

УДК 539.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-3-147-158

Н.Н. БЕЛОВ¹, Д.Г. КОПАНИЦА¹, Н.Т. ЮГОВ¹, Г.П. ТОНКИХ²,
А.С. ПЛЯСКИН¹, А.В. РЫШКОВ¹,

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,

²Национальный исследовательский

Московский государственный строительный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ФРАГМЕНТА КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ НА УДАР

В настоящее время производится корректировка и переработка СП 88.13330.2014 «Защитные сооружения гражданской обороны». Исследования, посвященные математическому моделированию процессов динамического разрушения кирпичной кладки при действии ударной нагрузки, являются весьма актуальными.

Целью работы являлось исследование методом компьютерного моделирования динамической прочности фрагмента кирпичной кладки при действии ударной нагрузки различной интенсивности и углах контакта.

Численные эксперименты проведены с использованием программного комплекса «РАНЕТ-3», позволяющего проводить решение задач удара, взрыва, воздействия мощных потоков излучения на вещество в полной трехмерной постановке, модифицированного на решение динамических задач методом конечных элементов.

Построена математическая модель ударного взаимодействия фрагмента кирпичной кладки и падающего груза массой 1000 кг. Получены картины разрушения кирпичной кладки при действии ударной нагрузки различной интенсивности, а также угле контакта, равном $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$.

Основные выводы представлены в виде картин напряженного состояния фрагмента кирпичной кладки при взаимодействии с падающим грузом в различные моменты времени.

Полученные результаты могут быть применены при проектировании и переустройстве помещений гражданских зданий и сооружений в убежища и другие защитные сооружения гражданской обороны.

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

Для цитирования: Белов Н.Н., Копаница Д.Г., Югов Н.Т., Тонких Г.П., Пляскин А.С., Рышков А.В. Исследование методом компьютерного моделирования прочности фрагмента кирпичной кладки на удар падающего груза под углом, отличным от нормального, и повторный удар // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 3. С. 147–158.

N.N. BELOV¹, D.G. KOPANITSA¹, N.T. YUGOV¹, G.P. TONKIKH²,
A.S. PLYASKIN¹, A.V. RYSHKOV¹,

¹Tomsk State University of Architecture and Building,

²The National Research Moscow State University of Civil Engineering

COMPUTER SIMULATION OF MASONRY DYNAMIC STRENGTH UNDER IMPACT LOAD

Purpose: The aim of this work is computer simulation of the dynamic strength of masonry fragment under impact load of various intensity and contact angles. **Design/methodology/approach:** Numerical calculations are performed on the RANET-3 software package allowing 3D simulation of impact, explosion and powerful radiation using the finite element analysis oriented towards the solution of dynamical problems. Stress states of masonry are studied in its interacting with the weight drop at different time points. **Research findings:** A mathematical model is proposed to simulate the impact interaction between the masonry fragment and a 1000 kg weight drop. The fracture of masonry is shown due to the impact load of various intensity and contact angles of 0, 30 and 45 degrees. **Practical implications:** The obtained results can be readily used in design and reconstruction of rooms in civil buildings into protective shelters and other civil defense buildings. **Value:** SNiP 88.13330.2014 'Civil defense buildings' is being currently revised, and the mathematical simulation of the dynamic fracture of masonry due to the impact load are therefore rather relevant.

Keywords: shock-wave load; masonry; dynamic fracture; mathematical modeling.

For citation: Belov N.N., Kopanitsa D.G., Yugov N.T., Tonkikh G.P., Plyas-kin A.S., Ryshkov A.V. Issledovanie metodom komp'yuternogo modelirovaniya prochnosti fragmenta kirpichnoi kladki na udar padayushchego gruzha pod uglom, otlichnym ot normal'nogo, i povtorny udar [Computer simulation of masonry dynamic strength under impact load at different contact angles]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture, 2018. V. 20. No. 3. Pp. 147–158. (rus)

В настоящей работе в рамках механики сплошной среды методом компьютерного моделирования проведено исследование прочности фрагмента кирпичной кладки на удар падающего на копровой установке груза массой 1000 кг с высоты 2 м под углом, отличным от нормального. 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.

Исследована прочность фрагмента кладки на повторный удар падающего груза соответственно с высоты 2 и 1 м. Расчет динамической прочности кладки проведен в рамках пакета вычислительных программ «РАНЕТ-3».

Сравнительно мало работ посвящено математическому моделированию процессов динамического разрушения кирпичной кладки, поэтому моделирование и расчет прочности кирпичной кладки является актуальной задачей. Математическая модель, описывающая процессы деформирования и разрушения в обыкновенном глиняном кирпиче при ударе падающего на копровой установке стального груза массой m кг с высоты h м, предложена в работе [1]. В работе [2] приведена математическая модель, описывающая в рамках механики сплошной среды процессы деформирования и разрушения материалов кирпичной кладки в условиях динамического нагружения. Динамическое разрушение рассматривается как процесс роста и слияния микродефектов под действием образующихся в процессе нагружения напряжений. Локальным критерием отрывного разрушения является предельная величина относительного объема пустот. В качестве сдвигового разрушения принимается предельная величина интенсивности пластических деформаций. Данные модели реа-

лизированы в пакете вычислительных программ «РАНЕТ-3» [3, 4], позволяющих проводить решение задач удара, взрыва, воздействия мощных потоков излучения на вещество в полной трехмерной постановке, модифицированных на решение динамических задач методом конечных элементов.

Расчетно-экспериментальным методом в работе [5] проведен анализ процессов деформирования и разрушения в столбчатом образце кирпичной кладки, выполненном из четырех обыкновенных глиняных кирпичей на цементно-песчаном растворе, при падении на него на копровой установке груза массой $m = 197\text{--}500$ кг с высоты $h = 1\text{--}2$ м. Методом компьютерного моделирования в работе [6] проведено исследование прочности фрагмента кладки на удар падающего стального груза массой 1000 кг с высоты $h = 2$ м. В отличие от предыдущего фрагмент кладки состоял 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.

В настоящей работе проведены исследования влияния угла подхода стальной пластины к поверхности рассмотренного выше фрагмента кирпичной кладки на процесс его разрушения и поведения фрагмента при повторном ударе стальной пластины.

При нормальном соударении ($\alpha = 0^\circ$, где α – угол между направлениями вектора скорости стальной пластины и нормалью к поверхности фрагмента) нагрузка от падающего груза на лицевую поверхность фрагмента кирпичной кладки моделировалась заданием компонента массовой скорости $U_z(x, y, z, t) = -U_0$. 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, $m \frac{dU_z}{dt} = -P_0 S_1$, где S_1 – площадь лицевой поверхности фрагмента.

Учитывая, что в течение времени T_1 скорость менялась от $V_0 = \sqrt{2gh}$ до 0, $T_1 = \frac{mV_0}{S_1 P_0}$. Для скорости удара V_0 численные значения P_0 и массовой скорости U_0 определялись графическим методом с использованием ударных адиабат стали и кирпича. При ударе, отличном от нормального, ($\alpha \neq 0^\circ$) компоненты массовой скорости на лицевой поверхности фрагмента определялись по формулам: $U_z(x, y, z, t) = -U_0 \cos \alpha$, $U_y(x, y, z, t) = 0$, $U_x(x, y, z, t) = -U_0 \sin \alpha$.

На рис. 1–3 приведены результаты математического моделирования процессов деформирования и разрушения фрагмента кирпичной кладки при падении с высоты $h = 2$ м стального груза массой $m = 1000$ кг. Решение задачи проведено 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; $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$. Расчет проведен до момента времени 3000 мкс. Действие импульсной нагрузки на фрагмент кладки к этому моменту времени закончилось.

На рисунках изображены на момент окончания расчета конфигурации кирпичной кладки (а) и распределения изолиний относительного объема пустот ξ (б) и интенсивности пластических деформаций (в) в срединном продольном сечении фрагмента кирпичной кладки ($y = 0$), по которым можно судить о характере и степени разрушения фрагмента.

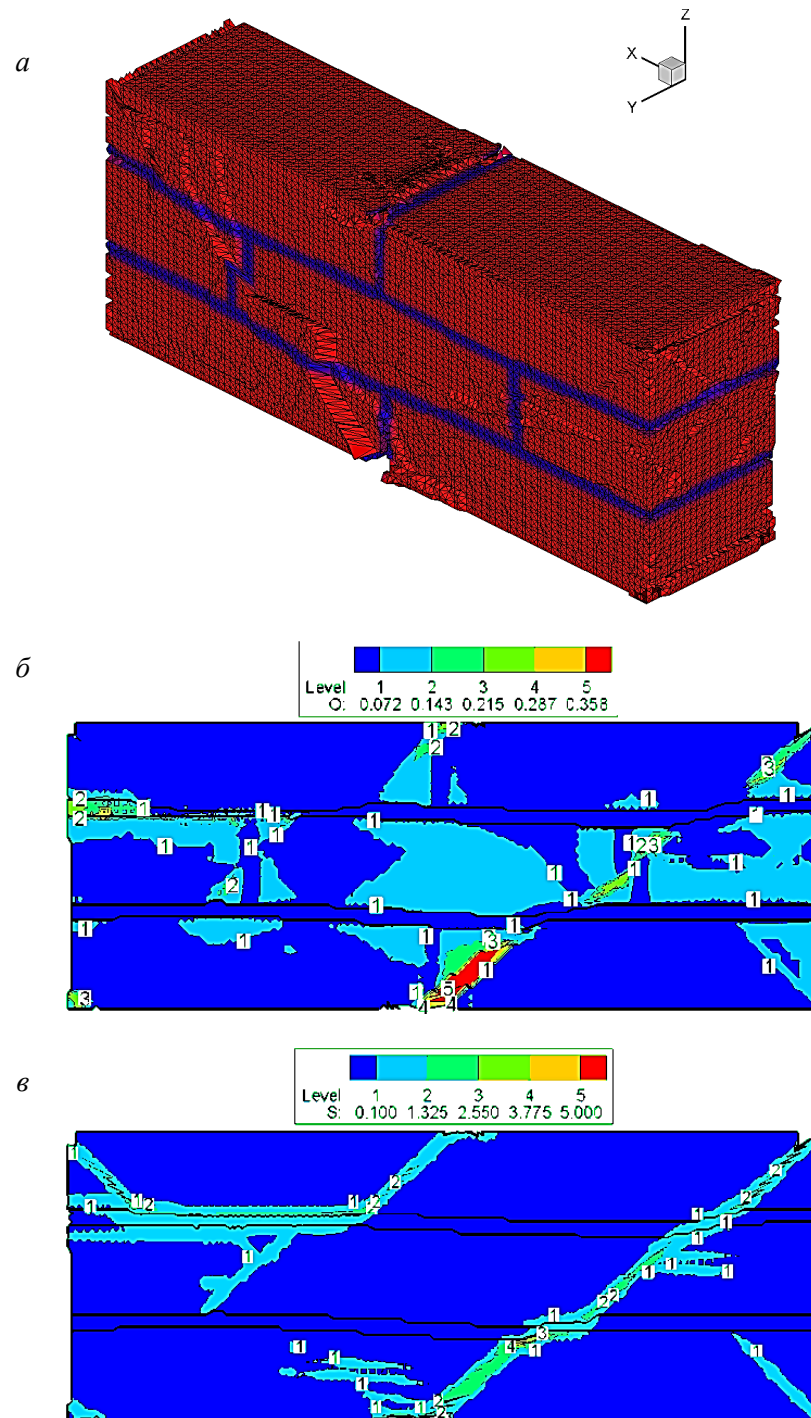


Рис. 1. Конфигурация фрагмента кирпичной кладки (а), распределения изолиний относительного объема пустот ξ (б) и интенсивности пластических деформаций (в) в срединном продольном сечении фрагмента кирпичной кладки на момент времени 3000 мкс при падении стального груза с высоты $h = 2$ м ($\alpha = 0^\circ$)

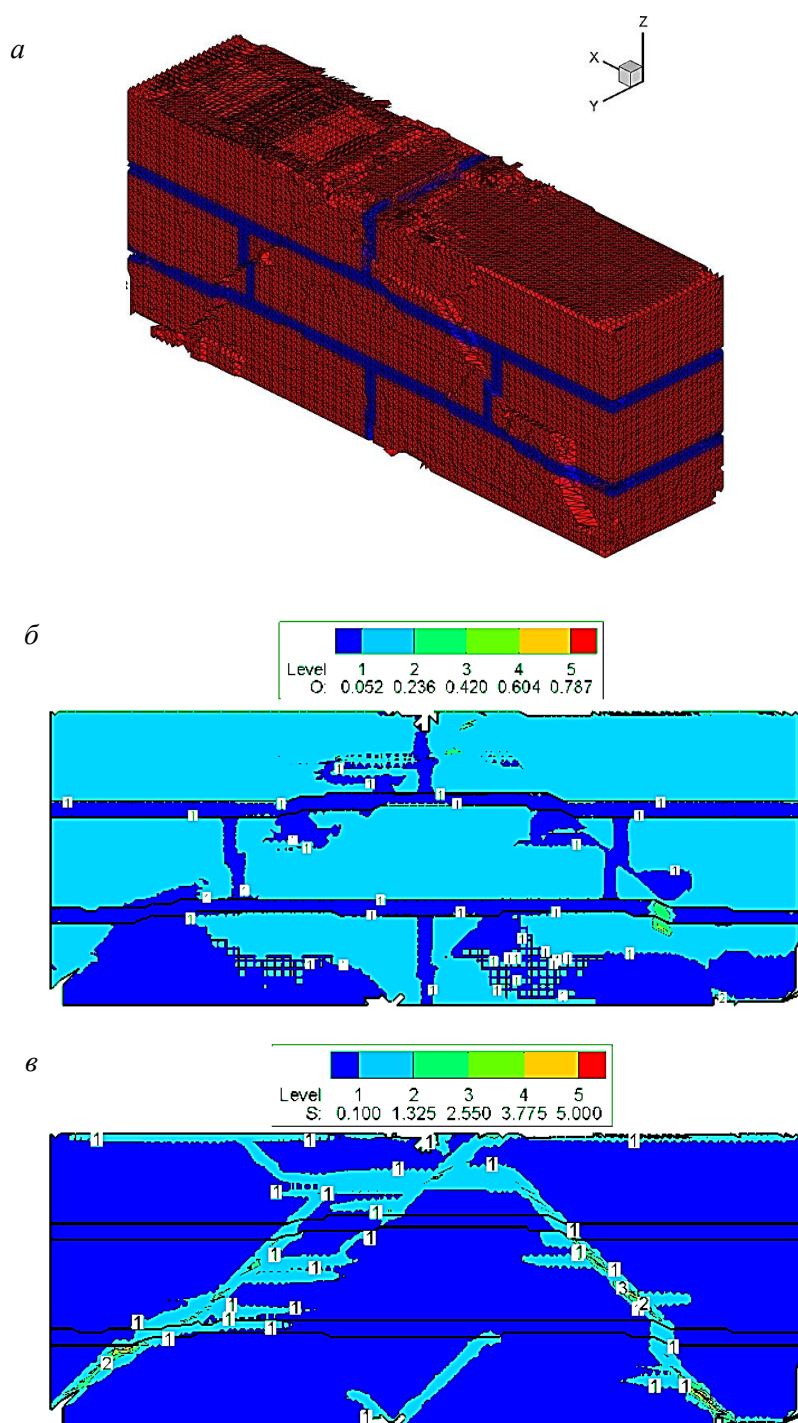


Рис. 2. Конфигурация фрагмента кирпичной кладки (*a*), распределения изолиний относительного объема пустот ξ (*б*) и интенсивности пластических деформаций (*в*) в срединном продольном сечении фрагмента кирпичной кладки на момент времени 3000 мкс при падении стального груза с высоты $h = 2$ м ($\alpha = 30^\circ$)

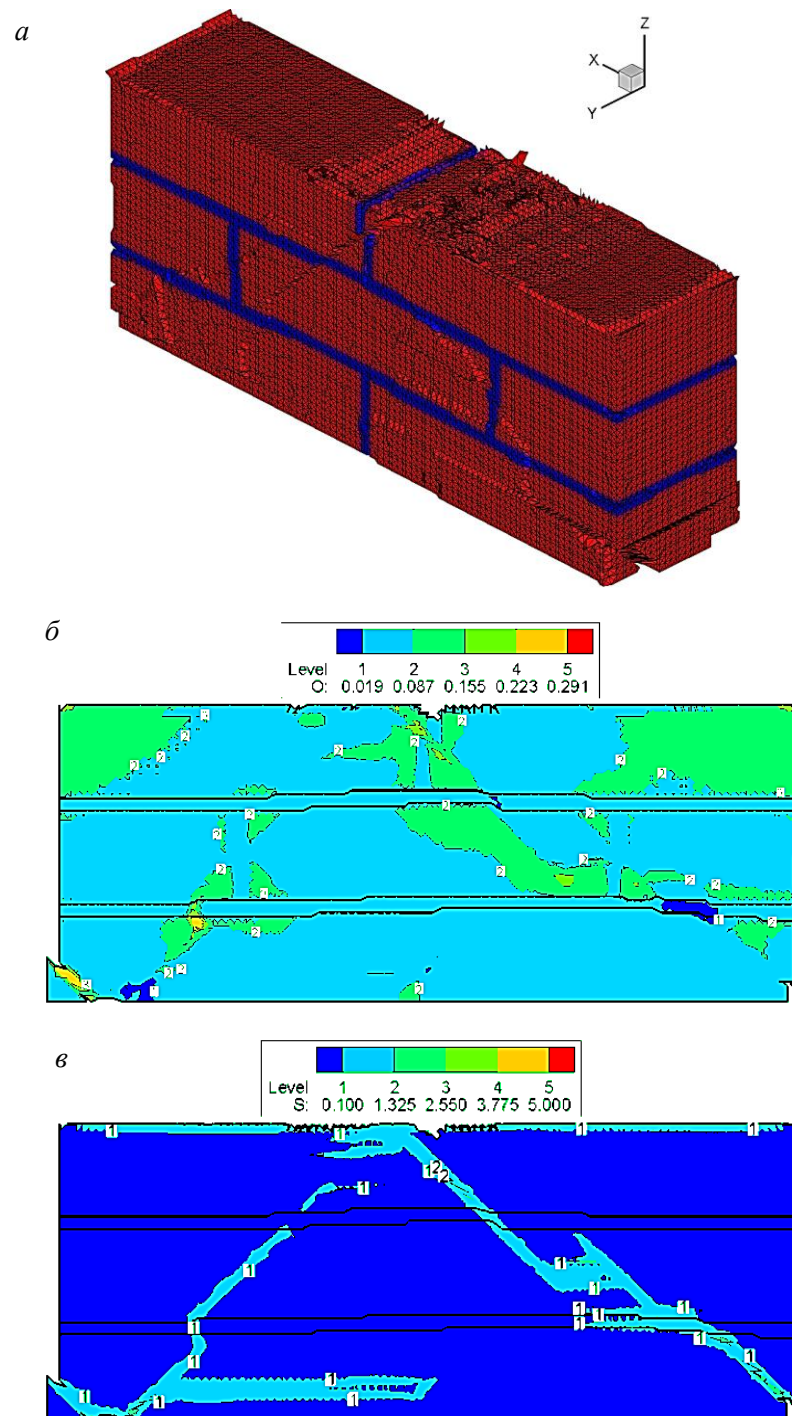


Рис. 3. Конфигурация фрагмента кирпичной кладки (*a*), распределения изолиний относительного объема пустот ξ (*б*) и интенсивности пластических деформаций (*в*) в срединном продольном сечении фрагмента кирпичной кладки на момент времени 3000 мкс при падении стального груза с высоты $h = 2$ м ($\alpha = 45^\circ$)

Фрагментирование поврежденного трещинами материала, подвергнутого воздействию растягивающих напряжений, происходит, когда относительный объем пустот достигает критической величины $\xi^* = 0,3$. Если поврежденный трещинами материал подвергнут воздействию сжимающих напряжений, то критерием фрагментирования является предельная величина интенсивности пластических деформаций $\epsilon_u^* = 0,26$.

Материал кирпича изначально пористый. Относительный объем пустот до нагружения в нем достигает величины $\xi = 0,13$, что соответствует 13 % пористости. В растворе до нагружения $\xi = 0,03$, что соответствует 3 % пористости.

При нормальном соударении груза с фрагментом кладки ($\alpha = 0^\circ$, рис. 1, б) на момент окончания расчета ($t = 3000$ мкс) пористости в первом слое кладки составляет приблизительно 7,2 % ($\xi = 0,072$). В центре второго слоя ее величина увеличивается до 14 %. Аналогичные значения величины пористости достигаются в первом кирпиче в области, примыкающей к поверхности раздела слоев и свободной боковой поверхности. Такой же уровень пористости достигается в третьем кирпиче второго слоя.

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 0,1 до 3,77 (рис. 1, в). Произошло разрушение материала по сдвиговому механизму. Образовалась наклонная трещина, проходящая через все три слоя кладки.

В первом кирпиче первого слоя образовались еще две наклонные трещины. Первая трещина распространяется от левого верхнего угла под углом 45° к поверхности раздела слоев, вторая – от стыка между кирпичами по первому кирпичу к поверхности раздела слоев. Слой раствора под первым кирпичом разрушен. Разрушен материал первого кирпича на границе раздела слоев.

Во втором слое материал первого и второго кирпича разрушен у поверхности раздела слоев. Образовалась наклонная трещина, распространяющаяся во втором кирпиче от поверхности раздела слоев под углом 45° вглубь кирпича к стыку с первым. В центре третьего кирпича наблюдаются две параллельные трещины, соединяющиеся с наклонной магистральной трещиной.

В третьем слое кирпичной кладки, помимо магистральной трещины, в первом кирпиче у стыка образовалось четыре параллельных трещины. Во втором кирпиче от раздела слоев в правый нижний угол под углом 45° распространяется наклонная трещина. Конфигурация фрагмента кладки на момент окончания расчета приведена на рис. 1, а.

При ударе под углом, отличным от нормального, картина разрушения фрагмента меняется. На рис. 2, в представлено распределение изолиний относительного объема пустот (рис. 2, б) и интенсивности пластических деформаций (рис. 2, в) в срединном (продольном) сечении фрагмента кирпичной кладки в момент времени 3000 мкс при нагружении прямоугольным импульсом давления длительностью 2541,7 мкс, моделирующего удар стальной пластины

со скоростью $V_0 = 6,26$ м/с ($U_0 = 6,1$ м/с) под углом $\alpha = 30^\circ$. При ударном взаимодействии во фрагменте в процессе нагружения происходят взаимодействия встречных волн сжатия и их отражения от жестких стенок пластины и основания. Поэтому во фрагменте возникают лишь сжимающие напряжения, приводящие к разрушению по сдвиговому типу.

К моменту времени 3000 мкс давление в первых двух слоях кирпичной кладки не превышает 0,042 ГПа. В третьем слое оно несколько выше. Наибольшее его значение достигается у тыльной поверхности фрагмента ($0,042 \text{ ГПа} < P < 0,093 \text{ ГПа}$). Такой же уровень давления достигается в растворе швов. В третьем слое произошло частичное затекание пустот в кирпичах. Относительный объем пустот в кирпичах $\xi < 0,052$ (5 % пористости).

На лицевой поверхности фрагмента произошло разрушение материала кирпичной кладки. В первом и во втором кирпичах первого слоя образовались трещины сдвига, распространяющиеся под углом 45° к центру слоя, в котором расположена горизонтальная трещина. Вторая горизонтальная трещина образовалась в первом слое у поверхности шва, разделяющего первый и второй слои кладки.

Наклонная трещина, расположенная во втором кирпиче первого слоя, проходит через весь первый слой и распространяется по второму кирпичу второго слоя, соединяясь с горизонтальными трещинами сдвига, находящимися в его центре.

От горизонтальной трещины в центре второго кирпича первого слоя под углом 45° вглубь второго и третьего слоев фрагмента проходит магистральная трещина. Интенсивность пластических деформаций сдвига в ней достигает величины $\varepsilon_u = 2,55$.

Вторая магистральная трещина распространяется от горизонтальной трещины в центре первого кирпича первого слоя через второй и третий слои к углу фрагмента, образованного боковой и тыльной поверхностями кладки.

В третьем слое образовалось две трещины у стыка кирпичей. Первая наклонная трещина расположена во втором кирпиче и проходит от поверхности раздела второго и третьего слоев к стыку кирпичей на тыльной поверхности. Помимо нее формируется наклонная трещина, распространяющаяся от стыка у тыльной поверхности вглубь первого кирпича третьего слоя.

На рис. 3 приведены изолинии относительного объема пустот (рис. 3, б) и интенсивности пластических деформаций (рис. 3, в) в срединном сечении фрагмента кирпичной кладки в момент времени 3000 мкс. Вектор скорости центра масс стальной пластины-ударника составляет с нормалью к поверхности фрагмента угол 45° . К данному моменту времени давление в кирпичной кладке в первом и втором слое не превышает 0,042 ГПа. Несколько выше величина давления достигается в третьем слое и в растворе.

Относительный объем пустот достигает наибольшей величины ($\xi \approx 0,09$) в первом слое в областях материала, примыкающих к свободным боковым поверхностям фрагмента и к поверхностям стыка кирпичей. Такой же величины он достигает во втором слое фрагмента в областях, граничащих со стыками кирпичей, и в области, расположенной между поверхностями раздела слоев во

втором кирпиче. В остальном материале кладки относительный объем пустот не превышает 0,087 ($0,019 < \xi < 0,087$).

В кладке образовались две наклонные сквозные трещины сдвига, распространяющиеся от стыка кирпичей первого слоя к углам фрагмента, образованным боковыми свободными поверхностями с тыльной поверхностью третьего слоя. Материал лицевой поверхности кладки поврежден трещинами. В третьем слое в первом кирпиче на расстоянии примерно 2 см от его тыльной поверхности образовалась горизонтальная трещина. Произошел скол угла в первом кирпиче третьего слоя. Конфигурация фрагмента кирпичной кладки на момент окончания расчета приведена на рис. 3, а. На рис. 4 приведены результаты математического моделирования процессов деформирования и разрушения фрагмента кирпичной кладки на повторный нормальный ($\alpha = 0^\circ$) удар падающей стальной пластины массой 1000 кг с высоты соответственно 2 и 1 м. В момент 3008 мкс по фрагменту кладки наносился повторный удар ($\alpha = 0^\circ$) падающего груза с высоты 1 м. Расчет проведен до момента времени 6000 мкс при следующих значениях нормативов: $V_0 = 4,43$ м/с; $U_0 = 3,75$ м/с; $P_0 = 0,025$ ГПа; $T_1 = 2863,4$ мкс; $\alpha = 0^\circ$. На рисунке представлены на момент окончания расчета конфигурация фрагмента кирпичной кладки (рис. 4, а) и распределения изолиний относительного объема пустот ξ (рис. 4, б) и интенсивности пластических деформаций (рис. 4, в) в срединном поперечном сечении ($y = 0$).

Картина разрушения фрагмента при повторном ударе аналогична картине разрушения во фрагменте после ударного нагружения стальной пластиной, падающей с высоты 2 м (см. рис. 1).

К моменту времени 6000 мкс давление во всем фрагменте кладки не превышает 0,032 ГПа. Как и при первом нагружении падающим грузом с высоты 2 м во фрагменте магистральная наклонная трещина проходит из правого верхнего угла в первом слое через второй слой к стыку кирпичей в третьем слое у тыльной поверхности фрагмента. Интенсивность касательных напряжений в ней достигает величины 2,55 и выше. Относительный объем пустот в области магистральной трещины выше критического значения ($\xi > 0,326$). В третьем слое во втором кирпиче в области магистральной трещины его величина составляет 0,469. Таким образом, материал в этой области разрушен по сдвиговому механизму и фрагментирован.

В первом слое существующие наклонные трещины в первом кирпиче также расширились. Интенсивность касательных напряжений в них достигает величины 2,5, а относительный объем пустот $\xi \approx 0,18$. По тыльной стороне первого кирпича в первом слое кладки, в растворе под ним на лицевой поверхности кирпичей второго слоя относительный объем пустот достигает величины 0,3 и выше ($\epsilon_u = 2,5$). Материал разрушен и фрагментирован.

При повторном ударе произошел рост образовавшихся в процессе первого удара трещин. Существующие в первом кирпиче третьего слоя четыре горизонтальные трещины после повторного удара практически слились в одну область поврежденного трещинами материала ($0,1 < \epsilon_u < 1,35$, $0,18 < \xi < 0,326$).

Конфигурация фрагмента кирпичной кладки на момент окончания расчета приведен на рис. 4, а.

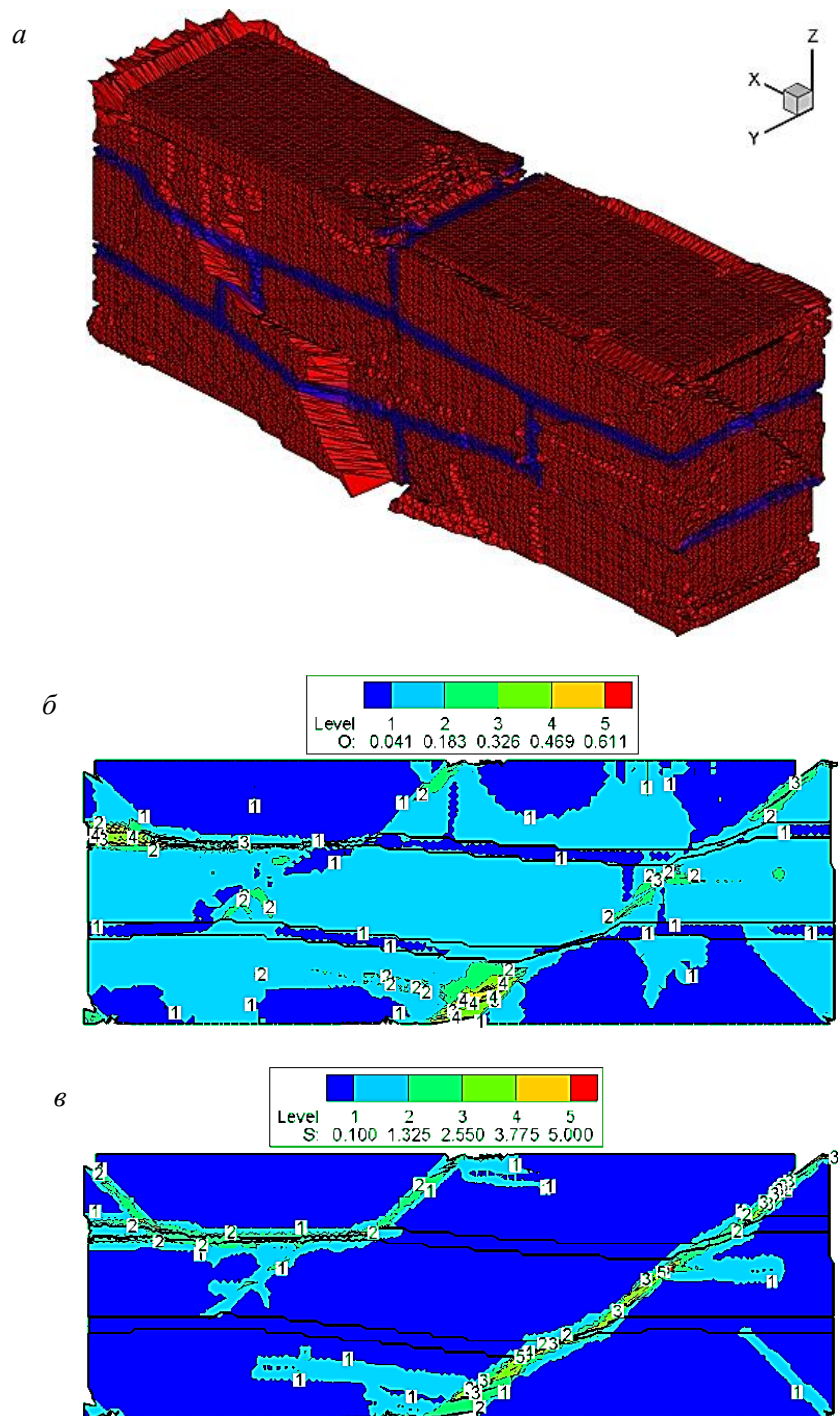


Рис. 4. Конфигурация фрагмента кирпичной кладки (*a*), распределения изолиний относительного объема пустот ξ (*б*) и интенсивности пластических деформаций (*в*) в срединном продольном сечении фрагмента кирпичной кладки на момент времени 6000 мкс при повторном падении стального груза с высоты $h = 1$ м ($\alpha = 0^\circ$)

Из вышеизложенного следует, что на процесс разрушения фрагмента кладки при падении на копровой установке стальной пластины существенное влияние оказывают структура фрагмента кладки, наличие стыков кирпичей, масса падающего груза, высота его падения и угол подхода стальной пластины к лицевой поверхности фрагмента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белов Н.Н., Югов А.А., Копаница Д.Г., Стуканов А.Л., Усеинов Э.С., Рышков А.В. Модель динамического разрушения обыкновенного глиняного кирпича // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 4 (57). С. 81–94.
2. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г. [и др.]. Модель динамического разрушения кладки из обыкновенного глиняного кирпича // Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции. 2016. № 4 (66). С. 3–10.
3. Югов Н.Т., Белов Н.Н., Югов А.А. Расчет адиабатических нестационарных течений в трехмерной постановке RANET-3 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 201061 1042. М., 2010.
4. Белов Н.Н., Кабанцев О.В., Копаница Д.Г., Югов Н.Т. Расчетно-экспериментальный метод анализа динамической прочности элементов железобетонных конструкций. Томск: STT, 2008. 289 с.
5. Колчунов В.И., Белов Н.Н., Копаница Д.Г., Югов Н.Т., Рышков А.В., Усеинов Э.С., Архипов И.Н. Исследование динамической прочности кирпичной кладки на удар // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 2 (61). С. 123–140.
6. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г., Югов А.А., Рышков А.В., Усеинов Э.С., Архипов И.Н. Исследование методом компьютерного моделирования прочности фрагментов кирпичной кладки на удар падающего груза // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 3 (62). С. 55–68.

REFERENCES

1. Belov N.N., Yugov A.A., Kopanica 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 (57). Pp. 81–94. (rus)
2. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanica D.G., et al. Model' dinamicheskogo razrusheniya kladki iz obyknovennogo glinyanogo kirpicha [Model of dynamic destruction of masonry from ordinary clay brick]. *Teoriya inzhenernykh sooruzhenij. Stroitel'nye konstrukcii*. 2016. No. 4 (66). Pp. 3–10. (rus)
3. Yugov N.T., Belov N.N., Yugov A.A. Raschet adiabaticeskikh nestacionarnykh techenij v trekhmernoj postanovke RANET-3 [Adiabatic unsteady flow analysis on RANET-3 software]. *RF Certificate of State Registration of Software*. 2010. No. 201061. P. 1042. (rus)
4. Belov N.N., Kabancev O.V., Kopanica D.G., Yugov N.T. Raschetno-eksperimental'nyj metod analiza dinamicheskoy prochnosti ehlementov zhelezobetonnykh konstrukcij [Dynamic strength analysis of reinforced concrete elements]. Tomsk: STT Publ., 2008. 289 p. (rus)
5. Kolchunov V.I., Belov N.N., Kopanica D.G., Yugov N.T., Ryshkov A.V., Useinov E.S., Arhipov I.N. Issledovanie dinamicheskoy prochnosti kirpichnoj kladki na udar [Dynamic load test of masonry]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 2 (61). Pp. 123–140. (rus)
6. Belov N.N., Yugov N.T., Kopanica D.G., Yugov A.A., Ryshkov A.V., Useinov E.S., Arhipov I.N. Issledovanie metodom komp'yuternogo modelirovaniya prochnosti fragmentov kirpichnoj kladki na udar padayushchego gruzha [Computer modeling of masonry impact resistance]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 3 (62). Pp. 55–68. (rus)

Сведения об авторах

Белов Николай Николаевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, n.n.belov@mail.ru

Копаница Дмитрий Георгиевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kopanitsa@mail.ru

Югов Николай Тихонович, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, n.t.yugov@mail.ru

Тонких Геннадий Павлович докт. техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, 5059144@mail.ru

Пляскин Андрей Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, plyaskinandrei@mail.ru

Рышков Артем Викторович, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, rav.tomsk@mail.ru

Authors Details

Nikolai N. Belov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, n.n.belov@mail.ru

Dmitriy G. Kopanitsa, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kopanitsa@mail.ru

Nikolai T. Yugov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, n.t.yugov@mail.ru

Gennady P. Tonkikh, DSc, Professor, The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, 5059144@mail.ru

Andrei S. Plyaskin, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, plyaskinadrei@mail.ru

Artem V. Ryshkov, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, rav.tomsk@mail.ru