

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

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,
чл.-кор. РААСН,
kopanitsa@mail.ru*

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

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

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

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

*АРХИПОВ ИЛЬЯ НИКОЛАЕВИЧ, канд. техн. наук, ст. преподаватель,
i.n.arkhipov@gmail.com*

*Инженерно-строительный институт
Сибирского федерального университета,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82*

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ФРАГМЕНТОВ КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ НА УДАР ПАДАЮЩЕГО ГРУЗА*

В настоящей работе в рамках механики сплошной среды методом компьютерного моделирования проведено исследование прочности фрагмента кирпичной кладки на удар падающего на копровой установке стального груза массой 1000 кг с высоты 2 м. Фрагмент кладки состоит из трех слоев кирпича, разделенного цементно-песчаным раствором толщиной 1 см. Первый и третий слои кладки выполнены из двух целых кирпичей, средний – из целого кирпича и двух его половинок.

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

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №17-01-00415.

*NIKOLAI N. BELOV, DSc, Professor,
n.n.belov@mail.ru
NIKOLAI T. YUGOV, DSc, Professor,
n.t.yugov@mail.ru
DMITRIY G. KOPANICA, DSc, Professor,
kopanitsa@mail.ru
ALEKSEI A. YUGOV, PhD, A/Professor,
yugalex@mail.ru
ARTEM V. RYSHKOV, Senior Lecturer,
rav.tomsk@mail.ru
EMIL S. USEINOV, Senior Lecturer,
useinov_em@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia,
ILYA N. ARKHIPOV, PhD, A/Professor, Senior Lecturer,
i.n.arkhipov@gmail.com
Civil Engineering Institute, SibFU,
82, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia*

COMPUTER MODELING OF MASONRY IMPACT RESISTANCE

The paper presents a computer simulation of masonry strength studied in the framework of continuum mechanics under impact load. The weight of 1000 kg was dropped from the height of 2 m using the impact drop machine. The masonry fragment consists of three layers of bricks separated with sand and cement mortar 1 cm thick. Two layers are made of two full bricks, whereas one layer is made of a full brick and two halves of a brick.

Keywords: impact-wave loading; masonry; dynamic fracture; mathematical modeling.

Процесс динамического деформирования и разрушения кирпичной кладки методами статического расчета описан быть не может. Поведение кирпичной кладки при действии динамической нагрузки характеризуется сложной картиной распространения и взаимодействия волн сжатия и разгрузки.

Многочисленные экспериментальные исследования [1, 2] свидетельствуют о том, что разрушение не является критическим событием мгновенной потери сплошности вещества при достижении определенной величины предельного значения. Необходимо некоторое время, за которое параметры напряженного и деформированного состояния, достигшие некоторого критического уровня, воздействуя на структуру материала, накапливают в ней повреждения, в результате чего материал постепенно разрыхляется, и наступает полное разрушение [3, 4].

Механизм отрывного разрушения пластичных материалов определяется последовательно развивающимися процессами зарождения, роста и слияния микропор или микротрещин в объемах, находящихся под действием растягивающих напряжений [1, 5–7].

В отличие от пластических сред высокотвердые керамики, геологические материалы, бетон, кирпич и другие хрупкие материалы содержат большое число концентраторов напряжений – пор, трещин, границ зерен, зарождение разрушений на которых активируется в области упругого деформирования материала. Подобные материалы под действием девиаторных напряжений могут растрескиваться в области упругого деформирования уже на фазе сжатия, что приводит к падению сопротивления растяжению [8]. С ростом давления пластичность и пороговые напряжения разрушению увеличиваются, поэтому становится возможной пластическая деформация без растрескивания.

С точки зрения математического моделирования проблема разрушения имеет два аспекта. Первый связан с разработкой модели и критерия разрушения, второй – с описанием механического поведения частично поврежденной или разрушенной среды [1, 8]. Для расчета прочности элементов строительных конструкций на взрывные и ударные нагрузки в Томском архитектурно-строительном университете разработаны математические модели поведения с учетом ударно-волнового нагружения сред сложной структуры, в том числе бетона, железобетона, фибробетона, глиняного кирпича и каменной кладки из него [9–20].

В работах [21, 22] приведены результаты экспериментальных исследований фрагментов кирпичной кладки при статическом и динамическом нагружении. Сравнительно мало работ посвящено математическому моделированию процессов динамического разрушения кирпичной кладки, поэтому математическое моделирование и расчет конструкций из кирпича при динамическом нагружении является актуальной задачей.

В настоящей работе в рамках модели [20], описывающей процессы деформирования и разрушения кладки из обыкновенного глиняного кирпича при динамическом нагружении, проведено исследование прочности фрагмента кирпичной кладки на удар падающего на копровой установке стального груза массой m (кг) и высотой h (м). Рассмотренная выше модель реализована в пакете вычислительных программ РАНЕТ-3 [23].

Нагрузка от падающего груза на лицевую поверхность фрагмента кирпичной кладки моделировалась заданием массовой скорости $u(x, y, z, t) = U_0$. Считалось, что давление на поверхность контакта в течение всего времени T_1 оставалось постоянным и равным P_0 . Время нагрузки T_1 определялось из второго закона Ньютона $m \frac{du}{dt} = -P_0 S_1$, где S_1 – площадь лицевой поверхности фрагмента. Учитывая, что в течение времени T_1 скорость изменилась от V_0 до 0, $T_1 = \frac{mV_0}{S_1 P_0}$, где $V_0 = \sqrt{2gh}$ – скорость падающего груза. Для скорости груза V_0 численные значения давления P_0 и массовой скорости U_0 на поверхности контакта «сталь – кирпич» определялись графическим методом с использованием ударных адиабат стали и материала кирпича. На рис. 1–6 приведены результаты математического моделирования процессов деформирования и разрушения фрагмента кирпичной кладки при падении с высоты $h = 2$ м стального груза массой $m = 1000$ кг. Расчет проведен при следующих значениях параметров нагружения: $V_0 = 6,26$ м/с, $U_0 = 6,1$ м/с, $P_0 = 0,04$ ГПа, $T_1 = 2541,7$ мкс.

На рис. 1 представлена конфигурация фрагмента кладки через 1000 мкс после начала действия импульсной нагрузки на его лицевую поверхность. Фрагмент кладки состоит из трех слоев кирпича, разделенного цементно-песчаным раствором толщиной 1 см. Первый и третий слои кладки выполнены из двух целых кирпичей, средний – из целого кирпича и двух его половинок.

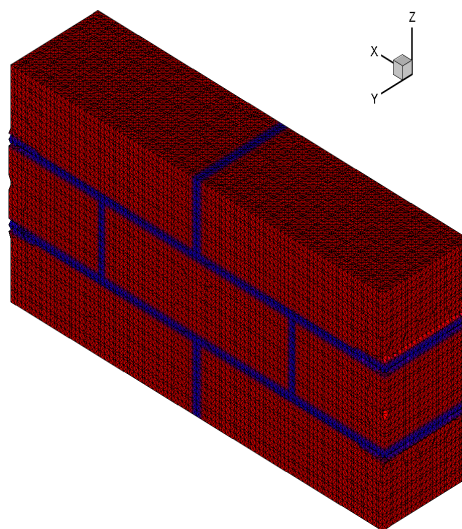


Рис. 1. Конфигурации кирпичной кладки под воздействием прямоугольного импульса нагрузки длительностью 2541,7 мкс и скоростью 6,1 м/с в момент времени 1000 мкс

Распределение изолиний давления p и относительного объема пустот ξ в срединном продольном сечении кладки в момент времени 500 мкс приведено на рис. 2. Продолжается процесс нагружения кладки импульсом давления. В данный момент времени практически во всех кирпичах давление одинаково ($0,008 \text{ ГПа} < p \leq 0,017 \text{ ГПа}$). Наибольшей величины оно достигается в области раздела материалов «кирпич – раствор» ($p \approx 0,025 \text{ ГПа}$). В слоях раствора его величина изменяется от 0,033 ГПа в области раздела «кирпич – раствор» до 0,042 ГПа в центре швов. Наименьшее значение p достигается во втором слое кладки в половинках кирпичей у их свободных поверхностей ($p < 0,008 \text{ ГПа}$). Материал кирпича изначально пористый. Относительный объем пустот в нем достигает $\xi = 0,13$, что соответствует 13 % пористости. В растворе до нагружения относительный объем пустот $\xi = 0,03$ (3 % пористости). Действие сжимающей нагрузки приводит к затеканию пустот. Во втором слое кладки в половинках кирпичей в области, примыкающей к свободным поверхностям, пористость практически не изменилась ($0,109 < \xi < 0,13$). Наибольшему сжатию подвергся материал в углах кладки в области лицевой и свободной поверхности первого слоя, в первом и третьем слоях кирпичной кладки, а также в целом кирпиче второго слоя $0,085 \leq \xi < 0,109$. В слоях раствора в центре пористость достигает величины порядка 3 %, а вблизи поверхностей раздела «кирпич – раствор» она увеличивается до 6 %. Таким образом, происходит разрушение раствора в кладке у поверхности контакта с кирпичом.

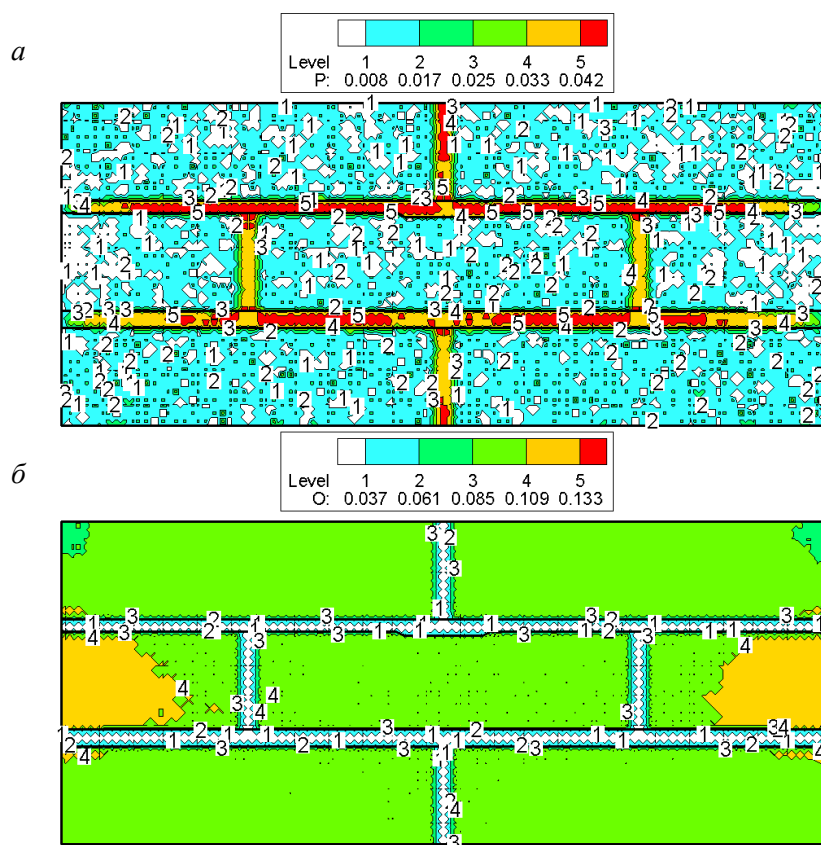


Рис. 2. Распределение изолиний давления (ГПа) (а) и относительного объема пустот ξ (б) в срединном сечении (продольном $Y = 0$) кирпичной кладки в момент времени 500 мкс при нагружении прямоугольным импульсом длительностью 2541,7 мкс и скоростью 6,1 м/с

Распределение изолиний давления p и относительного объема пустот ξ в срединном продольном сечении кирпичной кладки в момент времени 1000 мкс приведено на рис. 3. Давление в кирпичах во всех трех слоях фрагмента кладки в момент времени 1000 мкс практически одинаково ($0,006 \text{ ГПа} < p \leq 0,028 \text{ ГПа}$).

В первом и втором слоях кирпичной кладки давление в растворе стыка между кирпичами значительно выше, чем в кирпичах: $0,05 \text{ ГПа} \leq p \leq 0,072 \text{ ГПа}$. Наибольшие значения наблюдаются в стыке третьего слоя кладки у тыльной поверхности фрагмента ($0,072 \text{ ГПа} \leq p \leq 0,094 \text{ ГПа}$). На рис. 3, б представлены изолинии относительного объема пустот, характеризующие пористость материала.

В первом и третьем слоях кладки в области лицевой и тыльной поверхностей наблюдается аналогичная картина затекания пор в кирпичах. Наименьшее значение относительного объема пор наблюдается в углах фрагмента ($0,035 < \xi < 0,05$). По мере распространения вглубь фрагмента в первом и третьем слоях величина пористости увеличивается от 5 до 6,5 % ($0,05 \leq \xi \leq 0,065$). В области стыка кирпичей пористость достигает величины, несколько меньшей 8 % ($0,065 \leq \xi \leq 0,08$). Такой же пористостью обладают кирпичи второго слоя кладки,

за исключением областей материала вблизи свободной боковой поверхности, в которых пористость достигает 9,5 % ($0,08 \leq \xi \leq 0,095$). Интенсивность касательных напряжений ϵ_u , характеризующая степень разрушения сдвигом, во всем фрагменте кладки не превышает 0,005.

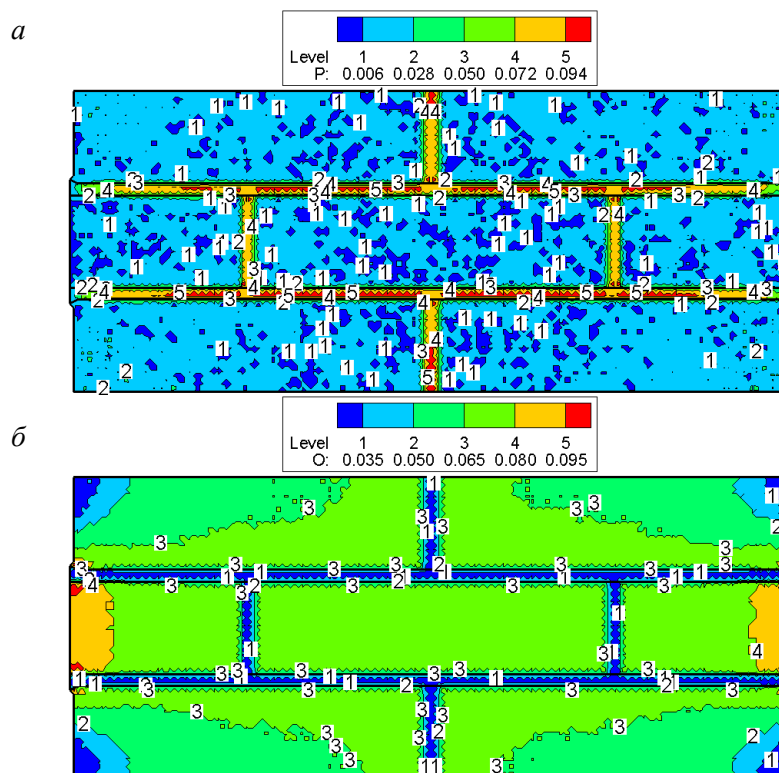


Рис. 3. Распределение изолиний давления (ГПа) (а) и относительного объема пустот ξ (б) в срединном продольном сечении ($Y = 0$) кирпичной кладки в момент времени $t = 1000$ мкс при нагружении прямоугольным импульсом длительностью 2541,7 мкс и скоростью 6,1 м/с

Распределение изолиний давления, относительного объема пустот и интенсивности пластических деформаций в срединном (продольном) сечении фрагмента кирпичной кладки на момент времени 2000 мкс приведено на рис. 4.

В первом слое кладки в окрестности лицевой поверхности $0,014 \text{ ГПа} \leq p \leq 0,097 \text{ ГПа}$. При движении в сторону поверхности раздела слоев уровень давления повышается от 0,097 до 0,18 ГПа. В областях, расположенных между свободными боковыми поверхностями и поверхностью раздела слоев, и у стыка кирпичей уровень давления не превышает 0,014 ГПа. В первом слое раствора $0,097 \text{ ГПа} \leq p \leq 0,18 \text{ ГПа}$. Во втором слое кирпичной кладки в центральном целом кирпиче давление приблизительно равно 0,014 ГПа.

В первом кирпиче в области, примыкающей к поверхности раздела второго и третьего слоев кладки, и в растворе $0,014 \text{ ГПа} \leq p \leq 0,097 \text{ ГПа}$. На стыке второго и третьего кирпичей в растворе $p \approx 0,097 \text{ ГПа}$.

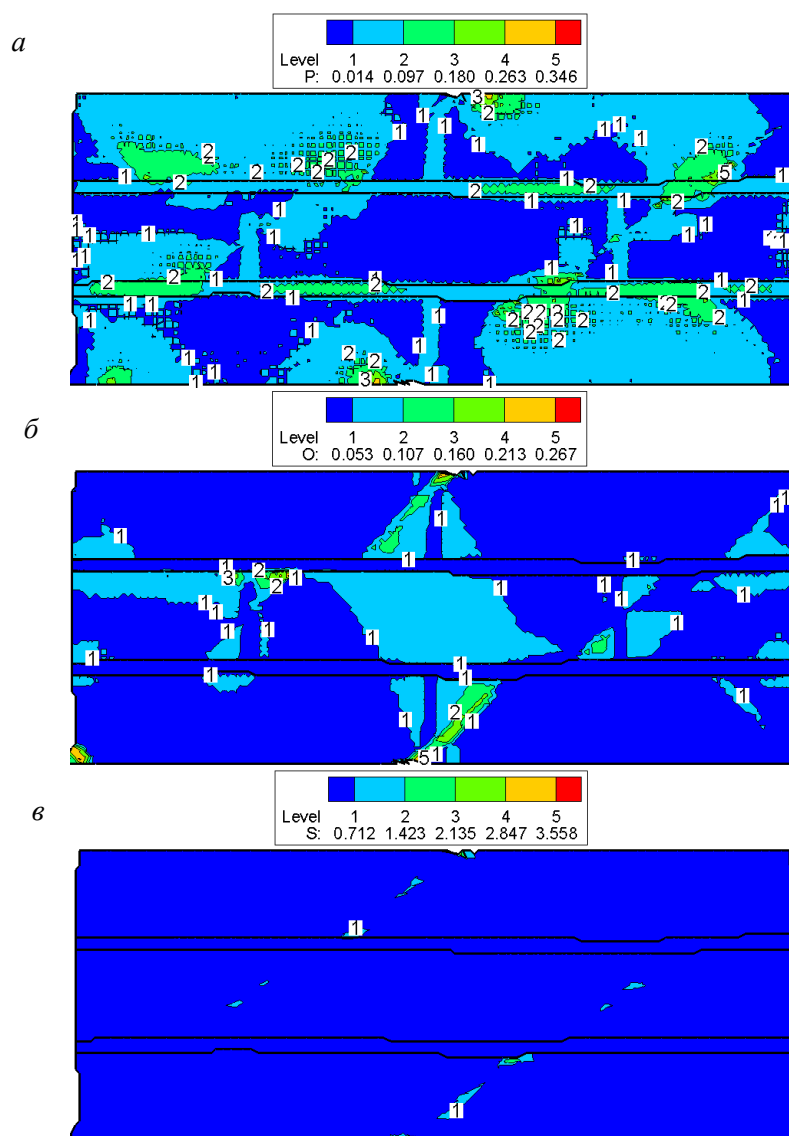


Рис. 4. Распределение изолиний давления (ГПа) (а), относительного объема пустот ξ (б) и интенсивности пластических деформаций (в) в срединном продольном сечении ($Y = 0$) кирпичной кладки в момент времени $t = 2000$ мкс при нагружении прямоугольным импульсом длительностью 2541,7 мкс и скоростью 6,1 м/с

Давление во втором и третьем слоях раствора, как и в первом, находится в пределах от 0,097 до 0,18 ГПа.

В центральной части первого кирпича третьего слоя $p \approx 0,014$ ГПа. На периферийной его части в области, примыкающей к тыльной поверхности фрагмента кладки, $p \approx 0,097$ ГПа.

Практически во всем втором кирпиче, за исключением областей, примыкающих к свободной поверхности кирпича и поверхности стыка, $p \approx 0,097$ ГПа.

Пористость кирпичной кладки достигает величины 5,3 %. В центральной части второго слоя ее величина составляет приблизительно 10,7 %. В первом слое от лицевой поверхности у стыка кирпичей под углом приблизительно 45° образуется область материала, выходящая на поверхность раздела первого и второго слоев, в которой пористость изменяется от 21,3 до 26,7 %. Аналогичная картина наблюдается во втором кирпиче третьего слоя. Интенсивность касательных напряжений в этих областях $\varepsilon_u = 0,712$. В кирпичной кладке происходит образование трещин по сдвиговому механизму.

Это подтверждает рис. 5, на котором представлена конфигурация кирпичной кладки, образованная через 2000 мкс после начала воздействия импульса, моделирующего удар падающего груза. На рисунке хорошо видно, что произошло разрушение материала со стороны тыльной поверхности фрагмента кладки, и наблюдается образование сквозной трещины, исходящей из верхнего угла первого слоя под углом приблизительно 45° и проходящей через второй и третий слои.

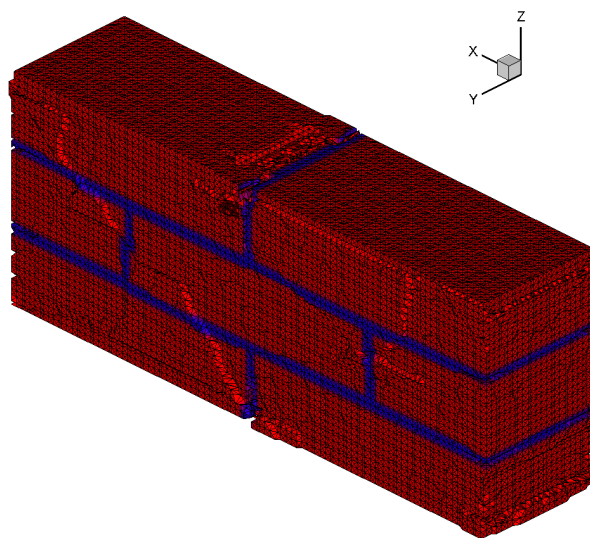


Рис. 5. Конфигурации кирпичной кладки под воздействием прямоугольного импульса нагрузки длительностью 2541,7 мкс и скоростью 6,1 м/с в момент времени 2000 мкс

Расчет проведен до момента времени 3000 мкс. Действие импульса на фрагмент кладки закончилось, к этому моменту давление во втором слое не превышает 0,014 ГПа (рис. 6, а). В первом кирпиче первого слоя, за исключением областей, примыкающих к свободной боковой поверхности и стыку, оно достигает величины 0,097 ГПа. Во втором кирпиче первого слоя эти значения достигаются в двух областях. Первая из них расположена у лицевой поверхности кладки вблизи стыка, вторая примыкает к поверхности раздела слоев вблизи свободной поверхности кладки.

В третьем слое область материала, в которой давление достигает значений 0,097 ГПа, расположена в первом кирпиче у тыльной поверхности фрагмента кладки. Эти же значения давления достигаются практически во всем

материале второго кирпича, за исключением областей, примыкающих к его собственной боковой поверхности и области стыка.

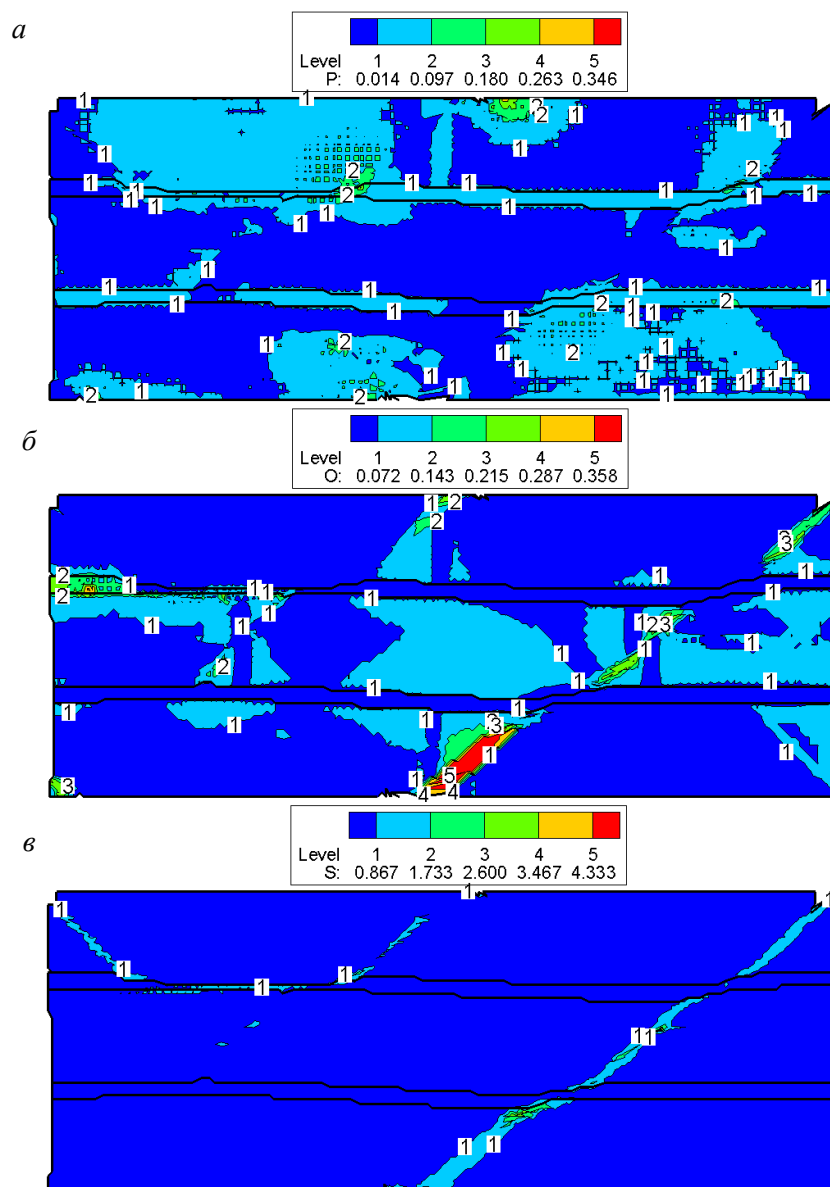


Рис. 6. Распределение изолиний давления (ГПа) (*a*), относительного объема пустот ξ (*b*) и интенсивности пластических деформаций (*v*) в срединном продольном сечении ($Y=0$) кирпичной кладки в момент времени $t = 3000$ мкс при нагружении прямоугольным импульсом длительностью 2541,7 мкс и скоростью 6,1 м/с

В первом слое кладки пористость составляет приблизительно 7,2 % (рис. 6, *b*). В центре второго слоя ее значение увеличивается до 14 %. Аналогичные значения величины пористости достигаются в первом кирпиче в обла-

сти, примыкающей к поверхности раздела слоев и свободной боковой поверхности. Такой же уровень величины пористости достигается в третьем кирпиче.

В третьем слое, как и в первом, пористость в материале составляет 7,2 %.

От правого верхнего угла первого слоя через второй и третий слои к стыку между кирпичами проходит узкая область материала, в которой пористость изменяется от 21,5 до 35,8 %. В этой области интенсивность касательных напряжений ϵ_u изменяется от 0,867 до 1,73. Произошло разрушение материала по сдвиговому механизму. Образовалась наклонная трещина, проходящая через все три слоя кладки.

В первом кирпиче первого слоя фрагмента кладки образовались еще две трещины. Первая трещина распространяется от левого верхнего угла под углом 45° к поверхности раздела слоев, вторая находится на стадии формирования и распространяется от стыка между кирпичами по первому кирпичу в сторону поверхности раздела слоев. В первом слое раствора под первым кирпичом материал разрушен. Окончательные картины деформации и разрушения фрагмента кирпичной кладки приведены на рис. 7.

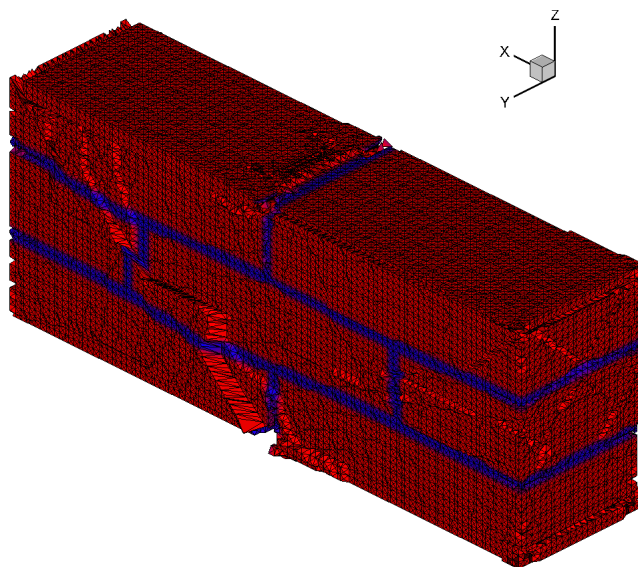


Рис. 7. Конфигурации кирпичной кладки 3×2 под воздействием прямоугольного импульса нагрузки длительностью 2541,7 мкс и скоростью 6,1 м/с в момент времени 3000 мкс

На рис. 8 для сравнения показана картина разрушения в кирпичной кладке, представляющей собой столбец из четырех кирпичей, разделенных тремя слоями песчано-цементного раствора, образовавшаяся при взаимодействии с падающим с высоты 2 м стального груза массой 500 кг [20]. Как и в рассмотренном выше варианте, значения параметров нагружения составляют: $V_0 = 6,26$ м/с, $U_0 = 6,1$ м/с, $P_0 = 0,04$ ГПа, $T_1 = 2541,7$ мкс. Картина разрушения значительно отличается от картины разрушения рассмотренного выше фрагмента. Основание кладки разрушено примерно на глубину 2 см

и смещено. Хорошо видна трещина в верхнем кирпиче вблизи лицевой поверхности. Оба центральных кирпича не повреждены. Произошло выкрашивание раствора в первом и третьем слоях.

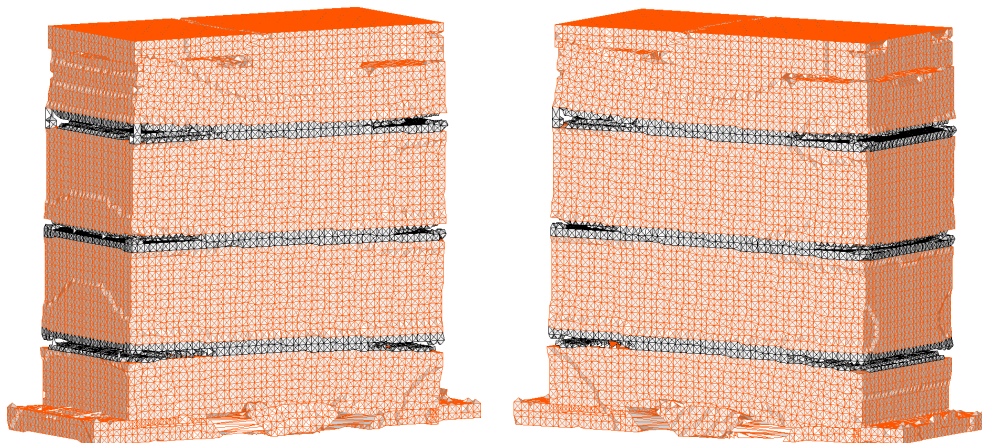


Рис. 8. Конфигурации кирпичной кладки под воздействием прямоугольного импульса нагрузки длительностью 2541,7 мкс и скоростью 6,1 м/с в начальный момент и в момент времени 4007 мкс

Различие в картинах разрушения рассмотренных выше фрагментов кирпичной кладки обусловлено наличием вертикальных стыков кирпичей, которые влияют на процессы взаимодействия распространяющихся при нагружении по кладке волн сжатия и разгрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Разрушение деформируемых сред* при импульсных нагрузках / Б.Л. Глушак, С.А. Новиков, А.И. Рузанов, А.И. Садырин. – Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 1992. – 193 с.
2. *Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов* / под ред. М.А. Майераса, Л.Е. Мурр. – М. : Металлургия, 1984. – 512 с.
3. *Никифоровский, В.С.* Динамическое разрушение твердых тел / В.С. Никифоровский, Е.И. Шемякин. – Новосибирск : Наука, 1979. – 272 с.
4. *Качанов, Л.М.* Основы механики разрушения / Л.М. Качанов. – М. : Наука, 1974. – 312 с.
5. *Курран, Д.Р.* Динамическое разрушение / Д.Р. Курран // Динамика удара. – М. : Мир, 1985. – С. 257–293.
6. *Курран, Д.Р.* Микроструктура и динамика разрушения / Д.Р. Курран, Л. Симэн, Д.А. Шоки // Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. – М. : Металлургия, 1984. – С. 387–412.
7. *Екобари, Т.* Физика и механика разрушения и прочности твердых тел / Т. Екобари. – М. : Металлургия, 1971. – 264 с.
8. *Ударно-волновые явления в конденсированных средах* / Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортов. – М. : Янус-К, 1996. – 408 с.
9. *Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления* / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница, А.А. Югов. – Northampton; Томск : SST, 2005. – 356 с.
10. *Расчетно-экспериментальный метод анализа динамической прочности элементов железобетонных конструкций* / Н.Н. Белов, О.В. Кабанцев, Д. Г. Копаница, Н.Т. Югов. – Томск : SST, 2008. – 292 с.

11. *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.
12. *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.
13. *Разрушение бетонных и железобетонных плит при высокоскоростном ударе* / С.А. Афанасьева, Н.Н. Белов, Д.Г. Копаница, Н.Т. Югов [и др.] // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 401. – № 2. – С. 185–188.
14. *Разрушение хрупких материалов в условиях неоднократного ударного нагружения* / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница [и др.] // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т. 13. – № 1. – С. 57, 70.
15. *Белов, Н.Н.* Математическое моделирование динамической прочности конструктивных материалов / Н.Н. Белов, Д.Г. Копаница, Н.Т. Югов. – М.: Изд-во АСВ, 2013. – 562 с.
16. *Исследование прочности моделей стальных трубобетонных 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 // Механика композиционных материалов и конструкций. – Т. 16. – № 2. – С. 181–190.
17. *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.
18. *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.
19. *Модель динамического разрушения обыкновенного глиняного кирпича* / Н.Н. Белов, А.А. Югов, Д.Г. Копаница, А.Л. Стуканов, Э.С. Усеинов, А.В. Рышков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 4 (57). – С. 81–94.
20. *Модель динамического разрушения кладки из обыкновенного глиняного кирпича* / Н.Н. Белов, А.А. Югов, Э.С. Усеинов, А.В. Рышков // Строительство и реконструкция. – 2016. – № 4 (66). – С. 3–12.
21. *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 (37). – С. 157–178.
22. *Экспериментальное исследование облегченной кирпичной кладки на центральное и внецентренное нагружение* / Ж.С. Нугужин, Д.Г. Копаница, Ю.Е. Кошарнова, А.М. Устинов, Э.С. Усеинов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 2 (55). – С. 107–116.
23. *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.

REFERENCES

1. *Glushak B.L., Novikov S.A., Ruzanov A.I., Sadyrin A.I.* Razrushenie deformiruemykh sred pri impul'snykh nagruzhkakh [Destruction of deformable media under impulse loads]. N. Novgorod: NNGU Publ., 1992. 193 p. (rus)
2. *Majerasa M.A., Murr L.E.* Udarnye volny i javleniya vysokoskorostnoj deformacii metallov [Shock waves and high-speed deformation of metals]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1984. 512 p. (rus).
3. *Nikiforovskii V.S., Shemjakin E.I.* Dinamicheskoe razrushenie tverdykh tel [Dynamic destruction of solids]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1979. 272 p. (rus)

4. *Kachanov L.M.* Osnovy mehaniki razrusheniya [Fundamentals of fracture mechanics]. Moscow: Nauka Publ., 1974. 312 p. (rus)
5. *Kurran D.R.* Dinamicheskoe razrushenie [Dynamic fracture]. Dinamika udara. Moscow: Mir Publ., 1985. Pp. 257–293. (rus)
6. *Kurran D.R., Simjen L., Shoki D.A.* Mikrostruktura i dinamika razrusheniya. Udarnye volny i javleniya vysokoskorostnoj deformacii metallov [Shock waves and high-speed metal deformation]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1984. Pp. 387–412. (rus)
7. *Ekobari T.* Fizika i mehanika razrusheniya i prochnosti tverdyh tel [Physics and mechanics of fracture and strength of solids]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1971. 264 p. (rus)
8. *Kanel' G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E.* Udarno-volnovye javleniya v kondensirovannyh sredah [Shock-wave phenomena in condensed media]. Moscow: Janus-K Publ., 1996. 408 p. (rus)
9. *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: SST Publ., 2005. 356 p. (rus)
10. *Belov N.N., Kabantsev O.V., Kopanitsa D.G., Yugov N.T.* Raschetno-jeksperimental'nyj metod analiza dinamicheskoy prochnosti jelementov zhelezobetonnyh konstrukcij [Design experimental analysis of dynamic strength of elements of reinforced concrete structures. Tomsk: SST Publ., 2008. 292 p. (rus).
11. *Belov N.N., Yugov N.T., Kopanica D.G., Yugov A.A.* Model' dinamicheskogo razrusheniya melkozemistogo betona [Model of dynamic destruction of fine-grained concrete]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2005. No. 1. Pp. 14–21. (rus)
12. *Belov N.N., Yugov N.T., Kopanica D.G., Yugov A.A.* Raschet prochnosti konstrukcij iz betonnyh i zhelezobetonnyh plit pri vysokoskorostnom udare [Strength analysis of concrete and reinforced concrete slabs under impact load]. *PMTF*. 2005. V. 46. No. 3. Pp. 165–173. (rus)
13. *Afanas'eva S.A., Belov N.N., Kopanica D.G., Yugov N.T., et al.* Razrushenie betonnyh i zhelezobetonnyh plit pri vysokoskorostnom udare [Destruction of concrete and reinforced concrete slabs at high-speed impact]. *Doklady Akademii nauk* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences]. 2005. V. 401. No. 2. Pp. 185–188; No. 3. Pp. 165–173. (rus)
14. *Belov N.N., Yugov N.T., Kopanica D.G., et al.* Razrushenie hрупких материалов v usloviyah neodnokratnogo udarnogo nagruzheniya [Destruction of brittle materials under impact loading]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*. 2007. V. 13. No. 1. Pp. 57, 70. (rus)
15. *Belov N.N., Kopanica 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)
16. *Belov N.N., Yugov N.T., Kopanica D.G., Kaparulin S.L., Yugov A.A.* Issledovanie prochnosti modelei stal'nyh trubobetonnyh i zhelezobetonnyh kolonn na neodnokratnyj torcevoj udar padajushhego gruzha raschetno-jeksperimental'nym metodom [Strength analysis of models of steel pipe-concrete and reinforced concrete columns under impact load]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*. V. 16. No. 2. Pp. 181–190. (rus)
17. *Belov N.N., Yugov N.T., Kopanica D.G., Yugov A.A., Chernikova E.V., Ustinov A.M.* Raschet prochnosti stalefibrobetonnyh plit na vysokoskorostnoj udar model'nym snarjadam [Strength analysis of steel-fiber-concrete plates under impact load]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 2. Pp. 60–71. (rus)
18. *Belov N.N., Yugov N.T., Kopanica D.G., Plevkov V.S., Yugov A.A., Shashkov V.V., Kudjakov K.L., Ustinov A.M.* Model' dinamicheskogo razrusheniya fibrobetona [Dynamic fracture model of fiber reinforced concrete]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 5. Pp. 63–76. (rus)
19. *Belov N.N., Yugov A.A., Kopanica D.G., Stukanov A.L., Useinov Je.S., Ryshkov A.V.* Model' dinamicheskogo razrusheniya obyknovennogo glinjanogo kirpicha [Model of dynamic fracture of ordinary loam brick]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 4. Pp. 81–94. (rus)
20. *Belov N.N., Yugov A.A., Useinov E.S., Ryshkov A.V.* Model' dinamicheskogo razrusheniya kladki iz obyknovennogo glinyanogo kirpicha [Model of dynamic destruction of masonry from ordinary clay bricks]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No. 4 (66). Pp. 3–12. (rus)

21. *Kopanica D.G., Kabancev O.V., Useinov Je.S.* Jeksperimental'nye issledovaniya fragmentov kirpichnoj kladki na dejstvie staticheskoy i dinamicheskoy nagruzki [Experimental studies of masonry fragments under static and dynamic loads]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 4. Pp. 157–178. (rus)
22. *Nuguzhinov Zh.S., Kopanitsa D.G., Kosharnova Yu.E., Ustinov A.M., Useinov E.S.* Eksperimental'noe issledovanie oblegchennoj kirpichnoj kladki na central'noe i vnecentrennoe nagruzhenie [Experimental research of hollow masonry under centric and eccentric loads]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 2. Pp. 107–116. (rus)
23. *Yugov N.T., Belov N.N., Yugov A.A.* Raschet adiabaticheskikh nestacionarnykh techenij v trehmernoj postanovke RANET-3 [Calculation of adiabatic nonstationary flows using RANET-3 software package]. RF Certificate of State Registration of Software N 201061 1042, Moscow, 2010. (rus)