

УДК 624.075.23+624.042.8

*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*

*КАПРУЛИН СЕРГЕЙ ЛЬВОВИЧ, канд. техн. наук,  
skaparulin@mail.ru*

*ПЛЯСКИН АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ, аспирант,  
plyaskinandrei@mail.ru*

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

## **РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ИМПУЛЬСА В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОЛОННЕ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ ЕЕ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Представлены результаты экспериментов по ударному взаимодействию моделей железобетонных колонн с жестким ударником. В рамках механики сплошной среды методом конечных элементов, модифицированным на решение динамических задач, проведен расчет прочности моделей железобетонных колонн и остаточного поперечного импульса в них на действие бокового удара жестким стальным ударником. Рассмотрен расчет разрушения модели колонны при подрыве на ее поверхности безоболочного заряда взрывного вещества.

**Ключевые слова:** железобетонная колонна; ударно-волновое нагружение; остаточный импульс поперечного сечения.

*BELOV, NIKOLAY NIKOLAYEVICH, Dr. of phys.-math. sc., prof.,  
n.n.belov@mail.ru*

*YUGOV, NIKOLAY TIKHONOVICH, Dr. of phys.-math. sc., prof.,  
n.t.yugov@mail.ru*

*KOPANITSA, DMITRIY GEORGIYEVICH, Dr. of tech. sc., prof.,  
kopanitsa@mail.ru*

*KAPARULIN, SERGEY LJVOVICH, Cand, of tech. sc.,  
kaparulin@mail.ru*

*PLYASKIN, ANDREI SERGEYEVICH, P.G.,  
plyaskinandrei@mail.ru*

*TomskStateUniversityofArchitectureandBuilding,  
2 Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russia*

## **CALCULATION OF RESIDUAL TRANSVERSE MOMENTUM IN CONCRETE COLUMN UNDER SHOCK-WAVE LOADING OF ITS SIDE**

The results of experiments on the impact interaction of models of reinforced concrete columns with a hard hammer are presented in the article. In the framework of continuum mechanics by

means of finite element method, modified for solving the dynamic problems, the calculation of the strength of concrete models of columns and residual transverse momentum in them at the action of side-impact by hard steel drummer has been carried out. The calculation of the destruction of the column model at blowing up the shell-less charge of explosive substances on its surface has been considered.

**Keywords:** concrete columns; shock-wave of loading set; the residual momentum of cross section.

Анализ поведения железобетонных конструкций зданий, воспринимающих динамические нагрузки природного и техногенного характера, невозможен без составления адекватных расчетных схем и соответствующих моделей поведения конструкционных материалов. Практический интерес представляют результаты расчетов, в которых отражаются последствия динамического воздействия в виде остаточных перемещений и форм разрушения конструкций. Такие методы позволяют сделать прогноз поведения здания при возможном действии нагрузки нестационарного характера.

Методы, основанные на принципах механики сплошной среды и учитывающие волновые процессы, дают возможность проводить расчеты лишь отдельных конструкций. Это вызвано в основном вычисленными трудностями, однако результаты этих расчетов могут быть использованы в качестве исходных и (или) промежуточных в расчетах с применением известных инженерных пакетов и дают возможность анализа поведения конструкций во всем диапазоне прочностных свойств материалов, включая разрушения.

Действие удара или взрыва на одну или несколько колонн каркаса может вызвать их разрушение, но не привести к обрушению здания. При расчете каркаса здания на ударную и взрывную нагрузку с использованием пакета прикладных программ необходимо составить адекватную расчетную схему конструкций. Расчетная схема колонн в этом случае может быть обоснована предварительным расчетом на ударно-волновое нагружение в рамках механики сплошной среды. Результаты предварительного расчета в виде деформированных схем и форм разрушения колонн принимаются в качестве исходных данных для обоснования расчетной схемы при использовании прикладного пакета программ. Нагрузка на колонну принимается из анализа значения остаточного импульса, т. е. количества движения, приобретенного колонной от действия ударно-волновой нагрузки. Местное разрушение снижает жесткость сечения на участке с трещинами и с вынесенным материалом.

За вычетом энергии, затраченной на местное разрушение, энергия общей деформации может быть определена в виде количества движения (остаточного импульса), распределенного между конечными элементами, составляющими расчетную схему колонны. Эта энергия может быть представлена в виде динамической нагрузки, действующей в зоне местного разрушения колонны.

Таким образом, инженерный расчет несущей способности каркаса при действии ударной или взрывной нагрузки на колонны может быть проведен в два этапа. На первом этапе проводится расчет на ударно-волновое нагружение в рамках механики сплошной среды. Определяются схемы локального разрушения и остаточный импульс. На втором этапе расчет проводится в среде прикладного пакета программ. Жесткость колонн принимается переменной

по высоте с учетом повреждений, выявленных предварительным расчетом на ударно-волновое нагружение. В качестве нагрузки принимается остаточный импульс, приложенный в зоне локального разрушения конструкции. Его продолжительность и закон изменения во времени определяются из анализа поведения колонны при ударе или взрыве.

В данной работе в рамках механики сплошной среды проведен расчет прочности железобетонных колонн и определен остаточный импульс в них после поперечного удара. Рассмотрен расчет моделей железобетонных колонн при подрыве на боковой поверхности безоболочного цилиндрического заряда взрывчатого вещества (ВВ).

Для исследования поведения материалов в условиях высокоскоростного удара, взрыва и воздействия мощных потоков энергии на вещество в [1–3] предложена математическая модель, описывающая поведение конструктивных материалов при ударно-волновом нагружении с учетом больших деформаций, неупругих эффектов, фазовых превращений, в том числе полиморфных, и разрушения.

Динамическое разрушение как пластичных, так и хрупких материалов в рамках данной модели рассматривается как процесс роста и слияния микродефектов под действием образующихся в процессе нагружения напряжений.

Обобщения модели на бетон и железобетон проведено в [4–8]. В рамках данной модели проведено исследование прочности бетонных, железобетонных и стальных трубобетонных колонн на неоднократные продольные удары падающего груза на копровой установке [5, 9–12]. Рассмотренные выше модели поведения сред сложной структуры в условиях ударно-волнового нагружения реализованы в программном комплексе РАНЕТ-3 [13], предназначенном для решения задач удара и взрыва в полной трехмерной постановке модифицированным на решение динамических задач методом конечных элементов [2, 4, 5].

### **Исследование разрушения и остаточного поперечного импульса в железобетонной колонне при ударе жестким индентором**

Программный комплекс РАНЕТ-3 использовали для расчета прочности моделей железобетонных колонн на удар стальным цилиндрическим индентором диаметром 20 и высотой 162 мм. Исследование проведено в диапазоне скоростей удара 15–100 м/с. Масса индентора 0,4 кг. Модели колонн представляют собой четырехгранные бетонные призмы 50×50×700 мм, армированные каркасом. Было рассмотрено три типа армирования. В первом варианте диаметр продольной арматуры  $d = 3$  мм, во втором – 4 мм, в третьем – 5 мм. Поперечное армирование проводилось стальной проволокой диаметром  $d_1 = 2$  мм с шагом 30 мм. При всех видах армирования защитный слой из бетона одинаков и равен 5 мм. Верификация модели проведена для скорости удара 58,4 м/с.

Сравнение данных математического моделирования с результатами экспериментов представлено на рис. 1, на котором изображена картина разрушения модели колонны третьего типа со стороны тыльной поверхности.

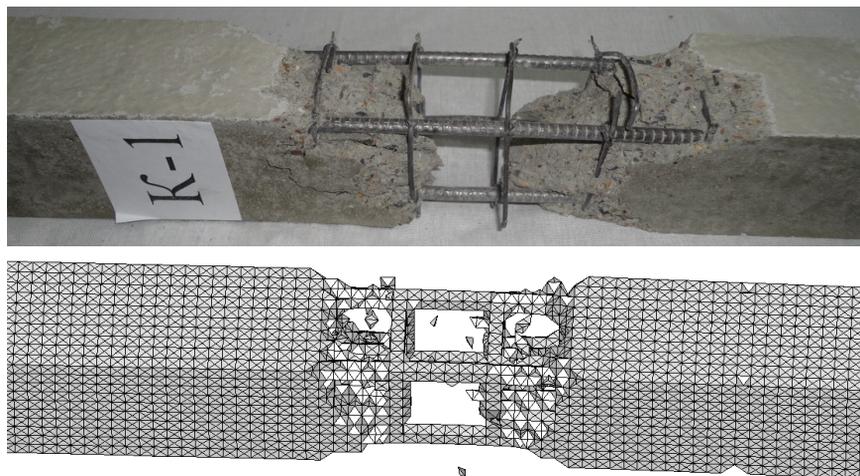


Рис. 1. Картина разрушения модели колонны третьего типа армирования после удара индентором со скоростью 58,4 м/с

Удар нанесен по центру лицевой поверхности между поперечными стержнями арматуры. В колонне образовалось сквозное разрушение, характерный размер которого значительно превышает размер индентора. Оголились стержни как поперечной, так и продольной арматуры. Со стороны боковых поверхностей произошло разрушение защитного слоя бетона. В верхней части колонны продольная арматура оголилась на расстоянии 60 мм. С тыльной стороны произошло откольное разрушение, в результате которого продольная арматура оголилась на расстоянии в 120 мм. Картина разрушения колонны по результатам вычислительного эксперимента хорошо согласуется с картиной разрушения, полученной экспериментально. Однако следует заметить, что в расчете защитный слой бетона с тыльной стороны колонны поврежден меньше, чем в эксперименте.

Проведено исследование поведения колонн, армированных тремя вышеуказанными способами на поперечный удар недеформируемым стальным индентором со скоростью 15, 30, 54,8, 63,3 и 100 м/с. Как и в предыдущем случае, удар наносился между поперечными стержнями. Конечные картины разрушения моделей колонн, армированных по третьему типу, для данных скоростей удара представлены на рис. 2.

В табл. 1 приведена величина остаточного поперечного импульса  $I_1$  в колонне после удара по моделям колонн с разными скоростями.

Таблица 1

**Величина остаточного поперечного импульса  $I_1$  (кг м/с) в колоннах после удара недеформируемым индентором**

Тип армирования	Остаточный поперечный импульс	Скорость удара, м/с				
		15	30	54,8	63,3	100
1	$I_1$ , кг м/с	4,565	9,257	6,893	5,825	4,658
2	$I_1$ , кг м/с	3,984	8,880	7,385	6,207	4,890
3	$I_1$ , кг м/с	2,358	8,248	6,945	4,870	2,438

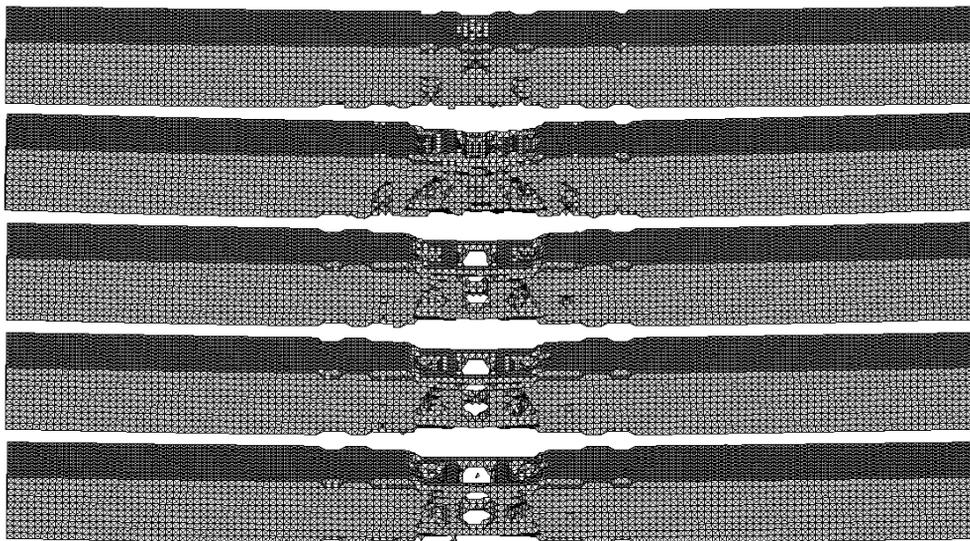


Рис. 2. Модели железобетонных колонн, армированных по третьему типу, после поперечного удара 400-граммовым недеформируемым индентором со скоростью 15, 30, 54,8, 63,3 и 100 м/с

Независимо от способа армирования при скорости встречи 15 и 30 м/с индентор застревал в теле колонны, не пробив ее. При скорости удара 15 м/с в колонне, армированной по первому типу, в центральной ее части происходило частичное повреждение защитного слоя. С тыльной стороны защитный слой поврежден на длине до 275 мм. При этом в направлении удара величина остаточного поперечного импульса  $I_1 = 4,565$  кг·м/с. Увеличение скорости удара до 30 м/с приводило к более интенсивному разрушению бетонного тела модели колонны. С тыльной стороны наблюдается откольное разрушение и оголение продольных стержней на длине до 400 мм. Величина остаточного поперечного импульса  $I_1 = 9,257$  кг·м/с. Увеличение диаметров продольной арматуры привело к падению остаточного поперечного импульса. Так, его величина при скорости индентора 15 м/с для колонны, армированной стержнями диаметром 4 мм, составила 3,987 кг·м/с, а для колонны с продольной арматурой диаметром 5 мм  $-I_1 = 2,358$  кг·м/с. Увеличение скорости удара до 30 м/с привело, как и в предыдущем случае, практически к удвоению импульса ( $I_1 = 8,88$  кг·м/с) в колонне, армированной стержнями диаметром 4 мм. В колонне с арматурой диаметром 5 мм величина остаточного поперечного импульса практически утроилась и составила  $I_1 = 8,248$  кг·м/с.

При скорости удара 54,8 м/с и выше индентор пробивал модели колонны независимо от армирования. Соответствующие величины поперечного импульса приведены в табл. 1. Зависимости остаточного поперечного импульса  $I_1$  от скорости удара приведены на рис. 3. В связи с выбросом разрушенного бетонного тела из колонны его величина резко падает. Для модели второго типа  $I_1 = 7,385$  кг·м/с. Для двух других типов моделей при данной скорости удара импульс практически одинаков и равен приблизительно 6,9 кг·м/с.

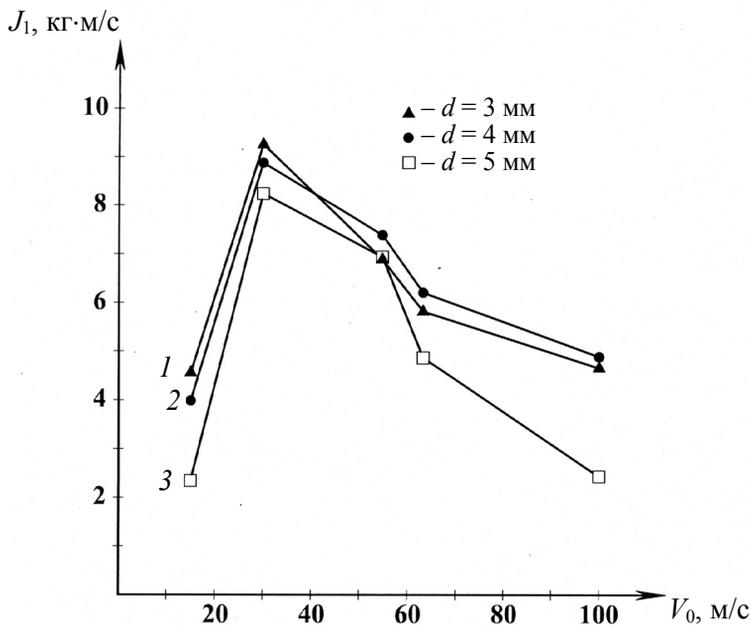


Рис. 3. Зависимость величины остаточного поперечного импульса  $I_1$  в модели колонны от скорости удара

При увеличении скорости удара происходит падение значений остаточного импульса. Для колонны с арматурой диаметром 5 мм при скорости удара 100 м/с его величина близка к значению, вычисленному для скорости удара 15 м/с ( $I_1 = 4,658$  кг·м/с).

### Расчет поперечного импульса в железобетонной колонне при подрыве на ее боковой поверхности безоболочного цилиндрического заряда взрывчатого вещества

При математическом моделировании поведения колонны при контактном взрыве необходимо интегрировать две системы дифференциальных уравнений, одна из которых описывает движение продуктов детонации, другая — поведение железобетона при действии продуктов детонации. Возможен и более простой способ решения задачи. Действие продуктов детонации на мишень можно заменить действием импульсной нагрузки, моделирующей контактный взрыв заряда ВВ. При таком подходе решается только система уравнений, описывающая поведение материала колонны.

Величину суммарного импульса  $I_s$ , переданного колонне продуктами детонации при взрыве цилиндрического заряда ВВ высотой  $h$  и диаметром  $d_0 = 2 \%$ , согласно [14] можно определить по формуле

$$I_s = \frac{p_0 M \left[ 1 - (1 - 0,8\omega_0)^5 (1 + 4\omega_0) \right]}{20\rho_{\text{он}}\omega_0^2 D_n (1 - 0,8\omega_0)^5},$$

где  $M = \pi r_0^2 h \rho_{\text{он}}$  – масса заряда;  $p_0$  – давление на контактной поверхности в точке на оси симметрии в момент выхода детонационной волны на поверхность раздела материалов;  $\rho_{\text{он}}$  – плотность ВВ;  $\omega_0 = \frac{u_0}{D_{\text{н}}}$ ;  $u_0$  – начальная скорость границы раздела твердое тело – продукты детонации;  $D_{\text{н}}$  – скорость детонации.

Увеличение импульса заряда, переданного продуктами детонации твердому телу, при увеличении длины заряда происходит лишь до определенного предела. При увеличении заряда выше оптимального значения  $h_{\text{кр}} = \frac{9}{2} r_0$  увеличение импульса не должно наблюдаться. При этом длина его активной части равна  $h_{\text{а}} = \frac{4}{9} h_{\text{кр}}$ . Учитывая это обстоятельство, в формуле необходимо вместо массы заряда использовать массу его активной части. Если длина заряда  $h_{\text{кр}} < \frac{9}{2} r_0$ , то активная масса заряда определяется объемом усеченного конуса, высота которого равна  $h_{\text{а}} = \frac{4}{9} h$ . Масса активной части заряда выражается в этом случае следующей зависимостью [14]:

$$M_{\text{а}} = \pi r_0^2 \rho_{\text{он}} \left( \frac{4}{9} h - \frac{8}{81} \frac{h^2}{r_0} + \frac{16}{2187} \frac{h^3}{r_0^2} \right).$$

Предположим теперь, что удельный импульс  $i_r$  распределяется на поверхности колонны по параболическому закону. Причем на расстоянии, равном радиусу заряда  $r_0$ , его величина составляет половину от величины на оси симметрии, а эпюра давления на оси симметрии имеет треугольную форму с максимумом  $p_0$  и длительностью  $T$ . С учетом этого действие продуктов детонации на лицевую поверхность колонны можно заменить действием импульса давления, которое в зоне контакта имеет вид:

$$p(r, t) = p_0 \left( 1 - \frac{t}{T} \right) \left[ 1 - 0,5 \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right],$$

где  $T = \frac{2I_s}{\pi r_0^2 p_0}$  – время действия импульса давления на поверхность колонны.

Величину  $\omega_0$  можно определить графоаналитическим методом. При взаимодействии продуктов детонации с твердым телом в последнем возникает ударная волна, интенсивность которой определяется характеристиками ВВ. В зависимости от плотности твердого тела в продукты детонации отражается либо волна вторичного сжатия, начальная интенсивность которой определяется зависимостью [14]:

$$u_x = \frac{D_n}{(n+1)} \left[ 1 - \frac{\sqrt{2n} \left( \frac{p_x}{p_n} - 1 \right)}{\sqrt{(n+1) \frac{p_x}{p_n} + (n-1)}} \right], \quad (1)$$

либо волны разряжения. В этом случае

$$u_x = \frac{D_n}{(n+1)} \left\{ 1 + \frac{2n}{(n-1)} \left[ 1 - \left( \frac{p_x}{p_n} \right)^{\frac{(n-1)}{2n}} \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $n$  – показатель изэнтропы;  $p_n$  – давление в точке Чепмена – Жуге;  $p_x$ ,  $u_x$  – давление и массовая скорость в продуктах детонации на поверхности твердого тела.

Решение этих уравнений совместно с уравнением ударной адиабаты материала твердого тела, на поверхности которого произошел подрыв ВВ,

$$p = \rho_0 D u,$$

где  $D = c_0 + s_0 u$  – скорость ударной волны, полностью определяющая решение задачи о нахождении давления  $p_0$  на границе раздела сред. Численные значения коэффициентов  $c_0$  и  $s_0$  для некоторых материалов, а также экспериментальные параметры детонационных волн в конденсированных ВВ приведены в [5, 14, 15].

В [5, 15] графоаналитическим методом проведено решение задачи о нахождении начального давления  $p_0$  и массовой скорости  $u_0$  при подрыве заряда ТГ 50/50 плотностью  $\rho_{\text{он}} = 1,68 \text{ г/см}^3$  ( $D_n = 7650 \text{ м/с}$ ,  $p_n = 24,8 \text{ ГПа}$ ,  $n = 3$ ) на поверхности бетонной плиты ( $\rho_{\text{он}} = 2,2 \text{ г/см}^3$ ,  $c_0 = 0,233 \text{ см/мкс}$ ,  $s_0 = 1,51$ ). При подрыве заряда на поверхности бетонной плиты в продукты детонации отражается волна разгрузки. Начальное давление на границе раздела бетон – продукты детонации  $p_0 = 22,5 \text{ ГПа}$  ( $u_0 = 0,205 \text{ см/мкс}$ ).

Ниже представлены результаты математического моделирования процесса подрыва на боковых поверхностях моделей железобетонных колонн, армированных рассмотренными выше тремя способами, двух безоболочных зарядов ВВ ТГ 50/50 массой  $M = 23,75 \text{ г}$  ( $r_0 = 1 \text{ см}$ ,  $h = 4,5 \text{ см}$ ,  $M_a = 3,52 \text{ г}$ ) и массой  $M = 190 \text{ г}$  ( $r_0 = 2 \text{ см}$ ,  $h = 9 \text{ см}$ ,  $M_a = 28,15 \text{ г}$ ). При подрыве заряда массой  $23,75 \text{ г}$  в железобетонной колонне в течение времени  $T = 0,674 \text{ мкс}$  передается суммарный импульс  $I_s = 2,384 \text{ кг·м/с}$ , при подрыве заряда массой  $190 \text{ г}$   $I_s = 19,0706 \text{ кг·м/с}$ ,  $T = 1,349 \text{ мкс}$ .

В табл. 2 приведена величина поперечного импульса  $I_1$  в колоннах в различные моменты времени после подрыва зарядов ВВ.

На рис. 4 и 5 представлены зависимости изменения величины поперечного импульса в колоннах от времени процесса при подрыве на их боковых поверхностях зарядов массой  $23,75$  и  $190 \text{ г}$ . Картины разрушения колонн на момент времени  $100 \text{ мкс}$  приведены на рис. 6–8.

Таблица 2

**Величина поперечного импульса в железобетонных колоннах в различные моменты времени после подрыва на их боковых поверхностях зарядов ВВ**

Поперечный импульс в колонне $I_1$ , кг·м/с						
$t$ , мкс	Диаметр продольной арматуры $d = 0,3$ см		Диаметр продольной арматуры $d = 0,4$ см		Диаметр продольной арматуры $d = 0,5$ см	
	Диаметр ВВ = 2 см	Диаметр ВВ = 4 см	Диаметр ВВ = 2 см	Диаметр ВВ = 4 см	Диаметр ВВ = 2 см	Диаметр ВВ = 4 см
1,25	1,99	8,95	1,94	8,98	2,07	9,73
2,5	1,62	6,32	1,62	6,41	1,78	7,39
5,0	1,31	5,98	1,33	6,15	1,41	7,06
10	1,22	5,27	1,24	5,40	1,35	6,17
15	1,24	5,06	1,26	5,17	1,58	5,89
20	1,29	4,79	1,31	4,92	1,42	5,55
25	1,32	4,47	1,33	4,59	1,45	5,18
30	1,33	3,95	1,35	4,13	1,46	4,64
40	1,34	2,91	1,37	3,08	1,46	3,63
50	1,29	2,58	1,31	2,69	1,41	3,14
60	1,23	2,38	1,26	2,47	1,35	2,91
70	1,20	2,30	1,23	2,42	1,31	2,82
80	1,18	2,25	1,20	2,37	1,29	2,75
90	1,17	2,17	1,19	2,31	1,27	2,69
100	1,17	2,11	1,19	2,26	1,26	2,64
110	1,16	2,04	1,18	2,17	1,24	2,59

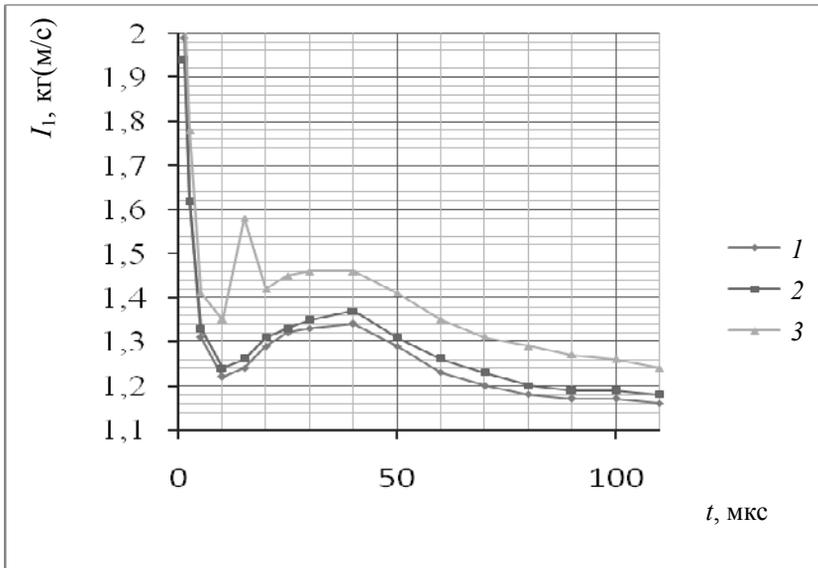


Рис. 4. Зависимость поперечного импульса в колонне от времени процесса при подрыве заряда массой 23,75 г

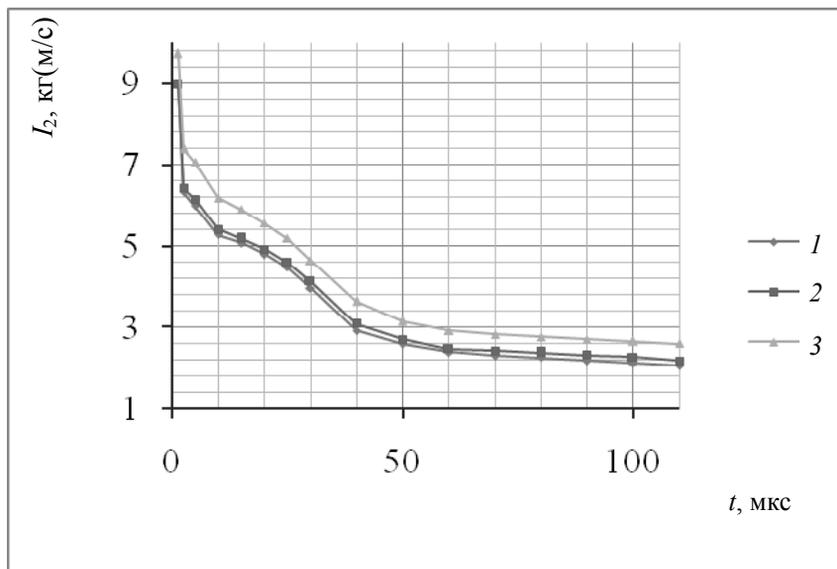


Рис. 5. Зависимость поперечного импульса в колонне от времени процесса при подрыве заряда массой 190 г

При подрыве на поверхности колонны заряда массой 23,75 г не происходит сквозного пробития колонн независимо от способа их армирования (рис. 6, а; 7, а; 8, а).

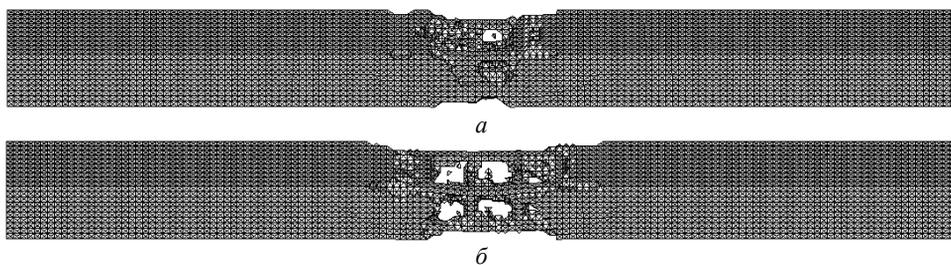


Рис. 6. Картина разрушения в железобетонной колонне первого типа армирования ( $d = 3$  мм) при подрыве на ее боковой поверхности зарядов массой 23,75 г (а) и 290 г (б)

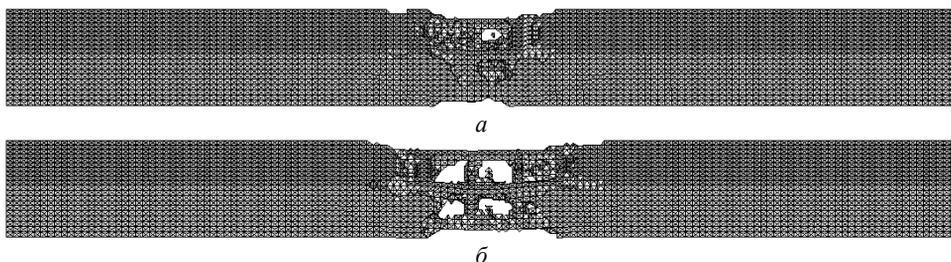


Рис. 7. Картина разрушения в железобетонной колонне второго типа армирования ( $d = 4$  мм) при подрыве на ее боковой поверхности зарядов массой 23,75 г (а) и 290 г (б)

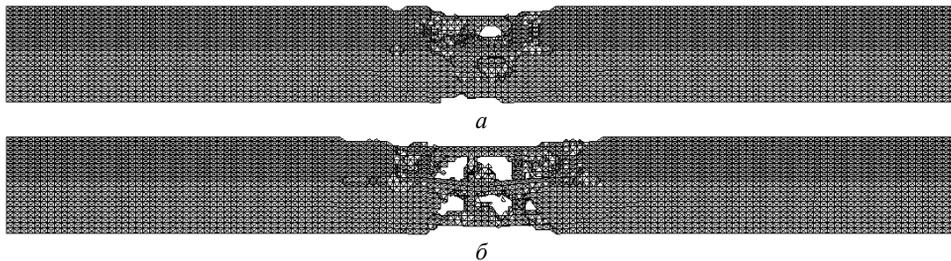


Рис. 8. Картина разрушения в железобетонной колонне третьего типа армирования ( $d = 5$  мм) при подрыве на ее боковой поверхности зарядов массой 23,75 г (а) и 290 г (б)

С боковых поверхностей колонн под зарядом защитный слой бетона поврежден. С тыльной стороны наблюдается откольное разрушение, в результате чего происходит оголение продольных стержней на расстоянии, равном примерно 5 см. С лицевой стороны продольные стержни оголились примерно на 11 см. Стержни поперечного армирования под зарядом не разрушены. При армировании колонны по первому типу величина поперечного импульса в колонне за 10 мкс изменилась от 1,99 до 1,22 кг·м/с (рис. 4, кривая 1).

В последующие моменты времени в начале происходит его рост до величины 1,34 кг·м/с ( $t = 40$  мкс), а затем уменьшение до величины 1,17 кг·м/с.

С увеличением диаметра продольной арматуры происходит и рост поперечного импульса в колонне. При армировании по третьему типу (рис. 4, кривая 3) величина поперечного импульса изменяется от 2,07 кг·м/с в момент времени 1,25 мкс до величины 1,35 кг·м/с в момент времени 10 мкс. Кривая 3 на рис. 4 идет практически параллельно кривой 1. В момент времени 100 мкс величина поперечного импульса в колонне, армированной по третьему типу, примерно на 7 % выше, чем в предыдущем случае ( $I_1 = 1,26$  кг·м/с).

При подрыве на боковой поверхности колонн открытого заряда ВВ массой 190 г происходит более сильное разрушение бетонного тела колонны под зарядом. В колоннах независимо от способа их армирования к моменту времени 30 мкс образуется сквозное разрушение с выкрашиванием бетона и с боковых поверхностей, что приводит к полному оголению стержней. Поперечные стержни под зарядом разрушены. С лицевой стороны колонны продольные стержни оголились примерно на 18–19 см, с тыльной стороны – на 14–15 см. На рис. 5 представлена зависимость изменения величины поперечного импульса в колонне от времени.

В колонне, армированной по первому типу, величина поперечного импульса падает с течением времени от 8,95 кг·м/с при  $t = 1,25$  мкс до 2,04 кг·м/с при  $t = 110$  мкс (рис. 5, кривая 1).

Как и в предыдущем случае, с ростом диаметра продольной арматуры происходит и рост остаточного поперечного импульса. На кривой 3 представлена зависимость изменения поперечного импульса в колонне, армированной продольными стержнями диаметром 5 мм. Данная кривая лежит в плоскости продольный импульс – время выше кривой 1.

В момент времени 100 мкс величина остаточного импульса в колонне, армированной по третьему типу, на 25 % выше, чем по первому ( $I_1 = 2,64$  кг·м/с).

Следует заметить, что величина остаточного поперечного импульса в колонне при ударе по ее поверхности жестким индентором с ростом диаметра продольной арматуры при фиксированной скорости удара, как правило, падала.

Полученная информация о степени повреждения моделей железобетонной колонны и остаточном поперечном импульсе при взрывном или ударном нагружении поверхности может быть использована в качестве исходных данных при постановке задачи о расчете прочности железобетонного каркаса на динамические нагрузки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белов, Н.Н. Компьютерное моделирование динамики высокоскоростного удара и сопутствующих физических явлений / Н.Н. Белов, В.Н. Демидов, Л.В. Ефремова // Известия вузов. Физика. – 1992. – Т. 35. – № 8. – С. 5–48.
2. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница [и др.]. // Northampton. – Томск : STT, 2005. – 356 с.
3. Белов, Н.Н. Математическое моделирование динамической прочности конструкционных материалов / Н.Н. Белов, Д.Г. Копаница, Н.Т. Югов // Том 3. Физика ударных волн. Динамическое разрушение твердых тел. – Томск : STT, 2010. – 318 с.
4. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки / Н.Н. Белов, Д.Г. Копаница, О.Г. Кумпяк [и др.]. – Томск : STT, 2004. – 466 с.
5. Расчетно-экспериментальный метод анализа динамической прочности элементов железобетонных конструкций / Н.Н. Белов, О.В. Кабанцев, Д.Г. Копаница [и др.]. – Томск : SST, 2008. – 292 с.
6. Модель динамического разрушения мелкозернистого бетона / Н.Н. Белов, Т.Т. Югов, Д.Г. Копаница [и др.]. // Вестник ТГАСУ. – 2005. – № 1. – С. 14–22.
7. Математическое моделирование процессов динамического разрушения бетона / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, П.В. Дзюба [и др.]. // МТГ. – 2008. – № 2. – С. 124–133.
8. Разрушение железобетонных плит при высокоскоростном ударе / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница [и др.]. // Вестник ТГАСУ. – 2007. – № 2. – С. 10–19.
9. Экспериментальные исследования железобетонных колонн на неоднократный продольный удар / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница [и др.]. // Вестник ТГАСУ. – 2007. – № 1. – С. 118–125.
10. Расчет прочности железобетонных колонн на повторный продольный удар / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница [и др.]. // ПМТФ. – 2008. – Т. 49. – № 1. – С. 181–190.
11. Расчет прочности стальных трубобетонных моделей колонн на однократный продольный удар / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница [и др.]. // Вестник ТГАСУ. – 2009. – № 4. – С. 68–77.
12. 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 [и др.]. // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – Т. 16. – № 2. – С. 181–190.
13. Расчет адиабатических нестационарных течений в трехмерной постановке (РАНЕТ-3). Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010611042 / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Р.Ф. – 2010.
14. Физика взрыва / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович [и др.]. – М. : Наука, 1975. – 704 с.
15. Расчет прочности бетонных и железобетонных колонн при контактном взрыве цилиндрического заряда открытого взрывчатого вещества / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница [и др.]. // Вестник ТГАСУ – 2006. – № 2. – С. 5–20.