

сжатию, как с количественной (значения разрушающих нагрузок), так и с качественной точки зрения (характер трещинообразования).

Результаты исследований с использованием микромоделей показали их адекватность и дальнейшую возможность перехода к макромоделям каменной кладки с эквивалентными деформационными и прочностными характеристиками.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Lourenço, P.B. Computational Strategies for Masonry Structures. PhD thesis, Technical University Delft. Delft University Press, The Netherlands, ISBN 90-407-1221-2, 1996. – 220p.
2. Соколов, Б.С. Исследования сжатых элементов каменных и армокаменных конструкций: научное издание / Б.С. Соколов, А.Б. Антаков. - М.:Издательство АСВ, 2010. - 104 с.
3. Кашеварова, Г.Г. Моделирование процесса разрушения кирпичной кладки зданий в натурных и численных экспериментах / Г.Г. Кашеварова, А.Ю. Зобачева, С.И. Дубинский // Научно-технический журнал - Строительная механика и расчет сооружений – 2010. – №1 (230). – С. 69-74.
4. Методы испытания раствора для каменной кладки. Часть 11. Определение прочности на растяжение при изгибе и прочности при сжатии затвердевшего раствора: EN 1015-11:1999+A1:2006. – Brussels: CEN/TC 125, 2006. – 18 с.
5. Diagonal tensile strength tests of small walls specimens. TC76-LUM: RILEM LUMB6 1991. - Brussels: TC76-LUM, 1991. – 5 p.
6. Демчук, И.Е. Численное исследование параметров сдвига в каменной кладке / И.Е. Демчук // Строительная наука - 2014: теория, образование, практика, инновации (посвящается 55-летию ИСИА САФУ): сборник трудов Междунар.научно-техн. конф., г.Архангельск, 22-23 мая 2014г. / Под ред. Б.В. Лабудина. – Архангельск: Изд-во ООО «Типография «ТОЧКА», 2014. – С. 112-119.
7. Методы испытания каменной кладки. Часть 3. Определение начальной прочности при сдвиге: СТБ EN 1052-3-2008 – Введ.20.02.2008. – Минск: Госстандарт. – 12 с.
8. Галалюк, А.В. Влияние прочности раствора при сжатии на величину модуля упругости раствора и коэффициент Пуассона / А.В. Галалюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне, 2012. – Випуск 24. – С. 100-112.
9. Демчук, И.Е. Исследование прочности сцепления растворов в каменной кладке / И.Е. Демчук, В.Н. Деркач // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2012. – №1(73): Строительство и архитектура. – С.71-76.

УДК 693.22

*Деркач В.Н.*

### **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ УЧЕТА СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ КАРКАСА С КАМЕННЫМ ЗАПОЛНЕНИЕМ**

Каркасные здания с каменным заполнением являются сложными многоэлементными системами, включающими конструктивные элементы с различными прочностными и деформационными характеристиками. В настоящее время при проектировании таких зданий каркас здания и каменное заполнение в виде наружного стенового ограждения и внутренних перегородок рассматриваются отдельно друг от друга без учета взаимного влияния, с использованием различных расчетных моделей. Как правило, предполагается, что влияние заполнения на статическую работу конструкций каркаса ограничивается передачей нагрузки от собственного веса каменной кладки.

В действительности участие каменного заполнения в работе каркаса имеет многофакторный характер. Заполнение воспринимает не только вертикальную, но и горизонтальную нагрузку, заметно повышает пространственную жесткость здания, существенно влияет на распределение и значения внутренних усилий в элементах каркаса.

Следует отметить, что действующие нормы проектирования каменных и армокаменных конструкций СНиП II-22-81 и СП 15.13330.2012 справедливо регламентируют необходимость расчета стенового заполнения каркасов на перекос в плоскости стен, однако методическое обеспечение в этой предметной области не соответствует современным требованиям.

Современные «тяжелые» программные комплексы ANSYS, ABAQUS, NASTRAN позволяют выполнять расчет каркасов с каменным заполнением на основе решения нелинейных контактных задач с трением и сцеплением между элементами каркаса и поверхностью кладки, которая рассматривается как однородный анизотропный материал. Данный способ моделирования совместной работы каменной кладки с каркасом трудно реализовать в практике проектирования, прежде всего из-за большой размерности решаемой задачи и сложности создания расчетной модели каркасного здания. Поэтому в инженерных расчетах кладка заполнения каркаса обычно представляется в виде стержневого аналога (СА), состоящего из условно выделенной полосы, направленной вдоль сжимающего силового потока (рисунок 1).

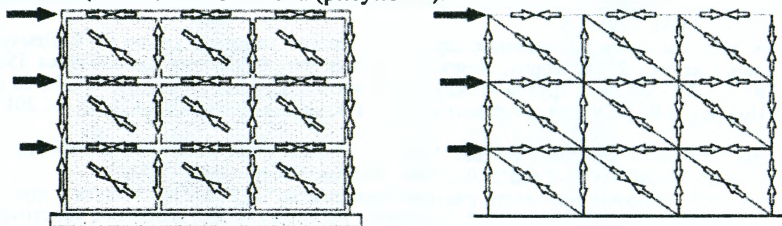


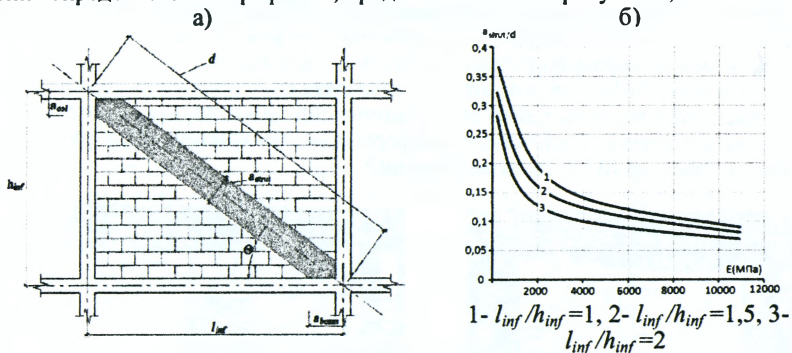
Рисунок 1 – Моделирование каркасного здания с каменным заполнением

На возможность такого подхода к расчету каркасных зданий на ветровую нагрузку еще в 40-х годах прошлого столетия указывал Онищик Л.И. [1]. Поляков С.В. [2,3] в 50-х годах прошлого века экспериментально обосновал правомерность моделирования каркаса с каменным заполнением, как рамной системы с шарнирно присоединенными раскосами, заменяющими каменную кладку. Результаты этих исследований нашли отражение в нормативных документах и специальных публикациях, которые в основном были посвящены повышению сейсмостойкости каркасных зданий. Вместе с тем в СНиП II-22-81 и СП 15.13330.2012 отсутствуют указания по назначению жесткостных параметров СА, что препятствует учету фактора совместной работы каменного заполнения с элементами каркаса при проектировании каркасных зданий.

С целью определения геометрических параметров СА заполнения до образования в нем трещин выполнен численный анализ рам с заполнением и рам, заполнение которых было смоделировано СА. Посредством нелинейного анализа методом конечных элементов (МКЭ) определялись углы сдвиговых деформаций рам с заполнением, на основании которых, расчетом упругих стержневых моделей рам с СА, устанавливалась линейная жесткость СА. Численные исследования выполнялись на основе решения МКЭ нелинейной контактной задачи с учетом трения и сцепления между заполнением и элементами каркаса. В расчетах варьировались отношение габаритных размеров и толщина заполнения, деформационные характеристики кладки, изгибная жесткость элементов рамы, коэффициент трения и величина сцепления между элементами рамы и заполнением, размеры проемов их количество и положение. Рассматривались варианты с контактом всего периметра заполнения с рамой и наличием горизонтального деформационного шва между заполнением и верхним элементом обрамления.

В расчетных моделях элементы каркаса и СА моделировались прямолинейными двухузловыми конечными элементами (КЭ) с тремя степенями свободы в каждом узле. Учитывая, что в рассматриваемых моделях рамы с заполнением работа последнего анализируется до образования трещин, каменная кладка представлялась, как однородный, изотропный материал, деформационные и прочностные характеристики которого принимались по результатам испытаний. Каменное заполнение моделировалось плосконапряженными четырехузловыми КЭ с тремя степенями свободы в каждом узле. Контактное взаимодействие между заполнением и каркасом моделировалось при помощи контактных конечных элементов (ККЭ), которые вводятся на участках возможного контакта взаимодействующих тел, тем самым дискретизируя некоторый фиктивный тонкий слой между контактирующими поверхностями.

На рисунке 2 приведены расчетные зависимости для определения геометрических параметров каменного заполнения, которое заменяется работающим на сжатие стержневым аналогом (СА) (рисунок 2,а). Ширина сечения СА назначается равной толщине заполнения, а высота ( $a_{strut}$ ) в случае сплошного заполнения определяется по графикам, представленным на рисунке 2,б.



а) - схема СА; б) - зависимость « $a_{strut}/d - E$ »  
Рисунок 2 – К расчету геометрических параметров СА

Если в заполнении имеется оконный или дверной проем, то значение  $a_{strut}$  корректируется путем умножения его на коэффициенты  $k_{open}$  или  $k'_{open}$  соответственно (рисунки 3,а и 3,б).

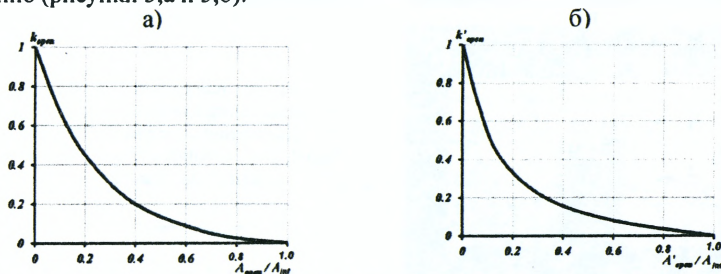


Рисунок 3 – Графики зависимостей: а) - « $k_{open} - A_{open}/A_{inf}$ »; б) « $k'_{open} - A'_{open}/A_{inf}$ »

На рисунке 3  $A_{inf} = l_{inf} \times h_{inf}$  – площадь заполнения,  $A_{open}$  и  $A'_{open}$  – соответственно площадь центрального оконного и дверного проема.



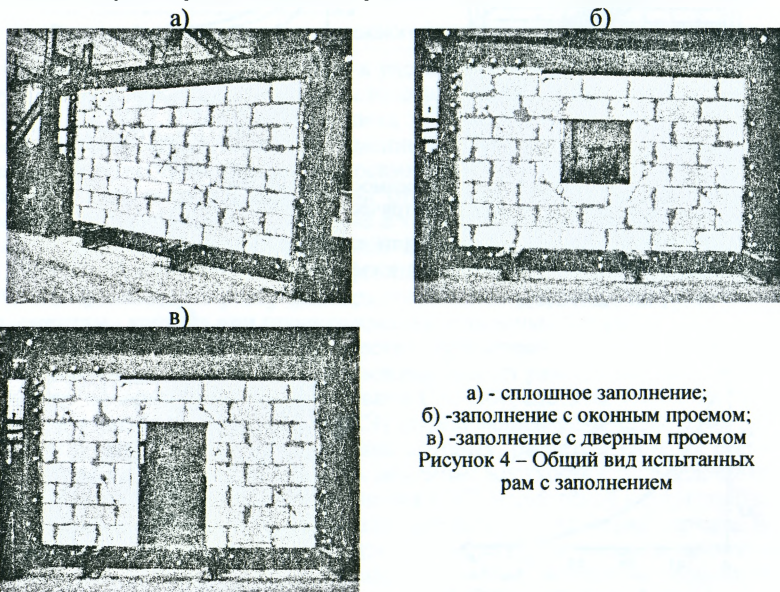
Условие для проверки предельного состояния несущей способности заполнения записывается в виде (1):

$$F_{strut,d} \leq \min\{R_{d1}, R_{d2}, R_{d3}\}, \quad (1)$$

где  $F_{strut,d}$  - расчетное усилие в заполнении,  $R_{d1}, R_{d2}, R_{d3}$  - соответственно расчетные значения сопротивлений заполнения действию касательных, главных растягивающих и главных сжимающих напряжений.

Методика определения значений  $R_1, R_2, R_3$  приведена в работе [4].

С целью проверки предлагаемой методики расчета каркаса с каменным заполнением был выполнен комплекс экспериментальных исследований моделей, представляющих замкнутую стальную раму с жесткими узлами, заполненную ячеистобетонными блоками В2,5 D500 толщиной 250мм на тонкошовных клеевых растворных швах (рисунок 4) [5]. Для того, чтобы минимизировать влияние масштабного фактора на результаты опытов, испытаниям подвергались образцы заполнения, размеры которых были близки к размерам реальных конструкций (4×2,5м). Контурные швы между стойками рамы и заполнением создавались клеевым раствором толщиной 10-15мм, наносимым на вертикальную грань крайних блоков, которые прижимались к стойкам рамы. Горизонтальная, возрастающая ступенями нагрузка, передавалась на раму в уровне центральной продольной оси ее верхнего ригеля с помощью гидравлического домкрата грузоподъемностью 25т. На каждом этапе нагружения фиксировались горизонтальные перемещения верхних узлов рамы, длины зон ее контакта с каменным заполнением, а также относительные деформации заполнения в направлениях ожидаемых траекторий главных напряжений.



а) - сплошное заполнение;  
 б) -заполнение с оконным проемом;  
 в) -заполнение с дверным проемом  
 Рисунок 4 – Общий вид испытанных рам с заполнением

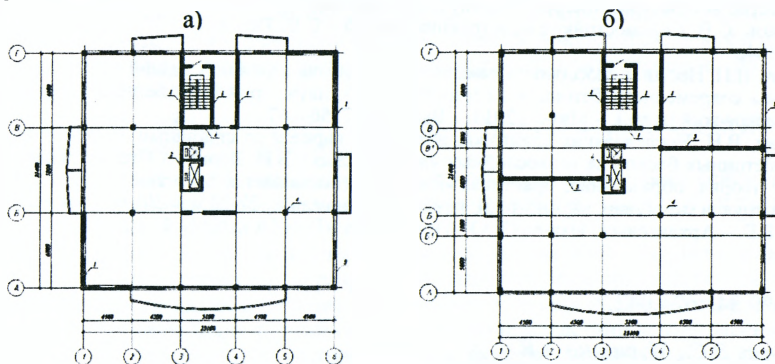
Выполнено сопоставление результатов экспериментальных исследований сдвиговой жесткости рам с заполнением с результатами расчетов (КЭ) модели, в которой заполнение моделировалось СА. В КЭ модели ригеля и стойки рамы,

а также СА представлялись стержневыми КЭ общего вида, имеющими шесть степеней свободы. Секущий модуль упругости заполнения Е принимался по результатам испытаний образцов каменной кладки, а геометрические характеристики СА устанавливались по зависимостям, приведенным на рисунках 2,3. Задача решалась в линейно-упругой постановке с помощью программного комплекса STARK ES. Установлено, что отклонения опытных и полученных расчетом МКЭ значений сдвиговых деформаций рамы до образования трещин в заполнении не превышают 10%.

При разработке проектов каркасных зданий с трансформируемой планировкой включать в совместную работу с каркасом целесообразно несмещаемые перегородки (межквартирные, межсекционные, отделяющие неквартирные коридоры от других помещений) и наружное стеновое ограждение, поэтому экономическая эффективность учета фактора взаимодействия каркаса с каменным заполнением в значительной степени определяется объемно-планировочным решением здания.

На основании сравнения представленных на рисунках 5 вариантов конструктивных решений каркаса 15-этажного здания выполнена оценка экономической эффективности учета взаимодействия заполнения с каркасом. В качестве критерия экономического сравнения вариантов принято условие обеспечения равной жесткости конструктивных систем, оцениваемой по величине максимальных горизонтальных перемещений узлов верхнего диска перекрытия.

Первый вариант конструктивного решения (рис.5а) предполагает, что горизонтальная ветровая нагрузка воспринимается конструкциями каркаса, включающими вертикальные элементы (колонны, диафрагмы жесткости) и плоские диски перекрытий. Согласно второму варианту (рис.5б) ветровая нагрузка воспринимается конструкциями каркаса, наружным стеновым ограждением из керамзитобетонных блоков и внутренними межквартирными кирпичными перегородками.



1-диафрагмы жесткости, 2-лифтовая шахта, 3-стеновое ограждение, 4-колонна,  
5-межквартирные перегородки

Рисунок 5 – Схема вертикальных элементов каркаса: а) - вариант I; б) - вариант II

В первом варианте расчетной модели предполагалось, что поэтажно опертые наружные стены не участвуют в работе каркаса, а лишь создают дополнительные нагрузки на плиты перекрытий. Второй вариант расчетной модели учитывал взаимодействие наружного стенового ограждения и внутренних межквар-

тирных перегородок с конструкциями каркаса. При этом стеновое ограждение заменялось стержневыми КЭ общего вида, шарнирно закрепленными в узлах каркаса. При назначении жесткости стержневым КЭ, моделирующим каменное заполнение, модуль упругости принимался по результатам испытаний опытных образцов кладки. Площадь поперечного сечения КЭ определялась как произведение толщины заполнения на высоту СА, устанавливаемую по графикам на рисунках 2,3.

Статический расчет каркаса выполнялся на основные сочетания воздействий, включающие постоянные и переменные воздействия, в линейно-упругой постановке с помощью программного комплекса STARK ES.

Расчеты показали, что учет в статическом расчете каркаса его совместной работы с каменным заполнением за счет уменьшения количества вертикальных диафрагм жесткости привел к снижению общего расхода бетона на каркас здания на 8%, а арматурной стали на 5,5%.

В заключение следует отметить, что учет взаимодействия каменного заполнения с каркасом при проектировании зданий без каких-либо дополнительных затрат позволяет уменьшить количество вертикальных железобетонных диафрагм жесткости, за счет чего расширяются возможности свободной планировки этажей, обеспечивается экономия материалов и снижение трудоемкости монтажа. Уменьшение количества вертикальных диафрагм жесткости в свою очередь приводит к более рациональному армированию дисков перекрытий, так как смягчает негативное влияние рамно-связевого эффекта, обусловленного резкой разницей в жесткости вертикальных элементов каркаса.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Онищик, Л.И. Прочность и устойчивость каменных конструкций / Л.И. Онищик. - М.: ОНТИ, 1937. – 291 с.
2. Поляков, С.В. Каменная кладка в каркасных зданиях / С.В. Поляков. - М: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1956. – 189с.
3. Поляков, С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий / С.В. Поляков. – М: Высшая школа, 1983. – 304с.
4. Деркач, В.Н. Несущая способность каменного заполнения каркасных зданий / В.Н. Деркач // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: М.Ф. Марковский [и др.]. – Минск, 2013. – Вып. 5. – С. 56 – 67.
5. Деркач, В.Н. Исследования сдвиговой жесткости каркаса со сплошным заполнением из ячеистобетонных блоков на тонкослойных клеевых швах / В.Н. Деркач // Строительная наука-2014: теория, образование, практика, инновации (посвящается 55-летию ИСиА САФУ): сборник трудов междунар. научно-техн. конф., г.Архангельск, 22-23 мая 2014г. /Под ред. Лабудина Б.В. – Архангельск: Изд-во ООО «Типография «ТОЧКА», 2014.- С. 120-127.

УДК 699.841:624.042.7

*Дорофеев В.С., Мурашко А.В.*

### **РАСЧЕТ ЗДАНИЙ С БЕЗРИГЕЛЬНЫМ КАРКАСОМ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

#### **АННОТАЦИЯ**

В статье приведено обоснование необходимости расчета существующих зданий с безригельным каркасом на прогрессирующее обрушение после землетрясения в рамках разрабатываемой системы оценки фактической сейсмостойкости зданий. Приведен перечень наиболее уязвимых к землетрясениям конструк-