

УДК 539.3

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ<sup>\*</sup>)

В.Г. Баженов<sup>1</sup>, Н.Н. Гердюков<sup>2</sup>, А.В. Гордиенко<sup>1</sup>, А.В. Дудник<sup>1</sup>,  
А.И. Кибец<sup>1</sup>, Л. Крушка<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Нижний Новгород, <sup>2</sup>Саров, <sup>3</sup>Варшава (Польша)

Излагаются вычислительная модель для оценки динамической прочности кирпичной кладки и экспериментальный метод для оснащения этой модели необходимыми параметрами. Приводятся результаты анализа деформирования и разрушения блока кирпичной кладки при взрывном нагружении.

### Введение

Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций из кирпичной кладки в условиях динамического нагружения необходимы определяющие соотношения и методы решения, адекватно описывающие рассматриваемые процессы, а также значения используемых в этих соотношениях механических характеристик. В связи с этим актуальны комплексные теоретико-экспериментальные исследования, позволяющие оснастить вычислительную модель требуемыми деформационными и прочностными параметрами и провести ее верификацию. Ниже приводятся определяющие соотношения поврежденной среды, механические характеристики которой зависят от вида НДС, текущего уровня повреждения, и описывается экспериментальный метод исследования свойств кирпичной кладки при взрывном нагружении. Апробация созданного расчетно-экспериментального метода выявила существенное влияние вида НДС на процессы деформирования и разрушения в рассматриваемом классе задач.

### 1. Постановка задачи и метод решения

Определяющая система уравнений формулируется в переменных Лагранжа с позиций механики сплошных сред. Уравнение движения выводится из вариационного принципа Журдена. Деформирование и разрушение кирпичной кладки рассматривается в рамках физически нелинейной модели [1, 2] упругой разномодульной среды, свойства которой зависят от вида НДС и уровня поврежденности. Вид НДС характеризуется параметром  $P$ , определяемым через главные напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  по формуле:

$$P = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sqrt{3(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)}. \quad (1)$$

<sup>\*</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 08-08-00560-а, 07-08-13637-офи\_ц) и Министерства образования и науки РФ (грант Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-3367.2008.8).

Влияние поврежденности на процесс деформирования учитывается путем введения зависимости упругих характеристик материала от текущего значения скалярного параметра целостности  $\omega$ , представляющего собой меру уменьшения эффективных площадок действия напряжений по отношению к их начальному неповрежденному значению. Применяемая модель хрупкого разрушения основывается на критерии максимальных нормальных напряжений. Изменение меры поврежденности  $\Delta\omega$  описывается уравнениями кинетического типа:

$$\Delta\omega = \begin{cases} 0 & \text{при } \sigma_1 < \sigma^R, \sigma_3 > \sigma^S, \\ C \frac{1-\omega}{\sigma_1} (\sigma_1 - \sigma^R) & \text{при } \sigma_1 > \sigma^R, \\ C \frac{1-\omega}{\sigma_3} (\sigma_3 - \sigma^S) & \text{при } \sigma_3 < \sigma^S, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\sigma_1, \sigma_3$  – текущие значения первого и третьего главных напряжений,  $\omega$  – накопленное значение меры поврежденности;  $C$  – константа, используемая для регуляризации описания процесса развития повреждений;  $\sigma^R, \sigma^S$  – зависящие от вида НДС предельные значения главных напряжений при растяжении и сжатии:

$$\sigma^R = f_1(P)\sigma_0^R, \quad \sigma^S = f_2(P)\sigma_0^S, \quad (3)$$

$\sigma_0^R, \sigma_0^S$  – пределы прочности материала при одноосном растяжении и сжатии.

Соотношения, устанавливающие связь между приращениями напряжений и деформаций на текущем временном шаге, записываются в виде [3]:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{ij} &= 2G_0\Delta\varepsilon'_{ij} + \delta_{ij}3K_0\Delta\varepsilon + \Delta r_{ij} + \Delta t_{ij}, \\ \Delta r_{ij} &= 2G_0(A_1 + A_2 + A_1A_2)\Delta\varepsilon'_{ij} + \delta_{ij}3K_0\Delta\varepsilon B, \\ \Delta t_{ij} &= \Delta G\sigma'_{ij}/G + \delta_{ij}\Delta K\sigma/K. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $\varepsilon'_{ij}, \varepsilon, \sigma'_{ij}, \sigma$  – девиаторные и шаровые компоненты тензоров деформаций и напряжений;  $G, K$  – модули сдвига и объемной деформации,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера,

$$\begin{aligned} K &= K_0(1+B), \quad K_0 = (K^+ + K^-)/2, \quad B = g_1\text{sign}(P), \\ g_1 &= (K^+ - K^-)/(K^+ - K^-), \quad G = G_0(1+A_1)(1+A_2), \\ G_0 &= (G^+ + G^-)/2, \quad A_1 = 1 + \sqrt{3}g_2P + 3g_3P^2, \\ A_2 &= (G'_0 - G_0)/G_0, \quad g_2 = (G^+ - G^-)/2G_0, \\ g_3 &= (G^+ + G^-)/2G_0 - 1, \end{aligned} \quad (5)$$

$G^+, G^-, K^+, K^-$  – значения модулей сдвига и объемной деформации при одноосном растяжении и сжатии,  $G'_0$  – секущий модуль сдвига на диаграмме  $\sigma_i \sim \varepsilon_i$  при чистом сдвиге ( $P=0$ ), характеризующий нелинейную упругость. Наряду с эффективными напряжениями  $\sigma_{ij}$ , действующими на поврежденных площадках, вводятся приведен-

ные напряжения  $\sigma_{ij}^*$ , статически эквивалентные  $\sigma_{ij}$  но отнесенные к неповрежденным площадкам, которые подставляются в уравнения движения конструкции.

Локальное разрушение кирпичной кладки происходит при достижении мерой поврежденности критического значения ( $\omega = 1$ ). При растяжении для материала характерно образование микротрещин, а затем и макротрещин, перпендикулярных направлению главного растягивающего напряжения. Для расчета фрагментации кирпичной кладки применяется упрощенная модель [3], учитывающая деформативность швов, прочность кирпича и раствора на растяжение и сдвиг, а также контактное взаимодействие фрагментов кладки. Решение определяющей системы уравнений при заданных начальных и граничных условиях основано на методе конечных элементов и явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа "крест" [4].

## 2. Постановка экспериментов

Для практического применения соотношений (1)–(5) следует знать механические характеристики материала при сдвиге, одноосном растяжении и сжатии, а также данные экспериментов по разрушению материала в условиях сложного НДС, необходимые для построения функций  $f_1(P)$ ,  $f_2(P)$  из (3). Для получения этих характеристик проводились экспериментальные исследования на фрагментах кирпичной стены размерами  $1 \times 0,5 \times 0,25$  м (6 рядов кирпичей по 8 штук в ряду). Кирпичи выкладывались по стандартной технологии на фундаменте из бетона, а в вертикальной плоскости опирались на рельсы, подкрепленные бетонными блоками (рис. 1,а). Расстояние между опорами составляло 0,76 м. Для кладки использовался кирпич КП-У (ГОСТ 530-95) марки 150 производства ОАО "Керама" и раствор марки 200, изготовленный по стандартной технологии. На момент проведения испытаний "возраст" изделий составлял около 15 месяцев.

Взрывное нагружение контактного типа осуществлялось по методу, суть которого заключается в следующем [5]. Импульс распределенного по нагружаемой поверхности давления заданного уровня и длительности создается при динамическом деформировании буферного (демпфирующего) слоя, размещенного на поверхности нагружаемого объекта, на котором тормозится ударник в виде плоской пластины, разгоняемой при подрыве слоя листового взрывчатого вещества (ВВ) (рис. 1,б).

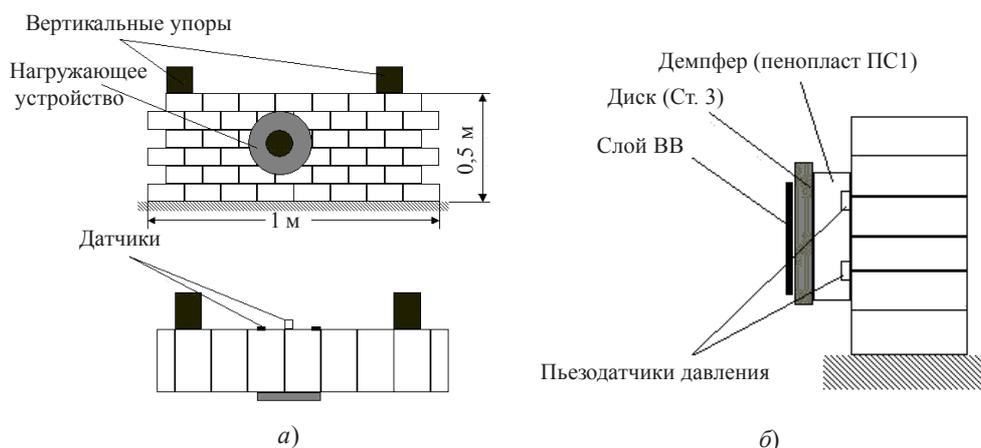


Рис. 1

В качестве демпфирующего слоя обычно применяют пенопласты (пенополистирол ПС-1 и т.п.), сотовые элементы из пластичных алюминиевых сплавов, крешерные блоки с крешерами в виде тонкостенных трубок и др. Принцип формирования нагрузки постоянного уровня – потеря устойчивости элемента в области пластичности при достижении больших деформаций (30÷50%). Форма импульса динамического давления обычно близка к трапециевидной. Конструктивные параметры нагружающего устройства (масса ударника, масса ВВ, размеры и тип демпфера) выбираются в зависимости от требуемых параметров импульсной нагрузки.

В указанной постановке было проведено несколько опытов, в которых варьировались амплитуда и длительность нагружающего импульса. В качестве демпфера использовался пенопласт ПС-1 с плотностью 230 кг/м<sup>3</sup>, диаметром 260 мм и толщиной 60 мм. Масса зарядов ВВ указана в таблице. В опытах проводились измерения: а) динамического давления от нагружающего устройства на лицевой поверхности (с помощью кварцевых пьезоэлектрических датчиков типа ПДД2), б) относительной деформации стенки на тыльной поверхности (стандартными тензодатчиками типа 2ФКП-10-200), в) ускорения тыльной стороны стенки в центре зоны нагружения (пьезоакселерометром АДП14), г) смещения во времени тыльной стороны стенки в центре зоны нагружения, д) обжатия (остаточной деформации) демпфера.

Таблица

№ опыта	Масса ВВ, г	Максимальная скорость перемещения $V$ в центре тыльной поверхности стены, м/с	
		эксперимент	расчет
1	87,5	0,8	0,7
2	96	1,6	1,5
3	123	3,1	2,8

### 3. Сопоставление результатов вычислительных и натуральных экспериментов

В натуральных экспериментах при минимальном заряде (опыт №1) в центре фрагмента кирпичной кладки возникла вертикальная волосовидная трещина без разделения фрагмента на части. В опыте №2 получен такой же результат, но трещина обозначена более явно. В опыте №3 фрагмент разрушился на две части с раскрытием трещины, разворотом обеих половинок и смещением их с основания. Разрушение (с разделением фрагмента стены на части) имело место в зоне действия наибольших растягивающих напряжений при уровне деформаций 0,015% (в среднем).

При численном моделировании зависимости взрывной нагрузки от времени и пространственных координат аппроксимировались по экспериментальным диаграммам. При идентификации деформационных и прочностных характеристик, входящих в уравнения (1)–(5), исходили из адекватного воспроизведения формы разрушения конструкции и временной зависимости перемещения в центре тыльной поверхности. На рис. 2 приведены графики изменения во времени перемещения  $U$  в центре тыльной поверхности кирпичной кладки (сплошные линии – эксперимент, точки – расчет, номера кривых соответствуют номерам опытов). Максимальные значения скорости перемещения в этой точке, полученные в расчетах и экспериментах, представлены в таблице.

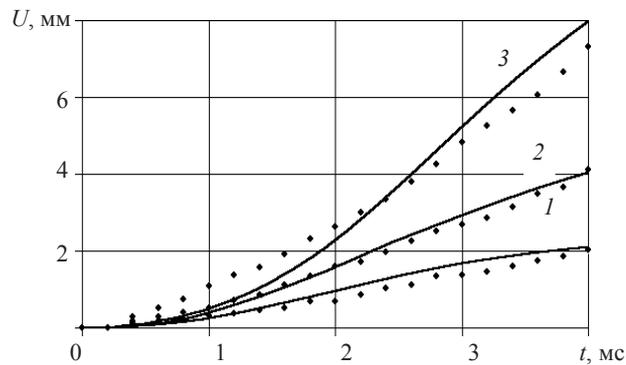


Рис. 2

Анализ уровня поврежденности материала при взрыве заряда ВВ массой 87,5 г (опыт №1) показал, что в кирпичной кладке на тыльной поверхности образуется несквозная вертикальная трещина в центральном поперечном сечении. С увеличением массы заряда до 123 г (опыт №3) вертикальная трещина по расчетным данным становится сквозной. Дополнительные исследования выявили существенную зависимость прочностных характеристик кирпичной кладки от вида НДС: если задать пределы прочности на растяжение и сжатие одинаковыми, получить вертикальную трещину в этой задаче не удастся.

Таким образом, можно сделать заключение об удовлетворительном качественном и количественном соответствии результатов численных и натуральных экспериментов, что подтверждает эффективность применяемой вычислительной модели кирпичной кладки при взрывных воздействиях и предлагаемого расчетно-экспериментального метода оценки ее параметров.

**Ключевые слова:** вычислительная модель, экспериментальный метод, динамическая прочность, кирпичная кладка, взрывное нагружение, деформирование, разрушение.

#### Литература

1. Качанов, Л.М. Основы теории разрушения / Л.М. Качанов. – М.: Наука, 1974. – 312 с.
2. Капустин, С.А. Численный анализ поведения конструкций из кусочнооднородных материалов, имеющих блочно-периодическую структуру / С.А. Капустин, С.Ю. Лихачева // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Н. Новгород: Изд-во ННГУ. – 2000. – Вып. 62. – С. 93–100.
3. Деформирование и разрушение конструкции кирпичной кладки при взрывном нагружении / В.Г. Баженов [и др.] // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов: Межвуз. сб. / М.: ТНИ КМК. – 1999. – Вып. 60. – С. 19–25.
4. Баженов, В.Г. Численное моделирование нестационарных процессов ударного взаимодействия деформируемых элементов конструкций / В.Г. Баженов, А.И. Кибец, И.Н. Цветкова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1995. – № 2. – С. 20–26.
5. Новиков, С.А. Прочность конструкционных материалов при интенсивных ударных нагрузках / С.А. Новиков // Высокие плотности энергии: Сб. науч. трудов РФЯЦ–ВНИИЭФ. – Саров, 1997. – С. 384–417.

[10.09.2008]

**COMPUTATIONAL-EXPERIMENTAL METHOD OF ANALYZING DEFORMATION  
AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF BRICKWORK  
UNDER EXPLOSIVE LOADING**

**V.G. Bazhenov, N.N. Gerdyukov, A.V. Gordiyenko, A.V. Dudnik,  
A.I. Kibets, L. Krushka**

A computational model for evaluating dynamic strength of brickwork and an experimental method for equipping this model with the necessary parameters are presented. The results of analyzing deformation and fracture of a brickwork block under explosive loading are given.

**Key words:** computational model, experimental method, dynamic strength, brickwork, explosive loading, deformation, fracture.