

УДК 624.042.1:539.3+693.157

*КАБАНЦЕВ ОЛЕГ ВАСИЛЬЕВИЧ, канд. техн. наук, профессор,  
ovk531@gmail.com*

*Московский государственный строительный университет,  
129337, г. Москва, Ярославское ш., 26*

*УСЕИНОВ ЭМИЛЬ СЕЙРАНОВИЧ, аспирант,  
useinov\_em@mai.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

### **ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ НОРМАЛЬНОГО СЦЕПЛЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КАМЕННОЙ КЛАДКИ В УСЛОВИЯХ ДВУХОСНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

Выполнен анализ процесса разрушения структурных элементов каменной кладки при различном уровне адгезионной прочности взаимодействия кирпича и раствора. Рассчитаны и обоснованы значения характеристик пластических свойств каменной кладки при различной величине нормального сцепления. Результаты численных исследований позволили установить ключевую роль уровня адгезионной прочности на протекание процессов пластического деформирования и характеристику пластичности кладки.

Результаты исследований могут быть использованы для формирования критериев предельных состояний каменной кладки для условий работы при действии горизонтальных нагрузок на здание, включая сейсмические воздействия.

**Ключевые слова:** моделирование; численные методы; расчетная модель; напряженно-деформированное состояние; каменная кладка; кирпич; раствор.

*OLEG V. KABANTSEV, PhD, Professor,  
ovk531@gmail.com*

*Moscow State University of Civil Engineering,  
26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia,*

*EMIL S. USEINOV, Research Assistant,  
useinov\_em@mai.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

### **PLASTIC DEFORMATION OF MASONRY UNDER BIAXIAL STRESS AFFECTED BY ADHESIVE STRENGTH BETWEEN BRICK AND MORTAR**

The paper presents the fracture analysis of masonry structural elements at different levels of adhesive strength between brick and mortar. A method of phase boundary definition between elastic and plastic masonry deformation is suggested under increasing load. The calculation of and rationale for masonry plastic properties are described for different levels of normal adhesion. The results of numerical analysis allow detecting the influence of adhesive strength on processes of plastic deformation and properties of masonry. Research results can be used to formulate criteria of limit states of masonry exposed to lateral and seismic loads.

**Keywords:** modeling; numerical methods; design model; stress-strain state; masonry; brick; mortar.

### Введение

В современных исследованиях каменная кладка рассматривается (преимущественно) как континуальная среда с обобщенными («эффективными») механическими характеристиками. К первым успешным работам по определению «обобщенных» механических характеристик каменной кладки относятся работы Л.И. Онищика [1], в которых установлены значения прочностных и деформационных характеристик кладки как континуального материала. В целом, практика проектирования и эксплуатации каменных зданий и сооружений подтвердила обоснованность и справедливость определения каменной кладки как континуального композитного материала с набором обобщенных характеристик, что позволяет (для условий действия нагрузок основного сочетания) получить достоверный прогноз как несущей способности, так и деформирования, в том числе с учетом физически нелинейной работы кладки.

Для условий двухосного напряженного состояния, которое формируется при действии горизонтальных нагрузок, например, при сейсмических воздействиях, идея континуализации каменной кладки позволяет получить только оценку несущей способности каменной конструкции. Корректный прогноз деформирования (с учетом наличия пластической фазы) каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния на основе континуальных моделей невозможно получить в принципе: как показано в других статьях [2], пластическая фаза деформирования представляет собой процесс формирования и накопления локальных разрушений, что порождает неопределенность, связанную с разрывом функционала, который в концепции континуального моделирования может быть только непрерывным.

Необходимо подчеркнуть, что уровень несущей способности каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния определяется исключительно величиной нормального сцепления, т. е. адгезионной прочностью взаимодействия кирпича и раствора. При этом из работ [3, 4] известно, что величина адгезионной прочности, реализующаяся в узлах взаимодействия базовых материалов композита, влияет на процесс пластической фазы деформирования таких композитов.

Как показано в работах [5, 6], каменная кладка представляет собой кусочно-однородную разномодульную композитную среду, что позволяет предположить наличие влияния уровня адгезионной прочности на процессы пластической фазы деформирования и параметры пластичности такого материала.

Важность исследований пластического деформирования каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния определяется тем, что при сейсмических воздействиях в конструктивных элементах каменных зданий формируется аналогичная схема напряжений. При этом несущая способность каменных конструкций является функцией пластичности материала (конструкции), которая опосредованно отражена в действующих нормативных документах по сейсмостойкому строительству в виде коэффициента допускаемых напряжений  $K_1$ .

Сопоставление значений параметра, характеризующего возможность конструкции реализовывать пластические деформации (коэффициент допускаемых повреждений  $K_1$ ), для несущих конструкций из каменной кладки, принятых в отечественных нормах различных лет, показывает, что в течение 30 лет указанный параметр существенно изменился – значение  $K_1$  увеличилось на 60 %. Это свидетельствует о недостаточной научной обоснованности используемых в нормах значений важнейшей механической характеристики каменных несущих конструкций сейсмостойких зданий и необходимости совершенствования методов оценки их сейсмостойкости.

Таким образом, исследование влияния величины адгезионной прочности на характеристику пластичности представляет собой несомненный научный и практический интерес.

### Постановка задачи исследования

На основе разработанной, обоснованной и верифицированной в работах [7, 8] структурной модели каменной кладки с использованием методов многоэтапного расчета, представленного в работах [9–11], провести численные исследования процессов упругопластического деформирования и разрушения расчетных моделей образцов из каменной кладки, соответствующих образцам, исследованным в физических экспериментах [2, 12].

В исследованиях решались следующие задачи:

– определение несущей способности каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния при заданных механических характеристиках базовых материалов (кирпича и раствора) и прочности их адгезионного взаимодействия;

– построение зависимостей «нагрузка – деформация», соответствующих процессу деформирования и разрушения каменной кладки под возрастающей нагрузкой;

– определение структуры процесса упругопластического деформирования каменной кладки под возрастающей нагрузкой;

– анализ результатов экспериментальных исследований и определение обоснованных величин характеристик пластичности каменной кладки.

Необходимо отметить, что образцы, изготовленные для эксперимента в работе [2], имеют чрезвычайно высокий уровень адгезионной прочности  $R_{adh} = 0,628$  МПа. Столь высокий уровень адгезионной прочности крайне редко реализуется в реальных каменных конструкциях.

Характеристики прочности элементов модели, принятые в численном эксперименте, приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Характеристики экспериментальных образцов

Условный номер серии [исследование]	Размеры образцов			Прочность кирпича на сжатие $R_k$ , МПа	Прочность раствора на сжатие $R_p$ , МПа	Нормальное сцепление $R_t$ , МПа
	Толщина, мм	Ширина, мм	Высота, мм			
КО [12]	250	1030	1106	11,28	6,12	0,128
КС[2]	250	1030	1106	9,92	7,40	0,628

Численный эксперимент с расчетной моделью, механические характеристики которой соответствуют образцам, исследованным в работах [2, 12], выполнен с использованием вычислительного комплекса SCAD [13] на единой методической основе (см. работы [7, 8]).

### Результаты исследования

По результатам выполненных исследований построены графики деформирования образцов под возрастающей нагрузкой (рис. 1).

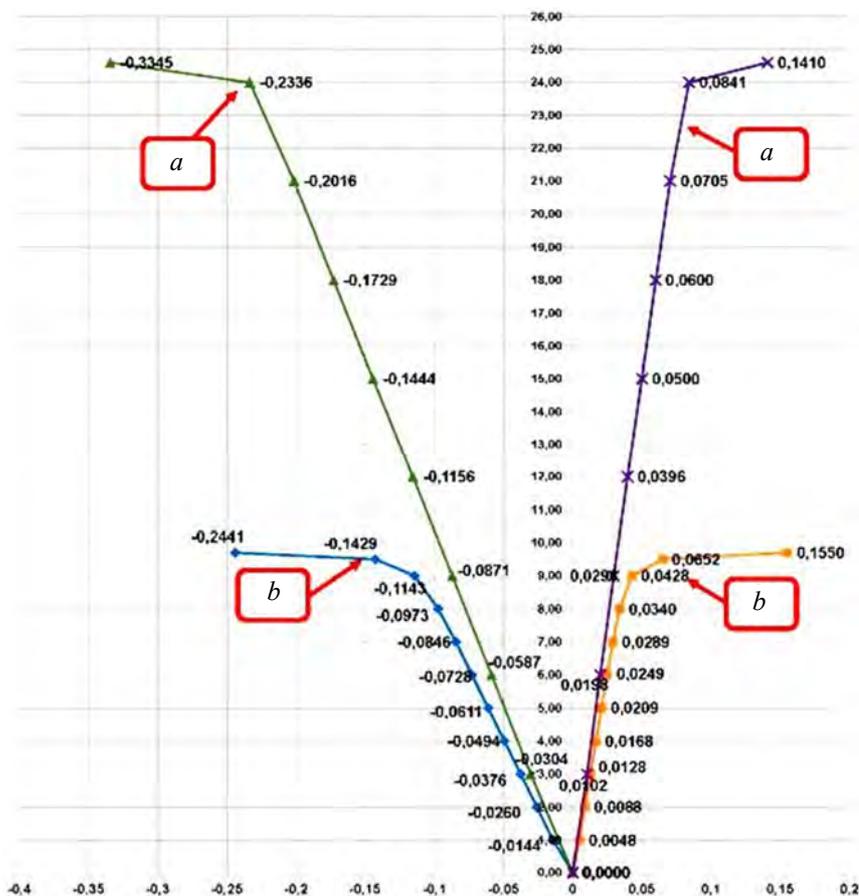


Рис. 1. Графики деформирования расчетной модели каменной кладки, соответствующей образцу из работы [2] (a) и образцу из работы [12] (b). По вертикальной оси — нагрузка в тоннах, по горизонтальной оси — относительные деформации  $\varepsilon \cdot 10^{-3}$

Исследование процесса формирования и развития трещин выполнено с учетом процесса формирования трещин в кирпиче при некотором уровне неизменяющейся нагрузки (в соответствии с методикой, изложенной в работе [7]).

Сопоставление результатов исследований позволяет сделать вывод о хорошей корреляции результатов физического и численного экспериментов. Уровни разрушающих нагрузок достаточно близки — различия составляют

5–10 %. Величины деформаций сжатия образцов под возрастающей нагрузкой имеют хорошую корреляцию (в пределах 12–17 %) (табл. 2).

Таблица 2

Тип эксперимента	Предельная (разрушающая) нагрузка $P_{ult}$ , кН	Относительные деформации (полные) при разрушающей нагрузке $P_{ult} \cdot \varepsilon_{tot} \cdot 10^{-3}$	
		Сжатие	Растяжение (справочно)
Численный NM-12	95,16 (100 %)	24,41 (100 %)	15,5 (100 %)
Физический КО-1 [12]	100 (105,1 %)	21,3 (87,3 %)	24 (154,8 %)
Физический КО-2 [12]	98,0 (103,0 %)	21,3 (87,3 %)	21,2 (136,8 %)
Численный NM-2	255 (100 %)	33,45 (100 %)	14,10 (100 %)
Физический КС-1 [2]	280 (109,8 %)	29 (86,7 %)	10,4 (73,8 %)

Определение границы упругой и пластической фаз деформирования выполнено на основе анализа величин приращений относительных деформаций при изменении нагрузки на модель. В качестве параметра, характеризующего способность кладки реализовать некоторую величину пластической фазы деформирования, предлагается (на основе работ Н.Н. Попова и Б.С. Рассторгуева [14] с учетом работы А.С. Veletsos [15]) использовать коэффициент пластичности

$$\mu = \varepsilon_{tot} / \varepsilon_{el}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{el}$  – величина упругих деформаций;  $\varepsilon_{tot}$  – величина полных деформаций образца на стадии, предшествующей разрушению. Результаты расчета коэффициентов пластичности в сопоставлении с результатами физических экспериментов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Тип модели	Нормальное сцепление $R_t$ , МПа	Предельная нагрузка $P_{ult}$ , кН	Относительные деформации сжатия		Коэффициент пластичности $\mu = \varepsilon_{tot} / \varepsilon_{el}$
			Упругая фаза $\varepsilon_{el} \cdot 10^{-5}$	Полные деформации $\varepsilon_{tot} \cdot 10^{-5}$	
КО-1 [12]	0,128	100 (100 %)	7,3 (100 %)	21,3 (100 %)	2,918 (100 %)
NM-12	0,128	95,16 (95,16 %)	8,46 (115,9 %)	24,41 (105,7 %)	2,885 (98,87 %)
КС-1 [2]	0,628	280 (100 %)	23,0 (100 %)	29,0 (100 %)	1,261 (100 %)
NM-2	0,628	255 (91,07 %)	20,16 (87,65 %)	33,45 (115,3 %)	1,659 (131,6 %)

Анализ численного эксперимента показывает: в процессе пошагового нагружения в расчетной модели формируется несколько стадий напряженно-деформированного состояния: стадия упругой работы под нагрузкой, стадия формирования микроразрушений, стадия слияния микроразрушений в макроразрушения и стадия полного разрушения модели. Величины разрушающих нагрузок и деформационные параметры, определенные в физических и чис-

ленных исследованиях, имеют хорошую корреляцию, что подтверждает корректность математической модели и методов расчетного анализа.

### Структурный анализ процессов разрушения в рамках пластической фазы деформирования

Принцип дискретного моделирования образцов из каменной кладки и разработанная система критериев прочности позволяют выполнить детальный анализ процессов, происходящих в рамках пластической фазы деформирования.

Анализ прочности различных структурных групп конечных элементов моделей выполнен на основе следующих критериев прочности (детали – см. работы [7, 8]):

критерий тип 1 – прочность кирпича в условиях двухосного напряженного состояния (критерий (3) в работе [7];

критерий тип 2 – прочность раствора в условиях двухосного напряженного состояния (критерий (3) в работе [7];

критерий тип 3 – узел взаимодействия кирпича и раствора в горизонтальном шве – критерий «отрыв» и «срез» при действии растягивающих напряжений ( $N \geq 0$ ), перпендикулярных плоскости шва;

критерий тип 4 – узел взаимодействия кирпича и раствора в горизонтальном шве – критерий «срез» при действии сжимающих напряжений ( $N < 0$ ), перпендикулярных плоскости шва;

критерий тип 5 – узел взаимодействия кирпича и раствора в вертикальном шве – критерий «отрыв» при действии растягивающих напряжений ( $N \geq 0$ ), перпендикулярных плоскости шва;

критерий тип 6 – узел взаимодействия кирпича и раствора в вертикальном шве – критерий «срез» при действии сжимающих напряжений ( $N < 0$ ), перпендикулярных плоскости шва.

По результатам анализа динамики формирования и накопления «разрушенных» КЭ, аппроксимирующих различные группы структурных элементов кладки, построены обобщающие графики, характеризующие процесс пластического деформирования каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния при возрастающих нагрузках (рис. 2).

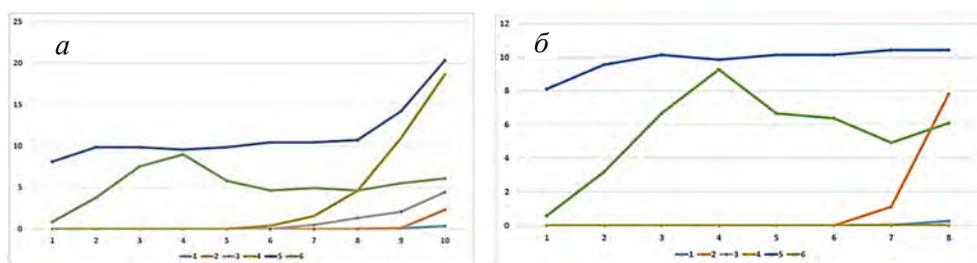


Рис. 2. Накопления повреждений в различных структурных группах элементов расчетной модели при поэтапном нагружении:

*а* – модель NM-12; *б* – NM-2; 1–6 – критерии прочности; по вертикальной оси – проценты от общего числа КЭ в группе; по горизонтальной оси – этапы нагружения

Метод структурного анализа позволяет детализировать процесс накопления разрушений по различным видам критериев прочности (рис. 3–5, где синий цвет – графики для модели NM-2; красный цвет – NM-12; по вертикальной оси – объем разрушенных элементов структурной группы в процентах, по горизонтальной оси – нагрузка в долях от разрушающей).

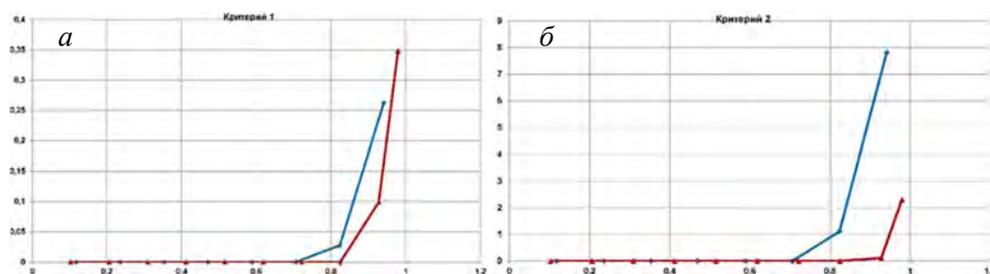


Рис. 3. Накопление повреждений в КЭ различного типа:  
а – кирпич; б – раствор

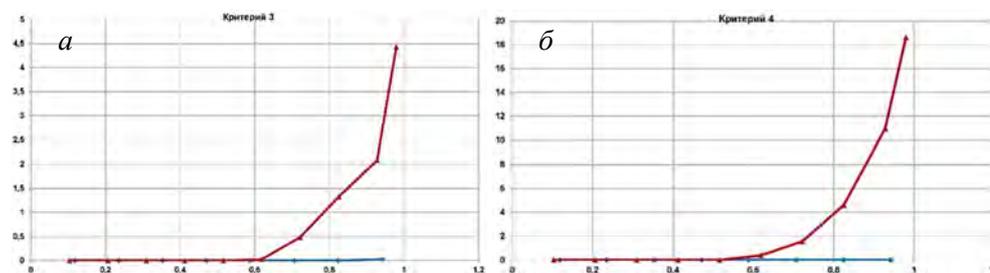


Рис. 4. Накопление повреждений в КЭ различного типа:  
а – адгезионный слой в горизонтальном растворяющем шве (критерий прочности – тип 3); б – адгезионный слой в горизонтальном растворяющем шве (критерий прочности – тип 4)

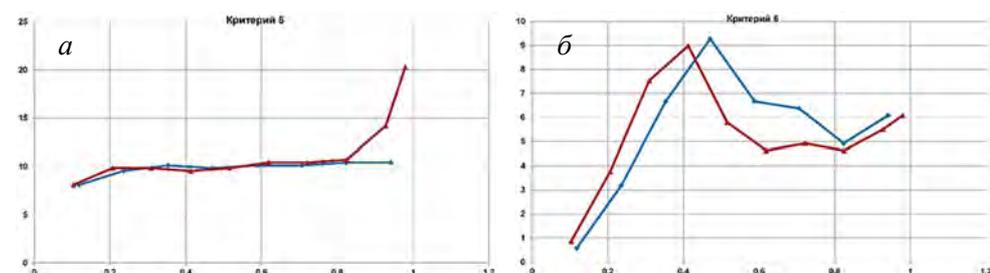


Рис. 5. Накопление повреждений в КЭ различного типа:  
а – вертикальный растворяющий шов (критерий прочности – тип 5); б – вертикальный растворяющий шов (критерий прочности – тип 6)

Кирпич (критерий тип 1) разрушается в весьма незначительных объемах (0,27–0,35 % от общего числа КЭ соответствующей группы), и только на завершающих – предпоследнем и последнем – этапах нагружения образца (рис. 3, а).

Раствор (критерий тип 2) разрушается на завершающих этапах нагружения образца. При низком уровне нормального сцепления разрушения формируются в незначительных объемах (2,3 %); при высоком уровне нормального сцепления разрушение раствора происходит в существенно больших объемах – увеличение объема более чем в 3 раза – до 7,8 % (рис. 3, б).

Адгезионный слой горизонтального шва (критерий тип 3): при пониженном уровне адгезионной прочности начало процесса разрушения происходит при уровне нагрузки  $0,6-0,65 P_{ult}$ , после чего объем разрушенных элементов увеличивается до величины 4,5 % от числа элементов структурной группы; при высоком уровне адгезионной прочности процесс разрушения элементов такого типа крайне незначителен и фиксируется в малых объемах на последней стадии нагружения. В целом, развитие разрушения по критерию тип 3 вполне соответствует общим принципам механики – при меньшем уровне адгезионной прочности формируется больший объем разрушений (рис. 4, а).

В адгезионном слое горизонтального шва (критерий тип 4, рис. 4, б) при пониженном уровне адгезионной прочности начало процесса разрушения происходит при уровне нагрузки  $0,6-0,65 P_{ult}$ , после чего объем разрушенных элементов значительно увеличивается (18,4 %) по зависимости, близкой к квадратичной; при высоком значении прочности нормального сцепления разрушение в контактном слое кирпича и раствора в горизонтальном шве по критерию тип 4 не происходит – высокий уровень адгезионной прочности обеспечивает столь же высокий уровень удерживающих сил, достаточных для обеспечения неразрушения конечных элементов структурной группы адгезионного слоя.

Накопление повреждений в зоне взаимодействия кирпича и раствора в вертикальном шве по критериям прочности тип 5 и тип 6 представлено на рис. 5.

Анализ графика на рис. 5, а показывает, что при высоком уровне нормального сцепления (образец NM-2) «разрушение» узла взаимодействия кирпича и раствора происходит в минимальных объемах в диапазоне нагрузок от  $0,35$  до  $1,0 P_{ult}$ . При уровне нормального сцепления, близком к нормативному (образец NM-12), наблюдается интенсивный рост «разрушения» узла на завершающих стадиях нагружения модели.

По критерию прочности тип 6 характер процесса разрушения в образцах при различном уровне адгезионной прочности в целом не имеет принципиальных отличий (рис. 5, б). До уровня нагрузки  $0,4-0,5 P_{ult}$  наблюдается рост объема разрушений, после чего увеличение уровня сжимающих напряжений в зоне контакта кирпича и раствора формирует большие величины удерживающих напряжений в узле взаимодействия кирпича и раствора, что приводит к изменению состояния узла и сокращению разрушенных элементов модели по критерию тип 6.

Необходимо отметить выраженную особенность локальных «разрушений» при высоком уровне адгезионной прочности: зафиксирован неизменный объем «разрушений» в зоне контакта кирпича и раствора в вертикальном шве по критерию «отрыв при действии растягивающих напряжений» (критерий тип 5). Указанная особенность обусловлена чрезвычайно малым объемом «разрушений» в адгезионном слое горизонтального шва, что обеспечивает

отсутствие взаимного сдвига кирпичей одного ряда, а это, в свою очередь, препятствует изменению напряжений растяжения в вертикальном шве.

Анализ процессов накопления повреждений в адгезионном слое горизонтальных швов показывает, что высокий уровень адгезионной прочности формирует особый характер генерации локальных разрушений – их объем крайне незначителен (по критерию тип 3) либо близок к нулю (по критерию тип 4). Это свидетельствует о том, что увеличение нагрузок на модель приводит к смещению процесса разрушений из узла взаимодействия кирпича и раствора непосредственно в базовые материалы кладки, а такое изменение зон формирования разрушений приводит к изменению объема пластических деформаций образца.

Рядом исследователей зафиксирована связь уровня адгезионной прочности и величины пластической фазы деформирования каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния. Так, в работе P. Shubert и D. Bohene [16] установлена связь адгезионной прочности в горизонтальном шве и характеристик работы шва в режиме сдвига, что (в свою очередь) коррелирует с величиной пластической фазы деформирования. В исследованиях R. Carozzussa [17] показано, что каменные образцы с наибольшим объемом локальных разрушений в горизонтальных швах обладают наиболее выраженной пластической фазой деформирования. В работе R. Sousa, H. Sousa, J. Guedes [18] зафиксировано увеличение пластических деформаций образцов при больших объемах деформирования в локальных зонах горизонтальных швов в режиме сдвига. Однако причины и механизмы, приводящие к изменению пластичности каменной кладки при двухосном напряженном состоянии, авторами работ не установлены.

Детализация схем формирования разрушений по различным видам критериев прочности показывает, что важнейшим фактором, определяющим весь процесс пластической фазы деформирования каменной кладки при плоском напряженном состоянии, является механизм локальных разрушений в зоне взаимодействия кирпича и раствора в горизонтальном шве по схемам «отрыв и срез при действии растягивающих напряжений» (критерий тип 3) и «срез при действии сжимающих напряжений» (критерий тип 4).

Таким образом, численные исследования позволили установить ранее не описанную особенность пластического деформирования каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния: характеристика пластичности определяется объемом локальных разрушений в узле контактного взаимодействия кирпича и раствора в горизонтальном шве. С учетом многократной разницы в объемах по разным видам механизмов разрушений (объем разрушений по критерию тип 4 превосходит аналогичный объем по критерию тип 3 более чем в четыре раза) можно сделать вывод о том, что схема разрушений по механизму «срез при действии сжимающих напряжений» в контактной зоне горизонтального шва определяет величину характеристики пластических свойств каменной кладки.

### **Заключение**

На основе результатов численных исследований следует сделать вывод, что наибольшей пластичностью обладают образцы из каменной кладки, в ко-

торых разрушения формируются и накапливаются в зонах контактного взаимодействия кирпича и раствора в горизонтальных швах. И наоборот, минимальной пластичностью обладают образцы, в которых объем разрушений в контактной зоне кирпича и раствора незначителен, но формируется большой объем разрушений в базовых материалах кладки – кирпиче и растворе. К минимизации разрушений в контактной зоне может привести высокий уровень адгезионной прочности, при котором процесс формирования локальных разрушений смещается из узла контакта в зону базовых материалов.

Анализ полученных результатов показывает, что выявлена выраженная обратная зависимость величины коэффициента пластичности от уровня адгезионной прочности ( $R_{adh}$ ): максимальный уровень коэффициента пластичности  $\mu = 2,885$  зафиксирован при более низком уровне адгезионной прочности ( $R_{adh} = 0,128$  МПа), минимальный уровень  $\mu = 1,659$  – при наиболее высоком уровне адгезионной прочности ( $R_{adh} = 0,623$  МПа).

Столь существенные изменения величины характеристики пластичности определяются различными схемами формирования и накопления разрушений в структурных элементах модели в рамках пластической фазы деформирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Онищик, Л.И.* Каменные конструкции промышленных и гражданских зданий / Л.И. Онищик. – М. ; Л. : Стройиздат, 1939. – 208 с.
2. *Копаница, Д.Г.* Экспериментальные исследования фрагментов кирпичной кладки на действие статической и динамической нагрузки / Д.Г. Копаница, О.В. Кабанцев, Э.С. Усеинов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 4. – С. 157–178.
3. *Бураго, Н.Г.* Моделирование разрушения упругопластических тел / Н.Г. Бураго // Вычислительная механика сплошных сред. – 2008. – Т. 1. – № 4. – С. 5–20.
4. *Трусов, П.В.* Некоторые вопросы нелинейной механики деформируемого твердого тела (в порядке обсуждения) / П.В. Трусов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2009. – 17. – С. 85–95.
5. *Kabantsev, O.* Modeling Nonlinear Deformation and Destruction Masonry under Biaxial Stresses. Part 1. Masonry as Simulation Object // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – P. 681–696.
6. *Kabantsev, O.* Modeling Nonlinear Deformation and Destruction Masonry under Biaxial Stresses. Part 2. Strength Criteria and Numerical Experiment // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – P. 808–819.
7. *Кабанцев, О.В.* Дискретная модель каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния / О.В. Кабанцев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 4. – С. 113–134.
8. *Кабанцев, О.В.* Моделирование упругопластического деформирования каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния / О.В. Кабанцев, А.Г. Тамразян // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2015. – Is. 3. – V. 11. – P. 87–100.
9. *Перельмутер, А.В.* Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – М. : СКАД СОФТ; Изд-во АСВ; ДМК Пресс, 2011. – 709 с.
10. *Кабанцев, О.В.* Учет изменений расчетной схемы при анализе работы конструкции / О.В. Кабанцев, А.Г. Тамразян // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 5. – С. 15–26.
11. *Кабанцев, О.В.* Учет изменения жесткостей элементов в процессе монтажа и эксплуатации / О.В. Кабанцев, А.В. Перельмутер // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 5. – С. 6–14.

12. Экспериментальные исследования сейсмоусиления каменной кладки наружными бетонными аппликациями / Г.П. Тонких, О.В. Кабанцев, О.А. Симаков, А.Б. Симаков, С.М. Баев, П.С. Панфилов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2011. – № 2. – С. 35–42.
13. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++ / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, М.А. Микитаренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер. – М. : Изд-во СКАД СОФТ, 2015. – 808 с.
14. Попов, Н.Н. Динамический расчет железобетонных конструкций / Н.Н. Попов, Б.С. Распоргуев. – М. : СИ, 1974. – 207 с.
15. Veletsos, A.S. Effect of inelastic behavior on the response of simple systems to earthquake motion / A.S. Veletsos // Proc. Second World Conf. Earthq. Engrg. – Tokio and Kioto, Japan. – P. 895–912.
16. Schubert, P. Schubfestigkeit von Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen /P. Schubert, D. Bohene // Das Mauerwerk Heft 3, Ernst & John. – 2002. – P. 98–102.
17. Capozucca, R. Shear behaviour of historic masonry made of clay bricks / R. Capozucca // The Open Construction and Building Technology Journal. – 2011. – 5. (Suppl 1-M6). – P. 89–96.
18. Sousa, R. Diagonal compressive strength of masonry samples – experimental and numerical approach / R. Sousa, H. Sousa, J. Guedes // Materials and Structures. – 2013. – 46. – P. 765–786.

## REFERENCES

1. Onishchik L.I. Kamennye konstruksii promyshlennykh i grazhdanskikh zdaniy [Stone structures of industrial and civil buildings]. Moscow : Gosizdat Publ., 1939. 208 p. (rus)
2. Kopanitsa D.G., Kabantsev O.V., Useinov E.S. Eksperimentalnye issledovaniia fragmentov kirpichnoi kladki na deistvie staticheskoi i dinamicheskoi nagruzki [Experimental research of masonry fragments under static and dynamic loads]. *Vestnik TSUAB*. 2012. No 4. Pp. 157–178. (rus)
3. Burago N.G. Modelirovanie razrusheniia uprugoplasticheskikh tel [Modelling of elastoplastic body failure]. *Computational Continuum Mechanics*. 2008. V. 1. No 4. Pp. 5–20. (rus)
4. Trusov P.V. Nekotorye voprosy nelineinoy mekhaniki deformiruемого tverdogo tela (v poriadke obsuzhdeniia). [Problems of nonlinear mechanics of deformed solids]. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2009. No. 9. Pp. 85–95. (rus)
5. Kabantsev O.V. Modeling nonlinear deformation and destruction masonry under biaxial stresses. Part 1. Masonry as simulation object. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Pp. 681–696.
6. Kabantsev O.V. Modeling Nonlinear deformation and destruction masonry under biaxial stresses. Part 2. Strength criteria and numerical experiment. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Pp. 808–819.
7. Kabantsev O.V. Diskretnaya model' kamennoi kladki v usloviyakh dvukhosnogo napryazhennogo sostoyaniya [Discrete model of masonry under biaxial stress]. *Vestnik TSUAB*. 2015. No 4. Pp. 113–134. (rus)
8. Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G. Modelirovanie uprugo-plasticheskogo deformirovaniya kamennoi kladki v usloviyakh dvukhosnogo napryazhennogo sostoyaniya [Modeling of elastoplastic deformation of masonry under biaxial stress]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2015. V. 11. No. 3, Pp. 87–100. (rus)
9. Perelmuter A.V., Slivker V.I. Raschetnyie modeli sooruzheniy i vozmozhnost ih analiza [Design building models and their analysis]. Moscow : SKAD SOFT Publ., ASV Publ., DMK Press. 2011. 709 p. (rus)
10. Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G. Uchet izmeneniy raschetnoy skhemy pri analize raboty konstruksii [Structural behavior analysis]. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. No 5. Pp. 15–26. (rus).
11. Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Uchet izmeneniya zhestkosti elementov v protsesse montazha i ekspluatatsii [Stiffness changes in elements during mounting and operation]. *Magazine of Civil Engineering*. 2015. No 1. Pp. 6–14. (rus)
12. Tonkikh G.P., Kabantsev O.V., Simako, O.A., Simakov A.B., Baev S.M., Panfilov P.S. Eksperimentalnye issledovaniia seismousileniia kamennoi kladki naruzhnymi betonnymi aplikatsiiami [Experimental research of seismic reinforcement of masonry with external con-

- crete applications]. *Seismostoikoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenii*. 2011. No 2. Pp. 35–42. (rus)
13. *Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Mikitarengo M.A., Perelmuter A.V., Perelmuter M.A.* SCAD Office. Versiya 21. Vychislitelnyy kompleks SCAD++ [SCAD Office 21. SCAD++]. Moscow : SKAD SOFT Publ., 2015. 808 p. (rus)
  14. *Popov N.N., Rastorguev B.S.* Dinamicheskii raschet zhelezobetonnykh konstruksii [Dynamic analysis of reinforced concrete structures] Moscow : Stroyizdat Publ., 1974. 207 p. (rus)
  15. *Veletsos A.S.* Effect of inelastic behavior on the response of simple systems to earthquake motion. *Proc. 2nd World Conf. on Earthquake Engrg.* Pp. 895-912.
  16. *Schubert P.D. Bohene.* Schubfestigkeit von Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen. Das Mauerwerk Heft 3, Ernst & John, 2002. Pp. 98–102.
  17. *Capozucca R.* Shear behavior of historic masonry made of clay bricks. *The Open Construction And Building Technology Journal*. 2011. No. 5. (Suppl 1-M6). Pp. 89–96.
  18. *Sousa R., Sousa H., Guedes J.* Diagonal compressive strength of masonry samples – experimental and numerical approach. *Materials and Structures*. 2013. No. 46. Pp. 765–786.