

УДК 539.3

БЕЛОВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
n.n.belov@mail.ru

ЮГОВ НИКОЛАЙ ТИХОНОВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
n.t.yugov@mail.ru

КОПАНИЦА ДМИТРИЙ ГЕОРГИЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
kopanitsa@mail.ru

ЮГОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
yugalex@mail.ru

СТУКАНОВ АНАТОЛИЙ ЛЕОНИДОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
ingrafika@mail.ru

УСЕИНОВ ЭМИЛЬ СЕЙРАНОВИЧ, ст. преподаватель,
useinov_em@mail.ru

РЫШКОВ АРТЕМ ВИКТОРОВИЧ, ст. преподаватель,
rav.tomsk@mail.ru

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

МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ОБЫКНОВЕННОГО ГЛИНЯНОГО КИРПИЧА

Предложена математическая модель, описывающая в рамках механики сплошной среды процессы деформирования и разрушения материала обыкновенного глиняного кирпича в условиях ударно-волнового нагружения. Модель реализована в пакете вычислительных комплексов «РАНЕТ-3», позволяющем проводить решение задач удара и взрыва в полной трехмерной постановке модифицированным на решении динамических задач методом конечных элементов. Проведен расчет на прочность кирпича марки М100 при ударе падающей с высоты 1 м стальной пластины массой 197 кг.

Ключевые слова: ударно-волновое нагружение; кирпич; динамическое разрушение; математическое моделирование.

NIKOLAI N. BELOV, DSc, Professor,
n.n.belov@mail.ru

NIKOLAI T. YUGOV, DSc, Professor,
n.t.yugov@mail.ru

DMITRIY G. KOPANITSA, DSc, Professor,
kopanitsa@mail.ru

ALEKSEI A. YUGOV, PhD, A/Professor,
yugalex@mail.ru

ANATOLIY L. STUKANOV, PhD, A/Professor,
ingrafika@mail.ru

EMIL S. USEINOV, Senior Lecturer,
useinov_em@mail.ru

ARTEM V. RYSHKOV, Senior Lecturer,
rav.tomsk@mail.ru

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

MODEL OF DYNAMIC FRACTURE OF ORDINARY LOAM BRICK

The paper presents the mathematical model of the dynamic fracture of an ordinary loam brick under shock-wave loading. This mathematical model is implemented using the RANET-3 software package allowing 3D simulation of impact and explosion problems using the finite element analysis oriented towards the solution of dynamical problems. The impact strength analysis is given for the type M100 loam brick using a steel plate 197 kg weight dropped from 1 m height.

Keywords: shock-wave loading; brick; dynamic fracture; mathematical modeling.

Введение

Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в регионах с высоким уровнем сейсмических рисков является важной проблемой, решение которой способствует устойчивому социально-экономическому развитию и обеспечению национальной безопасности Российской Федерации.

Как показали результаты общего сейсмического районирования, сейсмическая опасность на территории Российской Федерации оказалась более значительной, чем это представлялось прежде. В соответствии с новыми картами (ОСР-97) сейсмическая опасность на территории многих субъектов Российской Федерации была уточнена и оказалась выше на 1–2 и даже 3 балла, т. е. уровень сейсмического риска на этих территориях значительно повысился в сравнении с прежними расчетными величинами.

Очевидно, что здания и сооружения, построенные до уточнения величины сейсмической опасности, имеют значительный дефицит сейсмостойкости, их разрушение в результате землетрясений может привести к огромным людским и материальным потерям.

По экспертным оценкам, имеют дефицит сейсмостойкости и могут представлять источник опасности при сейсмических воздействиях до 50 % объектов жилого, общественного, производственного назначения и коммунальной сферы.

Анализ структуры существующих зданий по основным типам несущих конструкций показывает, что преобладающим является каменная кладка. Здания с несущими стенами из каменной кладки относятся к группе так называемых жестких зданий, получающих весьма высокую степень повреждения при сейсмических воздействиях. При этом многочисленные лабораторные и натурные испытания показывают, что кирпичная кладка, выполненная обычным ручным способом, далеко не всегда удовлетворяет требованиям норм, предъявляемым к кладкам I и II категории. В отдельных случаях нормальное сцепление в кладке, являющееся основным показателем сейсмостойкости здания, находится в пределах до $0,6 \text{ кг/см}^2$, в то время как по нормам его величина должна быть равной $1,2\text{--}1,8 \text{ кг/см}^2$. Низкое сцепление раствора с кирпичом, нарушение монолитности кладки на отдельных участках стен, а также отступления от проекта в процессе возведения или изменения полезных или других нагрузок в период эксплуатации приводят к тому, что многие здания не соответствуют нормативным требованиям их сейсмостойкости. В случае землетрясений в этих зданиях возможны повреждения и даже разрушения, которые могут стать причиной гибели людей и потерь материальных ценностей.

Отметим также, что «ослабленные» за счет возникших в них повреждений и дефектов строительства эти здания и сооружения обладают меньшей стойкостью и к воздействию взрывных нагрузок различного происхождения (взрывы бытового газа, террористические акты и т. п.). Все это диктует необходимость принятия мер по усилению и реконструкции таких зданий и сооружений для обеспечения их эксплуатационной технической безопасности в целом, а также сейсмобезопасности и взрывобезопасности в частности.

В настоящее время перспективным представляется выполнение мероприятий по усилению существующих каменных зданий без прерывания их эксплуатации с использованием современных материалов и технологий.

Для расчета прочности элементов строительных конструкций на взрывные и ударные нагрузки в Томском государственном архитектурно-строительном университете разработаны математические модели поведения с учетом ударно-волнового нагружения сред сплошной структуры, в том числе бетона, железобетона, фибробетона [1–16].

В работах [1, 2] рассмотрены два подхода к расчету динамического разрушения в мелкозернистом бетоне. В работах [2–6] для расчета разрушения мелкозернистого бетона применен феноменологический подход, когда критерии прочности выражаются через инвариантные связи критических значений макрохарактеристик процесса – напряжений и деформаций. Проведенное сравнение данных математического моделирования с результатами специально поставленного эксперимента показало, что данный подход к расчету разрушения, используемый при решении задач статики, может быть использован при расчете разрушения в мелкозернистом бетоне при ударном нагружении в диапазоне скоростей удара до 800 м/с. В работах [1, 2, 7] предложена модель динамического разрушения мелкозернистого бетона, в котором разрушение в бетоне при ударно-волновом нагружении рассматривается как процесс роста и слияния микродефектов (трещин, пор) под действием образующихся в процессе нагружения напряжений. Проведено сравнение данных математического моделирования, полученных в рамках обоих подходов как между собой, так и с данными эксперимента. Модель, описывающая разрушение как процесс роста и слияния микродефектов под действием образующихся в процессе нагружения напряжений, позволяет рассчитывать процессы разрушения в бетоне при многократном ударном нагружении [2, 8–11]. В работах [2–12] проведено обобщение моделей на расчет прочности элементов железобетонного каркаса на взрывные и ударные нагрузки. При расчете железобетонных конструкций слой бетона с арматурой моделируется упругопластической средой, представляющей собой гомогенную двухфазную смесь материалов – стали и бетона. В отличие от бетона, который разрушается хрупко, гомогенная двухфазная смесь стали и бетона разрушается так же, как и пластичные материалы [2, 10, 13, 14]. Сравнение данных математического моделирования процессов ударного взаимодействия цилиндрических ударников с железобетонными плитами с результатами проведенных экспериментов показало удовлетворительное согласование для обоих подходов, что позволяет использовать их при расчете разрушения в железобетоне в условиях динамического нагружения.

Обобщение модели, описывающей поведение мелкозернистого бетона в условиях ударно-волнового напряжения [2–6], на материал обыкновенного глиняного кирпича позволит рассчитывать динамическое разрушение не только в кирпиче, но и в кирпичной кладке. Исследований поведения конструкций, содержащих кирпичную кладку, при ударно-волновом нагружении крайне недостаточно. В работах [17, 18] приведены результаты экспериментальных исследований фрагментов кирпичной кладки при статическом и динамическом нагружении. Математическое моделирование и расчет конструкций из кирпича при динамическом нагружении является весьма актуальной задачей.

В настоящей работе предложена математическая модель, описывающая в рамках феноменологического подхода процесс динамического разрушения материала глиняного кирпича. При разработке математической модели деформирования и разрушения глиняного обыкновенного кирпича необходимо учитывать его начальную пористость, которая может достигать 13 %.

Математическая модель

Удельный объем пористой среды представляется в виде суммы удельного объема материала матрицы и удельного объема пор: $v = v_m + v_p$. Пористость материала характеризуется относительным объемом пустот ξ либо параметром $\alpha = v / v_m$, которые связаны зависимостью $\alpha = 1 / (1 - \xi)$. Система уравнений, описывающих движение пористой упругопластической среды, имеет вид [1, 2, 7, 10, 14]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho dV &= 0, \quad \frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{u} dV = \int_S \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} dS, \\ \frac{d}{dt} \int_V \rho E dV &= \int_S \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{u} dS, \quad \mathbf{e} = \frac{\mathbf{s}^j}{2\mu} + \lambda \mathbf{s}, \\ \mathbf{s} : \mathbf{s} &= \frac{2}{3} \sigma_T^2, \quad p = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{c_0^2 \rho_0 (1 - \gamma_0 \eta / 2) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} + \rho_0 \gamma_0 \varepsilon \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где t – время; V – объем интегрирования; S – его поверхность; $\mathbf{n}$ – единичный вектор внешней нормали; ρ – плотность; $\boldsymbol{\sigma} = -p \mathbf{g} + \mathbf{s}$ – тензор напряжений; $\mathbf{s}$ – его девиатор; p – давление; $\mathbf{g}$ – метрический тензор; $\mathbf{u}$ – вектор скорости; $E = \varepsilon + \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} / 2$ – удельная полная энергия; ε – удельная внутренняя энергия; $\mathbf{e} = \mathbf{d} - (\mathbf{d} : \mathbf{g}) \mathbf{g} / 3$ – девиатор тензора скоростей деформаций; $\mathbf{d} = (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) / 2$ – тензор скоростей деформаций; $\mathbf{s}^j = \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{s} \cdot \boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{s}$ – производная девиатора тензора напряжений в смысле Яуманна – Нолла; $\mu = \mu_0 (1 - \xi) [1 - (6\rho_0 c_0^2 + 12\mu_0)\xi / (9\rho_0 c_0^2 + 8\mu_0)]$, $\sigma_T = Y_0 / \alpha$ – эффективные модуль сдвига и предел текучести; $\boldsymbol{\omega} = (\nabla \mathbf{u}^T - \nabla \mathbf{u}) / 2$ – тензор вихря; $\rho_0, c_0, \mu_0, Y_0, s_0$ – константы материала матрицы; $\eta = 1 - \rho_0 v / \alpha$. Параметр λ исключается с помощью условия текучести.

C_0 и s_0 являются коэффициентами линейной зависимости скорости ударной волны D от массовой скорости u ($D = c_0 + s_0 u$).

Система (1) замыкается уравнениями, связывающими давление p и пористость α при сжатии:

$$\left[p \geq \frac{2}{3} \sigma_T \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right) \right],$$

$$\rho_0 \gamma_0 \varepsilon + \frac{c_0^2 \rho_0 (1 - \gamma_0 \eta / 2) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} - \frac{2}{3} \sigma_T \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right) = 0 \quad (2)$$

и при разгрузке

$$\left[p \leq -a_s \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right) \right],$$

$$\rho_0 \gamma_0 \varepsilon + \frac{c_0^2 \rho_0 (1 - \gamma_0 \eta / 2) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} + a_s \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right) = 0. \quad (3)$$

Материал кирпича – отоженная глина при динамическом нагружении до выполнения критерия прочности описывается моделью линейного упругого тела, обладающего физико-механическими свойствами кирпича.

В качестве условия прочности используется критерий, предложенный для бетона [19]:

$$3J_2 = [AI_1 + B] \left\{ 1 - (1 - C) \left[1 - \frac{J_3}{2} \left(\frac{J_2}{3} \right)^{-\frac{3}{2}} \right] \right\}, \quad (4)$$

где I_1, J_2, J_3 – первый инвариант тензора напряжений, второй и третий инварианты девиатора тензора напряжений соответственно;

$$A = R_c - R_p; \quad B = R_c R_p; \quad C = \frac{3T_c^2}{R_c R_p},$$

где R_c, R_p, T_c – пределы прочности при одноосном сжатии, растяжении и чистом сдвиге соответственно.

Поверхность (4) для изотропных материалов должна отвечать условию выпуклости (в соответствии с постулатами Друккера и Хилла), которое накладывает следующие ограничения на расчетные параметры:

$$0,530 \leq \frac{T_c}{\sqrt{R_c R_p}} \leq 0,577.$$

Численные значения A, B, C определяются через пределы прочности кирпича при растяжении, сжатии и чистом сдвиге, полученные при динамическом нагружении. После выполнения критерия прочности считается, что материал поврежден трещинами.

Процесс фрагментирования поврежденного трещинами материала и поведение разрушенного материала описываются в рамках модели пористой упругопластической среды.

Фрагментация поврежденного трещинами материала, подвергнутого воздействию растягивающих напряжений, происходит, когда относительный объем пустот достигнет критической величины $\xi_* = \frac{\alpha_* - 1}{\alpha_*}$. Если поврежден-

ный трещинами материал подвергнуть воздействию сжимающих напряжений, то критерием фрагментирования является предельная величина интенсивности пластических деформаций e_u^* :

$$e_u^* = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2},$$

где a_s – параметр модели; T_1 и T_2 – первый и второй инварианты тензора деформаций.

Разрушенный материал моделируется гранулированной средой, выдерживающей сжимающие нагрузки, но не выдерживающей растягивающих напряжений.

Данная модель реализована в пакете вычислительных программ «РАНЕТ-3», позволяющем проводить решение задач удара и взрыва в полной трехмерной постановке [20].

Результаты расчета

В рамках изложенной выше модели проведен расчет динамической прочности кирпича марки М100 на удар падающего на копровой установке стального груза массой m с высоты h . В качестве матричного материала кирпича была принята глина, ударная адиабата которой приведена в работах [21, 22]. Параметры уравнения состояния представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры уравнения состояния

ρ_0 , г/см ³	α_0	c_0 , см/мкс	s_0	γ_0	α_{00}
2,183	1,149	0,332	1,02	2,0	1,001

Через α_{00} в табл. 1 обозначена минимальная пористость в материале, которая не устраняется при любом сжатии. Физико-механические характеристики и параметры модели разрушения кирпича марки М100 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические параметры кирпича М100

μ_0 , ГПа	R_c , ГПа	R_p , ГПа	T_c , ГПа	Y_0 , ГПа	a_s , ГПа	ξ^*	e_u^*
2,27273	0,014	0,00126	0,00238	0,0058	0,0039	0,30	0,26

Нагрузка от падающего груза на лицевую поверхность кирпича моделировалась заданием массовой скорости $u(x, y, z, t)$ на контактную поверхность сталь-кирпич: $u(x, y, z, t) = u(t)$. Рассмотрено три способа задания нагрузки (рис. 1). В первом варианте считалось, что давление на поверхности контакта в течение всего времени нагружения T_1 оставалось постоянным и равным P_0 .

Время нагрузки T_1 можно определить из второго закона Ньютона $m \frac{du}{dt} = -P_0 S_1$. Учитывая, что скорость в течение времени T_1 изменяется от V_0

до 0, $T_1 = \frac{mV_0}{S_1 P_0}$. Приняты следующие обозначения: $V_0 = \sqrt{2gh}$ – скорость падающего груза; S_1 – площадь лицевой поверхности кирпича.

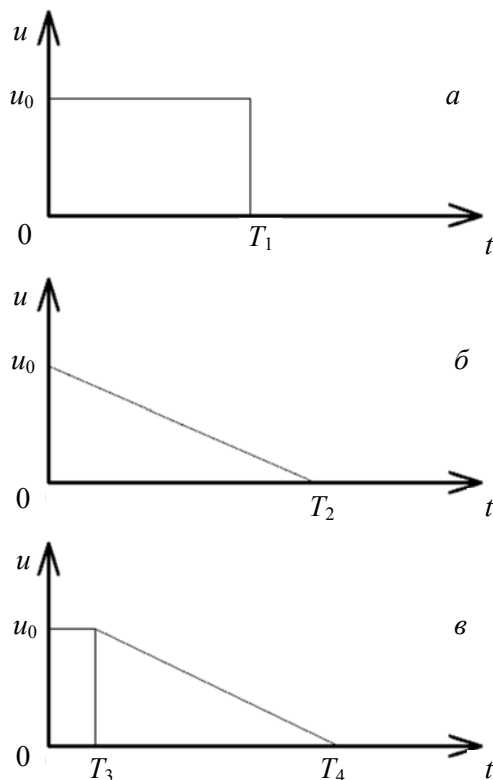


Рис. 1. Зависимость массовой скорости u на поверхность контакта сталь-кирпич от времени процесса t

Для скорости удара V_0 численные значения давления P_0 и массовой скорости u_0 на поверхность контакта сталь-кирпич можно определить графическим методом, используя ударные адиабаты стали и материала кирпича. Во втором варианте на поверхности контакта массовая скорость в течение времени t изменяется по линейному закону: $u(x, y, z, t) = u_0(1 - \frac{t}{T_2})$, где $T_2 = \frac{2mV_0}{S_1 P_0}$.

При третьем способе задания (комбинированном) массовая скорость на поверхности раздела материалов считается постоянной $u(x, y, z, t) = u_0$ до тех пор, пока волны упругой разгрузки, распределяющиеся от тыльной поверхности стальной пластины, не достигнут контактной поверхности ($t = [0, T_3]$), а затем изменятся с течением времени по треугольному закону: $u(x, y, z, t) = u_0(1 - \frac{t}{T_4})$.

На рис. 2–4 представлены результаты математического моделирования динамического разрушения кирпича марки М100 при падении груза массой

197 кг с высоты 1 м. Скорость падения груза $V_0 = 4,43$ м/с, $u_0 = 3,75$ м/м, $P_0 = 0,025$ ГПа, $T_1 = 1128,2$ мкс, $T_2 = 2256,4$ мкс, $T_3 = 50,8$ мкс, $T_4 = 2205,6$ мкс.

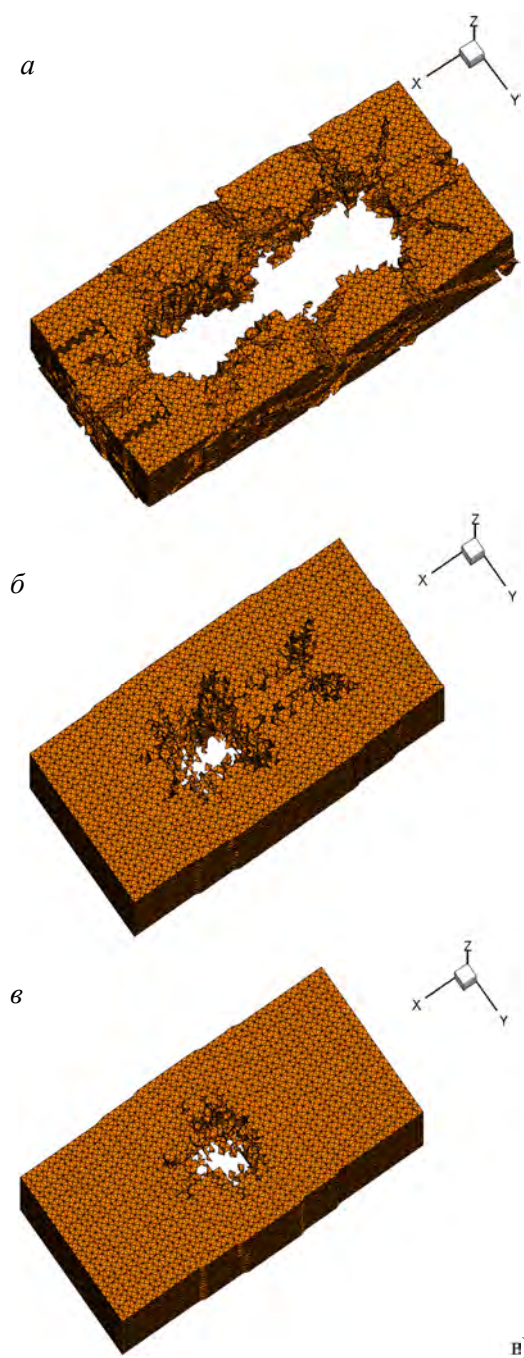


Рис. 2. Картины разрушения кирпича в момент времени 1500 мкс:
а – импульс нагрузки прямоугольный; б – импульс нагрузки треугольный; в – импульс нагрузки комбинированный

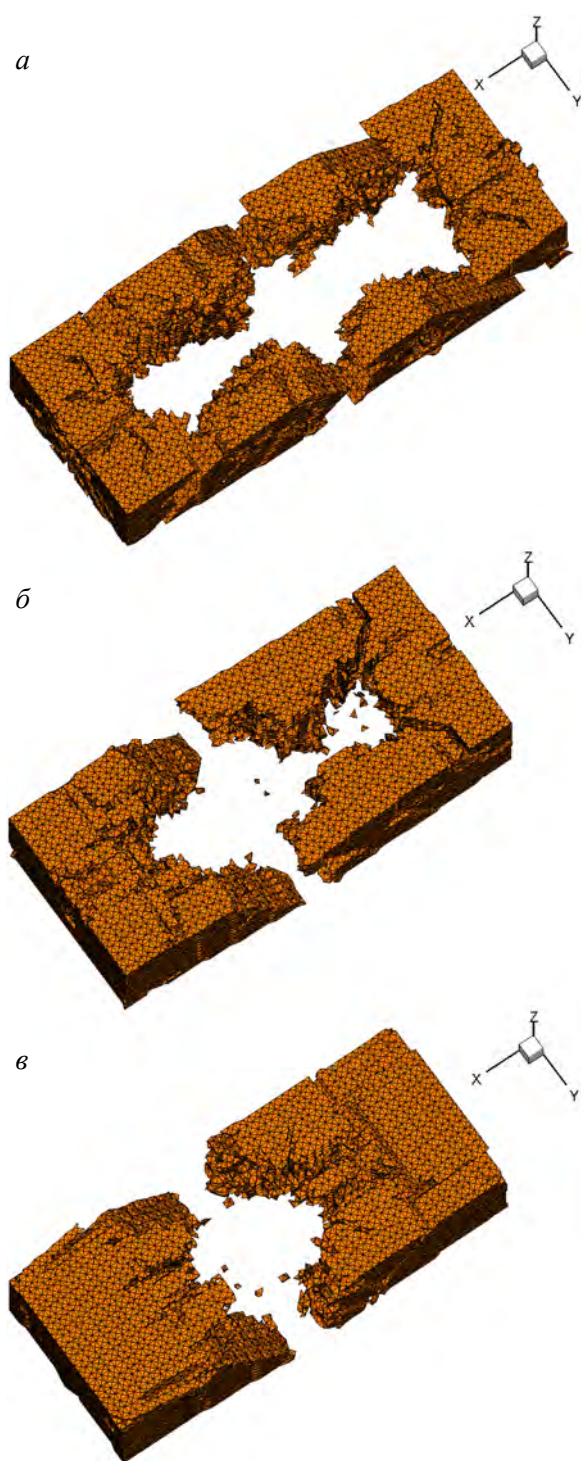


Рис. 3. Картины разрушения кирпича в момент времени 2500 мкс:

а – импульс нагрузки прямоугольный; *б* – импульс нагрузки треугольный; *в* – импульс нагрузки комбинированный

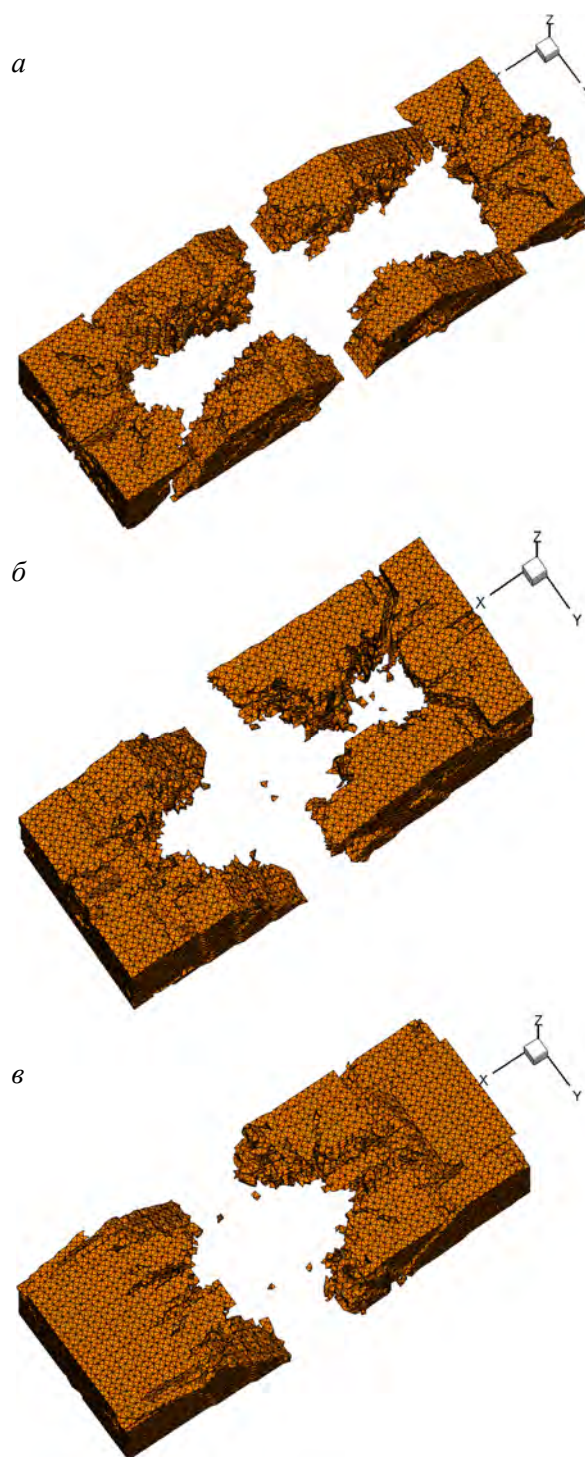


Рис. 4. Картины разрушения кирпича в момент времени 3300 мкс:
а – импульс нагрузки прямоугольный; б – импульс нагрузки треугольный; в – импульс нагрузки комбинированный

При первом способе задания нагрузки, когда на лицевую поверхность кирпича действует импульс давления прямоугольной формы, уже к моменту времени 1000 мкс в центральной части кирпича материал полностью разрушен. На рисунках для наглядности конечные элементы, материал в которых полностью разрушен (песок), не отрисовывался. В последующие моменты времени, несмотря на то что действие нагрузки прекращается, процесс разрушения кирпича продолжается. При двух других способах задания нагрузки на лицевую поверхность кирпича разрушений в нем не наблюдается до момента времени приблизительно 1500 мкс.

На рис. 2 на момент времени 1500 мкс представлена сравнительная картина разрушений. В то время как при первом способе задания нагрузки кирпич практически полностью разрушен, при двух других в центре кирпича появилась область разрушений.

Следует отметить, что при действии нагрузки треугольной формы разрушений в кирпиче больше, чем при действии комбинированной нагрузки, т. к. примерно с момента времени 600 мкс давление на поверхности разделов материалов выше в кирпиче, нагруженном по второму способу ($P = 0,01835$ ГПа). На рис. 3 представлена сравнительная картина разрушения на момент времени 2500 мкс. Во всех трех вариантах расчета действие нагрузки на лицевую поверхность кирпича прекращена. В кирпиче, нагруженном по первому способу, центральная часть полностью разрушена, происходит разделение периферийных областей на крупные куски. Аналогичная картина разрушения наблюдается при втором способе задания нагрузки. При комбинированном способе кирпич распался на три крупных фрагмента. Разрушение кирпичей происходит до момента времени 3300 мкс. Окончательная картина разрушения приведена на рис. 4.

Как показывают представленные расчеты, при падении груза массой 197 кг разрушение кирпича происходит при любом из рассмотренных выше способов задания нагрузки. Различие заключается лишь в конечной картине разрушения.

Данная модель хорошо описывает динамическое разрушение в кирпиче и может быть в дальнейшем использована для расчета прочности кирпичной кладки на ударно-волновое нагружение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Модель динамического разрушения мелкозернистого бетона* / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница, А.А. Югов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2005. – № 1. – С. 14–21.
2. *Расчетно-экспериментальный метод анализа динамической прочности элементов железобетонных конструкций* / Н.Н. Белов, О.В. Кабанцев, Д.Г. Копаница, Н.Т. Югов. – Томск : STT, 2004. – 466 с.
3. *Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки* / Н.Н. Белов, Д.Г. Копаница, О.Г. Кумпак, Н.Т. Югов. – Northampton; Томск : STT, 2008. – 292 с.
4. *Расчет прочности конструкций из бетонных и железобетонных плит при высокоскоростном ударе* / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница, А.А. Югов // ПМТФ, 2005. – Т. 46. – № 3. – С. 165–173.
5. *Разрушение бетонных и железобетонных плит при высокоскоростном ударе* / С.А. Афанасьева, Н.Н. Белов, Д.Г. Копаница [и др.] // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 401. – № 2. – С. 185–188.

6. *Расчет прочности железобетонных плит* при высокоскоростном ударе / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница, С.А. Афанасьева, А.А. Югов, П.В. Дзюба // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2004. – № 1. – С. 71–80.
7. *Математическое моделирование* процессов динамического разрушения бетона / Н.Н. Белов, П.В. Дзюба, О.В. Кабанцев, Д.Г. Копаница, А.А. Югов, Н.Т. Югов // Механика твердого тела. – 2008. – № 2. – С. 124–133.
8. *Разрушение хрупких материалов* в условиях неоднократного ударного нагружения / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница, О.В. Кабанцев, Ю.А. Бирюков, А.А. Югов, А.Н. Овечкина // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т. 13. – № 1. – С. 57–70.
9. *Хорошилова, А.Н.* Исследование прочности железобетонных колонн на повторный поперечный удар / А.Н. Хорошилова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2008. – № 1. – С. 97–109.
10. *Математическое моделирование* динамической прочности конструкционных материалов / Н.Н. Белов, Д.Г. Копаница, Н.Т. Югов. – М. : Изд-во АСВ, 2013. – 562 с.
11. *Исследование прочности моделей* стальных трубобетонных и железобетонных колонн на неоднократный торцевой удар падающего груза расчетно-экспериментальным методом / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница, С.Л. Капарулин, А.А. Югов, Р.С. Мамцев // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – Т. 16. – № 2. – С. 181–190.
12. *Расчет прочности железобетона* на ударные нагрузки / Н.Н. Белов, О.В. Кабанцев, А.А. Коняев, Д.Г. Копаница, В.Ф. Толкачев, А.А. Югов, Н.Т. Югов // ПМТФ, 2006. – Т. 47. – № 6. – С. 165–173.
13. *Компьютерное моделирование* динамики высокоскоростного удара и сопутствующих физических явлений / Н.Н. Белов, В.Н. Демидов, Л.В. Ефремова, А.В. Жуков, А.П. Николаев, В.Г. Симоненко, В.Г. Трушков, М.В. Хабибуллин, И.Е. Шиповский, В.Б. Шуталев // Изв. вузов. Физика. – 1992. – № 8. – С. 5–48.
14. *Динамика высокоскоростного удара* и сопутствующие физические явления / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница, А.А. Югов. – Northampton; Томск : STT, 2005. – 360 с.
15. *Расчет прочности сталефибробетонных плит* на высокоскоростной удар модельным снарядом / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница, А.А. Югов, Е.В. Черникова, А.М. Устинов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 2. – С. 60–71.
16. *Модель динамического разрушения фибробетона* / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница, В.С. Плевков, А.А. Югов, В.В. Шашков, К.Л. Кудяков, А.М. Устинов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 5. – С. 63–76.
17. *Копаница, Д.Г.* Экспериментальные исследования фрагментов кирпичной кладки на действие статической и динамической нагрузки / Д.Г. Копаница, О.В. Кабанцев, Э.С. Усейнов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 4. – С. 157–178.
18. *Экспериментальные исследования* облегченной кирпичной кладки на центральное и внецентренное нагружение / Ж.С. Нугужин, Д.Г. Копаница, Ю.Е. Кошарнова, А.М. Устинов, Э.С. Усейнов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 2 (55). – С. 107–116.
19. *Баженов, Ю.М.* Бетон при динамическом нагружении / Ю.М. Баженов. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1970. – 272 с.
20. *Югов, Н.Т.* Расчет адиабатических нестационарных течений в трехмерной постановке РАНЕТ-3 / Н.Т. Югов, Н.Н. Белов, А.А. Югов // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 201061 1042. – М., 2010.
21. *Сжимаемость горных пород* в ударных волнах. / Р.Ф. Трунин, Г.В. Симаков, И.П. Дудолов, Г.С. Телегин, И.П. Трусов // Свойства конденсированных веществ при высоких давлениях и температурах. – Арзамас-16 : ВНИИЭФ, 1992. – С. 249–256.
22. *Трунин, Р.Ф.* Исследования экстремальных состояний конденсированных веществ методом ударных волн. Уравнения Гюгоньо / Р.Ф. Трунин. – Саров : РФЯУ-ВНИИЭФ, 2006. – 286 с.

REFERENCES

1. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., Yugov A.A. Model' dinamicheskogo razrusheniya melkozernistogo betona [Model of dynamic fracture of fine concrete]. *Vestnik TSUAB*. 2005. No. 1. Pp. 14–21. (rus)
2. Belov N.N., Kabantsev O.V., Kopanitsa D.G., Yugov N.T. Raschetno-eksperimental'nyj metod analiza dinamicheskoy prochnosti jelementov zhelezobetonnykh konstrukcii [Design and experiment analysis of dynamic strength of reinforced concrete structures]. Tomsk : STT Publ., 2004. 466 p. (rus)
3. Belov N.N., Kopanitsa D.G., Kumpyak, O.G., Yugov, N.T. Raschet zhelezobetonnykh konstrukcij na vzryvnye i udarnye nagruzki [Explosive and impact strength analysis of reinforced concrete structures]. Northampton; Tomsk : STT Publ., 2008. 292 p. (rus)
4. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., Yugov A.A. Raschet prochnosti konstrukcij iz betonnykh i zhelezobetonnykh plit pri vysokoskorostnom udare [Strength analysis of concrete and reinforced concrete slabs at high velocity impact]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2005. V. 46. No. 3. Pp. 165–173. (rus)
5. Afanas'eva S.A., Belov, N.N., Kopanitsa D.G., et al. Razrushenie betonnykh i zhelezobetonnykh plit pri vysokoskorostnom udare [Fracture of concrete and reinforced concrete slabs at high velocity impact]. *Reports of Russian Higher Education Academy of Sciences*. 2005. V. 401. No. 2. Pp. 185–188. (rus)
6. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., Afanas'eva S.A., Yugov A.A., Dzyuba P.V. Raschet prochnosti zhelezobetonnykh plit pri vysokoskorostnom udare [Strength analysis of concrete slab under high-speed impact]. *Vestnik TSUAB*. 2004. No. 1. Pp. 71–80. (rus)
7. Belov N.N., Dzyuba P.V., Kabantsev O.V., Kopanitsa D.G., Yugov A.A., Yugov N.T. Matematicheskoe modelirovanie processov dinamicheskogo razrusheniya betona [Mathematical modeling of dynamic fracture of concrete]. *Rigid Body Mechanics*. 2008. No. 2. Pp. 124–133. (rus)
8. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., Kabantsev O.V., Birjukov Yu.A., Yugov A.A., Ovechkina A.N. Razrushenie khrupkikh materialov v usloviyakh neodnokratnogo udarnogo nagruzheniya [Fracture of brittle materials under repeated impact loading]. *Journal on Composite Mechanics and Design*. 2007. V.13. No. 1. Pp. 57–70. (rus)
9. Horoshilova A.N. Issledovanie prochnosti zhelezobetonnykh kolonn na povtornyj poperechnyj udar [Transverse strength analysis of reinforced concrete columns]. *Vestnik TSUAB*. 2008. No. 1. Pp. 97–109. (rus)
10. Belov N.N., Kopanitsa D.G., Yugov N.T. Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskoy prochnosti konstrukcionnykh materialov [Mathematical modeling of dynamic strength of structural materials]. Moscow : ASV Publ., 2013. 562 p. (rus)
11. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., Kaparulin S.L., Yugov A.A., Mamtsev R.S. Issledovanie prochnosti modelej stal'nykh trubobetonnykh i zhelezobetonnykh kolonn na neodnokratnyj torcevoj udar padajushhego gruzha raschetno-jeksperimental'nym metodom [End impact analysis of steel pipe-concrete models and concrete columns]. *Journal on Composite Mechanics and Design*. 2010. V. 16. No. 2. Pp. 181–190. (rus)
12. Belov N.N., Kabantsev O.V., Konjaev A.A., Kopanitsa D.G., Tolkachev V.F., Yugov A.A., Yugov N.T. Raschet prochnosti zhelezobetona na udarnye nagruzki [Impact load analysis of reinforced concrete]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2006. V. 47. No. 6. Pp. 165–173. (rus)
13. Belov N.N., Demidov V.N., Efremova L.V., Zhukov A.V., Nikolaev A.P., Simonenko V.G., Trushkov V.G., Habibullin M.V., Shipovskij I.E., Shutalev V.B. Komp'yuternoe modelirovanie dinamiki vysokoskorostnogo udara i soputstvujushhih fizicheskikh javlenij [Computer simulation of dynamics of high-speed impact and related physical phenomena]. *Russian Physics Journal*. 1992. No. 8. Pp. 5–48. (rus)
14. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., Yugov A.A. Dinamika vysokoskorostnogo udara i soputstvujushhie fizicheskie javleniya [Dynamics of high-speed impact and related physical phenomena]. Northampton, Tomsk : STT Publ., 2005. 360 p. (rus)
15. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., Yugov A.A., CHernikova E.V., Ustinov A.M. Raschet prochnosti stalefibrobetonnykh plit na vysokoskorostnoj udar model'nym snaryadom [Strength

- analysis for steel fiber-concrete slabs under shock-wave exposure]. *Vestnik TSUAB*. 2014. No. 2. Pp. 60–71. (rus)
16. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., Plevkov V.S., Yugov A.A., Shashkov V.V., Kudyakov K.L., Ustinov A.M. Model' dinamicheskogo razrusheniya fibrobetona [Dynamic fracture model of fiber reinforced concrete]. *Vestnik TSUAB*. 2014. No. 5. Pp. 63–76. (rus)
 17. Kopanitsa D.G. Kabantsev O.V., Useinov E.S. Eksperimental'nye issledovaniya fragmentov kirpichnoj kladki na dejstvie staticheskoy i dinamicheskoy nagruzki [Experimental studies of masonry fragments under static and dynamic loads]. *Vestnik TSUAB*. 2012. No. 4. Pp. 157–178. (rus)
 18. Nuguzhinov Zh.S., Kopanitsa D.G., Kosharnova Ju.E., Ustinov A. M., Useinov E.S. Eksperimental'nye issledovaniya oblegchennoi kirpichnoi kladki na tsentral'noe i vnetsentrennoe nagruzhenie [Experimental research of hollow masonry under centric and eccentric loads]. *Vestnik TSUAB*. 2016. No. 2. Pp. 107–116. (rus)
 19. Bazhenov Yu.M. Beton pri dinamicheskom nagruzhenii [Concrete under dynamic loading]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1970. 272 p. (rus)
 20. Yugov N.T., Belov N.N., Yugov A.A. Raschet adiabaticheskikh nestacionarnykh techenij v trehmernoj postanovke RANET-3 [3D model of adiabatic nonstationary flow using RANET-3]. Federal'naja sluzhba po intellektual'noj sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programm dlja EVM N 201061 1042, Moscow, 2010 (rus)
 21. Trunin R.F., Simakov G.V., Dudoladov I.P., Telegin G.S., Trusov I.P. Szhimaemost' gornykh porod v udarnykh volnah [Compressibility of rocks in shock waves]. Svojstva kondensirovannykh veshchestv pri vysokih davleniyah i temperaturah [The properties of condensed matter at high pressures and temperatures]. Arzamas-16 : VNIIEHF, 1992. Pp. 249–256. (rus)
 22. Trunin R.F. Issledovaniya ehkstremal'nykh sostoyanij kondensirovannykh veshchestv metodom udarnykh voln. Uravneniya Gyugonio [Studies of extreme states of condensed matter by shock waves. Hugoniot equation]. Sarov : RFYAU-VNIIEHF Publ., 2006. 286 p. (rus)