравнение теплопроводности применяется на всей расчетной области; уравнение диффузии водяного пара – только в сорбционной зоне, т.е. в областях конструкции, где относительная влажность воздуха в капиллярно-поровом пространстве материала не более 100%; уравнение влагопроводности рассчитывается только в сверхсорбционной зоне, т.е. при влажности материала выше предела сорбционного увлажнения. Ибрагимов А.М. [5] для решения задачи в области промерзания ограждающей конструкции получил решение краевой задачи теплопроводности с фиксированными границами и условиями первого рода на этих границах, поместив начало координат на стыке мерзлой зоны и зоны промерзания.

Автор с помощью решения нижеприведенных уравнений (1, 2, 3, 4) смоделировал и описал условия проникновения влаги в ограждающую конструкцию.

$$\begin{aligned}
 T(\bar{x}, F_0) = & \frac{t(\bar{x}, \tau) - t_{\phi}}{t_{нзб} - t_{\phi}} = (1 - \bar{x}) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(\pi n \bar{x}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 F_0) + \\
 & 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\pi n \bar{x}) \exp(-\pi^2 n^2 F_0) \int_0^1 T_o(\xi) \sin(\pi n \xi) d\xi + (1 - \bar{x}) \int_0^{\bar{x}} \xi P_o(\xi) d\xi + \\
 & \bar{x} \int_{\bar{x}}^1 P_o(\xi) (1 - \xi) d\xi - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin(\pi n \bar{x}) \exp(-\pi^2 n^2 F_0) \int_0^1 P_o(\xi) \sin(\pi n \xi) dx.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Если в зоне промерзания лед образуется по всей толщине с одинаковой интенсивностью, т.е. источник льдообразования имеет линейное распределение, решение (4) упрощается и принимает вид:

$$T(\bar{x}, F_0) = -\frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(\pi n \bar{x}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 F_0) + (1 - \bar{x}) + \frac{P_0}{2} \bar{x}(1 - \bar{x}) + \\ + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\pi n \bar{x}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 F_0) \int_0^1 T_0(\xi) \sin(\pi n \xi) d\xi - \\ \frac{4P_0}{\pi^3} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin(\pi n \bar{x}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 F_0)$$
 (2)

Решение краевой задачи в области малых значений чисел Фурье:

$$T(\bar{x}, F_0) = \operatorname{erfc} \frac{\bar{x}}{2\sqrt{F_0}} - \operatorname{erfc} \frac{2-\bar{x}}{2\sqrt{F_0}} \pm \frac{1}{2\sqrt{F_0}} \left\{ \int_0^1 T_0(\xi) \exp\left[-\frac{(\bar{x} \pm \xi)^2}{4F_0}\right] d\xi + \int_0^1 T_0(\xi) \exp\left[-\frac{2-|\bar{x} \pm \xi|^2}{4F_0}\right] d\xi \right\} \pm \\ \pm \sqrt{F_0} \left\{ \int_0^1 P_0(\xi) \cdot \operatorname{ierfc} \left[ -\frac{|\bar{x} \pm \xi|}{2\sqrt{F_0}} \right] d\xi + \int_0^1 P_0(\xi) \cdot \operatorname{ierfc} \left[ -\frac{2-|\bar{x} \pm \xi|}{2F_0} \right] d\xi \right\}$$
 (3)

Окончательное решение краевой задачи для мерзлой зоны в области оригиналов:

$$T(\bar{x}, F_0) = \frac{t(x, \tau) - t_{n3e}}{t_{n3e}} = Ki \left\{ (1 - \bar{x}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\mu_n^2} \sin[\mu_n (1 - \bar{x})] \cdot \exp(-\mu_n^2 F_0) \right\} + \\ + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\mu_n \bar{x}) \cdot \exp(-\mu_n^2 F_0) \int_0^1 T_0(\xi) \cos(\mu_n \xi) d\xi + \int_0^1 P_0^*(\xi) d\xi + \int_0^1 P_0^*(\xi) \Psi(\bar{x}, \xi) d\xi - \\ - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} \cos(\mu_n \bar{x}) \cdot \exp(-\mu_n^2 F_0) \int_0^1 P_0^*(\xi) \cos(\mu_n \xi) d\xi.$$
 (4)

Рассматривая нестационарные процессы, такие как охлаждение строительной конструкции, ее увлажнение введем предельно допустимое состояние процессов, влияющих на особенности эксплуатации конструкций.

Согласно I-d диаграмме при температуре внутреннего воздуха внутри помещения +22°C и относительной влажности 50% точка росы на поверхности конструкции будет возникать при понижении температуры до 11 °C; при относительной влажности воздуха 60% на конструкции возникнет точка росы при уменьшении температуры до 14 °C.

**Формулировка цели статьи.** Многокритериальное соответствие конструкционной системы «Монофант» (рис.1, 2) учитывается не только прочностными характеристиками, но и

усовершенствованием конструкций нового типа за счет облегчения собственного веса, при этом решение температурной задачи для многослойной конструкции является актуальной задачей.

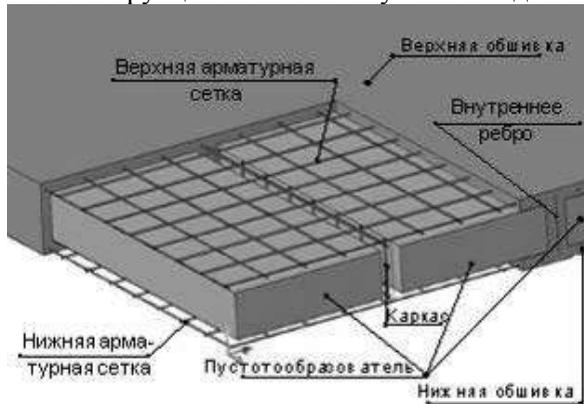


Рис. 1. Рассматриваемая система «Монофонт»

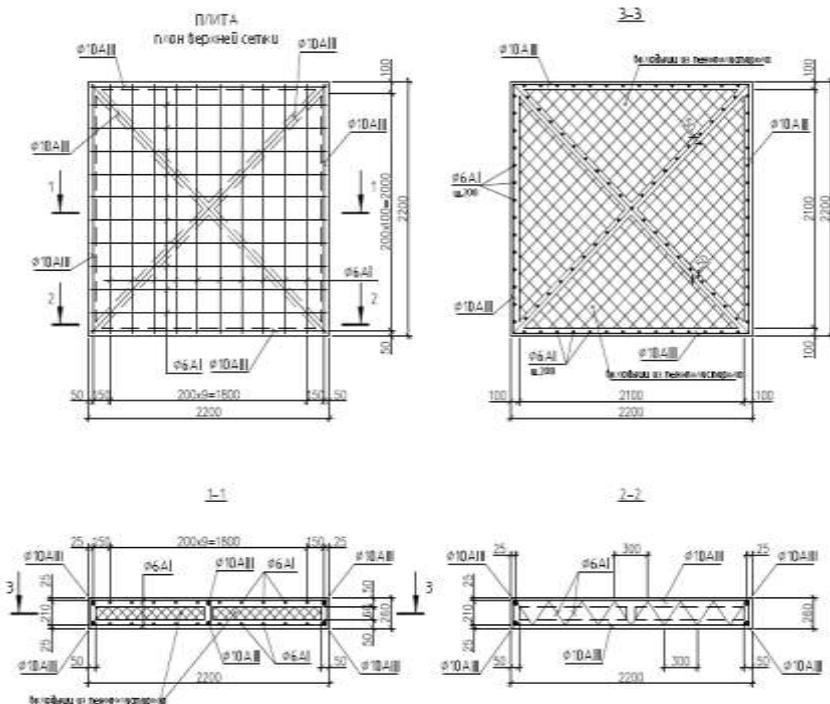


Рис.2. – Модель плиты конструктивной системы «Монофонт»

**Исследования с полным обоснованием полученных научных результатов.** Конструктивная система «Монофант» представляет собой термически неоднородную конструкцию т.е. имеет наличие зон общей площади более 2% от внутренней поверхности конструкции с температурами, отличающимися от температур основного поля более чем на 2 %.

Проведенный анализ численных исследований распределения температурных полей ограждающей конструкции системы «Монофант» показывает, что для I климатического района Украины ( -22 °С), температура на поверхности конструкции составляет 20,3 °С, в бетонном ребре жесткости температура составляет 11 °С – т.е. на поверхности бетонного ребра конструкции будет недопустимый перепад температур, что приведет к неудовлетворительному температурно-влажностному состоянию конструкции.

В работе построена трехмерная конечноэлементная модель конструктивной системы рассматриваемого типа, позволяющая решать температурную задачу в стационарных и нестационарных условиях.

При численном решении задачи принимались следующие исходные данные: коэффициент Пуассона бетона 0,17; коэффициент конвективного теплообмена на внутренней поверхности  $\alpha_{вн}=8,7$  Вт/м<sup>2</sup>°С; на наружной поверхности  $\alpha_{н}=23$  Вт/м<sup>2</sup>°С; на наружной поверхности конструкции задано условие теплоотдачи излучением в окружающую среду в виде коэффициента излучения 0,85. Климатические параметры окружающей среды задавались в соответствии с температурными характеристиками архитектурно-строительных климатических районов Украины. Внутренняя температура задавалась в соответствии с минимальными требованиями к отапливаемым зданиям +18°С; и для неотапливаемых помещений с температурой воздуха +5 °С и ниже.

Согласно ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [6] климатические показатели архитектурно-строительных климатических районов Украины, в том числе температурные, рассмотрены на основе среднемесячной температуры окружающего воздуха в январе и в июле.

При выполнении расчета на торцевых поверхностях моделей задавалось условие нулевой скорости теплового потока.

Коэффициент теплопроводности материалов в рассматриваемой стационарной задаче стационарен и не зависит от времени.

В результате численной реализации стационарной тепловой задачи определены температурные поля, приближенно удовлетворяющие (в узлах сетки на контуре) граничным условиям, неизменяющимся во времени. Так как, теплофизические свойства материалов зависят от температуры – задача рассматривалась как нелинейная.

Модель состоит из 142940 конечных элементов, при этом количество узлов - 439067. Численное решение стационарной температурной задачи, для рассмотренных климатических параметров Украины приведены в виде графика на рис.3.

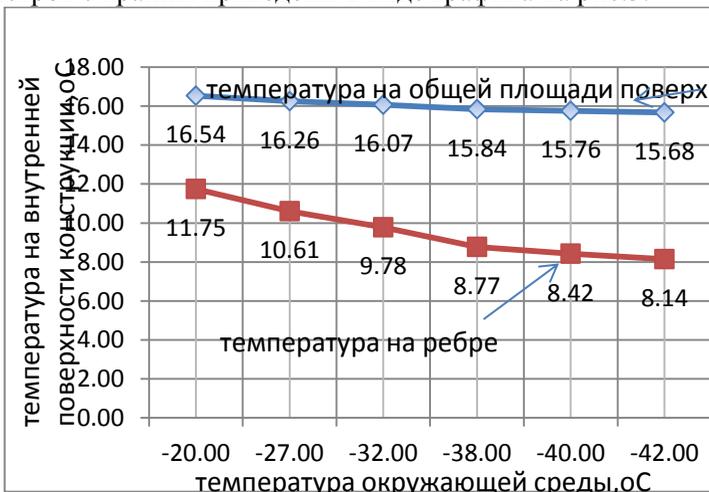


Рис 3. Распределение температур в термически неоднородной конструктивной системе «Монофант» при абсолютных минимумах архитектурно-строительных климатических районов Украины.

Проведенные численные исследования нестационарной температурной задачи в случае аварийного отключения системы отопления в холодную пятидневку и понижения температуры внутреннего воздуха в помещении до  $+5^{\circ}\text{C}$  на ребре жесткости конструкции (при постоянной температуре наружного воздуха  $-23^{\circ}\text{C}$  в течении 5 суток) свидетельствуют о том, что температура на ребре жесткости достигнет  $0^{\circ}\text{C}$ , в то же время по всей площади конструкции температура через 5 суток уменьшится до  $3,9^{\circ}\text{C}$ .

Численный анализ результирующих температурных полей данных значений температур на поверхности конструкции, контактирующей с окружающей средой наружного воздуха показывает, что через 3,5 часа на поверхности конструкции установится стационарное температурное поле.

В то же время, численные расчеты температурных полей абсолютного максимума архитектурно-строительных климатических районов Украины не оказывают практически заметного влияния на условия теплообмена внутри помещения.

Так при температуре окружающей среды  $+41^{\circ}\text{C}$  разность между температурой на общей площади поверхности конструкции и температурой на ребре жесткости составляет  $3^{\circ}\text{C}$ , что вполне допустимо по санитарно-гигиеническим нормам.

Можно констатировать, что в результате исследований разработаны конструктивные мероприятия, направленные на борьбу с «мостиком холода», а именно, увеличение толщины ограждающей конструкции и устройство пенополистирольного вкладыша в зоне бетонного ребра с наружной стороны ограждающей конструкции (рис.4).

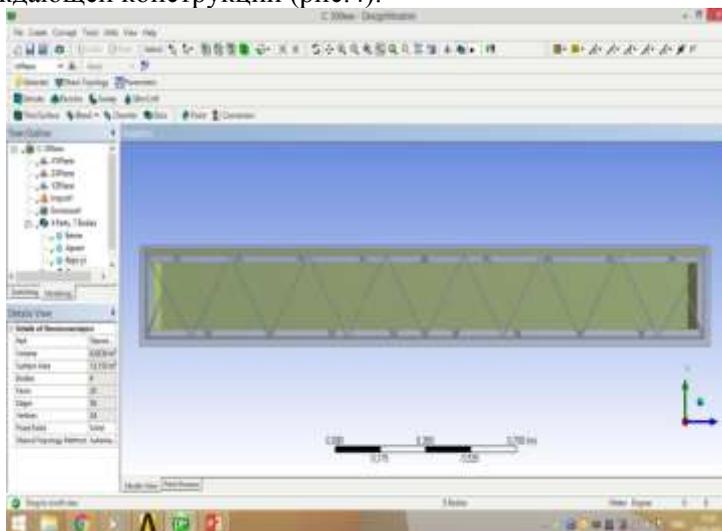


Рис. 4. Разрез предложенного конструктивного решения для ликвидации «мостика холода» в конструктивной системе многокритериального соответствия системы «Монофант»

Результатирующее температурное поле с учетом разработанных конструктивных решений приведено на рис.5.

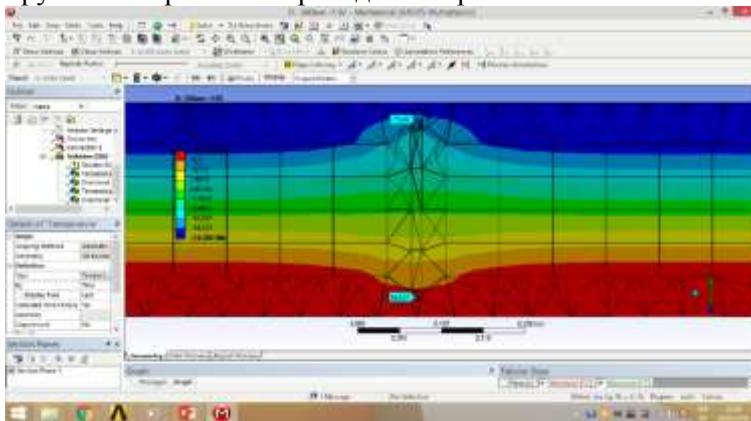


Рис. 5. Результитрующее температурное поле, с учетом предложенных конструктивных решений

**Экспериментальные исследования температурных полей.** Объектом исследования является плита в которой распределение температуры  $y$  зависит от температуры в нижнем отсеке  $x_1$  и температуры в верхнем отсеке  $x_2$  климатической камеры. Элементом строительной конструкции для испытаний является модель плиты конструктивной системы «Монофант» (рис .6.)



Рис. 6. Модель строительной конструкции системы «Монофант»

Климатические воздействия осуществлялись потоком воздуха, на пути которого устанавливались системы нагрева и охлаждения. Выполнены исследования конвективного теплообмена между воздухом и ограждающей конструкцией, методом теории подобия найдена связь между переменными, которые характеризуют процесс переноса массы в ограждающей конструкции.

Дифференциальное уравнение массообмена в движущейся среде выражает закон распределения концентрации и имеет следующий вид [9]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \omega_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \omega_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + \omega_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z} = D \cdot \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right)$$

Методом теории подобия получена связь между переменными, которые характеризуют процесс переноса теплоты и массы в потоке в виде критериальных уравнений:  $Nu=f(Re, Pr, Gr)$ .

Коэффициент массоотдачи зависит от физических свойств среды (температура воздуха, влажность воздуха) и гидродинамических условий в среде (ламинарный режим), а также геометрических факторов ограждающей конструкции. Основные определяющие критерии:

$$F_o = \frac{\tau \cdot D}{l^2} = idem; Pe_o = \frac{\omega \cdot l}{D} = idem; Re = \frac{\omega \cdot l}{\nu} = idem;$$
$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t_F = idem.$$

Были приняты следующие условия реальной эксплуатации конструкции. Температура внутреннего воздуха + 20°C. Относительная влажность воздуха 55%, геометрические характеристики рассматриваемой конструкции.

Параметры наружного воздуха принимались в соответствии с среднемесячных значениях для г. Харькова, принятыми по ДСТУ-Н Б В.1.1-27: 2010.

Для соблюдения условий подобия при испытаниях образца необходимо равенство критериев подобия на модели их значением для натуральных условий, которые приведены в таблицах 1, 2. При испытаниях в отсеках климатической камеры выбирались соответствующие значения факторов, обеспечивающих равенство определяющих критериев подобия.

Таблица 1

Значения критериев подобия на внешней поверхности плиты при проведении экспериментальных испытаний

Месяц года	$t_{н},$ °C	$\Phi$ окруж среды, %	W окуж среды , м/с	$v_{ж},$ М <sup>2</sup> /с	$Pr_{ж}$	$Re_{h, ж}$	$Nu_{h, ж}$
январь	-5,9	87	4,4	1,27785 Е-05	0,71	1032985	299,6
февраль	-5,1	84	4,7	1,28465 Е-05	0,70955	1097575	308,7
март	0	81	4,6	0,00001 328	0,707	1039157	300,0
апрель	9	66	4,4	0,00001 4072	0,7052	938033	284,8
май	15,5	60	3,8	0,00001 4655	0,7039	777892	259,2
июнь	18,9	64	3,5	0,00001 4961	0,70322	701825	246,1
июль	20,7	63	3,3	1,51258 Е-05	0,70286	654511	237,7
август	19,7	62	3,2	0,00001 5033	0,70306	638595	234,8
сентябрь	14,1	68	3,4	0,00001 41	0,70418	723404	250,0
октябрь	7,5	76	3,8	0,00001 394	0,7055	817791	266,0
ноябрь	1,0	86	4,2	0,00001 3368	0,7068	942549	285,7
декабрь	-3,7	89	4,3	1,29655 Е-05	0,70885	994948	293,8

Таблиця 2

Значения критериев подобия на внутренней поверхности плиты при проведении экспериментальных испытаний.

Месяц года	$t_{ст},$ °C	$\Delta t,$ °C	$\beta,$ 1/°C	$\nu_{ж},$ м <sup>2</sup> /с	$Pr_{ж}$	$Gr_{h, ж}$	$Nu_{h, ж}$
январь	15,72	4,28	0,003 413	0,0000 1506	0,703	1,7073 E+10	286,1
февраль	15,85	4,15	0,003 413	0,0000 1506	0,703	1,6546 E+10	283,1
март	16,69	3,31	0,003 413	0,0000 1506	0,703	1,3184 E+10	262,7
апрель	18,18	1,82	0,003 413	0,0000 1506	0,703	7,2510 E+09	215,7
май	19,26	0,74	0,003 413	0,0000 1506	0,703	2,9663 E+09	160,6
июнь	22,32	0,68	0,003 378	0,0000 1506	0,703	2,6753 E+09	155,2
июль	22,62	0,38	0,003 378	0,0000 1506	0,703	1,5008 E+09	128,2
август	22,45	0,55	0,003 378	0,0000 1506	0,703	2,1533 E+09	144,5
сентябрь	19,02	0,98	0,003 413	0,0000 1506	0,703	3,8892 E+09	175,6
октябрь	17,93	2,07	0,003 413	0,0000 1506	0,703	8,2398 E+09	224,9
ноябрь	16,86	3,14	0,003 413	0,0000 1506	0,703	1,2525 E+10	258,3
декабрь	16,08	3,92	0,003 413	0,0000 1506	0,703	1,5623 E+10	277,8

Таким образом, проанализированы дифференциальные уравнения тепломассопереноса через конструкцию, определены условия подобия при проведении экспериментальных исследований, выбраны определяющие критерии подобия. На основе анализа климатических данных рассчитаны значения критериев, которые должны обеспечиваться в климатической камере при моделировании тепловлажностных процессов. На базе лаборатории кафедры строительных конструкций ХНУГХ имени А.Н. Бекетова проводились исследования конструктивно-анизотропных конструкций в климатической камере (рис.7).



Рис.7. Общий вид климатической камеры

Во время проведения эксперимента использовались преобразователи термоэлектрические предназначенные для измерения температуры ТХК-0188 с рабочим диапазоном температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ . Измерительным узлом термопреобразователя является чувствительный элемент, состоящий из двух термоэлектродов, изготовленных из сплавов хромель, капель и соединенных между собой на одном конце, который составляет горячий спай (рис.8.).

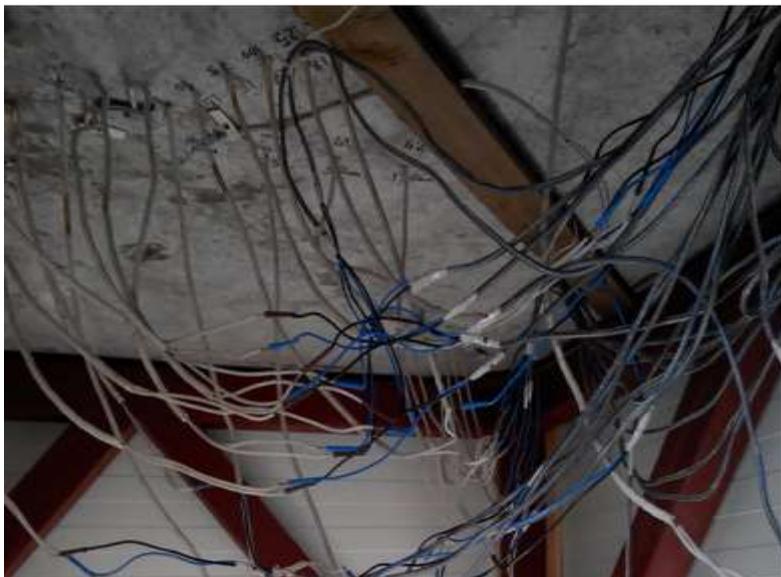


Рис. 8. Система измерений при проведении эксперимента  
Схема расположения термоэлектрических преобразователей показана на рис.9.

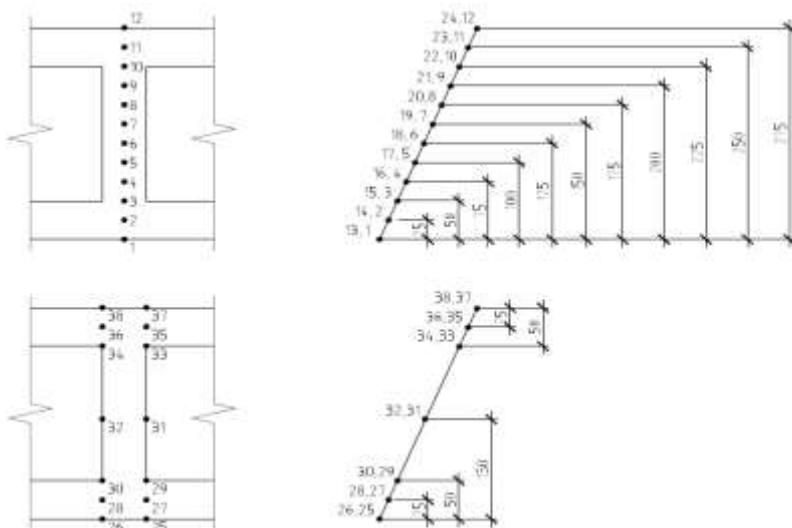


Рис.9. Схема расположения термоэлектрических преобразователей

При этом следует учитывать, что эксперимент проводился в стадии регулярного теплового режима. Проведенный анализ экспериментальных исследований приведен в виде графиков (рис.10-13).



Рис. 10. – Распределение температур в ограждающей конструкции в начальный период времени (температура окружающего воздуха +8°C)



Рис. 11 - Распределение температур в ограждающей в конструкции при установившемся стационарном процессе

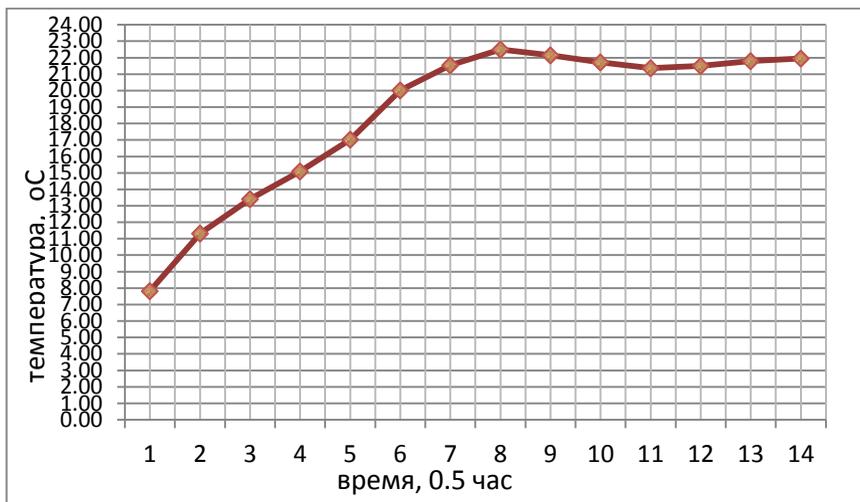


Рис. 12. – Результирующие значения регулярного температурного режима на наружной поверхности конструкции (по данным экспериментальных исследований)

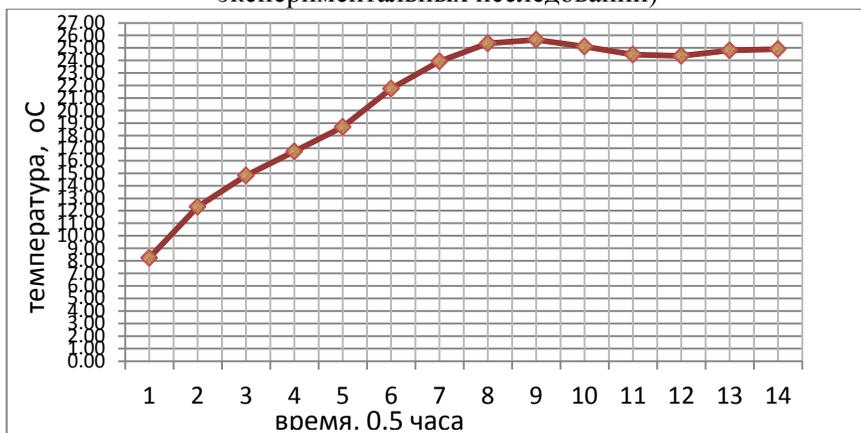


Рис. 13. – Результирующие значения регулярного температурного режима на внутренней поверхности конструкции (по данным экспериментальных исследований)

**Вывод:** конструктивная система «Монофант» может быть использована при возведении зданий во II климатической зоне Украины (расчетная температура наружного воздуха для ограждающих конструкций составляет  $-19^{\circ}\text{C}$ ). В I климатической зоне Украины без дополнительных конструктивно-технических

решений конструктивную систему «Монофант» с толщиной ограждающей конструкции 260 мм использовать не рекомендуется. Однако, в результате разработанных конструктивных мероприятий, направленных на борьбу с «мостиком холода», а именно увеличение толщины ограждающей конструкции и устройство пенополистирольного вкладыша в зоне бетонного ребра с наружной стороны ограждающей конструкции появляется возможность проектировать и строить здания экономически эффективными, инновационными нового качественного уровня.

#### Литература

1. Патент на корисну модель №89464 Україна, Е 04В 1/В (2006.01) Каркасна будівля «Монофант» / В.С. Шмуклер, В.М. Бабаєв, С.О. Бугаєвський, К.В. Бережна, І.А. Карякін, В.І. Кондращенко, І.М. Сеїрські. – № и 2013 11919; заявка 10.10.2013; публікація 25.04.2014. Бюл. №8.

2. Гапонова Л.В. Експериментально-теоретичне дослідження напружено-деформованного стану сферичної оболонки покриття [Текст] / Гапонова Л.В., Калмиков О.А., Гребенчук С.С. // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2015. – Вип.157. – С.102-113.

3. Гапонова Л.В. Напряженно-деформируемое состояние цилиндрической оболочки [Текст] / Гапонова Л.В., Калмиков О.А., Гребенчук С.С. // Коммунальное хозяйство городов. – 2016. – Вып. 126. – С 9-18.

4. V. Babaev, V. Shmukler, S. Grebenchuk, L. Gaponova, L., Kalmikov O. // Analysis of Stress-Strain State of Spherical Roof Shell / 1 st International Conference on Engineering and Innovative Technology, SU-ICEIT 2016, April 12-14, 2016, Salahaddin University-Erbil, Kurdistan, Iraq.

5. Ибрагимов А.М. Нестационарный тепломассоперенос в многослойных ограждающих конструкциях: дис... д-ра техн. наук: 05.23.01 Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ. – М, 2006. – 348с.

6. ДСТУ Б В.2.7-182:2010 “Будівельні матеріали. Методи визначення терміну ефективної експлуатації та теплопровідності будівельних ізоляційних матеріалів у розрахункових та стандартних умовах”.