

М.К. ИЩУК¹, В.Л. ИЩУК², Г.И. ШАПИРО¹ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия²Бизнес-студия «КОНФИГУРАТОР», г. Москва, Россия

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН В КЛАДКЕ ЛИЦЕВОГО СЛОЯ НАРУЖНЫХ СТЕН ПРИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аннотация. На основе проведенных экспериментальных и численных исследований установлен механизм образования трещин в кладке лицевого слоя с гибкими связями при температурных воздействиях.

Экспериментальные исследования проводились в течение пяти лет на фрагменте здания высотой на этаж, образованном наружными трехслойными стенами, опирающимися на монолитную железобетонную плиту.

Численные исследования проводились с использованием авторской специализированной программы расчета каменных конструкций, реализующей метод конечных элементов с учетом конструктивной нелинейности. Верификация программы выполнена сравнением результатов расчетов с данными экспериментов, а также на стадии до образования трещин с использованием программы ЛИРА-САПР.

Показано, что в зависимости от соотношения прочности кладки на растяжение по вертикальному сечению и срез по горизонтальным растворным швам возможны различные варианты развития трещин.

Вертикальные трещины подобно деформационным швам снижают уровень растягивающих и касательных напряжений. Срез кладки по горизонтальному растворному шву в основании стены приводит к сокращению длины участка влияния плиты перекрытия. Все вместе это приводит к снижению уровня растягивающих и касательных напряжений и затуханию процесса развития трещин.

Вверху стены влияние плиты перекрытия на напряженно-деформированное состояние (НДС) кладки относительно невелико и температурные деформации там близки к свободным. Это позволило применить упрощенную методику для оценки ширины раскрытия трещин.

Предложен метод расчета кладки лицевого слоя на температурные воздействия и назначения расстояний между вертикальными температурными швами.

Ключевые слова: трехслойные стены с гибкими связями, лицевой слой кладки, совместная работа кладки и плиты перекрытия, НДС кладки лицевого слоя, температурные деформации, методика оценки ширины раскрытия трещин.

М.К. ISHCHUK¹, V.L. ISHCHUK², G.I. SHAPIRO¹Reserch Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Kucherenko, Moscow, Russia²CONFIGURATOR Business Studio, Moscow, Russia

MECHANISM OF THE FORMATION OF CRACKS IN THE BRICK VENEER OF THE EXTERIOR WALLS WITH FLEXIBLE TIES UNDER TEMPERATURE INFLUENCES

Abstract. On the basis of the carried out experimental and numerical studies, the mechanism of crack formation in the masonry of the face layer with flexible ties under temperature influences has been established.

Experimental studies were carried out for five years on a floor-high fragment of a building formed by external three-layer walls resting on a monolithic reinforced concrete slab.

Numerical studies were carried out using the author's specialized program for calculating masonry structures, which implements the finite element method, taking into account structural

nonlinearity. The program was verified by comparing the calculation results with the experimental data, as well as at the stage before the formation of cracks using the LIRA-SAPR program.

It is shown that, depending on the ratio of the tensile strength of the masonry along the vertical joints and the cut along the horizontal mortar joints, different variants of crack development are possible.

Vertical cracks, like expansion joints, reduce tensile and shear stresses. Cutting the masonry along the horizontal mortar joint at the base of the wall leads to a reduction in the length of the area of influence of the floor slab. Together, this leads to a decrease in the level of tensile and tangential stresses and damping of the crack propagation process.

At the top of the wall, the effect of the floor slab on the stress-strain state of the masonry is relatively small and the temperature deformations there are close to free. This made it possible to apply a simplified methodology for assessing the crack opening width.

A method is proposed for calculating the facing layer masonry for temperature effects and for assigning distances between vertical expansion joints.

Keywords: *three-layer walls with flexible ties, front layer of masonry, joint work of masonry and floor slabs, stress-strain state, thermal deformations, width estimation method opening cracks.*

Введение

Напряженно-деформированному состоянию (НДС) кладки лицевого слоя наружных стен при температурных воздействиях посвящено много исследований как у нас в стране [1-14, и др.], так и за рубежом [15-20 и др.]. Если большинство этих исследований ограничиваются нахождением предельных значений напряжений, при которых возможно образование трещин, то в ряде работ авторов статьи [13, 14 и др.] анализируется также изменение НДС кладки лицевого слоя с учетом образования трещин при температурных воздействиях.

В европейских странах конструктивное решение наружных стен, опирающихся на железобетонные плиты перекрытий, отличается от принятого в России. Кладка свешивается на несколько сантиметров с плиты и на эту же толщину торец плиты закрывается эффективным утеплителем. В России такая конструкция в большинстве регионов неприемлема в силу необходимости установки утеплителя толщиной от 15 до 20 см. В этой связи утеплитель располагают в отверстиях в плите перекрытия и торец плиты оказывается открытым и подверженным температурным колебаниям.

В большинстве работ зарубежных авторов, посвященных исследованию НДС кладки при температурно-влажностных воздействиях, кладка аппроксимируется изотропными конечными элементами (КЭ) типа балка-стенка. Плита, на которую опираются стены, задается балкой постоянного сечения. Температурная нагрузка прикладывается только к стене.

В работе российских авторов [6] анализируются приведенные в статье [15] исследования, а также положения ряда нормативных европейских документов. Авторы справедливо считают, что «...перенос зарубежных решений по устройству деформационных швов без адаптации к российским условиям неприемлем. При этом требуется проведение дополнительных исследований...».

В работах бельгийского автора [20] отмечается, что «...не существует единообразных правил определения расстояния между деформационными швами, принятых в Национальных приложениях ЕС 6. С научной точки зрения не может быть объяснено, почему расстояние между деформационными швами должно быть разным в соседних странах, таких как Бельгия, Нидерланды и Германия, поскольку климатические условия сопоставимы. ... Иногда расстояние принимается не более нескольких метров, в то время как для других зданий вертикальные швы располагаются каждые 20 м и более без видимых трещин. В большинстве аналитических и численных исследований, касающиеся расстояния между вертикальными деформационными швами, влияние зависящего от времени поведения кладки... пренебрегается и моделирование основывается на критериях без трещин. Эти предположения... приводят к нереалистичным значениям расстояния между деформационными швами...».

В работах [9-13 и др.] авторами настоящей статьи была показана необходимость учета

совместной работы кладки лицевого слоя с плитой перекрытия не только на опоре, но и с расположенной внутри помещения частью плиты, имеющей другую температуру.

В данной статье анализируется процесс образования трещин в лицевом слое, ширина их раскрытия и даются практические рекомендации по расчету.

Критерии обоснованности выбранных расчетных моделей и характеристик материалов

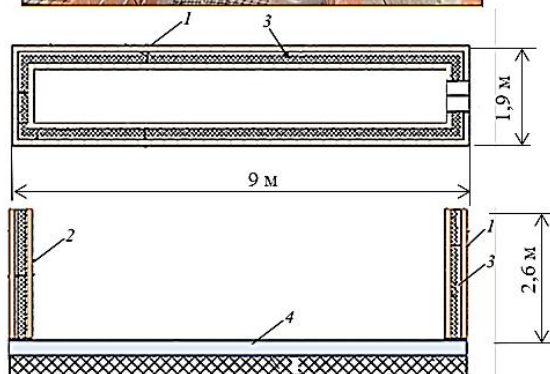


Рисунок 1 – Фрагмент здания: а – общий вид; б – возведение стен; в – план стен; г – разрез:
1, 2 – кладка лицевого и внутреннего слоев толщиной по 12 см; 3 – утеплитель 15 см с воздушным зазором 3 см;
4 – железобетонная плита [12]

В качестве критерия обоснованности выбранных расчетных моделей и характеристик материалов принимались результаты экспериментальных исследований, в том числе фрагмента здания (рисунок 1) [12], проводимых в течение пяти лет, его расчетов методом конечных элементов (МКЭ) по различным расчетным схемам с использованием объемных и плоских КЭ, варьированием их размеров и характеристиками материалов, а также результаты проводившихся натурных наблюдений строящихся и эксплуатируемых зданий с дефектами кладки лицевого слоя наружных стен [9, 10 и др.].

Ниже рассматриваются наружные стены, лицевой слой которых (1) соединен с внутренним (2) гибкими связями. Пространство между слоями заполнено утеплителем (3). Стены поэтажно опираются на монолитные железобетонные плиты перекрытий (4), торец которых является открытым (рисунок 1).

Численные исследования проводились с использованием авторской специализированной программы расчета каменных конструкций «КАМКОН», реализующей МКЭ с учетом конструктивной нелинейности [13, 14]. Верификация программы на стадиях до образования трещин проводилась сравнением полученных результатов с результатами экспериментальных и численных исследований с помощью программного комплекса ЛИРА-САПР, а с учетом образования трещин по экспериментальным данным.

В холодное время года в лицевом слое вследствие сдерживания свободных температурных

деформаций кладки железобетонной плитой в ней возникают горизонтальные растягивающие напряжения σ_x , способные вызвать вертикальные трещины. На рисунке 2 показаны трещины, возникшие в кладке продольных наружных стен экспериментального фрагмента.

Существуют два различных подхода к расчету каменной кладки с применением МКЭ. Первый из них основан на рассмотрении кладки в виде «макромодели», как гомогенной ортотропной среды с усредненными характеристиками. Жесткость КЭ задается эквивалентной жесткости кладки, а прочность оценивается по тому или иному критерию для плоского напряженного состояния.

При втором способе кладка рассматривается в виде «микромоделей», как кусочно-однородный материал с периодической внутренней структурой. Конечные элементы кирпича и раствора задаются отдельно.

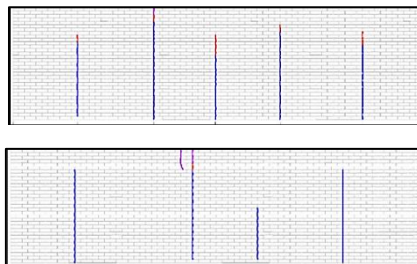


Рисунок 2 – Трещины в кладке лицевого слоя продольных наружных стен экспериментального фрагмента здания [12]

В работе Р. Lourenco [21], опубликованной еще в 1995 г., показано, что применение «микромоделей» позволяет получить хорошую сходимость с результатами эксперимента. Расчет с применением «макромоделей» позволил получить Р. Lourenco качественную картину с выделением области, где возможно образование трещин.

Несмотря на прогресс в развитии вычислительной техники, расчет с использованием «микромоделей», особенно в нелинейных расчетах, выполняется крайне редко для небольших фрагментов в исследовательских целях. Например, в работе О.В. Кабанцева [22] габариты фрагментов составляли 1×1 м при длине составляющих кладку кирпичей 25 см.

Расчет кладки, как гомогенной среды, позволяет получить результаты, достаточные для оценки несущей способности кладки, ее деформаций и характера образования трещин. Вместе с тем, применение указанной модели требует в ряде случаев учета размеров КЭ, поскольку при крупной разбивке сложно «поймать» пиковые значения напряжений и деформаций на участках концентрации напряжений и т.п. Особенно это важно при проверке кладки на возможность образования трещин.

В работе Н.С. Блохиной [23] показано, что учет физической нелинейности кладки позволяет уточнить результаты расчетов не более, чем на 11% при кратковременном приложении нагрузки. При этом, как показано С.В. Поляковым [24], полные деформации кладки при длительном нагружении значительно выше неупругих кратковременных и ими вообще можно пренебречь.

При выполнении численных исследований авторами физическая нелинейность принята несущественной по сравнению с конструктивной, обусловленной образованием трещин.

В работах Г.Г. Кашеваровой [25], В.Н. Деркача [26] показано, что учет ортотропии кладки также не приводит к существенному уточнению результатов расчета НДС кладки.

Во многих работах [27 и др.] задание трещины осуществляется посредством расшивки схемы по узлам, которые расположены вдоль линии распространения трещин. Этот подход авторы использовали и в программе «КАМКОН», где траектория развития трещин определяется алгоритмом программы и корректируется на каждом шаге в зависимости от угла наклона площадки главных растягивающих напряжений и от нарушения того или иного критерия прочности для кладки (рисунок 3).

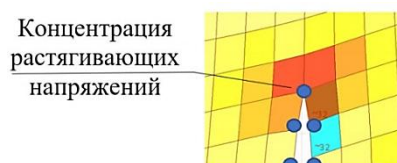


Рисунок 3 – Схема образования трещины

При оценке приоритета образования или развития существующих трещин, к которым относятся также незаполненные раствором вертикальные швы, к растягивающим напряжениям вводится коэффициент концентрации k .

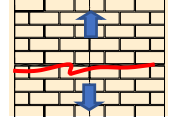
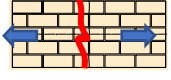
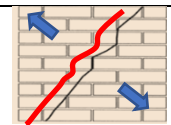
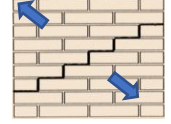
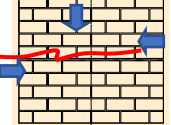
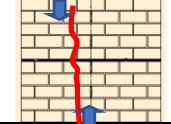
При закрытии трещины в узлах, лежащих по разным берегам трещины, производится объединение перемещений в направлении, препятствующем наложению противоположных берегов трещин один на другой.

В случае превышения критерия прочности на срез между двумя КЭ также добавляются узлы, однако между вновь образованными узлами и существовавшими ранее сохраняется односторонняя связь, работающая только на сжатие.

Критерии прочности кладки при плоском напряженном состоянии

В программе КАМКОН использованы апробированные экспериментами критерии не превышения напряжениями соответствующей прочности кладки по перевязанному или перевязанному сечениям (таблица 1).

Таблица 1 - Реализованные в программе КАМКОН критерии прочности

	Прочность на растяжение по перевязанному сечению, проходящему по горизонтальным швам $R_{t,z}$: $\sigma_z \leq R_{t,z}$
	Прочность на растяжение по перевязанному сечению, проходящему по вертикальным швам и кирпичу $R_{t,x1}$: $\sigma_x \leq R_{t,x1}$
	Прочность на растяжение по перевязанному сечению, проходящему по вертикальным швам и кирпичу $R_{t,x2}$: $\sigma_x \leq R_{t,x2}$
	Прочность на растяжение по наклонному перевязанному сечению, проходящему через кирпичи R_{w1} : $\sigma_w \leq R_{w1}$
	Прочность на растяжение по наклонному перевязанному сечению, проходящему по горизонтальным и вертикальным швам R_{w2} : $\sigma_w \leq R_{w2}$
	Прочность на срез по горизонтальным швам: $\tau \leq R_{sq} + 0,8\mu\sigma_0$
	Прочность кладки на срез по вертикальным швам и кирпичу: $\tau \leq R_{sq}$
σ_x – горизонтальные растягивающие напряжения; σ_z – вертикальные растягивающие напряжения; σ_w – главные растягивающие напряжения; σ_0 – напряжение сжатия; μ – коэффициент трения по шву кладки; n – коэффициент, зависящий от пустотности кирпича	

Кроме того, в критерии КАМКОН реализован критерий по допускаемой ширине раскрытия трещин.

Алгоритмом предусмотрено на каждом шаге приоритетное образование трещины, среза или разрушения в том конечном элементе, где процентное отношение нарушения прочности по одному из рассматриваемых критериев выше.

НДС кладки лицевого слоя трехслойных стен с гибкими связями

До образования трещин напряжения σ_x распределены в пределах так называемой активной зоны, граница которой может быть описана окружностью радиусом $R_{ак}$, равным половине длины стены L_x . Внутри этой границы напряжения распределены, практически, по треугольным эпюрам (рисунки 4,а, 4,б).

При высоте стены H , равной или большей половине расстояния между вертикальными деформационными швами L_x , напряжения σ_x в любом сечении, расположенном на высоте H_i , можно вычислить по формуле:

$$\sigma_x(H_i) = \sigma_x(H_0) \cdot (1 - 2 \cdot H_i / L_x). \quad (1)$$

Касательные напряжения τ в основании стены распределены по криволинейной эпюре с концентрацией напряжений по краям (рисунок 3,в). Коэффициент концентрации k_τ ,

определенный численным методом, может быть принят равным 1,4.

С учетом этого запишем:

$$\tau_{\max, \text{конц}} = k_{\tau} \cdot \tau_{\max} = k_{\tau} \cdot \sigma_{x, \max}. \quad (2)$$

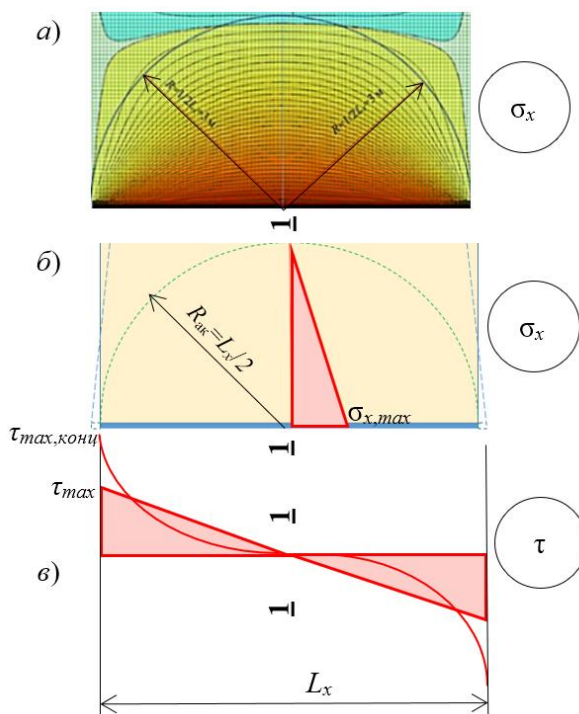


Рисунок 4– Напряжения в кладке лицевого слоя: а – изополя горизонтальных растягивающих напряжений σ_x ; б – идеализированная эпюра горизонтальных растягивающих напряжений σ_x ; в – эпюры касательных напряжений в основании стены

В сечении 1-1, проходящем по середине расстояния между деформационными швами, площадь эпюры напряжений σ_x равна площади эпюры касательных напряжений τ . Если заменить криволинейную эпюру τ треугольной той же площади, то из равенства их площадей следует:

$$0,5\tau_{\max} \cdot L_x/2 = 0,5\sigma_{x, \max} \cdot L_x/2; \quad (3)$$

$$\tau_{\max} = \sigma_{x, \max}.$$

Существует вероятность того, что в основании стены прочность кладки на срез по горизонтальному растворному шву со стороны вертикальных деформационных швов, где наблюдается концентрация касательных напряжений, будет превышена раньше, чем начнется образование вертикальных трещин.

Прочность кладки на срез по горизонтальным растворным швам зависит от коэффициента трения кирпича по раствору μ и уровня вертикальных напряжений σ_z и определяется по видоизмененной формуле Кулона:

$$\tau_{\max, \text{конц}} < R_{sq, \text{ult}} + 0,8n \cdot \mu \cdot \sigma_z, \quad (4)$$

где $\tau_{\max, \text{конц}}$ – максимальное значение касательных напряжений с учетом их концентрации;

$R_{sq, \text{ult}}$ – прочность срезу по горизонтальному растворному шву;

n – коэффициент, зависящий от наличия вертикальных пустот в кирпиче.

Обжатие собственным весом кладки высотой на один этаж не способно компенсировать возникающие при температурных воздействиях вертикальные растягивающие напряжения вблизи вертикальных деформационных швов (рисунок 5), однако на некотором расстоянии от них напряжения σ_z становятся сжимающими. Это способствует повышению прочности на срез и его затуханию по мере удаления от края стены.

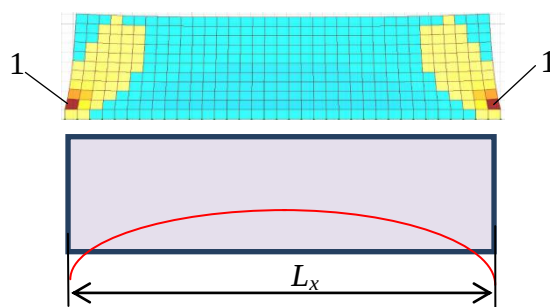


Рисунок 5 – Вертикальные напряжения σ_z : 1 – зоны положительных значений σ_z

В таблице 2 приведены мозаики горизонтальных напряжений и соответствующие им идеализированные схемы образования трещин по двум основным вариантам. По первому варианту максимальные величины напряжений $\sigma_{x,max}$ достигают прочности кладки на растяжение по вертикальному сечению $R_{t,ult}$ раньше, чем касательные напряжения $\tau_{max,конц}$ прочности кладки на срез по горизонтальному растворному шву.

При высоте активной зоны, превышающей высоту стены ($H_{акт} > H$), верх эпюр горизонтальных напряжений σ_x срезан и зеркально отображается, суммируясь с нижележащей частью эпюры (этап 1).

На втором этапе максимальные величины напряжений $\sigma_{x,max}$ превышают прочность кладки на растяжение. В вершине образовавшейся трещины наблюдается концентрация горизонтальных растягивающих напряжений, величины напряжений $\sigma_{x,конц}$ существенно превышают напряжения $\sigma_{x,max}$, что способствует дальнейшему развитию трещины. По мере развития вертикальной трещины происходит снижение уровня касательных напряжений $\tau_{max,конц}$.

При достаточном уровне температурной нагрузки вертикальная трещина достигает верха стены и разделяет кладку лицевого слоя на две части. Влияние образовавшейся трещины подобно влиянию вертикального деформационного шва. Уровни горизонтальных и касательных напряжений в основании стены $\sigma_{x,max}$ и $\tau_{max,конц}$ становятся существенно ниже начальных значений.

На третьем этапе при достаточном уровне температурной нагрузки возникают вторичные вертикальные трещины. Как правило, эти трещины не достигают верха стены.

При втором варианте касательные напряжения $\tau_{max,конц}$ достигают прочности кладки на срез раньше, чем горизонтальные напряжения $\sigma_{x,max}$ прочности кладки на растяжение $R_{t,ult}$:

$$\sigma_{x,max} < R_{t,ult};$$

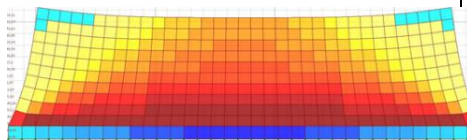
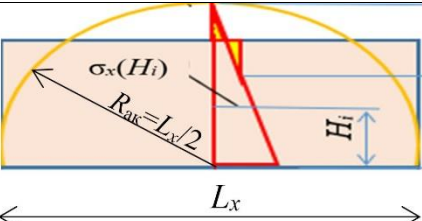
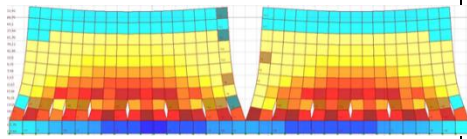
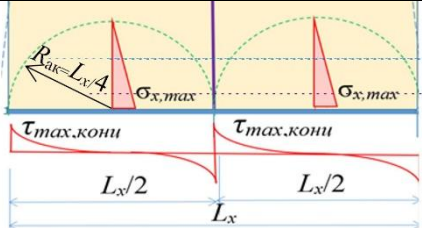
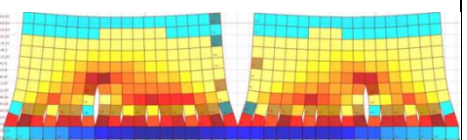
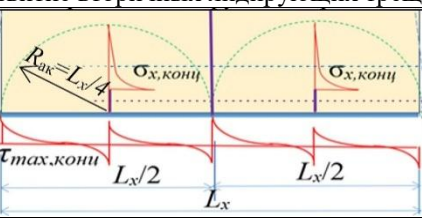
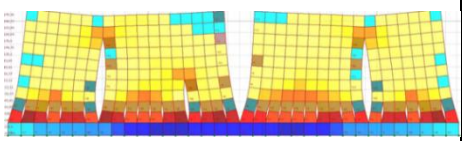
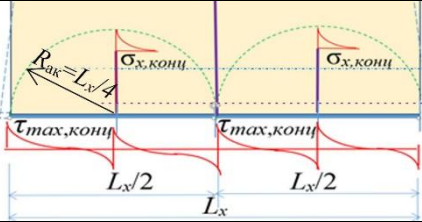
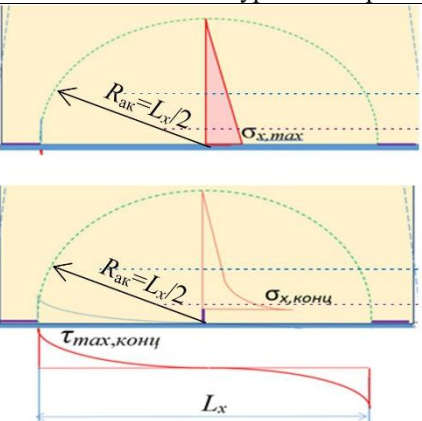
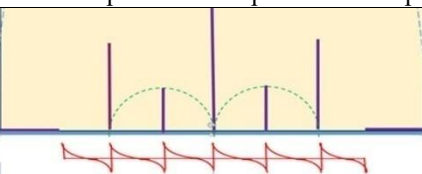
$$\tau_{max,конц} \geq R_{sq,ult} + 0,8n \cdot \mu \cdot \sigma_z.$$

Происходит срез кладки. По мере увеличения длины среза происходит сокращение длины участка стены L_x , совместно работающей с плитой перекрытия (таблица 1, вариант 2, этап 1) и соответственно уровней касательных и горизонтальных растягивающих напряжений. Кроме того, на границе среза растет уровень вертикальных напряжений, способствующих повышению прочности на срез (рисунок 4). Все это способствует затуханию дальнейшего среза кладки.

При дальнейшем росте температурной нагрузки возможно образование вертикальных трещин аналогично с первым вариантом.

Первая достигшая верха стены трещина подобна вертикальному деформационному шву, что позволяет оценить возможность образования вторичных трещин, принимая длину стены в два раза меньшей.

Таблица 2 - Схемы образования трещин в кладке лицевого слоя

Мозаики напряжений σ_x		Идеализированные эпюры напряжений	
Вариант 1. Этап 1 - Распределение напряжений до образования трещин			
		$\sigma_{x,max} < R_{t,ult}$ $\tau_{max,конц} < R_{sq,ult} + 0,8n \cdot \mu \cdot \sigma_z$ При $H < H_{акт} = 0,5 \cdot L_x$ $\sigma_x(H_i) = \sigma_{x,max} \cdot (1 - 2 \cdot H_i / L_x)$ При $H_i > 2H - 0,5L_x$ $H_i = 2 \cdot H - 0,5 \cdot L_x = \text{Const}$	
Этап 2 - Образование вертикальных трещин в основании стены и разделение лицевого слоя лидирующей (магистральной) вертикальной трещиной на две части			
		$\tau_{max,конц} < R_{sq,ult} + 0,8n \cdot \mu \cdot \sigma_z$	
Этап 3 - Развитие вторичных лидирующих трещин			
		$\tau_{max,конц} < R_{sq,ult} + 0,8n \cdot \mu \cdot \sigma_z$	
			
Вариант 2. Этап 1 - Первоначальный срез кладки. Сокращение участка совместной работы стены и плиты. Снижение высоты активной зоны и уровня напряжений σ_x			
		$\tau_{max,конц} \geq R_{sq,ult} + 0,8n \cdot \mu \cdot \sigma_z$	
Вариант 2. Этап 2 – Образование вертикальных трещин			
			

В работе Г.Г. Кашеваровой [28] выполнена оценка влияния неоднородности свойств каменной кладки на образование трещин при плоском напряженном состоянии. Показано, что при сохранении общего характера трещин их величина может отличаться. Подтверждением этому служат и результаты проведенного эксперимента на фрагменте здания (рисунок 2). При этом представляется интересным то, что в одной из стен фрагмента расстояние между двумя трещинами оказалось примерно в два раза выше, чем между остальными. Можно предположить, что при увеличении температурной нагрузки именно там образуется новая трещина.

Оценка ширины раскрытия трещин

Ниже рассмотрена идеализированная схема раскрытия трещины в кладке лицевого слоя на прямолинейном участке между двумя вертикальными деформационными швами (рисунок 6).

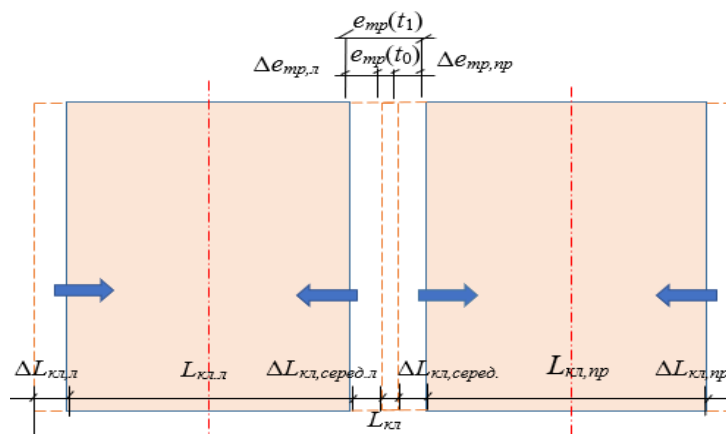


Рисунок 6 – Схема раскрытия трещины в лицевом слое при понижении температуры воздуха:

$e_{тр}(t_0)$ – начальная ширина раскрытия трещины;

$e_{тр}(t_1)$ – ширина раскрытия трещины после понижения температуры кладки

Если лицевой слой разделен на две части вертикальной трещиной, то при расстоянии между температурными швами не более 8 м длина каждой части равна высоте этажа либо незначительно ее превышает. В этом случае сверху стены влияние плиты на НДС кладки невелико и температурные деформации кладки там принимаем свободными. Приращение ширины раскрытия трещины равно:

$$\Delta e_{тр} = \alpha_t \cdot \Delta T (L_{кл,л} + L_{кл,п}) / 2.$$

Ширина раскрытия трещины $e_{тр}(t_1)$ после понижения температуры равна:

$$e_{тр}(t_1) = e_{тр}(t_0) + \Delta e_{тр},$$

где $e_{тр}(t_0)$ – первоначальная ширина раскрытия трещины. При симметричном расположении трещины получим:

$$e_{тр}(t_1) = e_{тр}(t_0) + \alpha_t \cdot \Delta T (L_{кл}) / 2,$$

где $L_{кл}$ – длина стены между вертикальными деформационными швами.

Назначение расстояний между вертикальными температурными швами

Расстояния между вертикальными деформационными швами в лицевом слое трехслойных стен с гибкими связями целесообразно назначать из соблюдения условий не превышения горизонтальными усилиями N от температурно-влажностных воздействий прочности лицевого слоя и связей при расчете по первой группе предельных состояний и недопустимости образования трещин при расчете по второй группе.

Расстояния между вертикальными деформационными швами не должны превышать значений, определяемых по эмпирической формуле:

$$L_x \leq N/(\beta \cdot A \cdot E \cdot \Delta t \cdot \alpha_t) + b,$$

где b , β – параметры, характеризующие материал кладки, учитывающие влияние температуры при возведении кладки и температуры плиты перекрытия в эксплуатационный период, солнечной радиации, концентрацию напряжений на опоре и вблизи проемов;

A – площадь вертикального сечения лицевого слоя, включаемая в работу с плитой перекрытия, принимаемая равной 0,8 м;

E – модуль деформаций кладки;

Δt – расчетная температура кладки лицевого слоя, назначаемая как разность температуры с момента замыкания конструкции (возведения кладки высотой на этаж) и температуры в рассматриваемый период времени;

α_t – коэффициент линейного расширения кладки;

N – горизонтальное усилие, определяемое для случая наступления предельного состояния в кладке и для случая образования первых трещин:

$$N(R_t) = R_t \cdot A;$$

$$N(\sigma_{t,cr}) = \gamma_{cr} \cdot \sigma_{t,cr} \cdot A,$$

где R_t – расчетное сопротивление кладки растяжению по горизонтали;

$\sigma_{t,cr}$ – напряжения в кладке на момент образования первых трещин, принимаемое равным $0,6 \cdot R_{t,ult}$;

$R_{t,ult}$ – временное сопротивление кладки растяжению по горизонтали;

γ_{cr} – коэффициент условий работы кладки при расчете по раскрытию трещин.

Выводы

1. Экспериментальные и численные исследования, выполненные с применением авторской программы «КАМКОН», в основу алгоритма которой заложена «макромодель» кладки с учетом конструктивной нелинейности, позволили установить механизм образования трещин в лицевом слое наружных стен при температурных воздействиях.

2. В основу механизма образования трещин положено представление о лидирующей (магистральной) трещине, разделяющей лицевой слой на всю высоту стены и которая подобно деформационному шву способствует снижению уровня касательных и растягивающих напряжений.

Развитие вторичных трещин возможно после повышения температурной нагрузки.

3. Граница распределения горизонтальных растягивающих напряжений, вызывающих вертикальные трещины, может быть описана окружность с радиусом, равным половине расстояния между вертикальными температурными швами за вычетом длины среза по растворным швам в основании стены. В пределах этой границы напряжения распределены по треугольной эпюре.

4. Вертикальные трещины на прямолинейных участках стен, заключенных между двумя температурными швами, образуются в холодное время года.

В теплое время года возможно образование трещин на углах стен при отсутствии там вертикальных деформационных швов.

5. Расстояния между вертикальными трещинами в идеализированной модели равны между собой.

Вследствие неоднородности кладки, вызванной в том числе плохо заполненными раствором вертикальными швами, выступающими в роли начальных трещин, расстояния между трещинами могут отличаться до 30%, что подтверждается натурными наблюдениями и экспериментальными данными.

Благодарности

Ушел из жизни Геннадий Исаакович Шапиро, крупный специалист, отдавший всю свою жизнь исследованию и разработке современных конструкций зданий. Он был полон творческих замыслов, готовил к публикации монографию. Эта статья является одной из последних, подготовленных с его участием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деркач В.Н., Демчук И.Е., Орлович Р.Б. Механизм повреждаемости несущей облицовки многослойных каменных стен // Строительство уникальных зданий и сооружений. №3 (54). 2017. С. 63-70.
2. Зимин С.С., Корсун В.И. Экспериментальные исследования температурных деформаций лицевого слоя многослойных наружных стен при одностороннем замораживании // Лолейтовские чтения-150. Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям. Под редакцией А.Г. Тамразяна. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Москва). 2018.
3. Орлова Н.С., Улыбин А.В. Проблемы расчета кирпичной облицовки облегченных стен на температурные воздействия // В сб.: Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы V Международной научно-практической конференции: Комсомольский-на-Амуре государственный университет. 2018. С. 230-234.
4. Орлович Р.Б., Деркач В.Н., Зимин С.С. Повреждение каменного лицевого слоя в зоне сопряжения с железобетонными перекрытиями // Инженерно-строительный журнал. 2015. №8(60). С. 30-37.
5. Орлович Р.Б., Деркач В.Н. Сопряжение лицевого слоя сплошных каменных стен с плитами перекрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2011. №11. С. 60-63.
6. Орлович Р.Б., Зимин С.С., Рубцов Н.М. О работе облицовочного каменного слоя наружных стен каркасно-монолитных зданий при силовых воздействиях // Строительство и реконструкция. 2014. № 4 (54). С. 26-30.
7. Шапиро Г.И., Коровкин В.С. К вопросу о напряженно-деформированном состоянии жилых и общественных зданий при температурных воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 12. С. 5-8.
8. Ищук М.К., Зуева А.В. Исследование напряженно-деформированного состояния лицевого слоя из кирпичной кладки при температурно-влажностных воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 3. С. 40-43.
9. Ищук М. К. Анализ напряженно-деформированного состояния кладки лицевого слоя наружных стен // Жилищное строительство. 2008. № 4. С. 23-28.
10. Ищук М.К. Отечественный опыт возведения зданий с наружными стенами из облегченной кладки // РиФ «Стройматериалы». М., 2009. 369 с.
11. Ищук М.К. Исследование напряженно-деформированного состояния кладки лицевого слоя наружных стен с гибкими связями при температурно-влажностных воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2018. №1 С. 72-76.
12. Ищук М.К. Экспериментальные исследования НДС кирпичной кладки лицевого слоя наружных стен с гибкими связями на температурно-влажностные воздействия // Вестник НИЦ Строительство. 2018. № 3(18). С. 61-78.
13. Ищук М.К., Ищук В.Л. Численные исследования прочности и деформаций наружных стен с лицевым слоем из каменной кладки с гибкими связями при температурных воздействиях // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. №2. С. 60-73.
14. Ищук М.К., Ищук В.Л. Расчет каменных стен при сдвиге и растяжении // Промышленное и гражданское строительство. 2020. №8. С. 31-42.
15. Schubert P. Reißfreie Wandlänge von tragenden, senkrecht zu den Lagerfugen belasteten Mauerwerkswänden aus Porenbetonsteinen. Aachen // Forschungsbericht : Institut für Bauforschung, 1999. № F. 595 p.
16. Schubert P. Vermeiden von schädlichen Rissen in Mauerwerkbauteilen // Mauerwerk-Kalender. Berlin, 1996. P. 621-651.
17. Brameshuber W., Schubert P., Schmidt U, Hannawald J. Reißfreie Wandlänge von Porenbeton-Mauerwerk // Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin Mauerwerk 10 (2006), Heft 4. S. 132-139.
18. Martens D.R.W. New approach for spacing of movement joints in reinforced and unreinforced masonry veneer walls Part 1 (Neue Bemessungsmethode für die Abstände von Dehnungsfugen in bewehrten und unbewehrten Verblendmauerwerksschalen Teil 1: Unbewehrtes Mauerwerk): Unreinforced masonry / Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, Mauerwerk 20 (2016). Heft 4.

19. Martens D.R.W. New Method for determining spacing of movement joints in solid unreinforced veneer walls // *Proceedings of the 16th IB2MaC. Padua, 2016. P. 255–262.*
20. Martens D. R.W. Typical masonry wall enclosures in Belgium and The Netherlands // *Enclosure masonry wall systems worldwide // CIB W023 – Wall structures. Berlin, 2011. P. 13–14.*
21. Lourenco Paulo B. Two approaches for the analysis of masonry structures: Micro and macro modeling // *Heron. 1995. Vol. 40. P. 313 – 340.*
22. Кабанцев О.В. Механика пластического деформирования и разрушения каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния в сб. *Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия под редакцией А.Г. Тамразяна, Д.Г. Копаницы* : МГСУ, 2016. С. 154–165.
23. Блохина Н.С. Расчет конструкций из анизотропных материалов с применением физической нелинейности // *Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 1. С. 3–5.*
24. Поляков С.В. Длительное сжатие каменной кладки. Научное сообщение. М.: Стройиздат, 1959. 183 с.
25. Кашеварова Г.Г., Труфанов Н.А. Численное моделирование деформирования и разрушения системы «здание-фундамент». Екатеринбург-Пермь: УрО РАН, 2005. 225 с.
26. Деркач В.Н. Деформационные характеристики каменной кладки в условиях плоского напряженного состояния // *Строительство и реконструкция. 2012. №2(40). С. 3 – 10.*
27. Колчунов В.И., Мартыненко Д.В. Прочность и деформативность сборно-монолитных платформенных стыков панельных зданий // *Строительство и реконструкция. 2019. №2 (82). С. 26-34.*
28. Кашеварова Г.Г. Программная реализация алгоритма учета статистического разброса механических свойств материалов // *Вестник ПНИПУ, Строительство и архитектура. 2012. №1. С. 133–141.*

REFERENCES

1. Derkach V.N., Demchuk I.E., Orlovich R.B. Mekhanizm povrezhdaemosti nenesushchej oblicovki mnogoslojnyh kamennyh sten [Damage mechanism of non-bearing facing of multilayer masonry walls] *Construction of unique buildings and structures. No. 3 (54). 2017.S. 63-70. (rus)*
2. Zimin S.S., Korsun V.I. Eksperimental'nye issledovaniya temperaturnyh deformacij licevogo sloya mnogoslojnyh naruzhnyh sten pri odностороннем zamorazhivanii [Experimental studies of temperature deformations of the face layer of multilayer external walls during unilateral freezing] *Loleitovskie chteniya-150. Sovremennye metody rascheta zhelezobetonnyh i kamennyh konstrukcij po predel'nyh sostoyaniyam. Pod redakciej A.G. Tamrazyana. Nacional'nyj issledovatel'skij Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet (Moskva) [Loleitovskie readings-150. Modern methods for calculating reinforced concrete and masonry structures by limiting states. Edited by A.G. Tamrazyan. National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow).] 2018. (rus)*
3. Orlova N.S., Ulybin A.V. Problemy rascheta kirpichnoj oblicovki oblegchennyh sten na temperaturnye vozdejstviya [Problems of calculating brick cladding of lightweight walls on temperature effects] *V sb.: Regional'nye aspekty razvitiya nauki i obrazovaniya v oblasti arhitektury, stroitel'stva, zemleustrojstva i kadaстров v nachale III tysyacheletiya: materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: Komsomol'skij-na-Amure gosudarstvennyj universiteta [In the collection: Regional aspects of the development of science and education in the field of architecture, construction, land management and cadastres at the beginning of the III millennium: materials of the V International scientific and practical conference: Komsomolsk-on-Amur State University] 2018. S. 230-234. (rus)*
4. Orlovich R.B., Derkach V.N., Zimin S.S. Povrezhdenie kamennogo licevogo sloya v zone sopryazheniya s zhelezobetonnyimi perekrytiyami // *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal [Damage to the brick face layer in the zone of conjugation with reinforced concrete floors] Engineering and construction journal. 2015. No. 8 (60). S. 30–37.*
5. Orlovich R.B., Derkach V.N. Sopryazhenie licevogo sloya sploshnyh kamennyh sten s plitami perekrytij [Conjugation of the face layer of solid stone walls with floor slabs] *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2011. No. 11. S. 60-63. (rus)*
6. Orlovich R.B., Zimin S.S., Rubtsov N.M. O rabote oblicovochного kamennogo sloya naruzhnyh sten karkasno-monolitnyh zdaniy pri silovyh vozdejstviyah [On the work of the facing stone layer of the outer walls of frame-monolithic buildings under power influences] *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2014. No. 4 (54). S. 26-30. (rus)*
7. Shapiro G.I., Korovkin V.S. K voprosu o napryazhenno-deformirovannom sostoyanii zhilyh i obshchestvennyh zdaniy pri temperaturnyh vozdejstviyah [On the question of the stress-strain state of residential and public buildings under temperature influences] *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2008. No. 12. S. 5-8. (rus)*
8. Ishchuk M.K., Zueva A.V. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya licevogo sloya iz kirpichnoj kladki pri temperaturno-vlazhnostnyh vozdejstviyah [Investigation of the stress-strain state of the facing layer of brickwork under temperature and humidity influences] *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2007. No. 3. P. 40-43. (rus)*
9. Ishchuk M.K. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kladki licevogo sloya naruzhnyh sten [Analysis of the stress-strain state of the facing layer of the outer walls] *Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2008. No. 4. S. 23-28. (rus)*
10. Ischuk M.K. Otechestvennyj opyt vozvedeniya zdaniy s naruzhnymi stenami iz oblegchennoj kladki

[Domestic experience in the construction of buildings with external walls from lightweight masonry] *RiF "Stroimaterialy"*, M. 2009. 369 p. (rus)

11. Ishchuk M.K. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kladki licevogo sloya naruzhnyh sten s gibkimi svyazami pri temperaturno-vlazhnostnyh vozdeystviyah [Investigation of the stress-strain state of the masonry of the front layer of external walls with flexible ties under temperature and humidity influences] *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2018.No. 1 S. 72-76. (rus)

12. Ishchuk, M.K. Eksperimental'nye issledovaniya NDS kirpichnoj kladki licevogo sloya naruzhnyh sten s gibkimi svyazami na temperaturno-vlazhnostnye vozdeystviya [Experimental studies of the stress-strain state of brickwork of the front layer of external walls with flexible ties on temperature and humidity effects] *Vestnik NITs Stroitel'stvo*. 2018. No. 3 (18). S. 61-78. (rus)

13. Ischuk M.K., Ishchuk V.L. CHislennye issledovaniya prochnosti i deformacij naruzhnyh sten s licevym sloem iz kamennoy kladki s gibkimi svyazami pri temperaturnykh vozdeystviyah [Numerical studies of the strength and deformation of external walls with a facing layer of masonry with flexible ties under temperature influences] *Vestnik NITs Stroitel'stvo*. 2019. No. 2. S. 60–73. (rus)

14. Ishchuk M.K., Ishchuk V.L. Raschet kamennyh sten pri sdvige i rastyazhenii [Calculation of stone walls in shear and tension] *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020. No. 8. S. 31-42. (rus)

15. Schubert P. Reißfreie Wandlänge von tragenden, senkrecht zu den Lagerfugen belasteten Mauerwerkswänden aus Porenbetonsteinen. Aachen // *Forschungsbericht : Institut für Bauforschung*, 1999. № F. 595 p.

16. Schubert P. Vermeiden von schädlichen Rissen in Mauerwerkbauteilen // *Mauerwerk-Kalender*. Berlin, 1996. P. 621–651.

17. Brameshuber W., Schubert P., Schmidt U, Hannawald J. Reißfreie Wandlänge von Porenbeton-Mauerwerk // *Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin Mauerwerk* 10 (2006), Heft 4, s. 132-139.

18. Martens D.R.W. New approach for spacing of movement joints in reinforced and unreinforced masonry veneer walls Part 1 (Neue Bemessungsmethode für die Abstände von Dehnungsfugen in bewehrten und unbewehrten Verblendmauerwerksschalen Teil 1: Unbewehrtes Mauerwerk): Unreinforced masonry / *Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Mauerwerk* 20 (2016). Heft 4.

19. Martens D.R.W. New Method for determining spacing of movement joints in solid unreinforced veneer walls // *Proceedings of the 16th IB2MaC. Padua*, 2016. P. 255–262.

20. Martens D. R.W. Typical masonry wall enclosures in Belgium and The Netherlands // *Enclosure masonry wall systems worldwide // CIB W023 – Wall structures*. Berlin, 2011. P. 13–14.

21. Lourenco Paulo B. Two approaches for the analysis of masonry structures: Micro and macro modeling // *Heron*. 1995. Vol. 40. P. 313 – 340.

22. Kabancev O.V. Mehanika plasticheskogo deformirovaniya i razrusheniya kamennoy kladki v usloviyah dvuhosnogo napryazhennogo sostoyaniya [Mechanics of plastic deformation and fracture of masonry under biaxial stress conditions] v sb. *Sovremennye problemy rascheta zhelezobetonnykh konstrukcij, zdaniy i sooruzhenij na avarijnye vozdeystviya pod redakciej A.G. Tamrazjana, D.G. Kopanicy* [in Sat. *Modern problems of calculating reinforced concrete structures, buildings and structures for emergency impacts edited by A.G. Tamrazyana D.G. Kopanitsy*] MGSU, 2016. S. 154–165. (rus).

23. Blokhina N.S. Raschet konstruksii iz anizotropnykh materialov s primeneniem fizicheskoi nelineinosti // *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. [Calculation of structures made of anisotropic materials using physical nonlinearity] *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2012. No. 1. P. 3-5. (rus)

24. Polyakov S.V. Dlitel'noe szhatie kamennoy kladki. *Nauchnoe soobshchenie*. [Prolonged compression of masonry]. *Nauchnoe soobshchenie*. [Scientific communication]. M.: Stroyizdat, 1959. 183 p. (rus)

25. Kashevarova G.G., Trufanov N.A. Chislennoe modelirovanie deformirovaniya i razrusheniya sistemy «zдание-fundament» [Numerical modeling of deformation and destruction of the building-foundation system] Ekaterinburg-Perm': UrO RAN, 2005. 225 s. (rus)

26. Derkach V.N. Deformacionnye harakteristiki kamennoy kladki v usloviyah ploskogo napryazhennogo sostoyaniya [Deformation characteristics of masonry in the plane stress state] *Building and reconstruction*. 2012. No. 2 (40). S. 3 – 10. (rus)

27. Kolchunov V.I., Martynenko D.V. Prochnost' i deformativnost' sborno-monolitnyh platformennyh stykov panel'nyh zdaniy [The strength and deformability of precast-monolithic platform joints of panel buildings] *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2019. Vol. 82. No. 2. Pp. 26-34. (rus)

28. Kashevarova G.G. Programmaya realizatsiya algoritma ucheta statisticheskogo razbrosa mekhanicheskikh svoystv materialov [The program for implementing the algorithm for accounting for the statistical dispersion of the mechanical properties of materials] *Bulletin of PNIPU, Construction and Architecture*. №1. 2012. S. 133–141. (rus)

Информация об авторах:

Ищук Михаил Карпович

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, заведующий лабораторией реконструкции уникальных каменных зданий и сооружений.

E-mail: kamkon@ya.ru

Ищук Вячеслав Леонидович

Бизнес-студия «КОНФИГУРАТОР», г. Москва, Россия,
ведущий программист.

E-mail: slava_1c@mail.ru

Шапиро Геннадий Исаакович

ООО «Техрекон», г. Москва, Россия,
главный конструктор ООО «Техрекон», инженер.

E-mail: g-shapiro@mail.ru

Information about authors:

Ishchuk Mikhail K.

Reserch Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Kucherenko, Moscow, Russia,
candidate of technical science, head of the laboratory for reconstruction of unique masonry buildings and structures.

E-mail: kamkon@ya.ru

Ishchuk Vyacheslav L.

CONFIGURATOR Business Studio, Moscow, Russia,
leading Programmer.

E-mail: slava_1c@mail.ru

Shapiro Gennady I.

LLC Techrecon, Moscow, Russia,
chief constructor Techrecon LLC, engineer.

E-mail: g-shapiro@mail.ru