

Расчет каменных стен при сдвиге и растяжении

Михаил Карпович ИЩУК, кандидат технических наук, зав. лабораторией, e-mail: kamkon@yandex.ru
ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», 109428 Москва, 2-я Институтская ул., 6

Вячеслав Леонидович ИЩУК, ведущий программист, e-mail: slava_1c@mail.ru
Бизнес-студия «КОНФИГУРАТОР», 115093 Москва, Партийный пер., 1 корп. 11

Аннотация. Рассмотрены основные подходы к расчету методом конечных элементов каменной кладки при плоском напряженном состоянии в областях отрыва и сдвига. Показано, что расчет с представлением кладки в виде микромоделей, когда задаются отдельно конечные элементы кирпича и раствора и соединяющих их интерфейсных элементов, позволяет получить достоверную картину образования трещин. В большинстве случаев расчета кладки с представлением ее в виде макромоделей, когда задается произвольная разбивка конструкции на конечные элементы с усредненными деформационными и прочностными характеристиками, удалось получить лишь качественную картину с указанием области возможного образования трещин. Расчет кладки с представлением ее в виде микромоделей применяется в основном в исследовательских целях. Более широко используется комбинированный двухуровневый метод, когда свойства кладки исследуются на ограниченном в габаритах фрагменте в виде микромоделей, а затем этими свойствами наделяется кладка всей конструкции, рассматриваемая уже как макромоделю. Авторами разработана специализированная программа расчета каменных конструкций КАМКОН, в которой кладка представлена в качестве макромоделей. В программе реализован метод конечных элементов с учетом конструктивной нелинейности. Учитываются особенности работы каменной кладки, такие как, например, качество заполнения вертикальных швов раствором. Для проверки прочности кладки и допустимой ширины раскрытия трещин используется комплексный критерий. Верификация программы произведена на основе сравнения результатов расчетов с данными экспериментов.

Ключевые слова: каменная кладка, плоское напряженное состояние, метод конечных элементов, алгоритм расчета, численные методы, температурно-влажностные деформации, критерии прочности кладки.

CALCULATION OF MASONRY WALLS IN SHEAR AND TENSION

Mikhail K. ISHCHUK, e-mail: kamkon@ya.ru

Reserch Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V. A. Kucherenko, Research Center of Construction, 2-ya Institutetskaya ul., 6, Moscow 109428, Russian Federation

Vyacheslav L. ISHCHUK, e-mail: slava_1c@mail.ru

CONFIGURATOR Business Studio, Partiyny per., 1, korp. 11, Moscow 115093, Russian Federation

Abstract. The article discusses the main approaches to calculating FEM of masonry in shear and tension. Shows that the calculation with the presentation of masonry in the form of micromodels, when separately required brick-elements, mortar-elements and interface-elements, allows you to get a reliable picture of cracking. As a result, all the necessary data were obtained in the form of macromodels, when the necessary changes in the FE design were obtained, taking into account the averaged deformation and strength evidence, which led to an extremely high-quality picture with an indication of the area of possible cracking. The implementation of these technologies in micromodels is limited. For wider application, a combined two-level method is used, in which the properties of the masonry are investigated in fragments of limited size in the form of micromodels, as well as in the properties of the masonry of the entire structure, which can be seen already in the form of macromodels.

Key words: masonry structure calculation program, finite element method, calculation algorithm, numerical methods, temperature-moisture deformation, shear, masonry strength, crack width.

Введение

Существуют два различных подхода к расчету каменной кладки с применением метода конечных элементов. Первый из них основан на рассмотрении кладки в виде макромоделей как однородной ортотропной среды с усредненными характеристиками. Жесткость конечного элемента задается эквивалентной жесткостью

кладки, а прочность зависит от направления и знака усилия. При втором способе кладка рассматривается в виде микромоделей как кусочно-однородный материал с периодической внутренней структурой. Конечные элементы кирпича (камня) и раствора задаются отдельно.

В работе P. Lourenco [1], опубликованной в 1995 г., дано срав-

нение обоих методов, где автор показывает, что применение микромоделей позволило получить хорошую сходимость с результатами эксперимента. Вместе с тем он отмечает, что данная модель требует больших затрат машинного времени и непригодна для расчета больших конструкций. Расчет с применением макромоделей позволил получить качественную

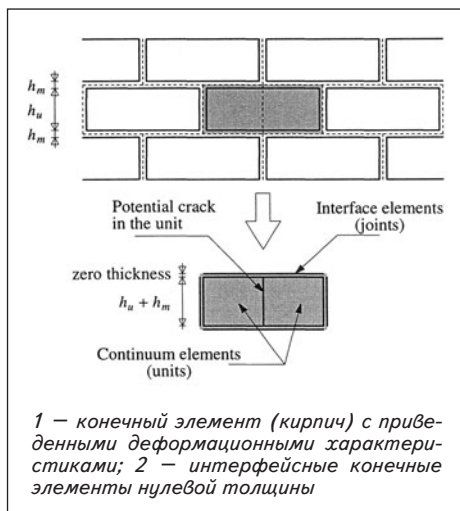


Рис. 1. Фрагмент конечно-элементной схемы микромодел в работе Р. Лоуэнсо [1]

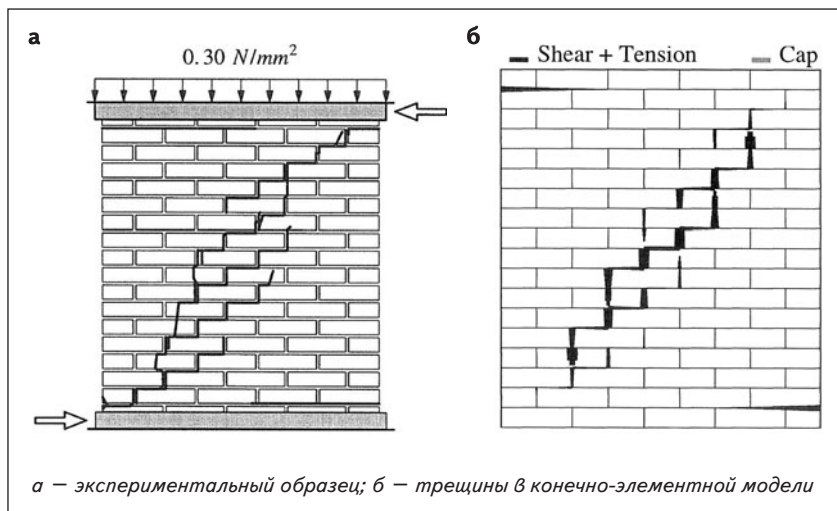


Рис. 2. Сравнение результатов расчета стенки на сдвиг с экспериментом [1]

картину с выделением области, где возможно образование трещин. Несмотря на прогресс в развитии вычислительной техники, расчет с использованием микромодел и сегодня представляет определенные сложности.

В работах основоположников науки по каменным конструкциям, например С. В. Полякова [2], показано, что вертикальные деформации каменной кладки при ее сжатии определяются в основном деформациями, развивающимися по контакту кирпича и раствора вследствие неровности и неоднородности растворной постели. В частности, это является причиной того, что кирпич при сжатии кладки разрушается преимущественно от среза и изгиба, что учитывается в формуле Л. И. Онищика при расчете кладки при одноосном сжатии [3, 4]. В этой связи задание модуля деформаций раствора в швах кладки в микромодел равным модулю деформаций раствора, полученному при испытании растворных призм, даст завышенный результат. В этом случае можно пойти путем рассмотрения растворного шва как некоего интерфейсного элемента нулевой толщины, которому заданы приведенные

прочностные и деформационные характеристики при сжатии, сдвиге и отрыве, как было сделано в работе [1]. При этом габариты конечного элемента — кирпича включали в себя толщину растворных швов, а его модули упругости и сдвига приводились с учетом соотношения жесткости кирпича и раствора, а также их толщины (рис. 1).

Расчет кладки на сдвиг показал удовлетворительное совпадение результатов с экспериментом (рис. 2).

В статье О. В. Кабанцева [5] для оценки работы кладки на перекос была также использована микромодел. При этом кладка задавалась тремя видами конечных элементов — кирпича, раствора и интерфейсного элемента нулевой толщины (рис. 3).

В работах С. А. Капустина и Г. Г. Кашеваровой для расчета каменной кладки используется двухуровневая модель [6, 7]. На нижнем уровне исследуется фрагмент кладки, образованный небольшим количеством кирпичей и растворных швов, а затем всей конструкции присваиваются полученные для этого фрагмента деформационные и прочностные характеристики. Сравнение ре-

зультатов расчета с экспериментом показало хорошее совпадение у обоих авторов.

Следует отметить, что прочностные и особенно деформационные характеристики кладки имеют большой разброс даже в случае изготовления кладки из одних и тех же материалов.

В работе [4] анализируется влияние качества кладки на ее прочность при сжатии. Показано, что прочность кладки может различаться в 1,5 раза и более в зависимости от квалификации каменщика, условий выполнения работы (зимняя кладка, кладка в сухую погоду и т.п.), вида и качества материалов, характера приложения нагрузки и др.

В статье Г. Г. Кашеваровой анализируется влияние разброса свойств кладки на ее прочность и характер образования трещин при сдвиге [8], откуда видно, что вследствие неоднородности кладки, например при сдвиге, можно говорить только о качественной картине напряженно-деформированного состояния и характера образования трещин.

В работе Н. С. Блохиной [9] показано, что учет нелинейной работы кладки дает уточнение в конечном результате не более



Рис. 3. Фрагмент конечно-элементной схемы микромоде-ли в работе О. В. Кабанцева [5]

чем на 11 %. В работах Г. Г. Кашеваровой [7] и В. Н. Деркача [10] показано, что учет ортотропии кладки также не приводит к существенному уточнению результатов расчета.

Преимуществом задания кладки макромоделью является возможность создания более крупной и гибкой сетки конечных элементов, не привязанной к относительно небольшим размерам кирпича и растворных швов. Не претендуя на особую точность, расчет кладки как однородной среды позволяет получить результаты, достаточные для оценки несущей способности кладки, ее деформаций и характера образования трещин.

Применение указанной модели требует в ряде случаев учета размеров конечных элементов, поскольку при крупной разбивке можно не установить пиковые значения напряжений и деформаций на участках концентрации напряжений и т. п. Особенно это важно при проверке кладки на возможность образования трещин.

Далее в статье приведены результаты расчетов по разработанной авторами специализированной программе расчета каменных конструкций КАМКОН.

В программе реализован метод конечных элементов с уче-

том конструктивной нелинейности. Физическая нелинейность считается несущественной по сравнению с эффектом трещинообразования. Расчет производится выбранным решателем СЛАУ. По умолчанию установлен наиболее оптимальный метод решения — оптимизированный итерационный метод Гаусса—Зейделя. Настройки этого метода (максимальное количество итераций, число Epsilon и множитель порядка значений матрицы) доступны для управления пользователем. Для расчета небольших систем можно использовать и другие методы: метод Гаусса—Жордана, метод Крамера, метод релаксации [11–15]. Для контроля над процессом включаются комментарий действий алгоритма и выдача в табличном виде посчитанных локальных и глобальных матриц жесткости для последующего анализа и сохранения в любом доступном формате.

Описание программы КАМКОН

Кладка моделируется ортотропным телом с двумя характерными направлениями — вдоль и поперек горизонтальных растворных швов. Программой предусмотрено применение различных критериев, определяющих предельное состояние в конечном

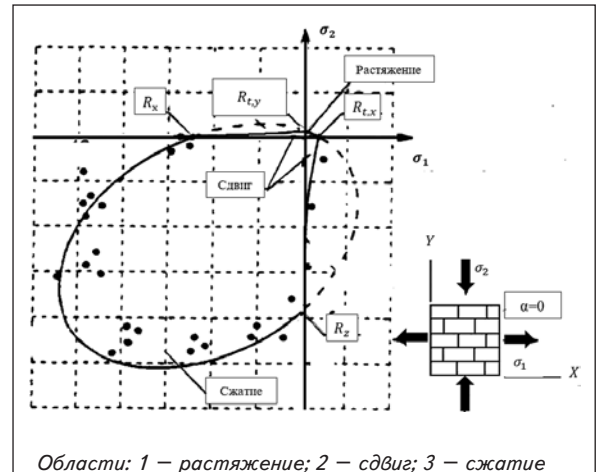


Рис. 4. Граничные кривые критерия прочности Г. А. Гениева [16]

элементе либо по прочности, либо по предельной ширине раскрытия трещины. Одним из заложенных в алгоритм программы критериев является критерий прочности Г. А. Гениева при плоском напряженном состоянии [16].

В области плоского напряженного состояния возможны следующие механизмы разрушения.

Разрушение от раздробления (см. рис. 4, область «Сжатие»), проявляющееся при одноосном или двухосном сжатии:

$$\left(\frac{\cos^2 \alpha}{R_x} + \frac{\sin^2 \alpha}{R_z} \right) \sigma_1 + \frac{\sigma_1 \sigma_2}{R_x R_z} + \left(\frac{\sin^2 \alpha}{R_z} + \frac{\cos^2 \alpha}{R_x} \right) \sigma_2 + 1 = 0, \quad (1)$$

где R_x, R_z — пределы прочности при сжатии соответственно по горизонтали и вертикали; σ_1, σ_2 — главные нормальные напряжения; α — угол, составляемый направлением большего главного нормального напряжения σ_1 с горизонтальной осью x .

Разрушение от отрыва (см. рис. 4, область «Растяжение»), проявляющееся при одноосном или двухосном растяжении:

$$\left(\frac{\cos^2 \alpha}{R_{t,x}} + \frac{\sin^2 \alpha}{R_{t,z}} \right) \sigma_1 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{R_{t,x} R_{t,z}} + \left(\frac{\sin^2 \alpha}{R_{t,z}} + \frac{\cos^2 \alpha}{R_{t,x}} \right) \sigma_2 - 1 = 0, \quad (2)$$

где $R_{t,x}$, $R_{t,z}$ – пределы прочности при растяжении соответственно по горизонтали и вертикали.

Разрушение от сдвига (см. рис. 4, область «Сдвиг») происходит в области смешанных двухосных напряжений либо по горизонтальным раствором швам, либо по ступенчатой линии, направление которой зависит от соотношения между главными напряжениями и от углов наклона главных осей:

$$\sigma_1^2 - 2(1 + \mu^2)\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 + 2\mu(R_{sq,x} + R_{sq,z})(\sigma_1 + \sigma_2) + 2(R_{sq,x} - R_{sq,z})(\sin 2\alpha - \mu \cos 2\alpha)(\sigma_1 - \sigma_2) - 4R_{sq,x}R_{sq,z} = 0, \quad (3)$$

где $R_{sq,x}$, $R_{sq,z}$ – пределы прочности при сдвиге соответственно по горизонтали и вертикали; μ – коэффициент трения.

Вместе с тем далее будет показано, что более точные результаты были получены при использовании созданного для расчетов при плоском напряженном состоянии каменной кладки критерия КАМКОН. По сути, критерий КАМКОН – это совокупность условий прочности кладки при отдельных простых случаях нагружения, дополненный введением коэффициентов концентрации напряжений на концах трещин и предельной шириной раскрытия трещины (табл. 1).

В критерии КАМКОН использованы апробированные экспериментами критерии непревышения напряжениями соответствующей прочности кладки по перевязанному или неперевязанному сечению, значения которых могут быть взяты из таблиц СП 15.13330.2012 «СНиП II-22-81 Каменные и армокаменные конструкции».

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

1. Критерии, реализованные в программе КАМКОН

Критерии прочности кладки	
	<p>Прочность при растяжении по неперевязанному сечению, проходящему по горизонтальным раствором швам $R_{t,z}$:</p> <p>$\sigma_z \leq R_{t,z}$;</p> <p>σ_z – вертикальные растягивающие напряжения</p>
	<p>То же, по перевязанному сечению, проходящему по вертикальным раствором швам и кирпичу $R_{t,x1}$:</p> <p>$\sigma_x \leq R_{t,x1}$;</p> <p>σ_x – горизонтальные растягивающие напряжения</p>
	<p>То же, $R_{t,x2}$:</p> <p>$\sigma_x \leq R_{t,x2}$;</p> <p>σ_x – горизонтальные растягивающие напряжения</p>
	<p>Прочность при растяжении по наклонному перевязанному сечению, проходящему через кирпичи R_{w1}:</p> <p>$\sigma_w \leq R_{w1}$;</p> <p>σ_w – главные растягивающие напряжения</p>
	<p>То же, проходящему по горизонтальным и вертикальным раствором швам R_{w2}:</p> <p>$\sigma_w \leq R_{w2}$;</p> <p>σ_w – главные растягивающие напряжения</p>
	<p>Прочность на срез по горизонтальным раствором швам: $\tau \leq R_{sq} + 0,8n\mu\sigma_0$;</p> <p>$\mu$ – коэффициент трения по шву кладки;</p> <p>σ_0 – напряжение сжатия;</p> <p>n – коэффициент, принимаемый равным 1,0 для кладки из полнотелого кирпича и 0,5 – для кирпича с вертикальными пустотами</p>
	<p>То же, по вертикальным раствором швам и кирпичу:</p> <p>$\tau \leq R_{sq}$,</p>
Критерий по допустимой ширине раскрытия трещины: $\delta_{cr} \leq \delta_{cr,ult}$	

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

$$\beta = \max \left\{ \begin{array}{l} \sigma_z / R_{t,z} \\ \sigma_x / R_{t,x1} \\ \sigma_x / R_{t,x2} \\ \sigma_w / R_{t,w1} \\ \sigma_w / R_{t,w2} \\ \sigma_w / R_{t,w2} \\ \tau / (R_{sq} + 0,8n\mu\sigma_0) \\ \tau / R_{sq} \end{array} \right. \quad (4)$$

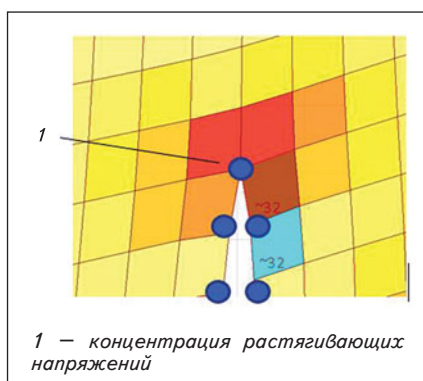


Рис. 5. Схема образования трещины

Образование трещины реализуется введением дополнительных узлов (рис. 5).

В зависимости от угла наклона площадок главных растягивающих напряжений, траектория трещины в пределах габаритов конечного элемента (КЭ) проходит либо по горизонтали, либо по вертикали, образуя прямую или ломаную линию.

При крупной разбивке на КЭ встает проблема учета концентрации напряжений, возникающих на концах трещины. Этот вопрос решен с помощью вводимого коэффициента концентрации напряжений k , значение которого зависит от размеров КЭ — чем больше их размеры, тем больше значение этого коэффициента. При оценке приоритета образования или развития трещин или незаполненных раствором вертикальных швов к растягивающим напряжениям вводится коэффициент k .

При закрытии трещины в узлах, лежащих по разным берегам трещины, производится объединение перемещений в направлении, препятствующем наложению противоположных берегов трещин друг от друга.

В случае превышения критерия прочности на срез между двумя конечными элементами также добавляются узлы, однако между вновь образованными узлами и существовавшими ранее

2. Развитие трещин при температурном воздействии

Этап	Мозаики горизонтальных растягивающих напряжений	Описание этапа
<i>Вариант 1 [20]</i>		
1		Температурные деформации лицевого слоя сдерживаются плитой. Кладка растянута, плита сжата. Горизонтальные растягивающие напряжения: $\sigma_x \leq R_{t,x1}$
2		Раскрытие вертикальных швов в кладке нижних рядов. Концентрация растягивающих напряжений на концах трещин: $k\sigma_x > R_{t,x1}$
3		Развитие центральной трещины. На конце концентрация растягивающих напряжений: $k\sigma_x > R_{t,x1}$
4		Достижение центральной трещиной верха стены. На конце концентрация растягивающих напряжений: $k\sigma_x > R_{t,x1}$
5		Разделение лицевого слоя на две части центральной трещиной: $k\sigma_x > R_{t,x1}$
6		Развитие в левой и правой частях лицевого слоя новых трещин. На конце трещин концентрация растягивающих напряжений: $k\sigma_x > R_{t,x1}$
7		Продолжающееся развитие трещин. На конце трещин концентрация растягивающих напряжений: $k\sigma_x > R_{t,x1}$
8		Развитие старых и образование новой трещины: $k\sigma_x > R_{t,x1}$. Затухание трещинообразования: $k\sigma_x \leq R_{t,x1}$
<i>Вариант 2 [19]</i>		
1		В основании на углах срез кладки по горизонтальным растворным швам: $k\tau > R_{sq}$. Вертикальных трещин нет, горизонтальные растягивающие напряжения: $k\sigma_x \leq R_{t,x1}$.
2		Развитие старых и образование новой трещины: $k\sigma_x > R_{t,x1}$. Затухание трещинообразования: $k\sigma_x \leq R_{t,x1}$

сохраняется односторонняя связь, работающая только на сжатие.

При превышении прочности при сжатии происходит разруше-

ние элемента путем его исключения из расчетной схемы либо снижением модуля упругости.

Алгоритм прекращает работу при отсутствии появления новых

дефектов либо при достижении ширины раскрытия трещин максимально допустимых значений. В последнем случае возможно продолжение расчета по команде пользователя.

Расчет производится в несколько этапов, количество которых назначается пользователем в зависимости от характера решаемой задачи. На каждом из этапов могут меняться нагрузка, вводиться или удаляться группы КЭ, меняться граничные условия, прочностные и деформационные характеристики материалов.

В программе возможен учет неоднородности кладки, разброса ее свойств, поскольку вертикальные швы между кирпичами не все могут быть тщательно заполнены раствором. Работа таких швов рассматривается как трещина.

Блок-схема алгоритма программы приведена на рис. 6.

Расчет кладки наружных стен на температурные воздействия

С 2015 г. на модели фрагмента здания (рис. 7) [17–19] проводятся исследования прочности и деформации кладки лицевого слоя, образования и раскрытия трещин в нем в зависимости от температуры наружного воздуха.

Результаты исследований послужили основой для верификации программы расчета каменных конструкций КАМКОН.

В модели вертикальные трещины появлялись от превышения прочности кладки по вертикальному сечению горизонтальными растягивающими напряжениями в январе с наступлением морозов и началом подачи тепла в помещение (рис. 8). Эти напряжения возникали вследствие сдерживания свободных температурных деформаций кладки железобетонной плитой. Зарождение трещин происходило в основании стены. Вблизи углов в основании стены возможен сдвиг кладки по

3. Развитие трещин при перекосе

Этап	Мозаики главных напряжений	Описание этапа
1 σ_w		Момент перед образованием первой трещины: $\sigma_w \leq R_{w1}$, где σ_w – главные растягивающие напряжения; R_{w1} – прочность кладки на действие главных растягивающих напряжений при прохождении трещины по вертикальным и горизонтальным раствором швам
2 σ_w		Образование наклонной трещины. Концентрация напряжений по краям трещины: $k\sigma_w > R_{w1}$, где k – коэффициент концентрации напряжений
3 σ_w		Развитие трещины от центра к углам: $k\sigma_w > R_{w1}$
4 σ_w		Предельная стадия. Усилие $P = 280$ кН. Разделение трещиной стенки на две части вдоль диагонали

горизонтальному растворному шву.

В качестве примера в статье [20] приведены результаты расчета по программе КАМКОН напряженно-деформированного состояния кладки лицевого слоя экспериментальной модели. В табл. 2 показаны мозаики горизонтальных напряжений в лице-

вом слое продольной стены с этапами развития трещин.

Приведены два сценария образования трещин. В первом случае (вариант 1) образование трещин начинается в средней части стены в ее основании вследствие превышения горизонтальными растягивающими напряжениями прочности кладки по вертикаль-

ному перевязанному сечению (этап 2) раньше, чем касательными напряжениями прочности кладки на срез по горизонтальному растворному шву:

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

$$\tau_{\max,конц} < \tau_{ult}.$$

Образованию вертикальных трещин способствуют плохо работающие на растяжение вертикальные растворные швы.

На последующих этапах (этапы 3, 4) приоритет развития получила трещина (назовем ее лидирующей) в середине стены, где максимальные значения горизонтальных напряжений σ_x превысили прочность кладки при растяжении. В вершине лидирующей трещины наблюдается концентрация горизонтальных растягивающих напряжений, причем напряжения $\sigma_{x,конц}$ существенно превышают напряжения $\sigma_{x,\max}$, что способствует дальнейшему развитию трещины:

$$k\sigma_x > R_{t,x1}$$

По мере развития лидирующей трещины происходит снижение уровня касательных напряжений $\tau_{\max,конц}$.

С увеличением температурной нагрузки лидирующая трещина достигает верха стены и разделяет кладку лицевого слоя на две части (этап 5). 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 последующих этапах (этапы 6, 7) при повышении температурной нагрузки возникают вторичные лидирующие вертикальные трещины. Как правило, эти трещины не достигают верха стены. При дальнейшем повышении температурной нагрузки на участках между вторичными лидирующими трещинами возникают

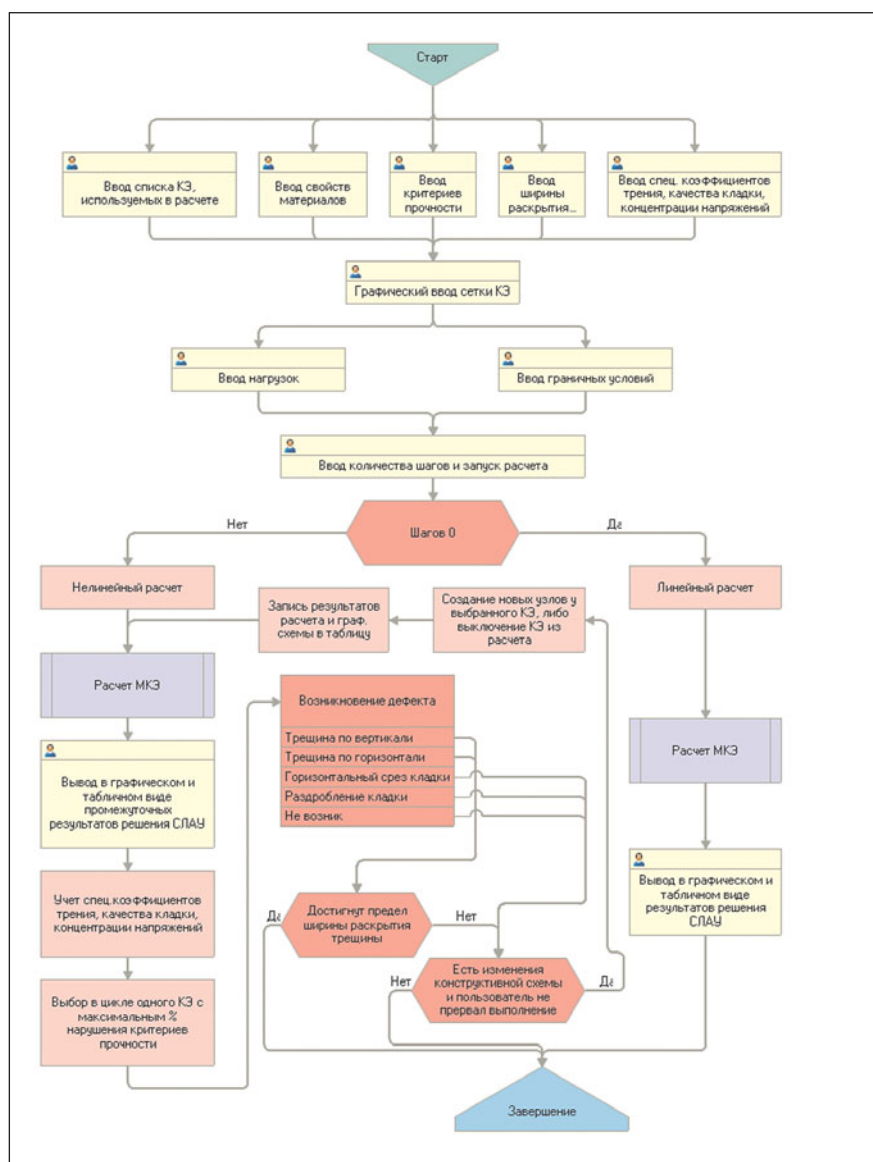


Рис. 6. Блок-схема алгоритма

новые вертикальные трещины (этап 8). В ряде случаев касательные напряжения со стороны вертикальных деформационных швов при повышении температурной нагрузки могут превысить прочность кладки на срез.

При втором варианте (см. табл. 2) максимальные касательные горизонтальные напряжения $\tau_{\max,конц}$ достигают прочности кладки на срез по горизонтальному растворному шву в основании стены раньше, чем горизонтальные напряжения прочности кладки при растяжении в середине стены:

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

$$\tau < \tau_{ult} = R_{sq,ult} + 0,8n\mu\sigma_z,$$

где τ – касательные напряжения; τ_{ult} – предельное значение касательных напряжений; $R_{sq,ult}$ – прочность срезу по горизонтальному растворному шву; μ – коэффициент трения; σ_z – вертикальные напряжения; n – эмпирический коэффициент, равный 1 для полнотелого кирпича и для кирпича с горизонтальными пустотами; 0,5 – для кирпича с вертикальными пустотами.

Происходит срез кладки (этап 1). По мере увеличения длины среза сокращается длина участка стены, совместно работающей с плитой перекрытия. Кроме то-

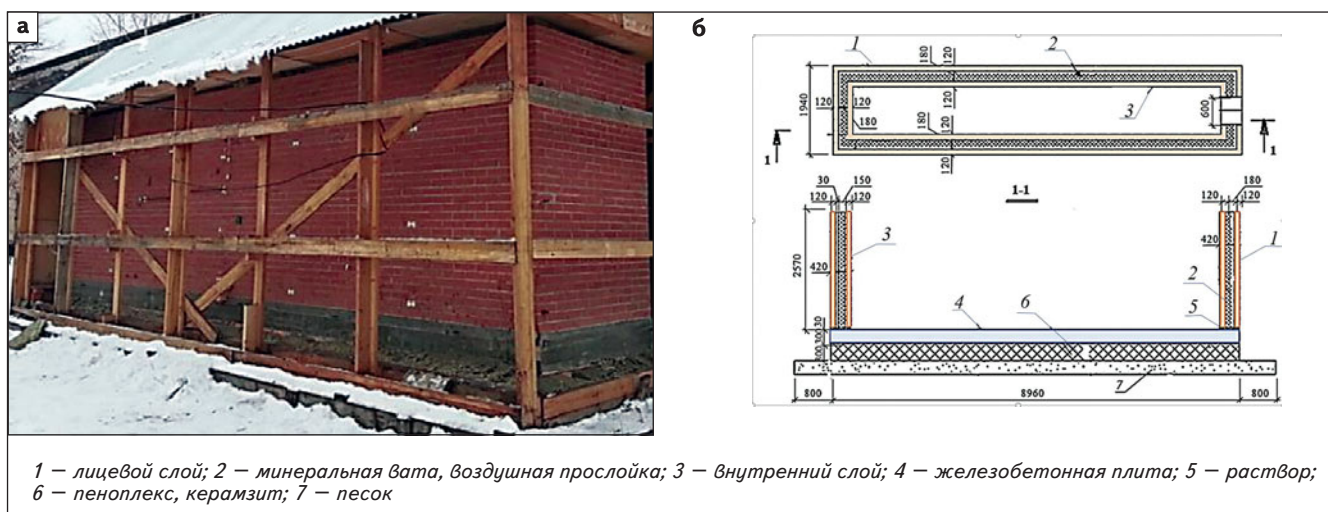


Рис. 7. Модель фрагмента здания

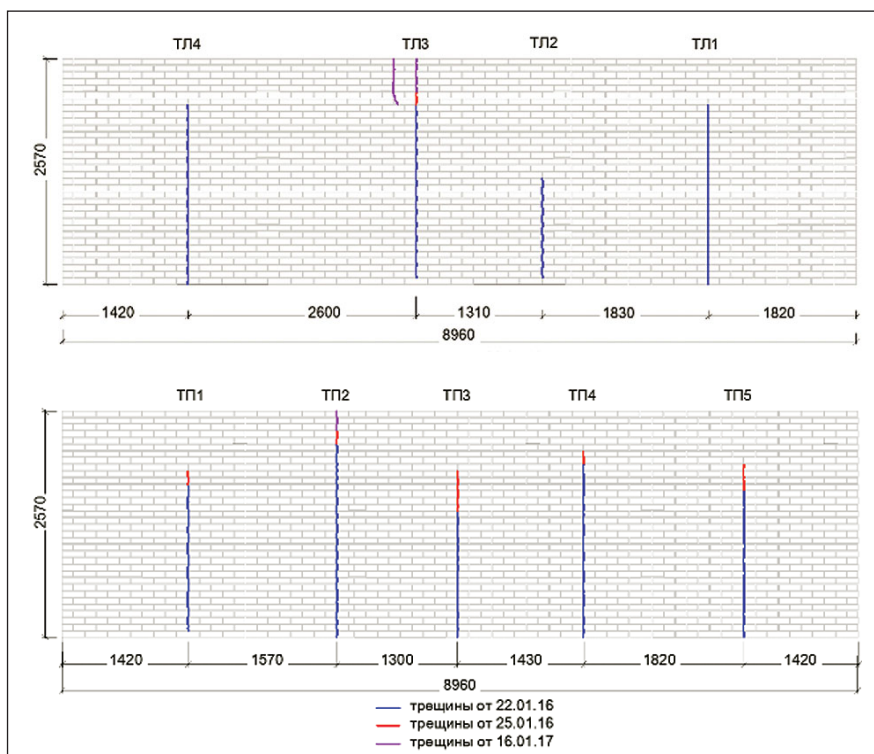


Рис. 8. Развитие трещин в продольных стенах модели здания

го, на концах участка стены, где произошел срез, растет уровень вертикальных напряжений, способствующих повышению прочности по горизонтальному растворному шву на срез. Все это способствует затуханию дальнейшего среза кладки.

После среза кладки значения горизонтальных напряжений в основании стены снижаются, что

может привести к тому, что вертикальные трещины смогут развиваться только после повышения температурной нагрузки (этап 2). Дальнейшее развитие трещин аналогично первому варианту.

Сравнение результатов расчета по программе КАМКОН показало, что перемещения кладки, характер образования трещин в целом совпадают с полученными

данными при исследовании модели здания (см. рис. 7). На стадии до образования трещин результаты расчетов практически совпадают с результатами, полученными по программе ЛИРА-САПР.

Расчет фрагмента кладки на перекоп

Сравнивались результаты испытаний стенки на перекоп (рис. 9), приведенные в работе [21], с результатами расчетов по программе КАМКОН (см. табл. 2, вариант 2).

В эксперименте образование трещин началось в середине образца. Далее рост нагрузки сопровождался незначительными деформациями с последующим резким развитием трещин от центра к углам. Затем происходило раскрытие существующих и образование новых трещин. Предельная нагрузка для двух образцов составила 300 и 280,8 кН соответственно.

В табл. 3 показаны мозаики главных напряжений в кладке, полученные из расчета. До образования трещин (этап 1) главные растягивающие напряжения сосредоточены в области, расположенной вдоль диагонали, по углам которой приложена нагрузка.

С образованием первой тре-



Рис. 9. Испытание на перекос кирпичной стенки [21]

шины (этап 2) в средней части стенки на концах трещины наблюдается значительная концентрация главных растягивающих напряжений, что способствует развитию трещины вдоль диагонали в сторону углов (этапы 2, 3). Предельное состояние наступает с достижением трещиной обоих углов и разделением стенки на две части (см. рис. 3, 5).

Перемещения кладки, характер образования трещин, полученные из расчета по программе КАМКОН, в целом совпадают с данными эксперимента в работе [21].

Расчет фрагмента кладки на сдвиг с обжатием вертикальной нагрузкой

Сравнивались результаты испытаний стенки с габаритами $2,5 \times 2,5 \times 0,12$ м на сдвиг горизонтальным усилием при обжатии вертикальной нагрузкой (рис. 10), приведенные в работах [8, 22], с результатами расчетов по программе КАМКОН.

В табл. 4 показаны мозаики напряжений в кладке, полученные из расчета. Трещины зародились вблизи места приложения горизонтального усилия и продолжали развиваться по ступенчатой линии вследствие превышения прочности кладки на срез по горизонтальным раствором швам ($k\tau > R_{sq} + 0,8n\mu\sigma_0$) и прочности на растяжение по верти-

4. Развитие трещин при сдвиге

Этап	Мозаики главных напряжений	Описание этапа
1 τ		Мозаика касательных напряжений τ . Образование первых трещин. Прочность при срезе по горизонтальным раствором швам: $k\tau \leq R_{sq} + 0,8n\mu\sigma_0$, где μ — коэффициент трения по шву кладки; σ_0 — напряжение сжатия; $n = 1,0$ для кладки из полнотелого кирпича и $0,5$ — для пустотелого; k — коэффициент концентрации напряжений
2 τ		Мозаика касательных напряжений τ . Развитие трещин. Прочность кладки при срезе по горизонтальным раствором швам: $k\tau \leq R_{sq} + 0,8n\mu\sigma_0$
3 σ_x		Мозаика горизонтальных напряжений σ_x . Развитие трещин. Прочность кладки при растяжении по перевязанному сечению, проходящему по вертикальным раствором швам и кирпичу $R_{t,x1}$: $k\sigma_x \leq R_{t,x1}$, где σ_x — горизонтальные растягивающие напряжения; k — коэффициент концентрации напряжений
4 τ		Мозаика касательных напряжений τ . Предельное состояние. Прочность кладки при срезе по горизонтальным раствором швам: $k\tau \leq R_{sq} + 0,8n\mu\sigma_0$,

кальному сечению, проходящему по вертикальным раствором швам ($k\sigma_x \leq R_{t,x1}$, пример на этапе 3).

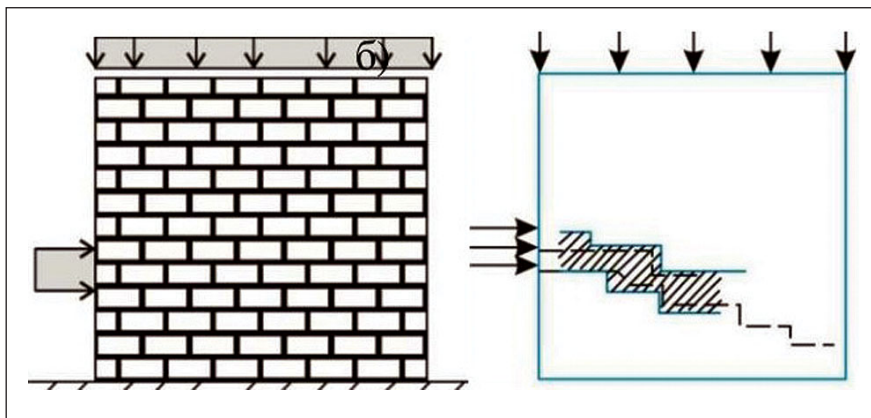


Рис. 10. Испытание на сдвиг кирпичной стенки [8, 22]

Перемещения кладки, характер образования трещин, полученные из расчета по программе КАМКОН, в целом совпадают с экспериментальными данными.

Выводы

1. Расчеты по специализированной программе КАМКОН, реализующей МКЭ с учетом конструктивной нелинейности, подтвердили правомочность использования конечно-элементной модели с рассмотрением кладки как континуальной гомогенной среды наряду с другими моделями, например с представлением кладки как кусочно-однородного тела.

Сравнение деформаций и перемещений, характера образования и развития трещин с данными экспериментов показало хорошее совпадение.

2. В качестве критериев прочности предложено использовать апробированный экспериментально комплексный критерий не превышения напряжениями соответствующей прочности кладки по перевязанному или неперевязанному сечению:

- прочность при растяжении R_t ;
- прочность на действие главных растягивающих напряжений R_w ;

- прочность при срезе по горизонтальным растворным швам или камню R_{sq} с учетом уровня обжатия кладки;

- прочность при сжатии R .

Значения прочности кладки приведены для большинства материалов в СП 15.13330.

Для случая, когда допускается образование трещин, в программе реализован критерий по допускаемой ширине раскрытия трещин.

3. При проверке прочности кладки в зоне образования трещины важно учитывать концентрацию напряжений на конце трещины. Коэффициент концентрации напряжений зависит от габаритов конечного элемента.

4. Вертикальные швы в кладке, плохо заполненные раствором, не только ослабляют вертикальное сечение кладки, но по сути являются такими же трещинами и способствуют концентрации напряжений на их концах.

5. Вследствие неоднородности кладки картина трещин может различаться для одного и того же случая при сохранении общего характера трещинообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lourenco, Paulo B. Two approaches for the analysis of masonry structures: Micro and macro modeling [Два подхода к моделированию кладки: микро- и макро-модели] // Heron. 1995. Vol. 40. Pp. 313–340.
2. Поляков С. В. Длительное сжатие каменной кладки. М.: Госстройиздат, 1959. 183 с.
3. Онищик Л. И. Каменные и армокаменные конструкции промышленных и гражданских зданий. М.; Л.: Госстройиздат, 1939. 149 с.
4. Ищук М. К. Влияние различных факторов на оценку прочности кладки при сжатии (к вопросу совершенствования норм по каменным конструкциям) // Строительные материалы. 2020. № 7. С. 67–75.
5. Кабанцев О. В. Механика пластического деформирования и разрушения каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия / под ред. А. Г. Тамразяна, Д. Г. Копаницы. М.: МГСУ, 2016. С. 154–165.
6. Капустин С. А., Лихачев С. Ю. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов с периодически повторяющейся структурой. Н. Новгород: ННГАСУ, 2012. 96 с.
7. Кашеварова, Г. Г., Труфанов Н. А. Численное моделирование деформирования и разрушения системы «здание–фундамент». Екатеринбург–Пермь: УрО РАН, 2005. 225 с.
8. Кашеварова Г. Г. Программная реализация алгоритма учета статистического разброса механических свойств материалов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2012. № 1. С. 133–141.
9. Блохина Н. С. Расчет конструкций из анизотропных материалов с применением физической нелинейности // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 1. С. 3–5.
10. Деркач В. Н. Деформационные характеристики каменной кладки в условиях плоского напряженного состояния // Строительство и реконструкция. 2012. № 2(40). С. 3–10.

11. *Зенкевич О. С.* Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 541 с.
12. *Колесников А. П.* Методы численного анализа, изложенные на языке формул и алгоритмическом языке С#. М. : Libroком, 2017. 412 с.
13. *Тухфатуллин Б. А.* Численные методы расчета строительных конструкций. Томск : ТГАСУ, 2017. 100 с.
14. *Тухфатуллин Б. А.* Численные методы расчета строительных конструкций. Метод конечных элементов (теория и практика). Томск : ТГАСУ, 2013. 100 с.
15. *Овчаренко В. А.* Расчет задач машиностроения методом конечных элементов. Краматорск : ДГМА, 2004. 125 с.
16. *Гениев Г. А., Курбатов А. С., Самедов Ф. А.* Вопросы прочности и пластичности анизотропных материалов. М. : ИНТЕРБУК, 1993. 187 с.
17. *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.
18. *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.
19. *Ищук М. К., Айзятуллин Х. А., Черемных В. А.* Экспериментальные исследования трехслойных каменных стен при температурных воздействиях // Вестник НИЦ «Строительство». 2020. № 24. С. 26–33.
20. *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.
21. *Копаница Д. М., Кабанцев О. В., Усеинов Э. С.* Экспериментальные исследования фрагментов кирпичной кладки на действие статической и динамической нагрузки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 4 (37). С. 157–178.
22. *Samarasinghe W., Page A. W., Hendry A. W.* A finite element model for the in-plane behaviour of brickwork [Конечно-элементная модель для плоского поведения кирпичной кладки] // Proc. of the Institution of Civil Engineers. 1982. Vol. 73. Pp. 171–178.

REFERENCES

1. Lourenco, Paulo B. Two approaches for the analysis of masonry structures: Micro and macro modeling. *Heron*, 1995, vol. 40, pp. 313–340.
2. Polyakov S.V. *Dlitel'noe szhatie kamennoj kladki. Nauchnoe soobshchenie* [Prolonged compression of masonry. Scientific communication]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1959. 183 p. (In Russian).
3. Onishchik, L. I. *Kamennye i armokamennye konstrukcii promyshlennyh i grazhdanskih zdaniy* [Masonry and reinforced masonry structures of industrial and civil buildings]. Moscow, Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1939. 149 p. (In Russian).
4. Ishchuk M. K. Influence of various factors on the assessment of the strength of masonry in compression (on the issue of improving the standards for masonry structures). *Stroitel'nye materialy*, 2020, no. 7, pp. 67–75. (In Russian).
5. Kabancev O.V. Mechanics of plastic deformation and fracture of masonry under biaxial stress conditions. *Sovremennye problemy rascheta zhelezobetonnyh konstrukcij, zdaniy i sooruzhenij na avarijnye vozdeystviya* [Modern problems of calculating reinforced concrete structures, buildings and structures for emergency impacts]. Moscow, MGSU Publ., 2016, pp. 154–165. (In Russian).
6. Kapustin S. A., Likhachev S. Yu. *Modelirovanie processov deformirovaniya i razrusheniya materialov s periodicheski povtoryayushchejsya strukturoj* [Modeling the processes of deformation and destruction of materials with a periodically repeating structure]. N. Novgorod, NNGASU Publ., 2012. 96 p. (In Russian).
7. Kashevarova G. G., Trufanov N. A. *Chislennoe modelirovanie deformirovaniya i razrusheniya sistemy «zdanie-fundament»* [Numerical modeling of deformation and destruction of the building-foundation system]. Ekaterinburg-Perm', UrORAN Publ., 2005. 225 p. (In Russian).
8. Kashevarova G. G. The program for implementing the algorithm for accounting for the statistical dispersion of the mechanical properties of materials. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arhitektura*. 2012, no. 1, pp. 133–141. (In Russian).
9. Blokhina N. S. Calculation of structures made of anisotropic materials using physical nonlinearity. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*, 2012, no. 1, pp. 3–5. (In Russian).
10. Derkach V. N. Deformation characteristics of masonry in the plane stress state. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*, 2012, no. 2 (40), pp. 3–10. (In Russian).
11. Zenkevich O. S. *Metod konechnyh jelementov v tehnike* [The finite element method in technology]. Moscow, Mir Publ., 1975. 541 p. (In Russian).
12. Kolesnikov A. P. *Metody chislennogo analiza, izlozhennye na jazyke formul i algoritmicheskogo jazyka C#* [Methods of numerical analysis presented in the language of formulas and the algorithmic language C#]. Moscow, Librokom Publ., 2017. 412 p. (In Russian).
13. Tuhfatullin B.A. *Chislennye metody rascheta stroitel'nyh konstrukcij* [Numerical methods for calculating building structures]. Tomsk, T GASU Publ., 2017. 100 p. (In Russian).
14. Tuhfatullin B. A. *Chislennye metody raschjota stroitel'nyh konstrukcij. Metod konechnyh jelementov (teorija i praktika)* [Numerical methods for calculating building structures. The finite element method (theory and practice)]. Tomsk, T GASU Publ., 2013. 100 p. (In Russian).
15. Ovcharenko V. A. Raschet zadach mashinostroenija metodom konechnyh jelementov [Calculation of the problems of mechanical engineering by the finite ele-

- ment method]. Kramatorsk , DGMA Publ., 2004. 125 p. (In Russian).
16. Geniev G. A., Kurbatov A. S., Samedov F. A. *Voprosy prochnosti i plastichnosti anizotropnyh materialov* [Issues of strength and ductility of anisotropic materials]. Moscow, INTERBUK Publ., 1993. 187 p. (In Russian).
 17. Ishchuk M.K. Experimental studies of the stress-strain state of masonry of the outer layer of the outer walls with flexible ties to temperature and humidity effects. *Vestnik NIC «Stroitel'stvo»*, 2018, no. 3(18), pp. 61–78. (In Russian).
 18. Ishchuk M. K. The study of the stress-strain state of the masonry of the outer layer of the external walls with flexible ties under temperature-humidity effects. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*, 2018, no. 1, pp. 72–76. (In Russian).
 19. Ishchuk M. K., Ajzjatullin H. A., Cheremnyh V. A. Experimental studies of three-layer masonry walls under temperature effects. *Vestnik NIC «Stroitel'stvo»*, 2020, no. 24, pp. 26 – 33. (In Russian).
 20. Ishchuk M. K., Ishchuk V. L. Numerical studies of the strength and deformation of external walls with a masonry front layer with flexible ties under temperature effects. *Vestnik NIC «Stroitel'stvo»*, 2019, no. 2, pp. 60–73. (In Russian).
 21. Kopanica D. M, Kabancev O. V., Useinov Je. S. Experimental studies of fragments of brickwork on the effect of static and dynamic loads. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2012, no. 4 (37), pp. 157–178. (In Russian).
 22. Samarasinghe W., Page A.W., Hendry A.W. A finite element model for the in-plane behaviour of brickwork. *Proc. of the Institution of Civil Engineers*, 1982, vol. 73, pp. 171–178.

Для цитирования: Ищук М. К., Ищук В. Л. Расчет каменных стен при сдвиге и растяжении // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 8. С. ??–??. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.??-??.

For citation: Ishchuk M. K., Ishchuk V. L. Calculation of masonry walls in shear and tension. . *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2020, no. 8, pp. ??–??. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.??-??.