

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НДС КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ ЛИЦЕВОГО СЛОЯ НАРУЖНЫХ СТЕН С ГИБКИМИ СВЯЗЯМИ НА ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

## INVESTIGATION OF THE STRESS- STRAIN STATE OF BRICK VENEER OF THE EXTERIOR WALLS WITH FLEXIBLE CONNECTORS UNDER TEMPERATURE- HUMIDITY INFLUENCES

М. К. ИЩУК, канд. техн. наук

*Исследованы температура и деформации кладки лицевого слоя наружных стен крупномасштабной модели здания, образованной наружными трехслойными стенами и плитой перекрытия высотой на один этаж. Возведение модели начато летом и закончено осенью 2015 г. В работе отражены результаты наблюдений за период по январь 2018 г. Показано, что на НДС лицевого слоя большое влияние оказывают плиты перекрытий. При замыкании конструкции (возведении кладки) в теплое время года в лицевом слое в холодное время возникают наибольшие растягивающие напряжения и изгибающие моменты, способные вызвать появление трещин.*

*The temperature and deformations of the laying of the face layer of the outer walls of a large-scale model of the building, formed by external three-layer walls and a one-floor-height slab were investigated. The construction of the model was started in the summer and finished in the fall of 2015. The work reflects the results of observations for the period until January 2018.*

*It is shown that the VAT of the face layer is greatly influenced by slabs of overlapping. When the structure (masonry) is closed in the warm season, the greatest stretching stresses and bending moments that can cause cracks appear in the face layer during cold weather.*

*На основе проведенных исследований уточнены методы оценки НДС лицевого слоя, усилий в гибких связях при температурно-влажностных воздействиях, а также корреляционные зависимости между температурой наружного воздуха и температурой кладки лицевого слоя. Показано, что в трехслойных стенах при определении НДС кладки лицевого слоя толщиной 12 см и менее необходимо принимать максимальные по абсолютной величине значения суточных колебаний температуры воздуха.*

*On the basis of the studies, the methods for estimating the VAT of the face layer, the forces in flexible bonds under temperature-humidity influences are refined.*

*Correlations between the temperature of the outside air and the temperature of the laying of the face layer were refined. It is shown that in three-layer walls when determining the VAT of the laying of the face layer with a thickness of 12 cm or less, it is necessary to take the maximum values of the daily variations in air temperature in absolute value.*

### **Ключевые слова:**

*Методы расчета многослойных стен, НДС кладки лицевого слоя, прочность кладки на растяжение, расстояния между вертикальными деформационными швами, температура замыкания, температурно-влажностные деформации, трехслойные стены с гибкими связями, ширина раскрытия трещин*

### **Key words:**

*Calculation methods, cavity walls with flexible ties, crack widths, distances between vertical deformation joints, temperature and humidity deformation, temperature of the circuit, tensile strength of the masonry, VAT laying the veneer*

Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) кладки лицевого слоя в зависимости от температурно-влажностных воздействий, практически не нашли своего отражения в мировой литературе. В основном натурные исследования сводятся к изучению влияния колебаний температуры наружного воздуха и солнечной радиации на микроклимат в помещении [1 и др.].

### **Описание конструкции модели**

Стены модели опираются на монолитную железобетонную плиту. Вид модели в защитном ангаре приведен на рис. 1. Габариты модели составляют  $1,94 \times 8,96 \times 2,57$  (h) м. Лицевой слой толщиной 12 см стен выполнен из кирпича М150 с пустотностью 46%, внутренний толщиной 12 см – из керамических камней М200 с пустотностью 41%. Слои соединены гибкими связями из одиночных стержней и сеток. Между слоями помещен утеплитель из минеральной ваты толщиной 15 см с воздушной прослойкой 3 см. Кладка велась на растворе М100.

Фото модели в процессе возведения и технические решения стен и плиты приведены на рисунках 2-8.



Рис. 1. Общий вид модели в защитном ангаре

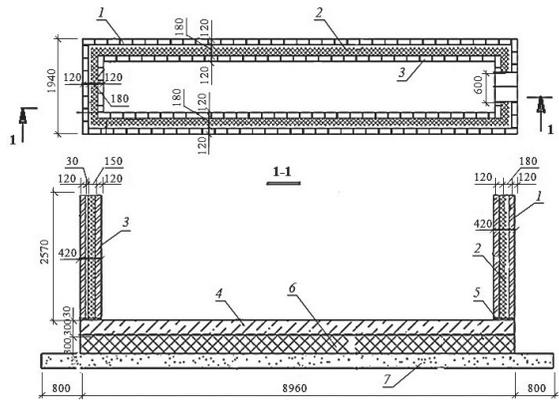


Рис. 2. План и разрез модели: 1 – лицевой слой из керамического кирпича; 2 – минеральная вата 15 см, воздушная прослойка 3 см; 3 – внутренний слой из керамических камней; 4 – ж.-б. плита; 5 – цементно-песчаный раствор; 6 – пеноплекс 15 см по керамзитовому гравия; 7 – песчаная подготовка

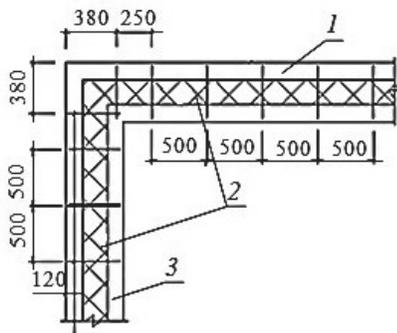


Рис. 3. Схема установки гибких связей из одиночных стержней: 1 – лицевой слой; 2 – утеплитель; 3 – внутренний слой

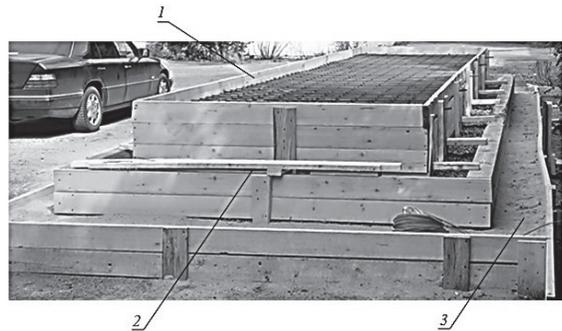


Рис. 4. Подготовка под железобетонную плиту: 1 – опалубка; 2 – пеноплекс 15 см по керамзитовому гравия; 3 – песчаная подготовка

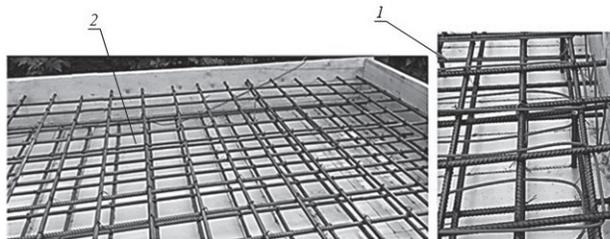
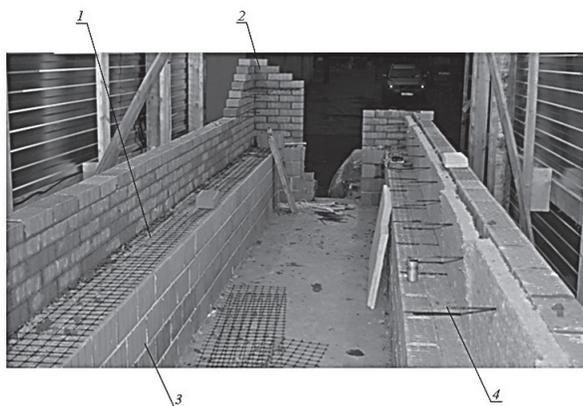


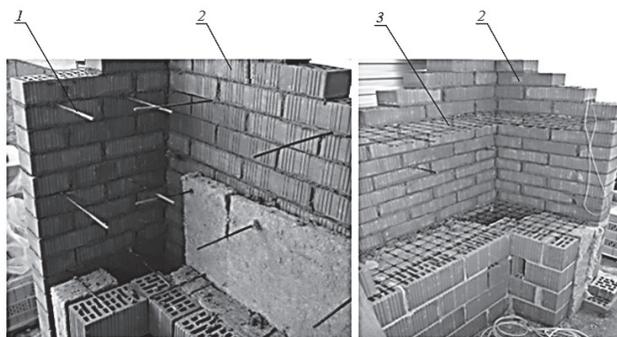
Рис. 5. Армирование плиты и устройство «теплого пола» для нагрева плиты: 1 – кабели для подогрева; 2 – пеноплекс толщиной 15 см по керамзиту



**Рис. 6.** Общий вид модели в процессе ее изготовления



**Рис. 7.** Кладка стен модели: 1 – гибкая связь из базальтопластиковой сетки; 2 – лицевой слой из керамического кирпича; 3 – внутренний слой из керамического камня; 4 – гибкая связь из одиночных базальтопластиковых стержней с песчаным наконечником



**Рис. 8.** Фрагменты стен модели: 1 – гибкая связь из одиночных стержней; 2 – лицевой слой из керамического кирпича; 3 – гибкая связь из сетки

### Приборы и оборудование

С помощью прогибомеров с ценой деления 0,01 мм измеряли горизонтальные перемещения продольных и поперечных стен. Схема расстановки прогибомеров приведена на рис. 9. Прогибомеры устанавливали в трех уровнях по высоте на углах стен с наружной (рис. 10, *а, б*) и внутренней сторон лицевого слоя (рис. 11).

Горизонтальные перемещения плиты измеряли прогибомерами по наружным вертикальным граням (рис. 10, *в*). В средней части продольной стены дополнительно измеряли горизонтальные деформации лицевого слоя на участках с трещинами с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм (рис. 12, *а*).

Ширину раскрытия трещин измеряли с помощью оптического микроскопа, устанавливаемого на трещину с гипсовыми маячками (рис. 13).

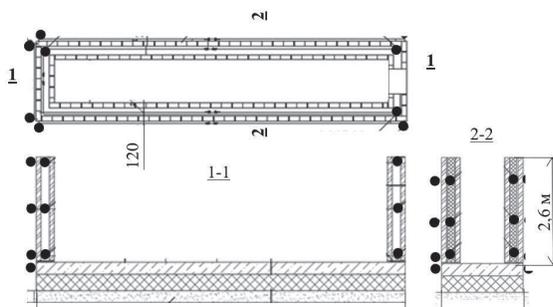


Рис. 9. Схема расстановки прогибомеров

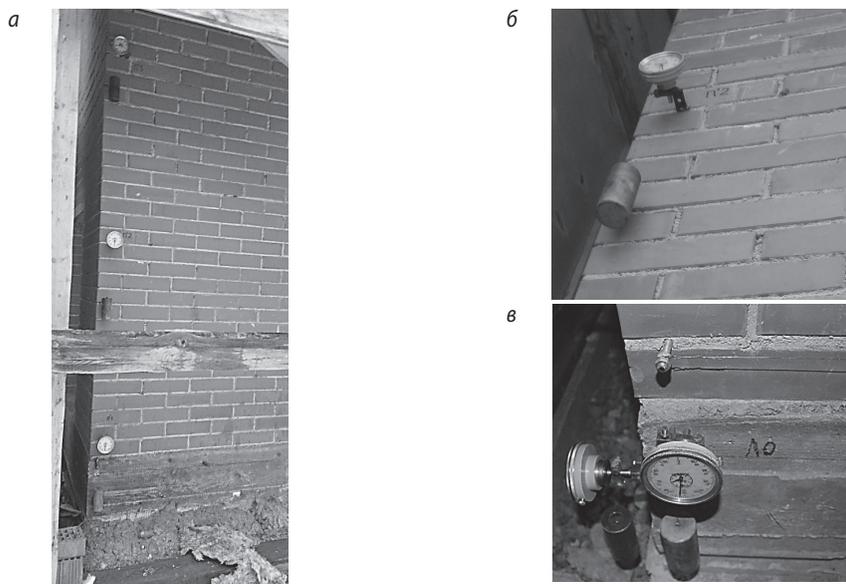
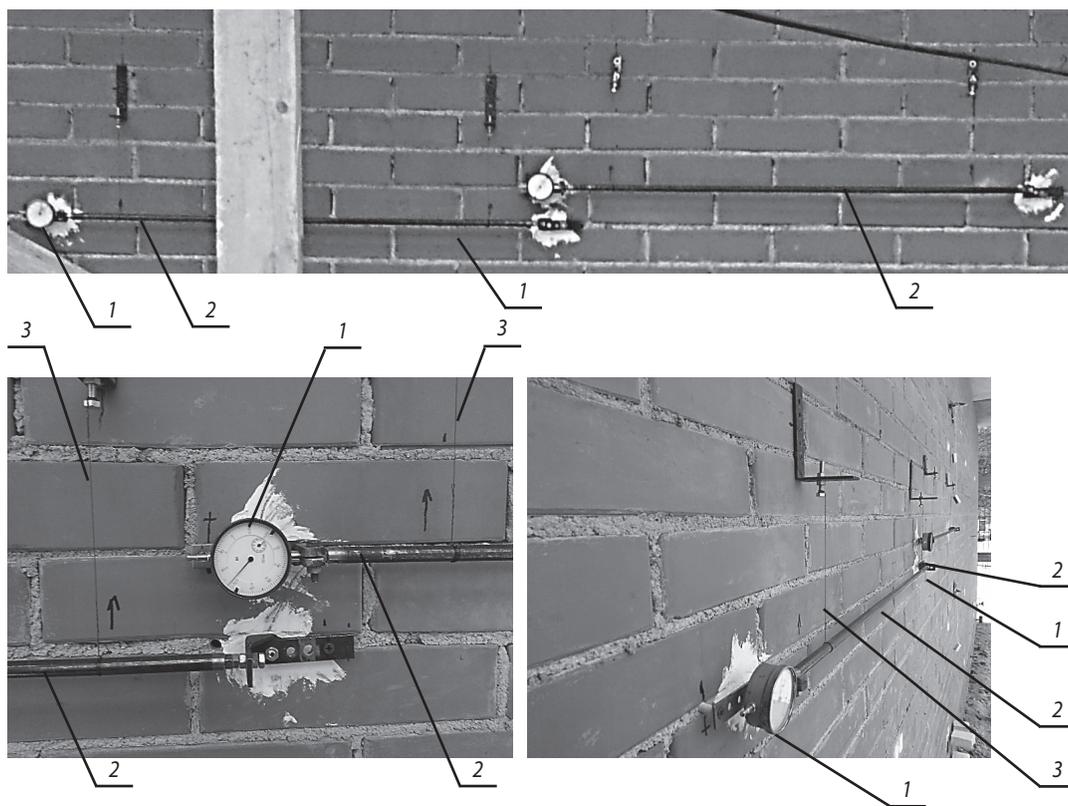


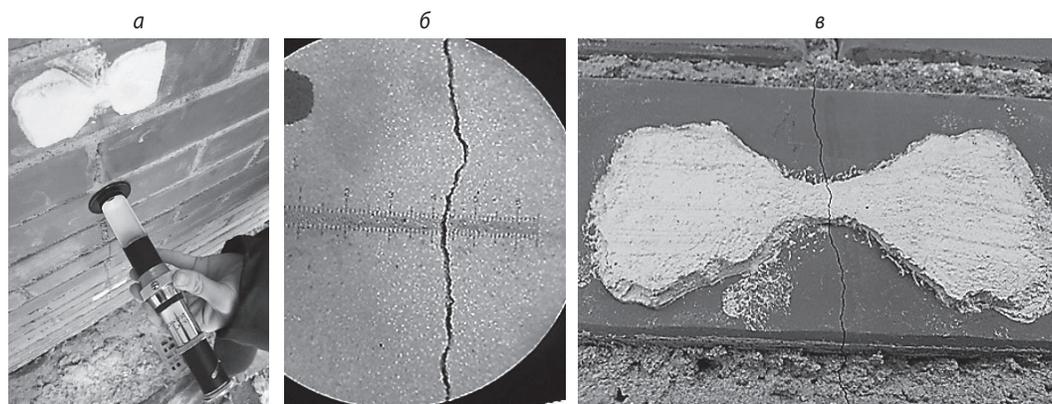
Рис. 10. Прогибомеры для измерения горизонтальных перемещений углов:  
*а, б* – наружной поверхности лицевого слоя; *в* – плиты



**Рис. 11.** Прогибомер для измерения горизонтальных перемещений кладки лицевого слоя с его внутренней стороны



**Рис. 12.** Индикаторы часового типа для измерения горизонтальных деформаций кладки: 1 – индикатор с ценой деления 0,01 мм; 2 – стержень из инвара; 3 – разгрузочная нить

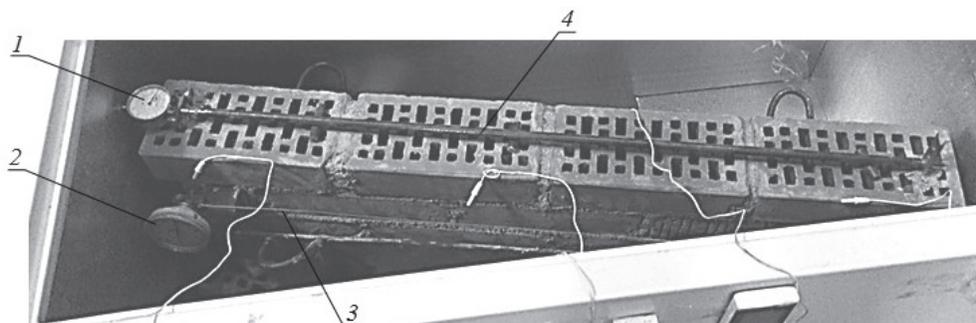


**Рис. 13.** Измерение ширины раскрытия трещин с помощью микроскопа и гипсовых маяков: *а* – установка микроскопа на трещину; *б* – вид трещины через микроскоп; *в* – гипсовый маяк с трещиной

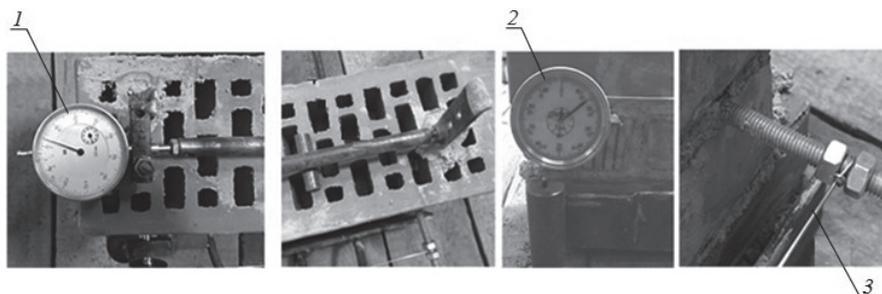
### Определение коэффициента линейного расширения кладки лицевого слоя

Коэффициент линейного расширения для кладки  $\alpha_l$  из керамического кирпича в Своде правил [2] принят равным  $0,000005 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . В европейских нормах  $\alpha_l = 0,000005 \dots 0,000007 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [3]. В работе [4] показано влияние влажности кладки на величину этого коэффициента при отрицательных температурах. Для корректного определения деформаций кладки модели проведены исследования на образце кладки из кирпича и раствора, примененных при кладке лицевого слоя модели. Образец имел длину 53 см, высоту 23 см и толщину 12 см. Для исключения трения в основании образца были уложены листы фторопласта с угольной смазкой между ними. Образец помещали в холодильную камеру (рис. 14, *а*). Индикатором часового типа и прогибомером измеряли горизонтальные деформации (рис. 14, *б*). Струна прогибомера и база индикатора были изготовлены из инвара, обладающего низким и постоянным значением коэффициента линейного расширения. Тестовые испытания самих приборов показали отсутствие значимых погрешностей в заданном диапазоне температур. Для исследуемой кладки в диапазоне температур от минус 20 до +20  $^\circ\text{C}$  коэффициент линейного расширения получен равным  $0,0000066 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

*а*



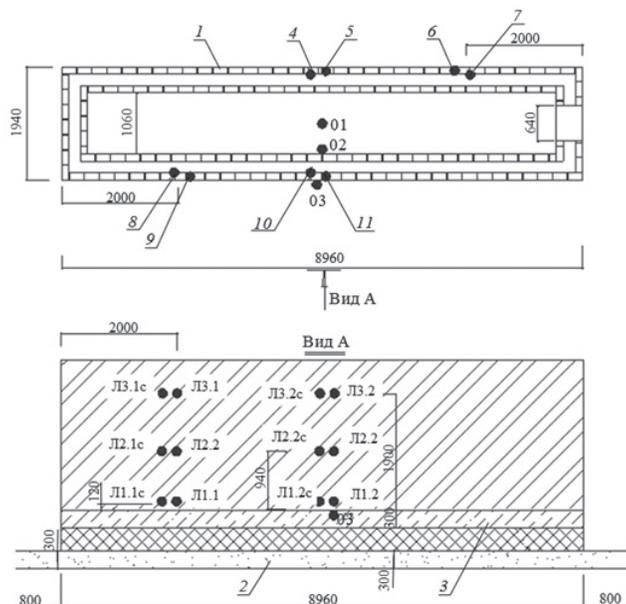
б



**Рис. 14.** Исследование коэффициента линейного расширения кладки лицевого слоя в холодильной камере: а - образец кладки из лицевого кирпича, помещенный в холодильную камеру; б - приборы для измерения температурных деформаций кладки: а - образец кладки из лицевого кирпича, помещенный в холодильную камеру; 1 - индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм; 2 - прогибомер с ценой деления 0,01 мм; 3 - проволока из инвара для прогибомера; 4 - база из инвара для индикатора; б - приборы для измерения температурных деформаций кладки; 1 - индикатор часового типа; 2 - прогибомер; 3 - проволока из инвара для прогибомера

### Измерение температуры кладки, плиты, наружного и внутреннего воздуха

Измерения температуры кладки лицевого слоя выполняли с наружной и внутренней сторон и в середине слоя и в трех уровнях по высоте стены (рис. 15). Измеряли температуру воздуха внутри помещения и снаружи, а также поверхностей кладки и плиты



**Рис. 15.** Места измерения температуры в лицевом слое и в железобетонной плите: 1 - кирпич лицевой; 2 - песчаная подготовка; 3 - железобетонная плита; 4-11 - места измерений температуры в кладке лицевого слоя; 12 - места измерений температуры в плите

### Результаты измерения температуры кладки лицевого слоя, железобетонной плиты, наружного и внутреннего воздуха

На рисунках 16, а – 16, е и 17 в качестве примера приведены графики температуры лицевого слоя в трех точках по его толщине и температуры наружного воздуха. Из анализа этих графиков просматривается четкая корреляционная зависимость между температурой воздуха и температурой кладки. Установлено, что пиковые значения температуры в середине лицевого слоя кладки отстают от пиковых значений зимней температуры наружного воздуха не более чем на 2,5 ч. Таким образом подтверждено экспериментально, что для оценки НДС кладки лицевого слоя толщиной 12 см, отделенного от внутреннего слоя стены эффективным утеплителем, следует принимать пиковые значения температуры наружного воздуха за сутки.

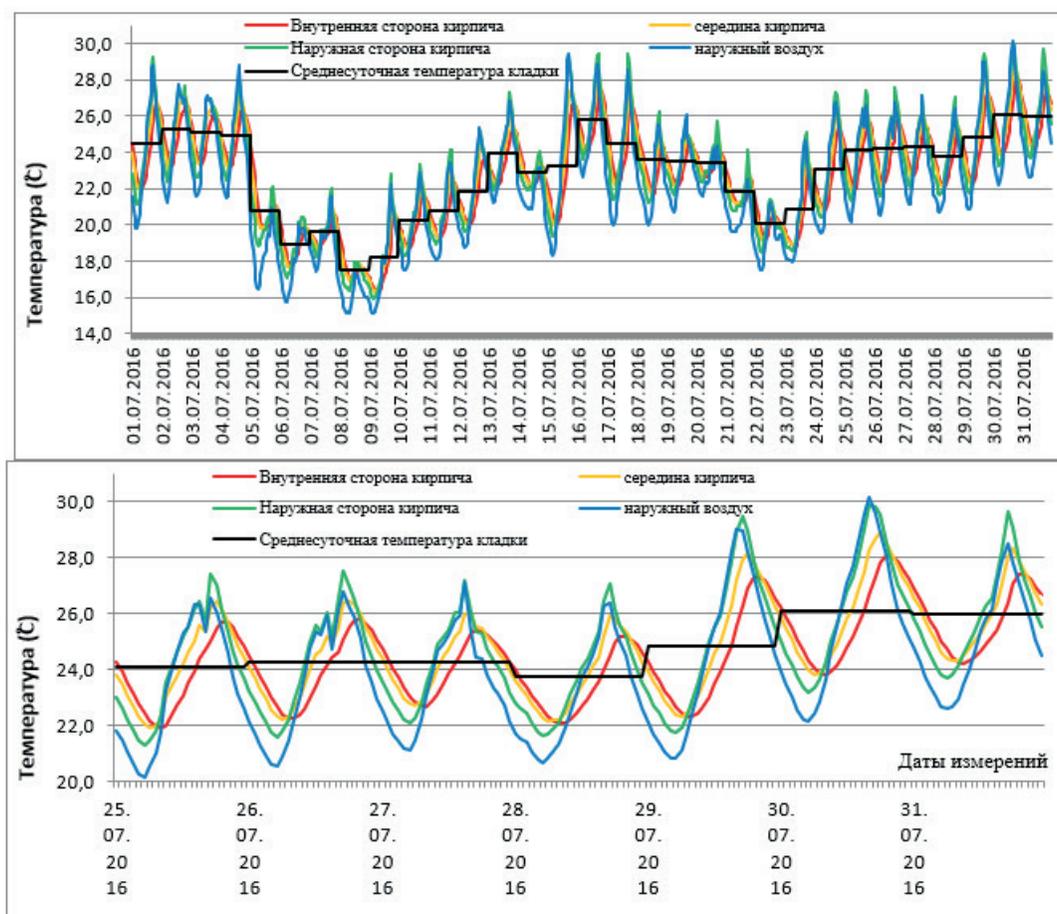


Рис. 16а. Графики изменения температуры наружного воздуха и лицевого слоя в июле 2016 г.



Рис. 16б. Графики изменения температуры наружного воздуха и лицевого слоя в августе 2016 г.

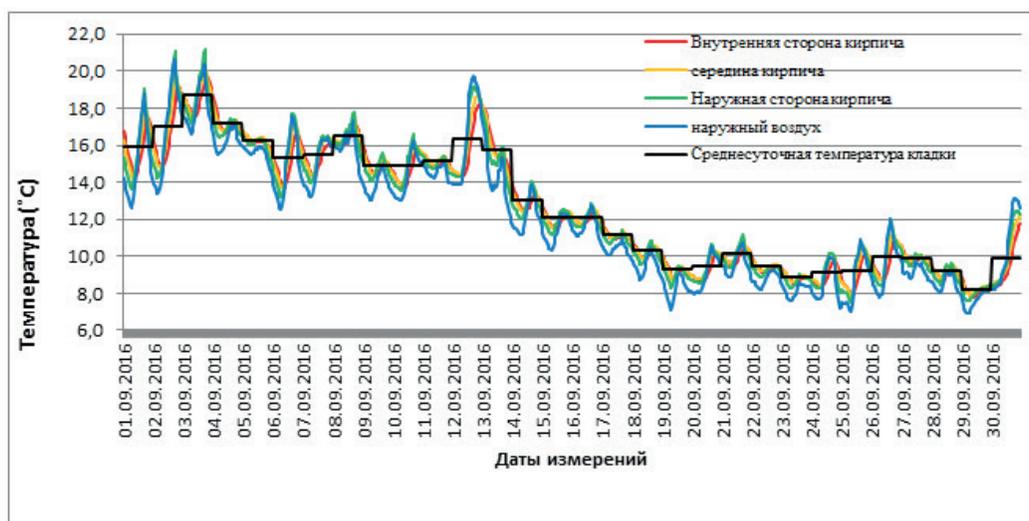


Рис. 16в. Графики изменения температуры наружного воздуха (вверху) и лицевого слоя (внизу) в сентябре 2016 г.



Рис. 16г. Графики изменения температуры наружного воздуха и лицевого слоя в октябре 2016 г.

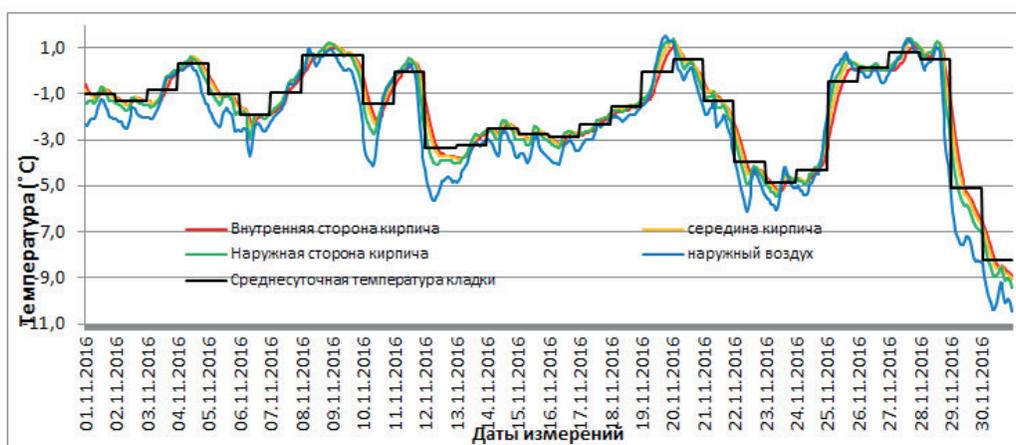


Рис. 16д. Графики изменения температуры наружного воздуха и лицевого слоя в ноябре 2016 г.



Рис. 16д. Графики изменения температуры наружного воздуха и лицевого слоя в ноябре 2016 г.

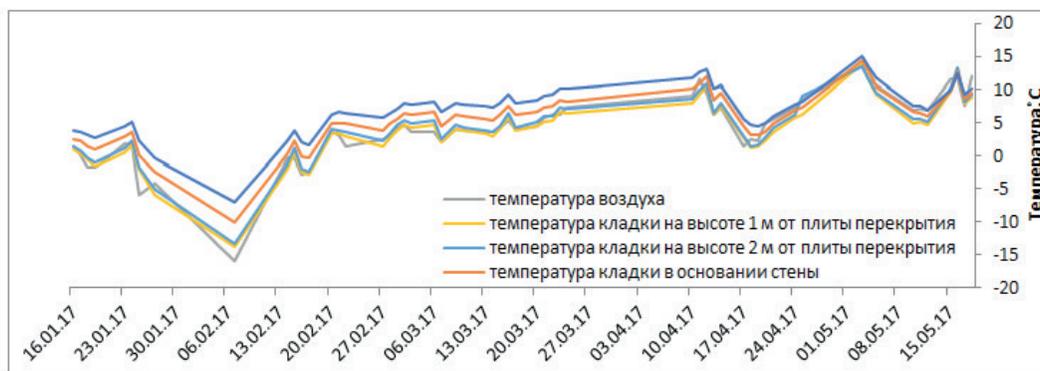


Рис. 16е. Температура торца плиты и лицевого слоя по высоте стены с января 2017 г. по май 2017 г.

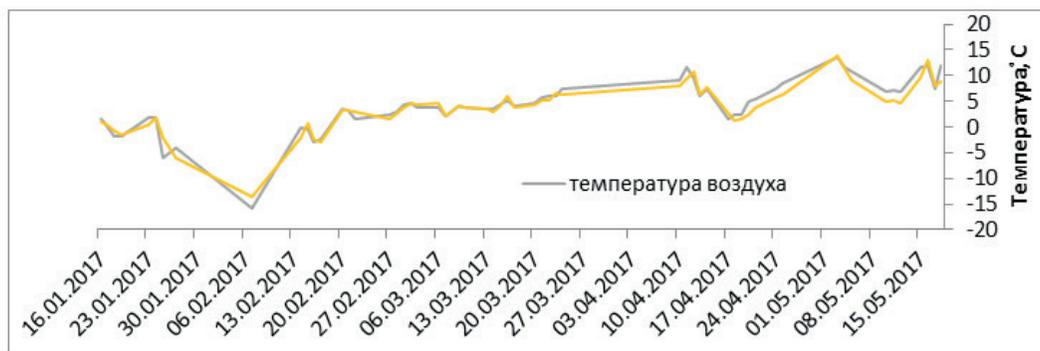


Рис. 17. График зависимости температуры лицевого слоя от температуры наружного воздуха с января 2017 г. по май 2017 г.

### Результаты измерения горизонтальных деформаций кладки лицевого слоя и железобетонной плиты и развития трещин

На рисунках 18-22 приведены результаты проводившихся в течение более двух лет измерений горизонтальных перемещений кладки лицевого слоя и плиты вдоль ее наружных граней. Перемещения кладки лицевого слоя даны для середины его толщины и подсчитаны как среднее между перемещениями по наружной и внутренней его сторонам. Знак минус принят для перемещений и деформаций, при которых происходило сокращение размеров.

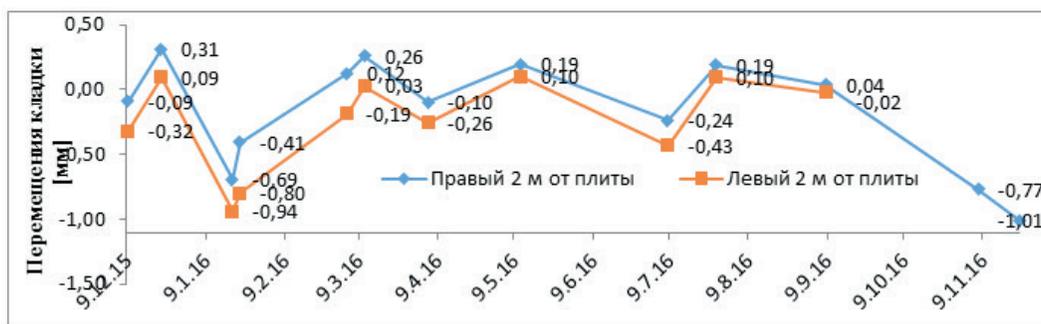


Рис. 18. Горизонтальные перемещения лицевого слоя на высоте 2 м от основания стены с декабря 2015 г. по ноябрь 2016 г.

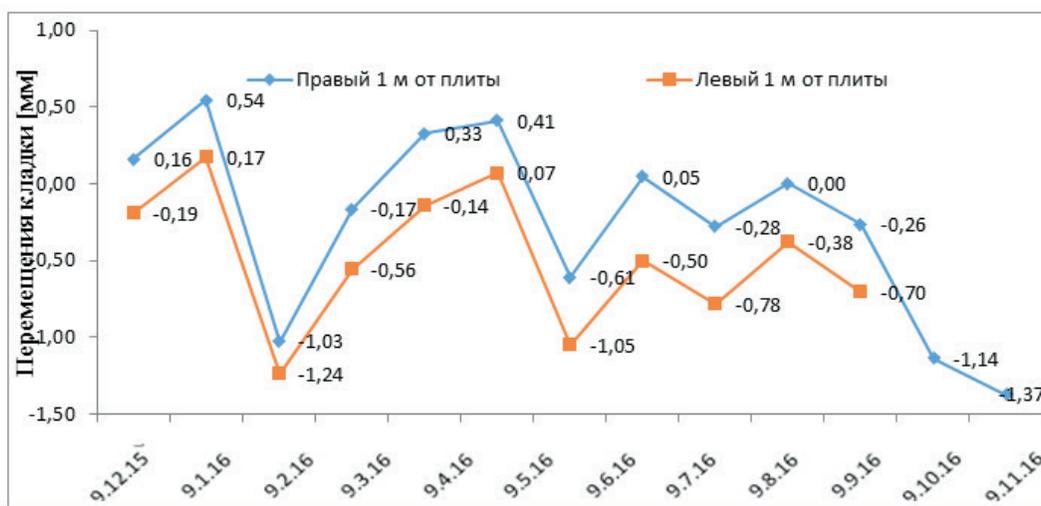


Рис. 19. Горизонтальные перемещения лицевого слоя на высоте 1 м от основания стены с декабря 2015 г. по ноябрь 2016 г.



Рис. 20. Горизонтальные перемещения кладки лицевого слоя в основании стены с декабря 2015 г. по ноябрь 2016 г.

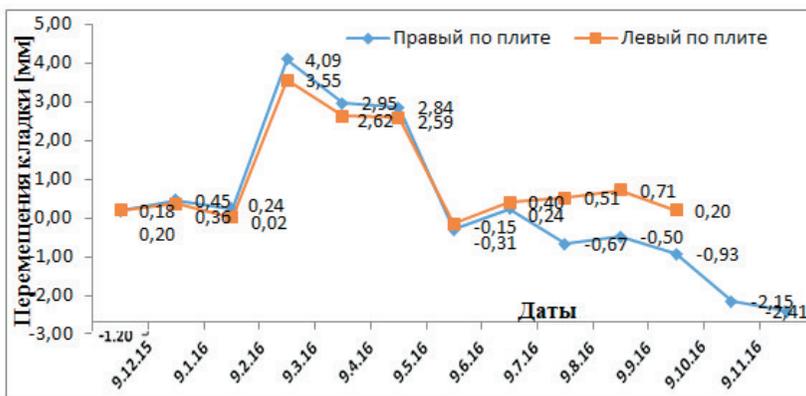
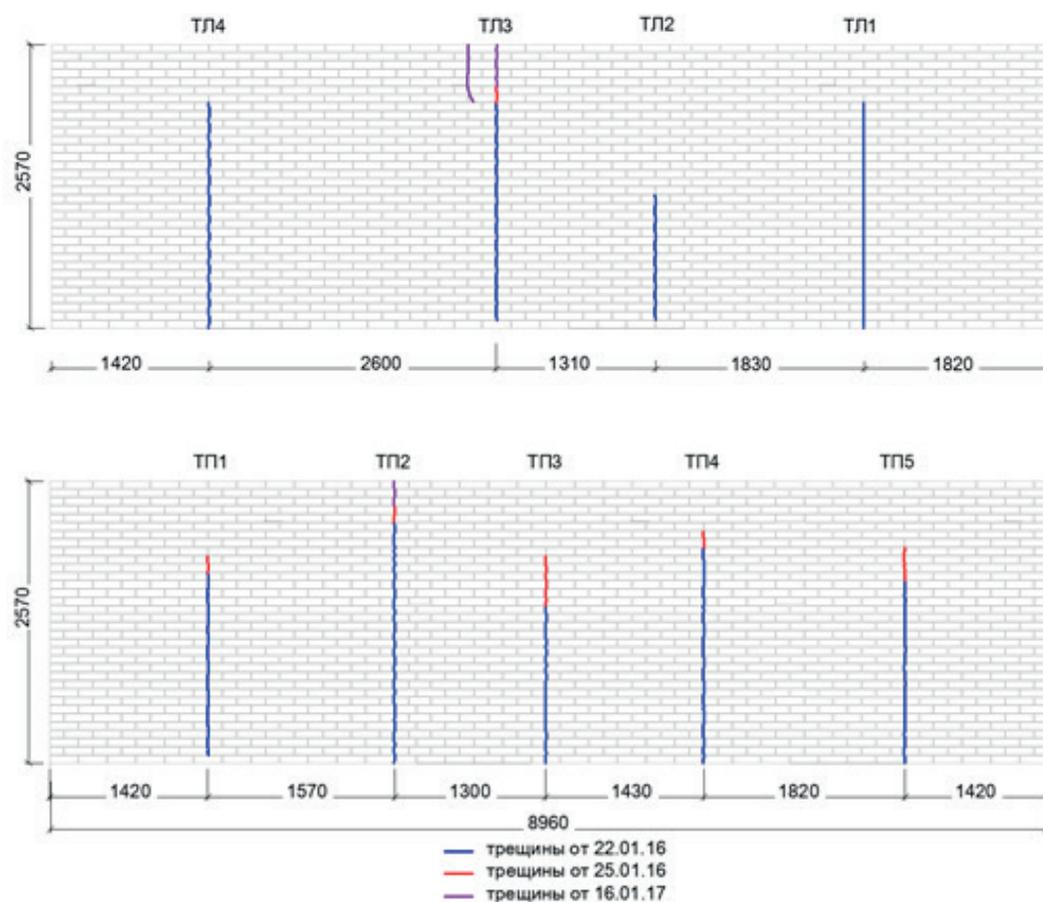


Рис. 21. Горизонтальные перемещения железобетонной плиты со стороны улицы с декабря 2015 г. по ноябрь 2016 г.



Рис. 22. Горизонтальные перемещения плиты и лицевого слоя на различных уровнях по высоте стены с января 2017 г. по май 2017 г.

19.01.16 г. в кладке лицевого слоя впервые были обнаружены вертикальные сквозные трещины. Схема трещин и мест измерения ширины их раскрытия приведена на рис. 23. С 22.01.16 г. по 25.01.16 г. произошло дальнейшее развитие трещин по высоте. С наступлением тепла началось закрытие трещин, и в апреле 2016 г. ширина их раскрытия уже не превышала 0,05 мм. Раскрытие трещин началось с наступлением холодов осенью 2016 г. Во время морозов в январе 2017 г. произошло развитие трещин по высоте. При этом в каждой стене наряду с другими образовалось по одной трещине, проходящей на всю высоту стены. После этого раскрытие происходило в основном по этим трещинам. Графики развития ширины раскрытия трещин в течение всего периода наблюдений приведены на рисунках 24 и 25.



**Рис. 23.** Схема трещин в кладке лицевого слоя продольных стен модели по состоянию на 22.01.2017 г.:  
вверху – в левой стене; внизу – в правой стене



Рис. 24. Раскрытие трещин в лицевом слое левой стены с января по май 2017 г.

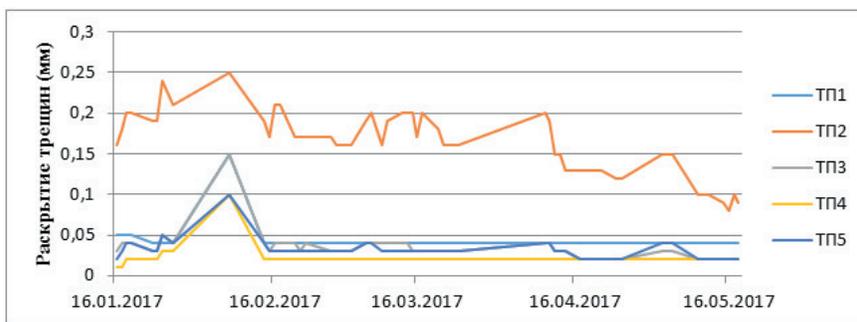


Рис. 25. Раскрытие трещин в лицевом слое правой стены с января по май 2017 г.

Этот пример иллюстрирует, как свободные температурные деформации кладки нижней части стены сдерживаются плитой перекрытия даже при наличии в кладке вертикальных трещин.

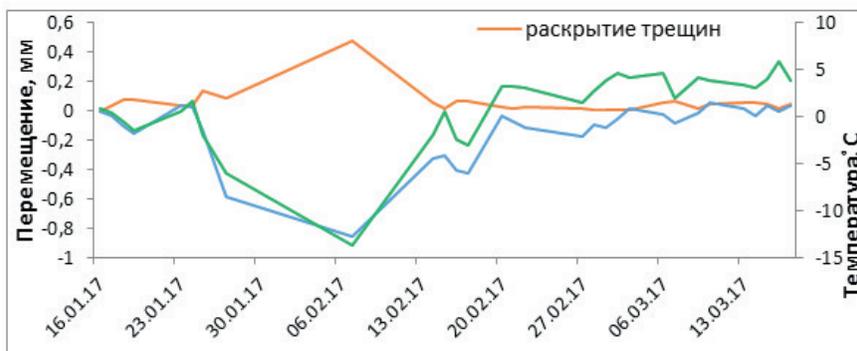


Рис. 26. График перемещений кладки по прогибомерам и суммарные раскрытия трещин правой стены модели в зависимости изменения температуры кладки

На рис. 26 приведены графики суммарной ширины раскрытия трещин и горизонтальных перемещений лицевого слоя с 16.01.2017 г. по 13.03.2017 г. на высоте 1 м от основания, где в этот период наблюдалась наибольшая ширина раскрытия трещин. Там же показан график изменения температуры клицевого слоя. *Прослеживается четкая корреляционная зависимость ширины раскрытия трещин и перемещений кладки от ее температуры*, которая снизилась за период с 16.01.2017 г. по 6.02.2017 г. на 14,1 °С. Видно, что расстояние между противоположными углами стены за этот же период сократилось на  $e = 0,85$  мм, в то время как суммарная ширина трещин раскрытия трещин  $e_{тр}$ , наоборот, увеличилась на 0,48 мм.

Свободные температурные перемещения кладки на длине стены  $L_x$  были бы равны:

$$\Delta e_{\text{клад}}(t) = \alpha_t \cdot \Delta t \cdot L_x = 0,0000066 \cdot 14,1 \cdot 8960 = 0,82 \text{ мм.}$$

Вместе с тем фактические суммарные перемещения собственно кладки на длине стены  $L_x$  равны

$$e_{\text{клад}} = e - e_{\text{тр}} = 0,85 - 0,48 = 0,37 \text{ мм.}$$

### Выводы

Проведенными на крупномасштабной модели экспериментальными исследованиями в течение двух с половиной лет было установлено следующее.

1. Температурные деформации кладки лицевого слоя в нижней части стен сдерживаются железобетонной плитой, на которую они опираются.

2. В верхней части стен температурные деформации кладки лицевого слоя являются практически свободными.

3. Температура кладки распределена по толщине лицевого слоя практически равномерно.

4. Пиковые значения температуры кладки за сутки отстают от пиковых значений температуры наружного воздуха не более чем на 2-2,5 ч.

5. Образование и раскрытие трещин происходило в кладке лицевого слоя продольных стен с наступлением морозов и пуском тепла в помещение.

6. В теплое время происходило закрытие трещин.

7. С образованием в каждой из продольных стен в середине их длин по одной трещине на всю высоту стены суммарная ширина раскрытия трещин определялась практически только этими трещинами.

8. Расстояние между трещинами составило 1,5 ... 1,9 м.

9. Вблизи углов образование трещин не происходило.

10. Коэффициент линейного расширения кладки лицевого слоя в диапазоне температур от минус 20 °С до +20 °С на основе проведенного эксперимента с использованием холодильной камеры принят равным 0,0000066 °С<sup>-1</sup>.

11. Проведенные исследования позволили в дальнейшем уточнить картину НДС кладки лицевого слоя при температурных воздействиях с учетом совмест-

ной работы с железобетонной плитой, была получена достоверная картина образования и развития трещин в кладке. Это, в свою очередь, позволило обосновано произвести разработку и корректировку расчетных схем МКЭ и назначение температурных нагрузок.

## Библиографический список

1. *Filiz Senkal Sezer, Cihan M. T., Sükran Dilmaç*. Experimental analysis of the thermal behavior of mezzanine floors in buildings with cavity wall insulation // Turkey Scientific Research and Essays. Vol. 5(14), Pp. 1925-1934, 18 July, 2010.
2. СП 15.13330.2012 Каменные и армокаменные конструкции.
3. EN 1966-1-1:2004 / Eurocode 6. Design of masonry structures // Part 1: General Rules for reinforced and unreinforced masonry. CEN, Brussels 2004.
4. *Мурый М. А.* Температурные деформации влажной кирпичной кладки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2008. № 1. С. 79-85.

## Автор

Михаил Карпович ИЩУК, канд. техн. наук, зав. лабораторией ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Mikhail ISHCHUK, Ph.D. in Engineering, Head of the Laboratory TSNIISK named after V. A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: kamkon@yandex.ru

тел.: +7 (926) 535-20-32; +7 (499) 174-79-96 (83)