

УДК 539.3

КОЛЧУНОВ ВИТАЛИЙ ИВАНОВИЧ, академик РААСН,
докт. техн. наук, профессор,
asiorel@mail.ru,
Юго-Западный государственный университет,
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94,
БЕЛОВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
n.n.belov@mail.ru
КОПАНИЦА ДМИТРИЙ ГЕОРГИЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
kopanitsa@mail.ru
ЮГОВ НИКОЛАЙ ТИХОНОВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
n.t.yugov@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 ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ НА УДАР

В статье экспериментально-расчетным методом приведен анализ процессов деформирования и разрушения столбчатого образца кирпичной кладки, выполненного из четырех обыкновенных глиняных кирпичей, на цементно-песчаном растворе на удар. Испытания проведены на копровой установке падающим стальным грузом массой 197–500 кг с высоты 1–2 м. Расчет динамической прочности кладки на удар падающего груза проведен в рамках пакета вычислительных программ «РАНЕТ-3», позволяющего проводить решение задач удара, взрыва, воздействия мощных потоков излучения на вещество в полной трехмерной постановке модифицированным на решение динамических задач методом конечных элементов.

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

VITALY I. KOLCHUNOV, Academician RAACS, DSc, Professor,
asiorel@mail.ru,
South-West State University,
94, 50 Let Oktyabrya Str., 305040, Kursk, Russia,
NIKOLAI N. BELOV, DSc, Professor,
n.n.belov@mail.ru
DMITRIY G. KOPANITSA, DSc, Professor,
kopanitsa@mail.ru

© Колчунов В.И., Белов Н.Н., Копаница Д.Г., Югов Н.Т., Рышков А.В., Усеинов Э.С.,
Архипов И.Н., 2017

*NIKOLAI T. YUGOV, DSc, Professor,
n.t.yugov@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, Senior Lecturer,
i.n.arkhipov@gmail.com
Civil Engineering Institute,
82, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia*

IMPACT LOAD TEST OF MASONRY

The paper presents experimental and calculation analysis of deformation and fracture processes in masonry specimen made of four common loam bricks joined by the cement-sand grout. The dynamic load test of masonry is carried out on the pile driver using 197–500 kg hammer dropping from 1–2 m height. The mathematical model of the dynamic strength is implemented using the RANET-3 software package allowing 3D simulation of impact and explosion problems using the finite element analysis.

Keywords: dynamic loading; masonry; dynamic fracture; mathematical simulation.

Разрушение кирпичной кладки под действием статических сжимающих сил происходит с некоторой степенью динамичности и характеризуется этапами зарождения микроповреждений, объемы которых увеличиваются под действием нагрузки и трансформируются в трещины.

Живучесть зданий и сооружений при запредельных воздействиях рассмотрена в работе [1], где приведен расчет железобетонных балочных, рамно-стержневых и пространственных систем, работающих в условиях приложения проектной и внезапной запроектированной нагрузки. Сравнительно мало работ посвящено деформированию и процессу разрушения кирпичной кладки при динамическом нагружении.

Известно, что схема разрушения во многом зависит от степени монолитности кладки. Для кирпичной кладки с высокой степенью монолитности трещины при действии нагрузки проходят по перевязанному сечению, разрушая кирпич. В кладке с низкими показателями сцепления кирпича с раствором трещины проходят по вертикальным и горизонтальным швам. Трещинообразование в кирпичной кладке сопровождается изменением частот собственных колебаний. Появление разуплотнений и трещин в кладке при увеличении нагрузки характеризуется смещением спектра мощности колебаний в область низких частот.

Поведение кирпичной кладки при действии динамической нагрузки характеризуется сложной картиной движения и взаимного действия волн сжатия и разгрузки. Анализ деформаций образцов из кирпичной кладки показал, что при скоростях нагружения до 5 м/с возможно использование результатов испытаний образцов статическими нагрузками для прогноза напряженного со-

стояния, деформаций и разрушения каменной кладки при динамических воздействиях. Это позволяет использовать результаты статических испытаний для определения упругопластических свойств при оценке сейсмостойкости каменных несущих конструкций [1].

Между тем процесс динамического деформирования кладки методами статического расчета описан быть не может, и возникает необходимость анализа поведения образцов из каменной кладки во времени. Рассмотрим решение данной задачи экспериментально-теоретическим методом. На первом этапе проведен анализ экспериментальных исследований образцов кирпичной кладки, испытанных на копре. Нагрузка создавалась действием падающего груза 197 кг с высоты 1 м. На втором этапе были проведены численные расчеты испытанных образцов и выполнено сопоставление полученных экспериментальных и расчетных результатов. Для проведения численных расчетов использован пакет вычислительных программ «РАНЕТ-3», позволяющий проводить решение задач удара, взрыва, воздействия мощных потоков энергии на вещество в полной трехмерной постановке модифицированным на решение динамических задач методом конечных элементов [2]. На третьем этапе проведены численные расчеты и анализ поведения опытных образцов на действие нагрузки от падающего груза 500 кг с высоты 2 м.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований. Подготовленные к испытаниям образцы кирпичной кладки показаны на рис. 1. Для выполнения экспериментальных образцов использован полнотелый глиняный кирпич марки М150.



Рис. 1. Образцы кирпичной кладки

Образцы выполнены из четырех кирпичей, объединенных тремя швами из цементно-песчаного раствора. Характеристики опытных образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики опытных образцов кирпичной кладки

№ образца	Прочность раствора на сжатие, МПа	Геометрические размеры образцов кирпичной кладки		
		Высота, мм	Длина, мм	Ширина, мм
1	21,65	295	245	115
2	21,65	293	245	113
3	21,65	297	245	112
4	21,65	295	245	112
5	21,65	295	245	115
6	21,65	302	245	115
7	21,65	296	245	115
8	21,65	296	245	113
9	21,65	297	246	116
10	21,65	300	245	115
11	21,65	296	245	114
12	21,65	294	245	112
13	21,65	295	245	115
14	21,65	300	245	112
15	21,65	293	245	114

Измерение деформаций выполнялось с использованием цифровой оптической измерительной системы VIC-2D, действие которой было совмещено со съемкой высокоскоростной камерой PHOTRON FASTCAM SA2. Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 2.

Результаты испытаний опытного образца № 12 на динамическое сжатие приведены в табл. 2. Начало отсчета времени принято с момента соприкосновения ударной плиты (ударника) с поверхностью верхнего кирпича. Рассмотрено четыре отрезка времени, в течение которого произошли основные деформации и началось активное разрушение образца.

Цветовая гамма на поверхности изменяется от красного цвета, отражающего сжатие, до фиолетового, соответствующего растяжению. Диапазон изменения деформаций для каждого момента времени показан строкой под соответствующей картиной деформаций.

В верхней строке табл. 2 приведены картины поперечных деформаций поверхности ϵ_{xx} , обращенной к скоростной видеокамере. Картина поперечных деформаций, зафиксированная на отрезке времени 0,5 мс, отражает образование полосовых деформаций сжатия и растяжения в теле верхнего кирпича в зоне контакта его поверхности с пластиной ударника. Эти деформации развиваются на треть высоты кирпича, разделяя его на несколько частей. В окрестности сжатых полос образовались области растяжения, предшеству-

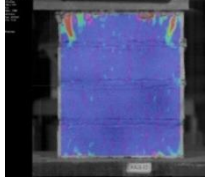
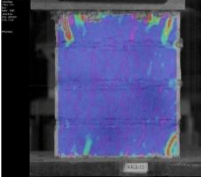
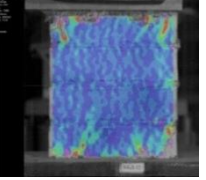
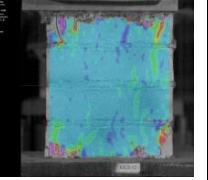
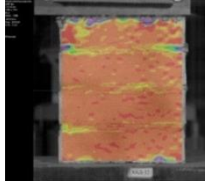
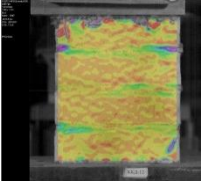
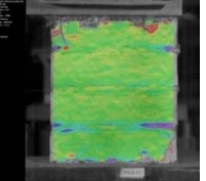
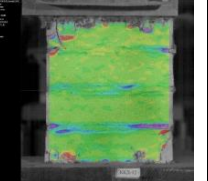
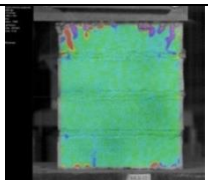
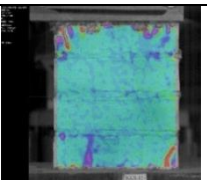
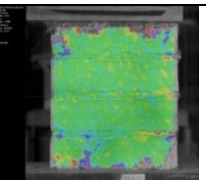
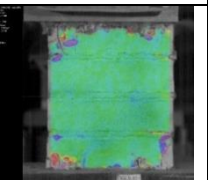
ющие появлению трещин. В зоне контакта опытного образца с опорной плитой образовались деформации растяжения. Соответствующие вертикальные деформации ϵ_{yy} в теле верхнего кирпича свидетельствуют о возникновении предельных сжимающих напряжений и разрушении контактной поверхности кирпича. В верхнем растворяном шве возникли растягивающие напряжения, развивающиеся от свободных вертикальных поверхностей образца. Максимальные сжимающие напряжения образовались в кирпичах, в то время как в швах кладки и в основании образца деформации имеют кратно меньшие значения. Характер распределения угловых деформаций ϵ_{xy} качественно совпадает с распределением поперечных деформаций ϵ_{xx} .



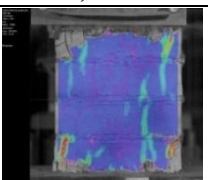
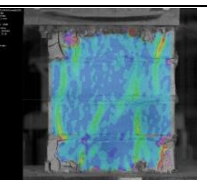
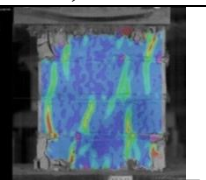
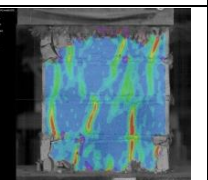
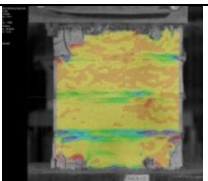
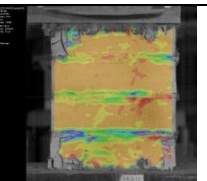
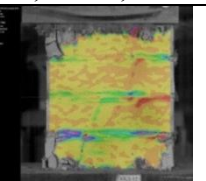
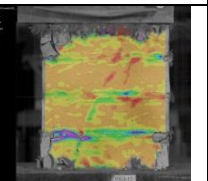
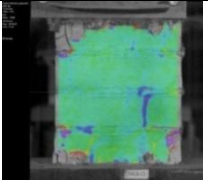
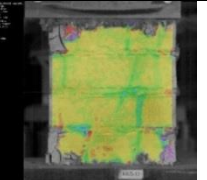
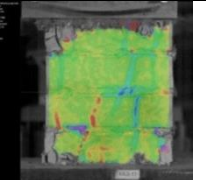
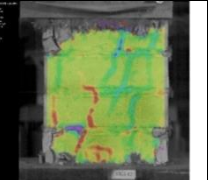
Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Таблица 2

Деформации образца № 12. Масса ударника 197 кг.
Высота падения ударника 1 м

	0,5 ms	1 ms	1,5 ms	2 ms
ϵ_{xx}	 -0,0045...0,0171	 -0,0056...0,0232	 -0,0082...0,0238	 -0,0195...0,037
ϵ_{yy}	 -0,036...0,028	 -0,0244...0,0046	 -0,036...0,02	 -0,0425...0,021
ϵ_{xy}	 -0,006...0,006	 -0,0073...0,0106	 -0,0117...0,0084	 -0,018...0,0178

Продолжение табл. 2

	2,5 ms	3 ms	3,5 ms	4 ms
ϵ_{xx}	 -0,0115...0,047	 -0,019...0,0425	 0,013...0,038	 -0,017...0,04
ϵ_{yy}	 -0,053...0,012	 -0,052...0,0095	 -0,0515...0,0115	 -0,041...0,0085
ϵ_{xy}	 -0,0148...0,014	 -0,0336...0,0102	 -0,0224...0,0098	 -0,0226...0,0086

При $t = 1$ мс поперечные деформации развились на большую площадь. В верхнем кирпиче – на всю его высоту, в средней части образовались отдельные трещины. В основании возникла вертикальная трещина на две трети нижнего кирпича. Большие изменения отмечены для вертикальных деформаций. В растворных швах наметились растягивающие напряжения, развивающиеся от вертикальных свободных граней к середине. Хорошо заметная трещина на картине угловых деформаций пересекла тело нижнего кирпича. Угловые деформации заметно развились в контактной зоне с ударником и в швах кладки. Произошло развитие угловых деформаций в основании образца с разрушением контактной зоны нижнего кирпича с опорной плитой.

Динамическая картина деформаций отражает развитие наметившихся в начальное время деформаций и их развитие. Характерная картина разрушения определена на отрезке времени $t = 3,5$ мс. В процессе деформаций произошло разрушение верхнего и нижнего кирпичей в зонах контактного взаимодействия с плитой ударника и на опоре. Появление трещин привело к перераспределению продольных деформаций и снижению уровня напряжений в растворных швах. С развитием поперечных деформаций возникли и развились вертикальные трещины, пронизывающие образец на всю его высоту. Неравномерное распределение угловых деформаций соответствует разрушению верхнего кирпича от действия ударника и нижнего кирпича на опоре. Совместное проведение лабораторного эксперимента и математического моделирования процессов деформирования и разрушения, протекающих в кирпичной кладке при ударно-волновом нагружении, с одной стороны, позволяет глубже понять данные эксперимента и дать им верную физическую интерпретацию, с другой – уточнить параметры модели разрушения. Математические модели, описывающие процессы деформирования и разрушения материалов кирпичной кладки в условиях ударно-волнового нагружения, приведены в работах [3–10].

На рис. 3–5 представлены результаты расчета динамической прочности кладки, состоящей из четырех глиняных кирпичей, между которыми нанесен слой раствора толщиной 1 см, на удар падающего на копровой установке стального груза массой $m = 197$ кг с высоты 1 м.

Нагрузка от падающего груза на лицевую поверхность верхнего кирпича кладки моделировалась заданием массовой скорости $u(x, y, z, t)$ на контактной поверхности «сталь-кирпич»: $u(x, y, z, t) = U_0$. Считалось, что давление на поверхности 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 m – масса падающего груза, а S_1 – площадь лицевой поверхности кирпича. Учитывая, что скорость $u(x, y, z, t)$ в течение времени изменяется от V_0 до 0, $T_1 = \frac{mV_0}{S_1 P_0}$, где $V_0 = \sqrt{2gh}$ – скорость падающего груза на момент взаимодействия. Для скорости удара V_0 численные значения P_0 и массовой скорости U_0 на поверхности контакта «сталь-кирпич» определялись графическим методом с использованием ударных адиабат стали и материала кирпича. При падении груза массой 197 кг с высоты 1 м $V_0 = 4,43$ м/с, $U_0 = 3,75$ м/с, $P_0 = 0,025$ ГПа, $T_1 = 1128$ мкс.

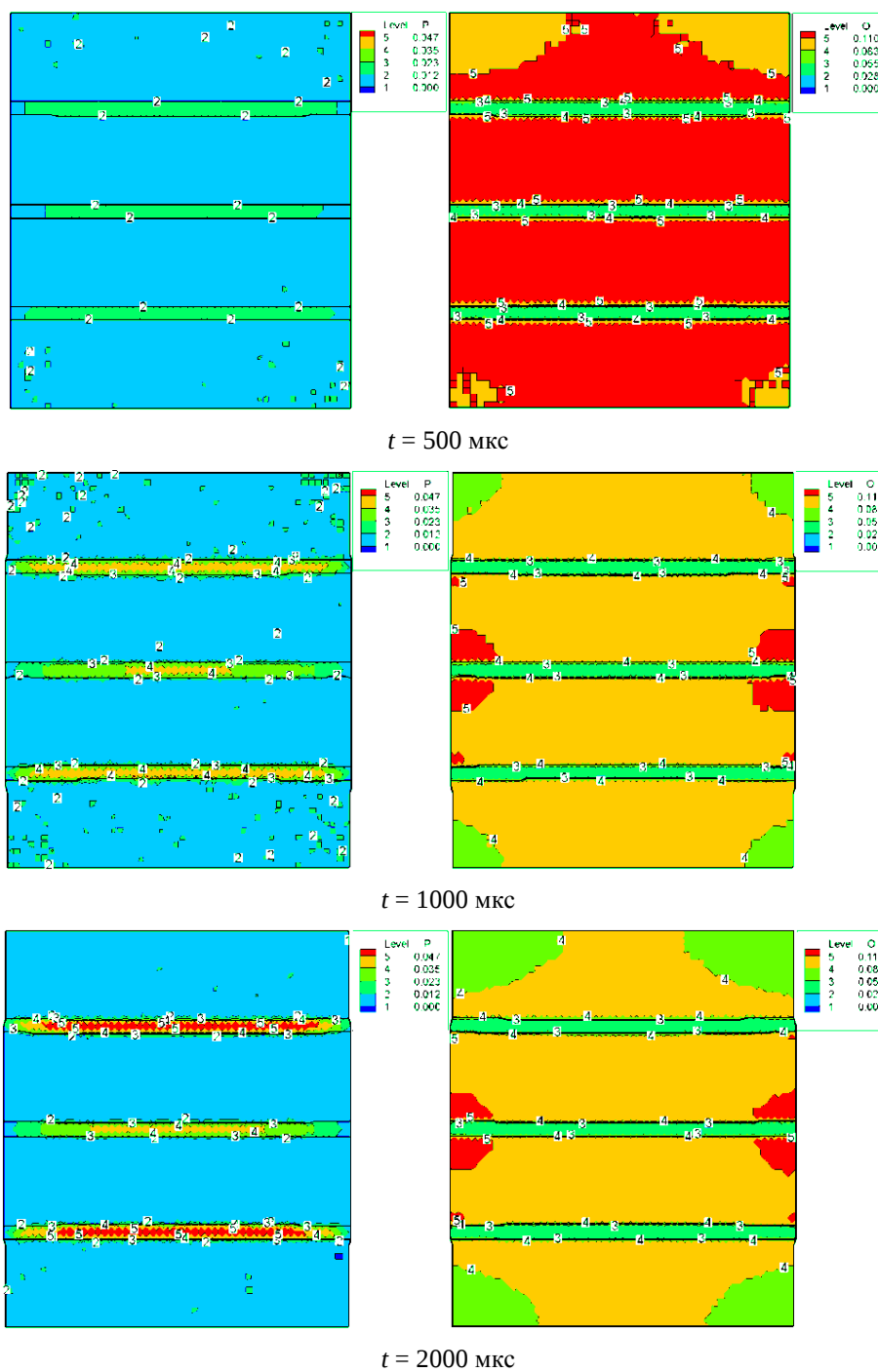


Рис. 3. Распределение изолиний давлений (ГПа) (слева) и относительного объема пор (справа) в срединном сечении (продольном) кирпичной кладки в различные моменты времени при нагружении прямоугольным импульсом длительностью 1128,2 мкс и скоростью 3,75 м/с

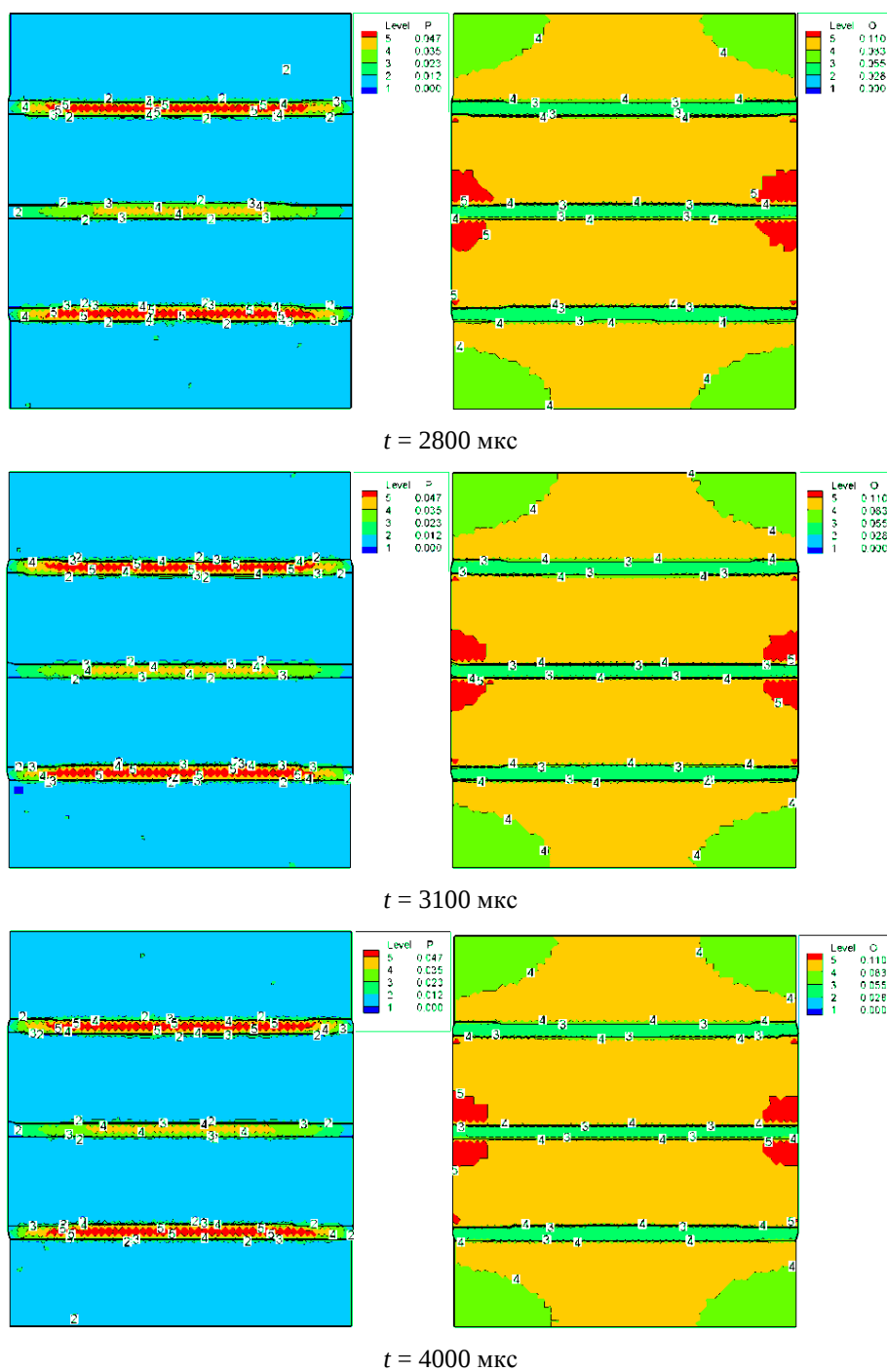


Рис. 4. Распределение изолиний давлений (ГПа) (слева) и относительного объема пор (справа) в срединном сечении (продольном) кирпичной кладки в различные моменты времени при нагружении прямоугольным импульсом длительностью 1128,2 мкс и скоростью 3,75 м/с

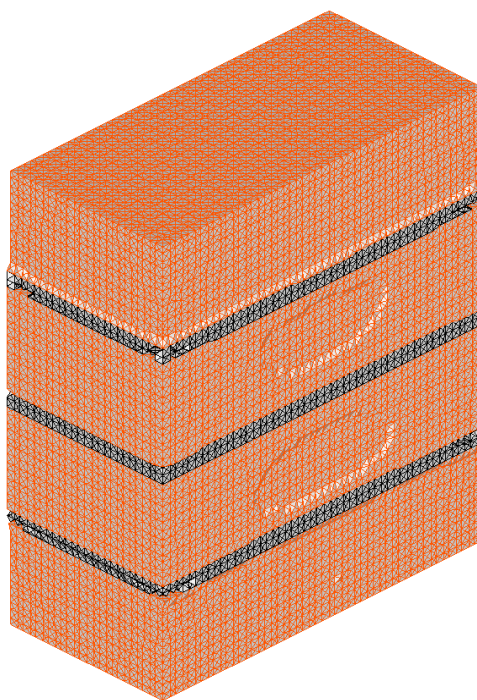


Рис. 5. Конфигурация кирпичной кладки под воздействием прямоугольного импульса нагрузки длительностью 1128,2 мкс в момент времени 2800 мкс

При взаимодействии с падающим грузом в верхнем кирпиче формируется волна сжатия, распространяющаяся от поверхности контакта вглубь кирпича. Примерно через 20 мкс она достигает поверхности раздела «кирпич-раствор». Происходит расщепление падающей волны на проходящую в раствор волну сжатия и отраженную вглубь сжатого кирпича волну разгрузки, что приводит к понижению сжимающих напряжений в кирпиче в области поверхности материалов. Волна сжатия, распространяющаяся по раствору, при выходе на поверхность раздела «раствор-второй кирпич» распадается на отраженную в раствор и падающую во второй кирпич волны сжатия. В процессе взаимодействия волны сжатия в слое раствора с поверхностями раздела материалов сжимающие напряжения в нем возрастают с течением времени.

В момент времени приблизительно 110 мкс волна сжатия выходит на тыльную поверхность четвертого кирпича, в результате чего происходит отражение волны сжатия в кирпичную кладку. На рис. 3, 4 представлены в различные моменты времени поля давлений (левый рисунок) и относительного объема пор ξ (правый рисунок) в кирпичной кладке. В момент времени 500 мкс все четыре кирпича подвергнуты сжимающим напряжениям ($P < 0,012$ ГПа), уровень которых несколько ниже предела прочности на сжатие ($R_c < 0,014$ ГПа). Наибольшее сжимающее напряжение в кладке достигается в слое раствора ($0,012$ ГПа $< P < 0,023$ ГПа). Их уровень превышает предел прочности на сжатие раствора ($R_c < 0,0105$ ГПа). С течением времени уровень сжимающих напряжений в кирпичах значительно не меняется, однако в слоях раствора наблюдается

его рост. Несмотря на то что в момент времени 1128 мкс прекращается действие импульса на лицевую поверхность первого кирпича, рост сжимающих напряжений в слоях раствора продолжается вплоть до момента времени 2000 мкс. Наибольшие сжимающие напряжения ($0,035 \text{ ГПа} < P < 0,047 \text{ ГПа}$) достигаются в первом и третьем слоях раствора. В центре второго слоя их уровень несколько ниже ($0,023 \text{ ГПа} < P < 0,035 \text{ ГПа}$). Такая картина наблюдается вплоть до окончания расчета ($t = 4000 \text{ мкс}$).

Материал кирпича изначально пористый. Относительный объем пустот в нем достигает величины $\xi = 0,13$, что составляет 13 % пористости. В растворе объем пустот $\xi = 0,03$ (3 % пористости). В процессе ударно-волнового нагружения относительный объем пустот в слоях раствора практически не меняется. В кирпиче с течением времени пористость изменяется от 11 % ($t = 500 \text{ мкс}$) до 8,3 % ($t = 1000 \text{ мкс}$). Расчет произведен до момента времени 4000 мкс. Разрушений в кирпичной кладке не произошло ни по сдвиговому механизму, ни по отрывному. Конфигурация на момент времени 2800 мкс приведена на рис. 5.

На рис. 6–10 представлены результаты расчета ударного взаимодействия подающего с высоты ($h = 2 \text{ м}$) стального груза массой $m = 500 \text{ кг}$ с кирпичной кладкой, рассмотренной выше ($V_0 = 6,26 \text{ м/с}$, $U_0 = 6,1 \text{ м/с}$, $P_0 = 0,04 \text{ ГПа}$, $T_1 = 2541 \text{ мкс}$). Расчет проведен до момента времени 4007 мкс.

На рис. 6 в три момента времени процесса ($t_1 = 2000 \text{ мкс}$, $t_2 = 3000 \text{ мкс}$, $t_3 = 4000 \text{ мкс}$ приведены поля давлений (левый рисунок)) и изолинии интенсивности пластических деформаций ε_u (правый рисунок) в (срединном продольном) сечении кладки. В момент времени 2000 мкс в центре кирпичей давление достигает величины 0,08 ГПа. Распространяющиеся от свободных поверхностей волны разгрузки понижают давление до нуля. Так в срединном сечении (поперечном) первого кирпича материал частично разгружен с торцевых свободных поверхностей. Растягивающее в этих областях давление $P \approx -0,002 \text{ ГПа}$. Как и в предыдущем варианте расчета, максимальное давление достигается в слоях раствора. На рис. 7 представлено распределение изолиний давления, относительного объема пор ξ и интенсивности пластических деформаций ε_u в срединном поперечном сечении первого слоя раствора кладки. В центральной части слоя раствора давление достигает величины до 0,131 ГПа, относительный объем пустот $\xi = 0,023$. При приближении к свободным поверхностям давление в растворе понижается до нуля, а относительный объем повышается до 0,03. Произошло разрушение материала раствора в углах кладки по отрывному механизму из-за действия встречных волн разгрузок. Интенсивность пластических деформаций незначительна ($0 < \varepsilon_u \leq 0,07$).

В срединном поперечном сечении второго кирпича давление P не превышает 0,07 ГПа, а относительный объем ξ достигает величины 0,065. В углах кирпич обладает пористостью порядка 13 %. Интенсивность пластических деформаций $\varepsilon_u = 0$.

Во втором слое раствора давление достигает величины 0,108 ГПа. Относительный объем пор $\xi = 0,03$, $\varepsilon_u = 0$. Произошло разрушение материала в углах кладки.

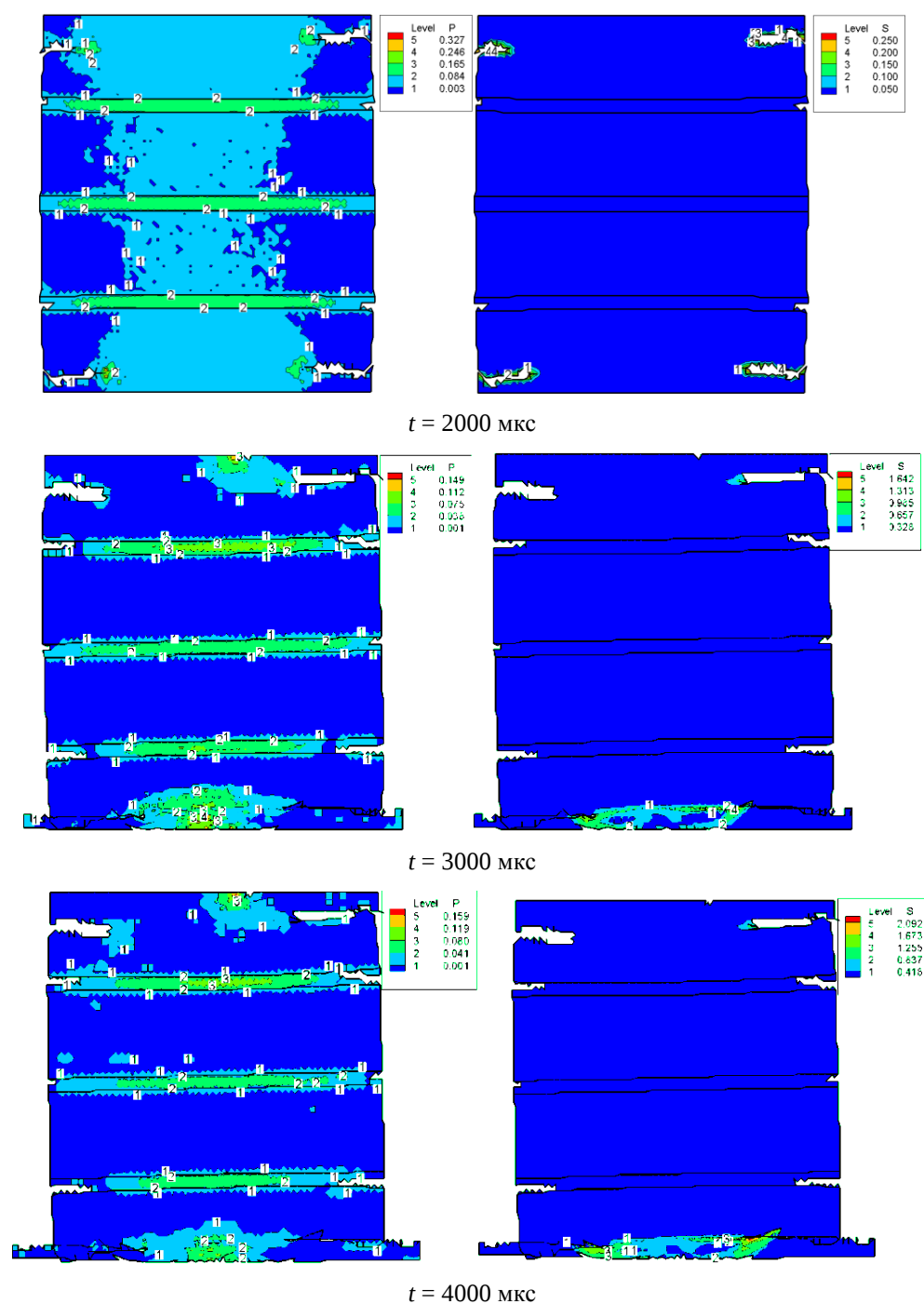


Рис. 6. Распределение изолиний давлений (ГПа) (слева) и интенсивности пластических деформаций (справа) в срединном сечении (продольном) кирпичной кладки в различные моменты времени при нагружении прямоугольным импульсом длительностью 2541,7 мкс и скоростью 6,1 м/с

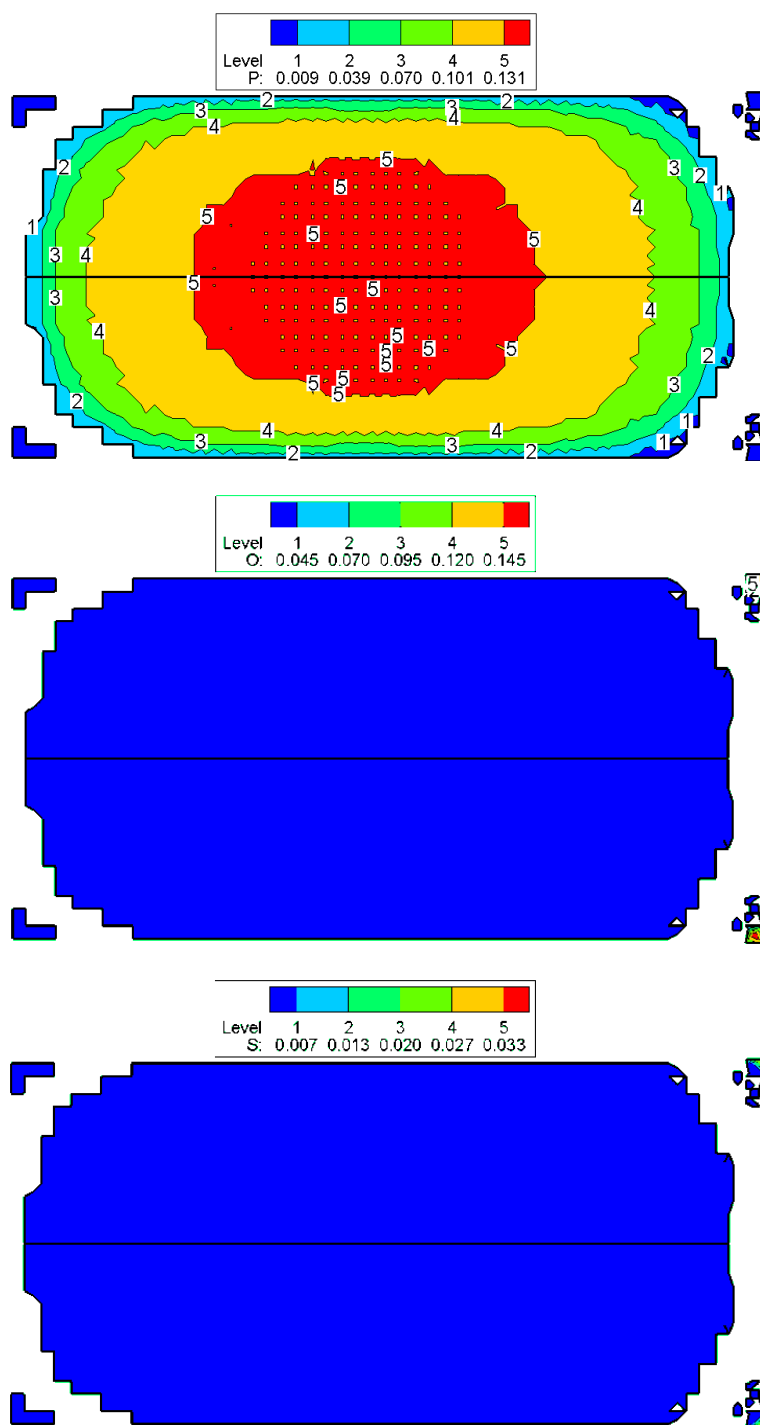


Рис. 7. Распределение изолиний давлений (ГПа), относительного объема пустот ξ и интенсивности пластических деформаций в срединном сечении первого слоя раствора кирпичной кладки в момент времени 2000 мкс при нагружении прямоугольным импульсом длительностью 2541,7 мкс и скоростью 6,1 м/с

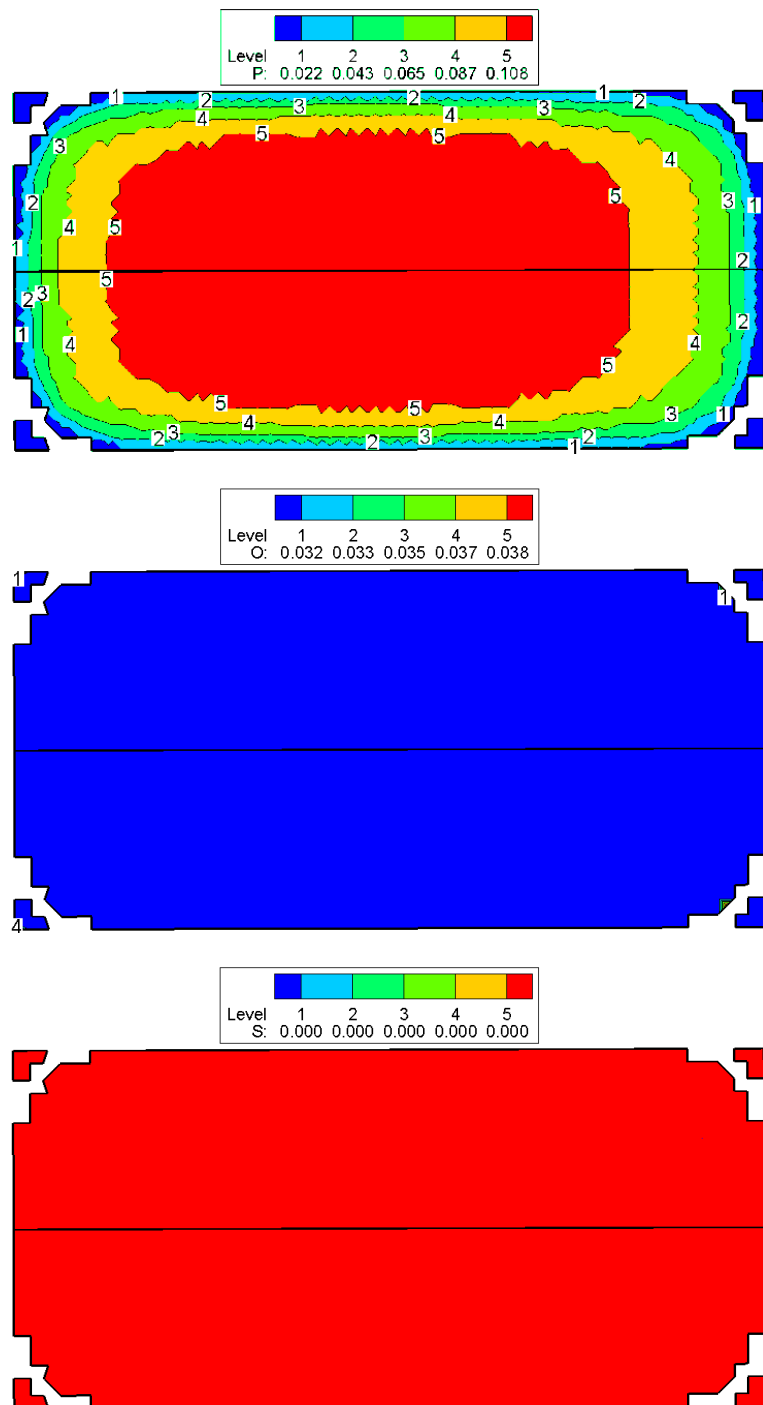


Рис. 8. Распределение изолиний давлений (ГПа), относительного объема пустот ξ и интенсивности пластических деформаций в срединном сечении второго слоя раствора кирпичной кладки в момент времени 2000 мкс при нагружении прямоугольным импульсом длительностью 2541,7 мкс и скоростью 6,1 м/с

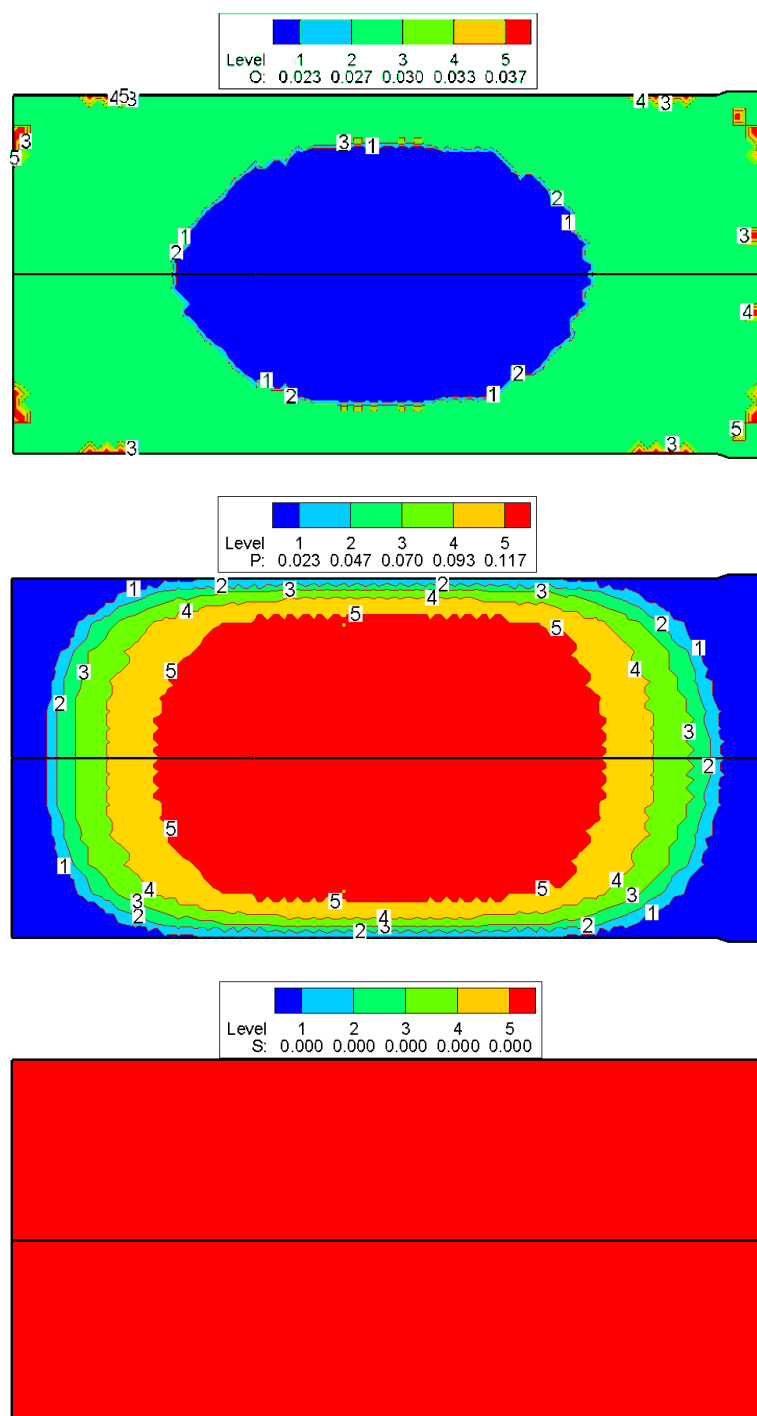


Рис. 9. Распределение изолиний давлений (ГПа), относительного объема пустот ξ и интенсивности пластических деформаций в срединном сечении третьего слоя раствора кирпичной кладки в момент времени 2000 мкс при нагружении прямоугольным импульсом длительностью 2541,7 мкс и скоростью 6,1 м/с

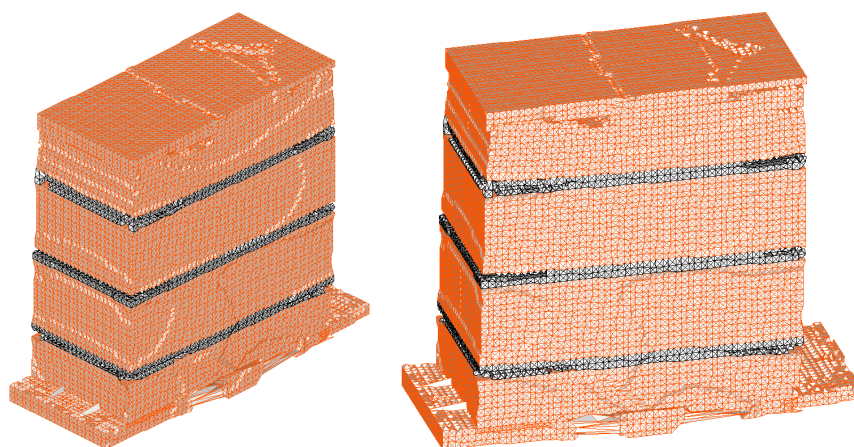


Рис. 10. Конфигурации кирпичной кладки под воздействием прямоугольного импульса нагрузки длительностью 2541,7 мкс и скоростью 6,1 м/с в начальный момент и в момент времени 4007 мкс

В третьем кирпиче, в его срединном поперечном сечении, давление в центральной части не превышает 0,01 ГПа, относительный объем пустот $\xi = 0,04$. В двух областях, прилегающих к торцевым свободным поверхностям, относительный объем пустот $\xi = 0,05$.

В третьем слое раствора давление в центральной части кладки достигает величины 0,117 ГПа и уменьшается в областях, прилегающих к свободным поверхностям. В центре слоя относительный объем пустот ξ не превышает 0,023, в остальной части $\xi = 0,03$. Интенсивность пластических деформаций $\epsilon_u = 0$.

В продольном поперечном среднем сечении четвертого кирпича $0,017 \text{ ГПа} < P < 0,035 \text{ ГПа}$. У торцевых свободных поверхностей образовались две области материала, в которых давление отрицательно ($P \approx -0,02 \text{ ГПа}$). Относительный объем пустот в центральной части продольного сечения $\xi = 0,02$ (пористость 2 %). Вблизи тыльных свободных поверхностей её величина составляет 5,3 %, в углах – 7,2 %.

К моменту времени $t = 2000 \text{ мкс}$ вблизи лицевой поверхности первого кирпича и тыльной поверхности четвертого кирпича кладки появились области разрушенного материала, выходящие на свободные поверхности. Разрушение произошло по сдвиговому механизму. Давление в окрестности разрушенного материала достигает величины 0,165 ГПа, а интенсивность пластических деформаций $\epsilon_u = 0,2$ (см. рис. 6).

К моменту времени 3000 мкс материал центральных кирпичей разгружен практически полностью. Произошло дальнейшее разрушение материала первого и четвертого кирпичей. В центре четвертого кирпича у его тыльной поверхности максимальные сжимающие напряжения достигают ($P = 0,112 \text{ ГПа}$). Такая же картина наблюдается вблизи лицевой поверхности первого кирпича. Максимальные давления находятся у лицевой поверхности в центре кирпича и достигают величины 0,0075 ГПа. Максимальные значения интенсивности пластических деформаций находятся лишь в области разрушенного материала ($\epsilon_u = 0,525$). Происходит выкрашивание раствора в первом и втором слоях.

В момент времени 4000 мкс картина практически не изменилась. Сильно разрушен нижний кирпич у основания, частично верхний. Второй и третий кирпичи не повреждены. Выкрошилась небольшая часть раствора в первом и третьем слоях.

На рис. 10 представлена окончательная картина разрушения в кирпичной кладке. Основание кирпичной кладки разрушено примерно на глубину до 2 см и смещено. Хорошо видна трещина в первом кирпиче вблизи лицевой поверхности.

Следует отметить, что параметры модели для лучшего понимания физики протекающих процессов несколько завышены. Это касается критических значений интенсивности пластических деформаций ε_u^* и относительного объема пор ξ^* , отвечающих за фрагментацию поврежденного трещинами материала.

Таким образом, наличие стыков в фрагменте кирпичной кладки оказывает существенное влияние на волновые процессы, протекающие в кладке при нагружении, что сказывается на конечной картине его разрушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях*/ В.И. Колчунов, Н.В. Ключева, Н.Б. Андросова, А.С. Бухтиярова. – М. : Изд-во АСВ, 2014. – 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 (37). – С. 157–178.
3. *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.
4. *Модель динамического разрушения кладки из обыкновенного глиняного кирпича* / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница [и др.] // Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции. – 2016. – № 4 (66). – С. 3–10.
5. *Исследование процессов динамического разрушения в мелкозернистом бетоне методом компьютерного моделирования* / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2001. – № 1. – С. 14–19.
6. *Модель динамического разрушения мелкозернистого бетона* / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2005. – № 1. – С. 14–21.
7. *Расчетно-экспериментальный метод анализа динамической прочности элементов железобетонных конструкций* / Н.Н. Белов, О.В. Кабанцев, Д.Г. Копаница, Н.Т. Югов. – Томск : STT, 2008. – 289 с.
8. *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.
9. *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.
10. *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.

REFERENCES

1. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Buhtiyarova A.S. Zhivuchest' zdaniy i sooruzheniy pri zaproeknykh vozdeistviyakh [Durability buildings beyond design basis]. Moscow: ASV Publ., 2014. 208 p. (rus)
2. Kopanitsa D.G., Kabantsev O.V., Useinov E.S. Eksperimental'nye issledovaniya fragmentov kirpichnoi kladki na deistvie staticheskoi i dinamicheskoi nagruzki [Experimental studies of fragments of masonry under static and dynamic loads]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 4. Pp. 157–178. (rus)
3. Yugov N.T., Belov N.N., Yugov A.A. Raschet adiabaticeskikh nestatsionarnykh techeniy v trekhmernoi posta-novke RANET-3 [Calculation of adiabatic nonstationary flows in 3D RANET-3 software]. RF Certificate of State Registration of Software N 201061 1042, Moscow, 2010 (rus)
4. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., et al. Issledovanie protsessov dinamicheskogo razrusheniya v melkozernistom betone metodom komp'yuternogo modelirovaniya [Computer modeling of loam-brick masonry dynamic fracture]. *Teoriya inzhenernykh sooruzheniy. Stroitel'nye konstruktsii*. 2016. No. 4 (66). Pp. 3–10. (rus)
5. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., et al. Issledovanie protsessov dinamicheskogo razrusheniya v melkozernistom betone metodom komp'yuternogo modelirovaniya [Computer modeling of dynamic fracture in fine concrete]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2001. No. 1. Pp. 14–19. (rus)
6. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., et al. Model' dinamicheskogo razrusheniya melkozernistogo betona [The model of dynamic fracture of fine-grained concrete]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2005. No. 1. Pp. 14–21. (rus)
7. Belov N.N., Kabantsev O.V., Kopanitsa D.G., Yugov N.T. Raschetno-eksperimental'nyi metod analiza dinamicheskoi prochnosti elementov zhelezobetonnykh konstruktsii [The analysis of dynamic strength of reinforced concrete elements]. Tomsk: STT Publ., 2008. 289 p. (rus)
8. Belov N.N., Kopanitsa D.G., Yugov N.T. Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskoi prochnosti konstruktsionnykh materialov [Mathematical modeling of dynamic strength of construction materials]. Moscow: ASV Publ., 2013. 562 p. (rus)
9. Belov N.N., Yugov A.A., Kopanitsa D.G., Stukanov A.L., Useinov E.S., Ryshkov A.V. Model' dinamicheskogo razrusheniya obyknovennogo glinyanogo 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)
10. Belov N.N., Yugov A.A., Useinov E.S., Ryshkov A.V. Model' dinamicheskogo razrusheniya kladki iz obyknovennogo glinyanogo kirpicha [The model of dynamic fracture masonry of ordinary clay brick]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No. 4. Pp. 3–12. (rus)