

УДК 523.593

ВЛИЯНИЕ АРМИРОВАННОЙ БЕТОННОЙ ПЛИТЫ НА СВОЙСТВА УДАРНОЙ ВОЛНЫ

S.-C. Lin^{1,2,3}, S. Gao¹, J.-Q. Han³¹Университет Сицзин, Сиань 710123, Китай²Университет Тяньцзиня, Тяньцзинь 300072, Китай³Северо-китайский университет науки и технологии, Таншань 063210, Китай

Создана сложная модель, описывающая систему ТНТ — воздух — плита при помощи программного обеспечения LS-DYNA для нелинейного явного динамического анализа методом конечных элементов. Модель основана на усовершенствованной технологии численного моделирования, методике больших смещений и механизме взаимодействия жидкость — твердое тело в сочетании с эффектом скорости деформации для бетона и стали. Методом численного моделирования проведена серия оценок свойств ударной волны в области за железобетонной плитой. Кратко описаны типичные характеристики ударных волн перед плитой и за ней. Установлены соотношения между набегающей и отраженной, а также между отраженной и преобразованной волнами путем изучения влияния плиты соответственно на свойства отраженной волны в области перед плитой и на изменение преобразованной волны в области за плитой. Приведен алгоритм прогнозирования свойств преобразованной волны с учетом влияния бетонной плиты. Анализ конкретного случая показывает, что предложенный метод может правильно и эффективно предсказать свойства преобразованной волны в области за железобетонной плитой.

Ключевые слова: железобетонная плита, мощный взрыв, ударная волна, взрывная ударная волна, отраженная волна, преобразованная волна, метод конечных элементов.

DOI 10.15372/FGV20200613

ВВЕДЕНИЕ

Природные и антропогенные катастрофы происходят внезапно и сопровождаются большими разрушениями. Помимо этого, в нашу повседневную жизнь вошли такие бедствия, как теракты, промышленные аварии и взрывы при неправильном обращении с опасными химическими материалами, при утечке легковоспламеняющихся и взрывоопасных газов и т. д., участились случаи атак и бомбардировок военных целей в локальных войнах. Все эти ситуации легко могут привести к мощному взрыву внутри здания. При таком взрыве ударная волна претерпевает ряд сложных изменений — отражение, преломление, дифракция, конвергенция, суперпозиция и т. п., и распределение полей обтекания становится очень сложным. Однако в большинстве исследований игнорирует-

ся влияние препятствий [1–3], таких как колонны, балки, плиты, каркасные стены с наполнителем и т. д., особенно плиты. Поэтому невозможно точно рассчитать свойства ударной волны от взрыва позади структурных элементов.

За последние десятилетия влияние конструкций и их элементов на свойства ударной волны изучалось как экспериментально, так и путем численного моделирования. В [4–6] рассматривались простые конфигурации типа строительных структур или элементов в виде бесконечной жесткой стены, предсказаны свойства ударной волны с использованием эмпирических или полуэмпирических формул. В [7] результаты экспериментов и численного моделирования позволили развить проверенные методы прогнозирования взрывной нагрузки на более сложные строительные структуры. Как известно, перегруженная городская среда включает в себя прямые улицы [8, 9], Т-образные пересечения [8, 10], перекрестки и туннельные формы [8]. Имеющиеся методы используются и для изучения влияния сложных геометрических структур внутри помещений — обычных рамочных структур [11], структур с большими

© Lin Shu-Chao^{1,2,3}, Gao Shan¹, Han Jian-Qiang³, 2020.

¹Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an 710123, China. ²Post-doctoral Mobile Station of Civil Engineering, School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China. ³College of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China.

объемами [12], с подземными транспортными инфраструктурами [13, 14] и т. д. Однако взаимодействие ударной взрывной волны с окружающими структурными элементами исследовано недостаточно. В работе [15] изучали соотношение между отраженной волной на обращенной к взрыву стороне колонны, волной, дифрагированной вокруг колонны, преобразованной волной за колонной и падающей волной с учетом размерного эффекта и геометрической формы колонны. В области взрывоустойчивости стен в [16] выполнены экспериментальные и численные исследования прохождения и дифракции взрывных ударных волн на гибкой стене, изготовленной из ткани, армированной волокнами полиэтилена сверхвысокой молекулярной массы.

В данной работе на основе результатов предыдущих исследований описываются характеристики взрывных ударных волн перед плитой и за ней. Подробно анализируется влияние армированной бетонной плиты на отраженную и преобразованную волны в целях разработки нового метода прогнозирования свойств взрывной ударной волны в пространстве за плитой. Надежность и достоверность предложенного метода проверены на практическом примере.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ АРМИРОВАННОЙ БЕТОННОЙ ПЛИТЫ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1.1. Конфигурация плиты

В работе рассматривается железобетонная плита длиной 5 м, шириной 5 м и толщиной 0.15 м, покрытая с обеих сторон слоем бетона на 20 мм. Стальная арматура представляет собой две сетки, выполненные из прутка диаметром 8 мм, которые расположены на расстоянии 0.15 м друг от друга (рис. 1, а). Плита заключена в армированную бетонную раму шириной 0.3 м и глубиной 0.48 м (рис. 1, б). Таким образом, в этой модели граничные условия для армированной бетонной плиты могут быть четко определены.

1.2. Вещественная модель

Для моделирования бетонного материала, подвергающегося сильным напряжениям, высокой скорости нагружения и действию

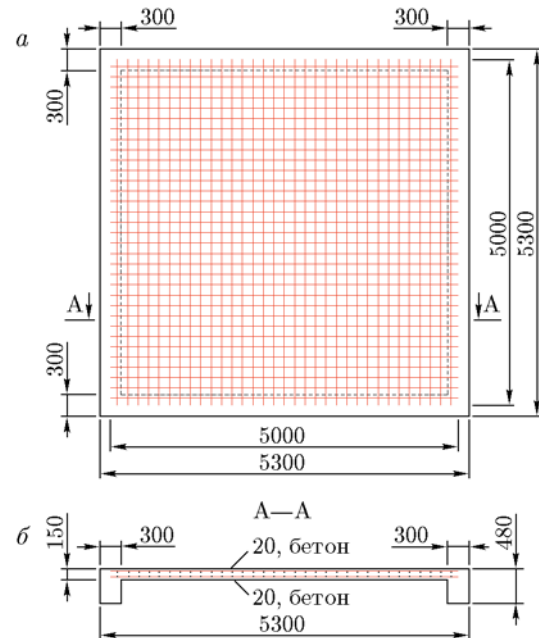


Рис. 1. Железобетонная плита (а) и ее поперечное сечение (б):

размеры указаны в миллиметрах

высокого давления, используется вещественная модель *Mat_Johnson_Holmquist_Concrete (*Mat_111) [17, 18], которая хорошо подходит для вычисления в рамках программы LS-DYNA. Эта вещественная модель допускает эффективное моделирование трехмерных элементов, таких как плиты.

Для изучения стальной арматуры под действием больших напряжений, высоких скоростей нагружения и высоких температур применяется вещественная модель *Mat_Johnson_Cook (*Mat_015) [18, 19], доступная в том же программном обеспечении LS-DYNA. Эта модель также пригодна для исследования одномерных элементов, таких как арматурные стержни.

Воздух обычно моделируется материальной моделью *Mat_Null (*Mat_009) [18] вместе с уравнениями состояния *EOS_Linear_Polynomial. Параметры, характеризующие физические свойства воздуха, приведены в табл. 1. Для моделирования детонации от мощного взрыва применены вещественная модель *Mat_High_Explosive_Burn (*Mat_008) [18] и уравнение состояния *EOS_JWL. Физические параметры заряда взрывчатого вещества представлены в табл. 2.

При описании взаимодействия рабочей

Таблица 1

Параметры воздуха для моделирования	
Параметр	Значение
Плотность	1.292 кг/м ³
Исходная внутренняя энергия, отнесенная к единичному стандартному объему	0.25 МДж/м ³
Отношение удельных теплоемкостей	1.4

Таблица 2

Параметры заряда взрывчатого вещества для моделирования

Параметр	Значение
Плотность	1 310 кг/м ³
Скорость детонации	5 500 м/с
Давление Чепмена — Жуге	7.4 ГПа
A	214.4 ГПа
B	0.182 ГПа
R_1	4.2
R_2	0.9
Ω	0.15
Энергия детонации на единицу объема	$4.192 \cdot 10^3$ МДж/м ³

среды с конструкцией считается, что рабочей средой (флюидом) является воздух, заряд взрывчатого вещества представлен произвольными элементами метода Лагранжа — Эйлера, а термин «конструкция» относится к бетонной плите с описанием элементов по методу Лагранжа. В этой модели взаимодействие рабочей среды с конструкцией моделируется между материалами, описываемыми по методу Лагранжа — Эйлера и по методу Лагранжа с использованием функции *Constrained_Lagrange_In_Solid [18, 20]. В общем, в программном обеспечении LS-DYNA рекомендуется метод сопряжения торможений. Для взаимодействия флюид — структура лагранжева сетка должна пространственно перекрываться с лагранжево-эйлеровой сеткой. Более мелкая сетка используется локально вблизи областей контакта и других деталей.

Для того чтобы можно было пренебречь эффектом дифракции взрывной ударной волны и вторичного отражения от горизонтальной по-

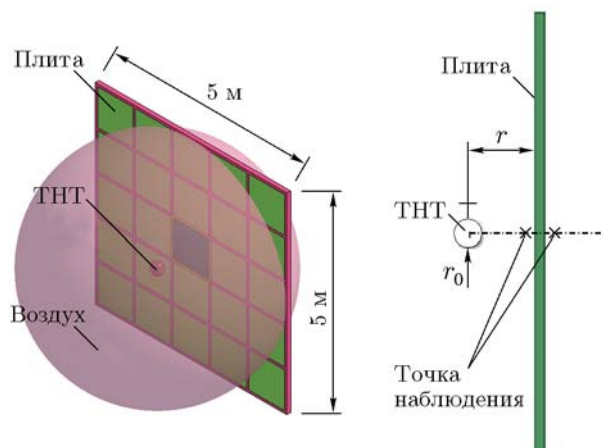


Рис. 2. Модель плиты для вычислений (5 × 5 фрагментов и квадрат 5 × 5 м)

верхности, используется модель конечных элементов, включающая в себя 5 × 5 идентичных фрагментов железобетонной плиты, описанной выше (рис. 2). Свободный воздушный взрыв производится сферическим зарядом взрывчатого вещества. Расстояние между плитой и местом взрыва составляет r , радиус заряда равен r_0 .

2. ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ

Ниже описано использование программы LS-DYNA для анализа методом высоконелинейных конечных элементов трансформированной волны позади гибкой стены, при этом моделирование проводилось для экспериментального элемента [16] — гибкой стены, армированной волокнами полиэтилена сверхвысокой молекулярной массы. Механические свойства материала ткани следующие: предел прочности на разрыв $f_{tk} = 3.0 \cdot 10^9$ Па; модуль упругости $E = 9.5 \cdot 10^{10}$ Па; коэффициент Пуассона $\nu = 0.34$. Гибкая стена высотой 2.5 м содержала три пролета в поперечном направлении с промежутком в 2 м и размещалась на расстоянии 3 м от заряда взрывчатого вещества массой 20 кг TNT.

При достижении взрывной ударной волной гибкой взрывозащитной стены одновременно происходит несколько явлений: отражение, распространение, дифракция и т. д. Позади защитной стены образуется новая взрывная ударная волна. Изменение давления такой преобразованной волны показано на рис. 3. Расчетное давление, индуцированное распро-

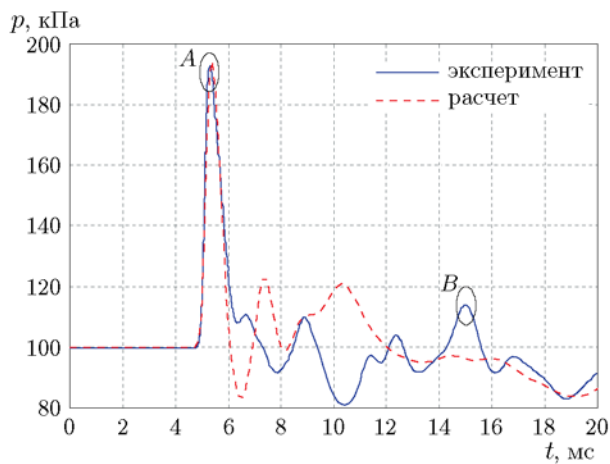


Рис. 3. Зависимость давления преобразованной волны от времени:

A — давление, индуцированное переходом, *B* — дифракцией

странением, соответствует экспериментальному, в то время как индуцированное дифракцией не согласуется с опытным давлением. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, из-за ограниченной производительности пользовательского компьютера вводится функция *Boundary_Non_Reflecting [18, 20] для определения неотражающих границ на наружной поверхности твердых элементов. Обычно она используется в геомеханических приложениях для ограничения размера модели. Во-вторых, сложные граничные условия взрывозащитной стенки не могут быть с хорошей точностью воспроизведены в рамках программы LS-DYNA.

3. РАЗВИТИЕ ДАВЛЕНИЯ И ИМПУЛЬСА ВО ВРЕМЕНИ

Процесс распространения взрывной ударной волны показан на рис. 4. В момент времени $t = 2$ мс набегающая волна приходит в кон-

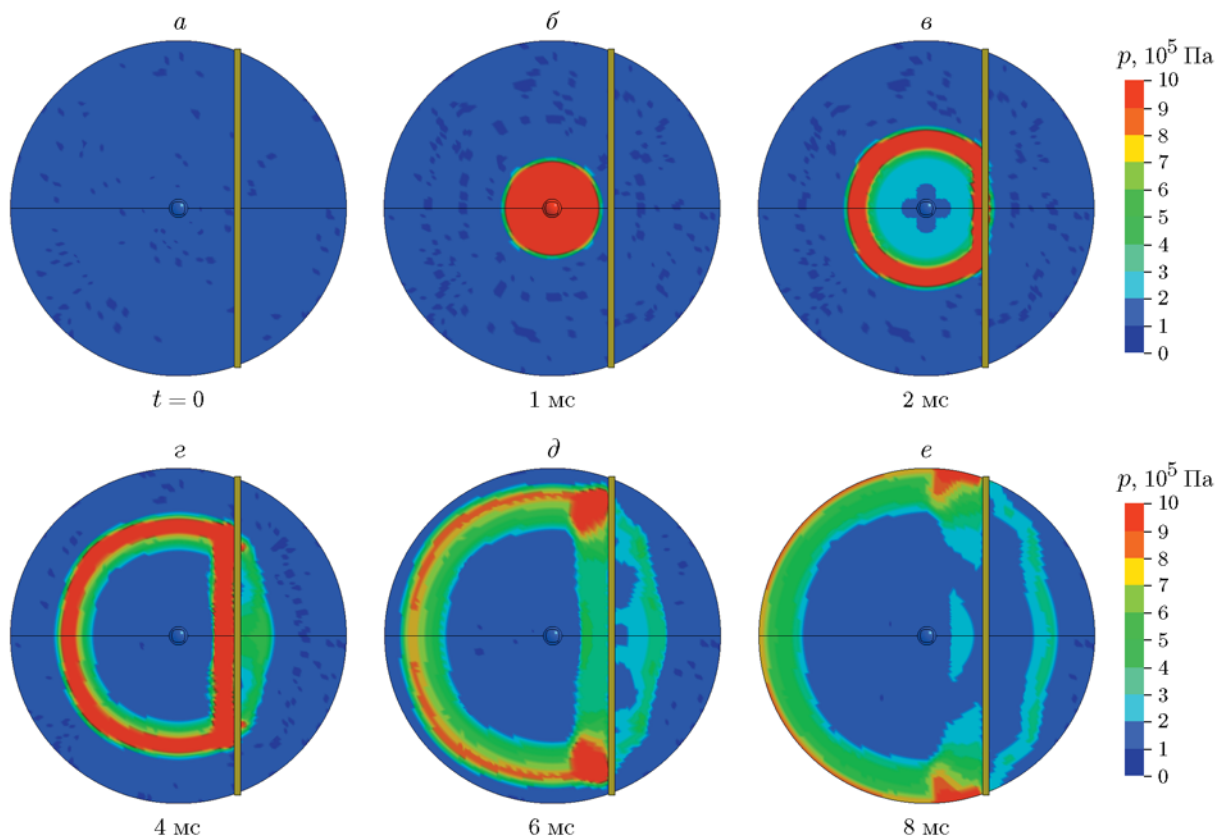


Рис. 4. Диаграмма давления, иллюстрирующая процесс распространения взрывной ударной волны

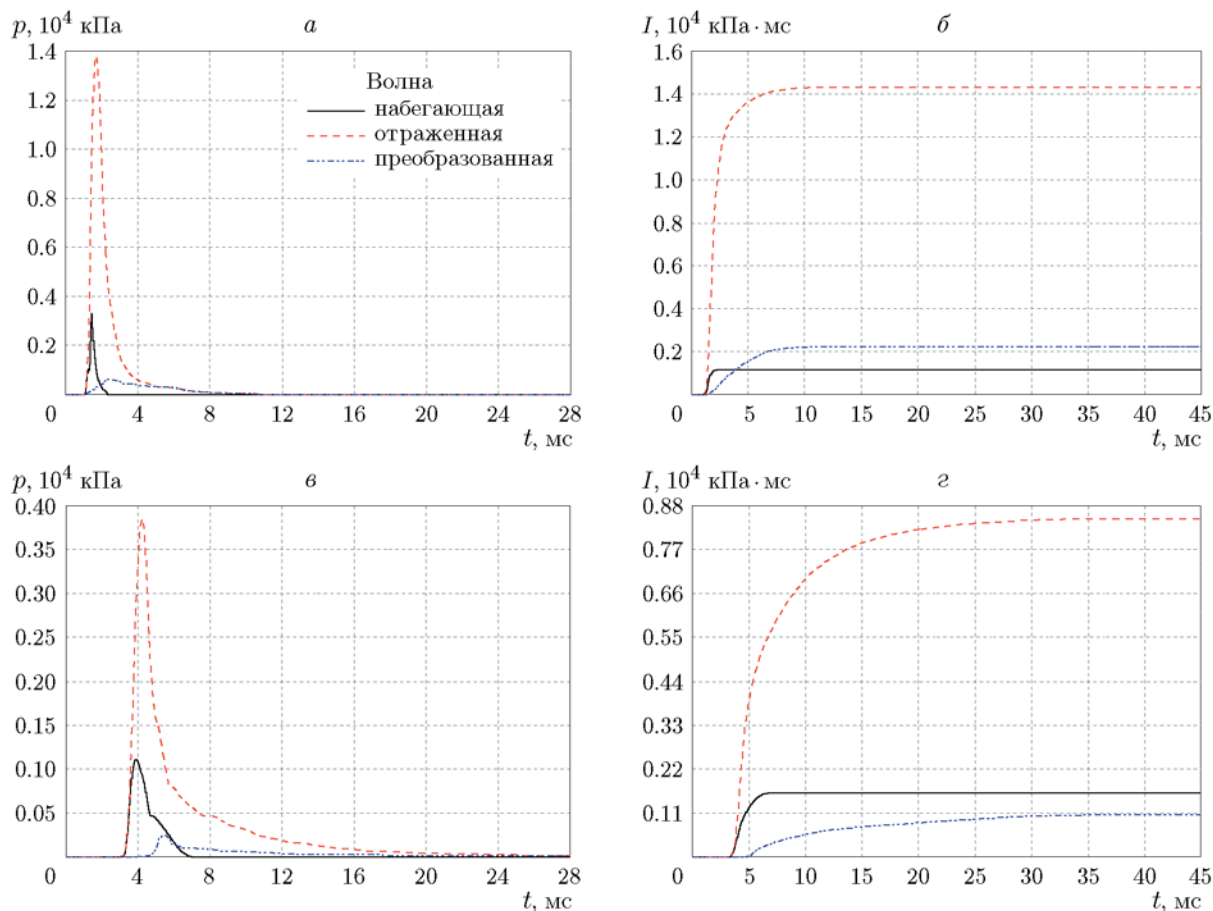


Рис. 5. Развитие во времени давления и импульса во взрывной ударной волне при $r/r_0 = 6.0$ (*a*, *б*) и $r/r_0 = 12.0$ (*в*, *з*)

такт с плитой, отражается от передней стороны плиты и образует новую ударную волну — отраженную. Одновременно взрывная ударная волна может пройти через плиту и образовать новую ударную волну позади плиты — преобразованную волну [21], а затем продолжить распространение по воздуху, как это видно на рис. 4.

Развитие давления и импульса взрывной волны во времени показаны на рис. 5. Отметим ряд закономерностей. Во-первых, при взаимодействии набегающей волны с плитой пиковое давление отраженной волны существенно возрастает. Однако это увеличение соответствует множителю усиления пика для волны, отраженной от жесткой стенки [22]. Во-вторых, по мере прохождения взрывной ударной волны через плиту давление преобразованной волны достигает максимума и затем быстро уменьшается. Чем больше величина r/r_0 , тем сильнее понижается временная зависимость давления,

и в конце концов она становится очень близкой к отраженной волне. В-третьих, пиковое давление преобразованной волны заметно снижается, в то время как ее пиковый импульс уменьшается не столь существенно. Это связано с характеристиками взрывной ударной волны и самой плиты. В-четвертых, пики давления преобразованной и отраженной волн следуют позже по времени, чем пики набегающей волны. Причина заключается в том, что динамический ответ плиты создает некоторый эффект связи входа с выходом между взрывной ударной волной и плитой.

4. ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОТРАЖЕННОЙ ВОЛНЫ

Когда набегающая волна доходит до плиты, давление немедленно возрастает и в боковой области взрыва генерируется отражательная зона высокого давления. Армирован-

Таблица 3
Влияние внеплоскостной жесткости плиты на отраженную волну ($r/r_0 = 6.0$)

H , мм	p_r , 10^4 кПа	η_p , %	I_r , 10^4 кПа·мс	η_I , %	δ_r , мм
100	1.3611	4.31	1.4623	3.89	8.49
120	1.3724	3.52	1.4680	3.52	7.75
150	1.3801	2.97	1.4482	4.82	4.79
180	1.3920	2.14	1.4535	4.47	2.74
Жесткая плита	1.4224	—	1.5215	—	0

Примечания. H — толщина плиты, p_r — пиковое давление в отраженной волне, I_r — пиковый импульс в отраженной волне, δ_r — отклонение плиты на середине пролета, $\eta_p = (p_{rRW} - p_r)/p_{rRW}$, p_{rRW} — пиковое давление отраженной волны позади жесткой плиты, $\eta_I = (I_{rRW} - I_r)/I_{rRW}$, I_{rRW} — пиковый импульс отраженной волны позади жесткой плиты.

ная бетонная плита не является идеально жестким телом [23], это лишь плита с бесконечной внеплоскостной жесткостью, например каркасная стена с заполнителем. Поэтому необходимо учитывать влияние внеплоскостной жесткости на свойства отраженной волны. Только таким образом можно точно предсказать свойства отраженной волны и обеспечить основу для прогнозирования параметров преобразованной волны.

4.1. Внеплоскостная жесткость плиты

Исследуем влияние толщины плиты. Рассматривались плиты толщиной $H = 0.10, 0.12, 0.15$ и 0.18 м, все они удовлетворяют предельному значению отношения пролета плиты к толщине в рамках стандарта Eurocode 2 [24]. Пиковое давление и импульс в отраженной волне приведены в табл. 3. Чем выше внеплоскостная жесткость плиты, тем меньше максимальное отклонение давления. Тем не менее для плит различной толщины не выявлено какой-либо очевидной закономерности изменения отклонения импульса. В целом отклонения давления и импульса не превышали 5 %. Следовательно, внеплоскостная жесткость плиты слабо влияет на свойства взрывной ударной волны [25, 26]. Несоответствия обусловлены в основном двумя причинами. Во-первых, длительность отраженной волны гораздо меньше, чем динамический ответ плиты. За такое короткое время плита не успевает претерпеть заметной деформации, отклонение в середине пролета, соответствующее пиковому давлению, много меньше, чем пролет плиты (см. табл. 3). Во-вторых, повреждение или даже разрушение плиты не

может вызвать существенного изменения во времени давления в отраженной волне.

4.2. Параметрическое изучение отраженной волны

Предполагается, что давление в отраженной волне распределяется по плите неравномерно. Максимального значения оно достигает в ближней к центру взрыва точке. Давление меняется с внутриплоскостным расстоянием на плите. Это свидетельствует о том, что предположение о взрывной нагрузке на плиту, обычно применяемое в большинстве анализов при проектировании в гражданском строительстве, может привести к ужасающим ошибкам в случае, если плита расположена очень близко к центру взрыва [27].

В предварительном проектировании защитных конструкций или при оценке характера и степени их повреждения обычно используются диаграммы давление — импульс [28]. Поэтому проводятся экспериментальные исследования и анализы методом численного моделирования в области исследуемого давления и импульса в отраженной волне. В работе [6] выведено эмпирическое соотношение между пиковыми давлениями в отраженной p_r и набегающей p_i волнах:

$$\frac{p_r}{p_i} = 2.85(p_i)^{0.206}, \quad p_i \leq 50 \text{ МПа.} \quad (1)$$

Подобное эмпирическое соотношение получено в работе [4]:

$$\frac{p_r}{p_i} = \frac{8p_i + 14}{p_i + 7.2}, \quad p_i \leq 4 \text{ МПа.} \quad (2)$$

На основании результатов исследований [4–6] и численного моделирования, проведенного в настоящей работе, выведено следующее соотношение между пиковыми давлениями в отраженной и падающей волнах:

$$\frac{p_r}{p_i} = 2.930(p_i)^{0.244}, \quad 0.5 \leq p_i \leq 100 \text{ МПа.} \quad (3)$$

Рис. 6 иллюстрирует сравнение отношений пиковых давлений в нормальной отраженной и падающей волнах, вычисленные разными методами. Отношение p_r/p_i увеличивается с интенсивностью падающей волны, кривая показывает постепенный медленный рост. Когда пиковое давление в падающей волне находится в интервале $0.5 \div 4.0$ МПа, предсказания по соотношениям из [6] (см. (1)), из [4] (см. (2)) и по уравнению (3) настоящей работы хорошо согласуются с результатами численного моделирования, максимальное расхождение не превышает 0.3. Однако расхождение между результатами [6] и по уравнению (3) постепенно увеличивается с ростом интенсивности падающей волны. Одновременно увеличивается дискретность результатов численного моделирования. На рис. 6 видно, что предложенное уравнение (3) может давать лучшие предсказания, чем другие методы.

При реальных взрывах взрывная ударная волна может падать на плиту под различными углами, и пиковое давление в отраженной волне очевидным образом связано с углом падения набегающей волны. Нормальные отраженные и нерегулярные отраженные волны имеют

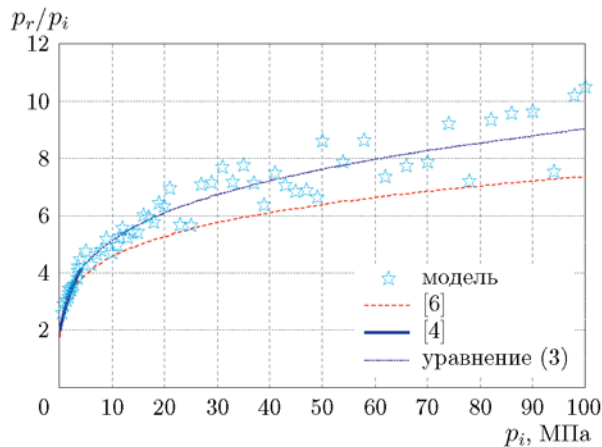


Рис. 6. Сравнение отношений пиковых давлений в нормальной отраженной и падающей волнах, полученных различными методами

существенные различия [29] и сильно отличаются по давлению взрывной ударной волны. В [6] выведено эмпирическое соотношение между пиковыми давлениями в отраженных нерегулярной $p_r(d)$ и нормальной $p_r(0)$ волнах и внутриплоскостным расстоянием d :

$$\frac{p_r(d)}{p_r(0)} = 1 - 0.0006[p_r(0)]^{0.46}d^2,$$

$$p_r(0) \leq 10 \text{ МПа.} \quad (4)$$

В настоящей работе для нелинейного согласования результатов численного моделирования используется функция NLINFIT в программе MATLAB. Соотношение между пиковыми давлениями отраженных нерегулярной и нормальной волн и внутриплоскостным расстоянием имеет вид

$$\frac{p_r(d)}{p_r(0)} = \begin{cases} 1 - 0.0012[p_r(0)]^{0.7147}d^{1.4296}, & r/r_0 = 3.0, \\ 1 - 0.0012[p_r(0)]^{0.8781}d^{1.3910}, & r/r_0 = 6.0. \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 7 показаны пиковые давления в нерегулярной отраженной волне в зависимости от внутриплоскостного расстояния. При $r/r_0 = 3.0$ и 6.0 наблюдается спад давления с

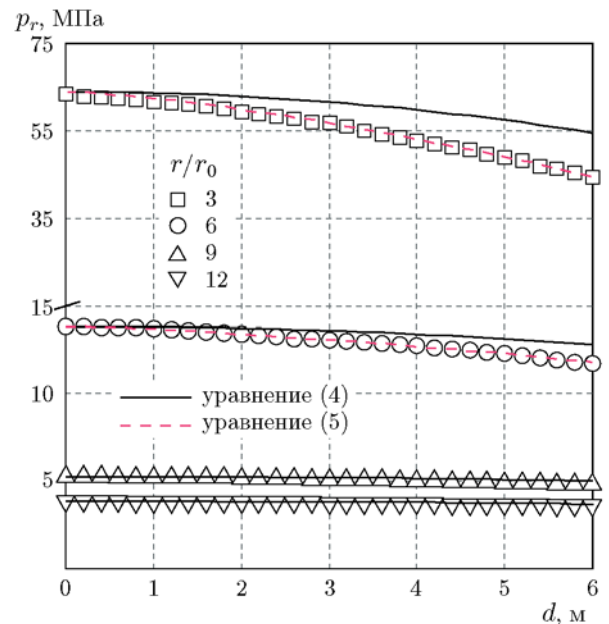


Рис. 7. Зависимость пикового давления в нерегулярной отраженной волне от внутриплоскостного расстояния

Таблица 4

Сравнение результатов численного моделирования и расчета по уравнению (6)

Способ расчета	$f_{ck} = 30$ МПа, $H = 150$ мм, $\rho_s = 0.0036$, $r/r_0 = 6.0$		$f_{ck} = 30$ МПа, $H = 150$ мм, $\rho_s = 0.0036$, $r/r_0 = 9.0$	
	p_r/p_p	I_r/I_p	p_r/p_p	I_r/I_p
Численное моделирование	15.5702	9.0398	12.0273	8.2190
Уравнение (6)	15.2532	8.9329	12.9819	7.9159
Ошибка, %	+2.08	+1.20	-7.35	+3.83

Примечания. f_{ck} — прочность бетона на сжатие, МПа; ρ_s — коэффициент армирования.

увеличением внутриплоскостного расстояния, и кривые показывают тенденцию к постепенному существенному понижению. При меньшем пиковом давлении в нерегулярной отраженной волне результаты моделирования при разных r/r_0 хорошо согласуются с предсказаниями по уравнению (4) в области его действия, а при большем пиковом давлении результаты численного моделирования дают меньшие значения, чем предсказанные уравнением (4), с увеличением внутриплоскостного расстояния. Главной причиной этого является то, что нерегулярное отражение может произойти из-за большего угла падения. Результаты численного моделирования при больших значениях r/r_0 хорошо согласуются с предсказанными уравнением (5) (см. рис. 7). Поэтому уравнения (4) и (5) могут использоваться для прогнозирования пикового давления в нерегулярной отраженной волне для любого положения на плите при разных значениях r/r_0 в смежном физическом поле взрыва.

Как показали результаты [4–6], временной ход отраженной волны аналогичен ходу взрывной волны в свободном виде на воздухе. В соответствии с уравнениями (4), (5) и модельным типичным временем затухания давления во взрывной ударной волне, легко построить модель затухания давления со временем в отраженной волне. Импульс можно получить как интеграл давления.

5. ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАННОЙ ВОЛНЫ

5.1. Преобразованная волна позади жесткой плиты

Рассмотрим такие параметры, как r/r_0 и толщина плиты H . Предполагается, что

они заданы в форме квадратного многочлена [30]. Существующие результаты численного моделирования были подвергнуты многомерной нелинейной подгоночной процедуре, и выведены следующие соотношения между свойствами отраженной и преобразованной волн:

$$\begin{aligned} \frac{p_r}{p_p} &= (0.0139\bar{r}^2 - 0.4275\bar{r} + 6.4768) \times \\ &\times (0.3313\bar{H}^2 - 0.2480\bar{H} + 3.2494), \\ \frac{I_r}{I_p} &= (0.0184\bar{r}^2 - 0.4507\bar{r} + 6.6451) \times \\ &\times (0.1423\bar{H}^2 + 0.1268\bar{H} + 1.5597). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь I_r , I_p — пиковый импульс соответственно отраженной и преобразованной волн, $\times 10^4$ кПа·мс; p_p — пиковое давление в преобразованной волне, $\times 10^4$ кПа; $\bar{r} = r/r_0$; $\bar{H} = H/H_{\min}$, H — толщина плиты, мм, H_{\min} — минимальная толщина плиты, удовлетворяющая предельному значению отношения пролета к толщине по стандарту Eurocode 2 [24].

Результаты численного моделирования и расчета по уравнению (6) приведены в табл. 4. Видно, что уравнение (6) хорошо предсказывает пиковое давление и импульс преобразованной волны позади жесткой плиты.

5.2. Преобразованная волна позади армированной бетонной плиты

Отношение r/r_0 , толщина плиты и прочность бетона очень сильно влияют на свойства взрывной ударной волны позади армированной бетонной плиты. Предполагается, что параметры представлены в виде квадратного многочлена [30]. Существующие результаты

Таблица 5

Сравнение результатов численного моделирования и расчетов по уравнению (7)

Способ расчета	$f_{ck} = 30 \text{ МПа}, H = 150 \text{ мм}, \rho_s = 0.0036, r/r_0 = 6.0$		$f_{ck} = 30 \text{ МПа}, H = 150 \text{ мм}, \rho_s = 0.0036, r/r_0 = 9.0$		$f_{ck} = 20 \text{ МПа}, H = 150 \text{ мм}, \rho_s = 0.0036, r/r_0 = 6.0$	
	p_r/p_c	I_r/I_c	p_r/p_c	I_r/I_c	p_r/p_c	I_r/I_c
Численное моделирование	22.5217	6.4251	17.4318	7.6440	20.4791	5.7446
Уравнение (7)	22.6500	6.2955	17.4055	7.5458	20.6610	5.7323
Ошибка, %	-0.57	+2.06	+0.15	+1.30	-0.88	+0.21

численного моделирования были подвергнуты многомерной нелинейной подгоночной процедуре, и выведены соотношения между давлением и импульсом в отраженной и преобразованной волнах:

$$\frac{p_r}{p_p} = (0.2700\bar{r}^2 - 6.4955\bar{r} + 60.9487) \times (0.1028\bar{H}^2 - 0.0762\bar{H} + 0.6504) \times (-0.0119\bar{f}^2 + 0.1473\bar{f} + 0.6639), \tag{7}$$

$$\frac{I_r}{I_p} = (-0.3250\bar{r}^2 + 7.6286\bar{r} + 7.5287) \times (0.0149\bar{H}^2 - 0.0110\bar{H} + 0.1432) \times (-0.0108\bar{f}^2 + 0.1425\bar{f} + 0.6607),$$

где $\bar{f} = f_{ck}/10$, f_{ck} — прочность бетона на сжатие, МПа.

Результаты численного моделирования и расчета по уравнению (7) представлены в табл. 5. Видно, что уравнение (7) лучше предсказывает пиковое давление и пиковый импульс в преобразованной волне позади армированной бетонной плиты.

6. МЕТОД, ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ СВОЙСТВ ПРЕОБРАЗОВАННОЙ ВОЛНЫ

Исходя из результатов параметрического изучения взрывной ударной волны, в данном исследовании предложен новый метод предсказания свойств преобразованной волны позади армированной бетонной плиты. Диаграмма предлагаемого метода показана на рис. 8, а основные шаги включают в себя следующие операции.



Рис. 8. Диаграмма предложенного метода

(1) Определить основные свойства заряда взрывчатого вещества: тип, форма, масса и т. д. Если речь идет не о стандартном веществе ТНТ, величины надо перевести в ТНТ-эквивалент. Кроме того, необходимо определить конфигурацию плиты и расстояние от плиты до центра взрыва.

(2) Рассчитать пиковое давление в набегающей волне в соответствии с моделью затухания давления со временем и определить длительность набегающей волны.

(3) Рассчитать по уравнению (3) пиковое давление в отраженной волне и определить длительность отраженной волны.

(4) Вычислить пиковое давление в отраженной волне в любой точке той стороны плиты, которая обращена к центру взрыва: при $p_r \leq 10$ МПа — по уравнению (4), при $p_r > 10$ МПа — по уравнению (5) вместе с линейной интерполяцией r/r_0 .

(5) Временной ход отраженной волны аналогичен таковому для набегающей волны в свободном виде в воздухе. В соответствии с уравнениями (4), (5) и типичной моделью затухания давления во времени, для волны в свободном виде в воздухе легко получить временной ход отраженной волны в любой точке плиты на стороне, обращенной к центру взрыва. Временной ход импульса определяется как интеграл давления по времени, после чего можно определить пиковый импульс отраженной волны.

(6) Предсказать по уравнению (6) пиковое давление и импульс преобразованной волны позади жесткой плиты для исследования характеристик динамического ответа и более точной оценки характера и степени повреждения структурных элементов позади жесткой плиты.

(7) Предсказать по уравнению (7) пиковое давление и импульс преобразованной волны позади армированной бетонной плиты для исследования характеристик динамического ответа и более точной оценки характера и степени повреждения позади армированной бетонной плиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мощный взрыв внутри здания сопровождается повреждением или даже разрушением ряда конструкций, причем в этот процесс неизбежно вовлекаются плиты и находящиеся за ними другие конструкции. И так может продолжаться до разрушения всего сооружения. Прогнозирование свойств взрывной ударной волны позади плиты — критически важная проблема, и первичной задачей здесь является оценка возможного повреждения элементов конструкции. В данной работе выполнены численные расчеты свойств взрывной ударной волны и сделаны следующие выводы.

1. Внеплоскостная жесткость плиты не влияет на свойства отраженной волны.

2. Предложенное новое соотношение между отраженной и падающей волнами позволяет более точно предсказывать давление, но оно применимо только для поля взрыва.

3. Для жесткой плиты или армированной бетонной плиты выполнен многомерный нелинейный процесс подгонки результатов численного моделирования и предложено новое соотношение между преобразованной и отраженной волнами.

4. Представлен новый метод предсказания свойств преобразованной волны в области позади плиты. Результаты численного моделирования показывают, что шаги в рамках предложенного метода являются строгими и точными, а результаты — достоверными.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках программы Key Research and Development (R&D) Program of Tangshan (N 19150232E) и проекта Postdoctoral Research Project of Chongqing (No. Xm2017189).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Jayasooriya R., Thambiratnam D. P., Perra N. J., Kosse V.** Blast and residual capacity analysis of reinforced concrete framed buildings // Eng. Struct. — 2011. — V. 33, N 12. — P. 3483–3495.
2. **Luccioni B. M., Ambrosini R. D., Danesi R. F.** Analysis of building collapse under blast loads // Eng. Struct. — 2004. — V. 26, N 1. — P. 63–71.
3. **Shi Y. C., Li Z. X., Hao H.** A new method for progressive collapse analysis of RC frames under blast loading // Eng. Struct. — 2010. — V. 32, N 6. — P. 1691–1703.
4. **Henrych J.** The dynamics of explosion and its use. — Amsterdam; New York: Elsevier Scient. Publ. Co., 1979.
5. **Technical Manual (TM-5-855-1).** Fundamentals of protective design for conventional weapons. — Washington, DC: Headquarters, Department of the Army, 1986.
6. **Wu C. Q., Hao H.** Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions // Int. J. Impact Eng. — 2005. — V. 31, N 6. — P. 699–717.
7. **Ram O., Nof E., Sadot O.** Dependence of the blast load penetrating into a structure on initial conditions and internal geometry // Exp. Therm. Fluid Sci. — 2016. — V. 78. — P. 65–74.
8. **Fouchier C., Laboureur D., Youinou L., Lapebie E., Buchlin J. M.** Experimental investigation of blast wave propagation in an un-

- ban environment // J. Loss Prev. Process Ind. — 2017. — V. 49, pt B. — P. 248–265.
9. **Rose T. A., Smith P. D.** Influence of the principal geometrical parameters of straight city streets on positive and negative phase blast wave impulses // Int. J. Impact Eng. — 2002. — V. 27, N 4. — P. 359–376.
 10. **Remennikov A. M., Rose T. A.** Modelling blast loads on buildings in complex city geometries // Comput. and Struct. — 2005. — V. 83, N 27. — P. 2197–2205.
 11. **Edri I. E., Feldgun V. R., Karinski Yu. S., Yankelevsky D. Z.** The blast load acting on a structure in an internal explosion scenario // ASCE Structures Congress 2018: Blast, Impact Loading, and Response; and Research and Education. — 2018. — P. 362–375.
 12. **Gao X. N., Wang S. P., Jiang Y.** Shock wave pressure distribution on large-space structures and explosion venting under blast loading // Eng. Mechanics. — 2010. — V. 27, N 4. — P. 226–233.
 13. **Ma T. B., Xu X. Z., Ning J. G.** Research on propagation laws of explosion shock wave inside metro station // J. Loss Prev. Process Ind. — 2017. — V. 46. — P. 54–68.
 14. **Pennetier O., William-Louis M., Langlet A.** Numerical and reduced-scale experimental investigation of blast wave shape in underground transportation infrastructure // Process Saf. Environ. Prot. — 2015. — V. 94. — P. 96–104.
 15. **Shi Y. C., Hao H., Li Z. X.** Numerical simulation of blast wave interaction with structure columns // Shock Waves. — 2007. — V. 17, N 1. — P. 113–133.
 16. **Zhang B., Nian X. Z., Jin F. N., Xia Z. C., Fan H. L.** Failure analyses of flexible Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) fiber reinforced anti-blast wall under explosion // Compos. Struct. — 2018. — V. 18. — P. 759–774.
 17. **Holmquist T. J., Johnson G. R., Cook W. H.** A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures // 14th Int. Symp. on Ballistics. — 1993. — P. 591–600.
 18. **LS-DYNA.** Keyword User's Manual. VOLUME I. — Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2016.
 19. **Johnson G. R., Cook W. H.** A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of the 7th Int. Symp. on Ballistics. — 1983. — P. 541–547.
 20. **LS-DYNA.** Theory Manual. — Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2016.
 21. **Schenker A., Anteby I., Gal E., Kivity Y., Nizri E., Sadot O., Michaelis R., Levintant O., Ben-Dor G.** Full-scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads // Int. J. Impact Eng. — 2008. — V. 35, N 3. — P. 184–198.
 22. **Орленко Л. П.** Физика взрыва. — М.: Физматлит, 2002.
 23. **Huang K. J., Zollinger D. G., Shi X. J., Sun P. Z.** A developed method of analyzing temperature and moisture profiles in rigid pavement slabs // Construction and Building Materials. — 2017. — V. 151. — P. 782–788.
 24. **Eurocode 2.** Design of Concrete Structures. — Civil Engineering, 2003.
 25. **Wang W. J., Chou N.** Experimental and theoretical studies of flax FRP strengthened coconut fibre reinforced concrete slabs under impact loadings // Construction and Building Materials. — 2018. — V. 171. — P. 546–557.
 26. **Sadraie H., Khaloo A., Soltani H.** Dynamic performance of concrete slabs reinforced with steel and GFRP bars under impact loading // Eng. Struct. — 2019. — V. 191. — P. 62–81.
 27. **Unified Facilities Criteria (UFC).** Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. — Department of Defense, 2013.
 28. **Shi Y. C., Hao H., Li Z. X.** Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads // Int. J. Impact Eng. — 2008. — V. 35, N 11. — P. 1213–1227.
 29. **Nakayama K., Kakinuma T., Tsuji H.** Oblique reflection of large internal solitary waves in a two-layer fluid // Eur. J. Mech. — B/Fluids. — 2019. — V. 74. — P. 81–91.
 30. **Wu W. B., Zhang A.-M., Liu Y. L., Wang S.-P.** Local discontinuous Galerkin method for far-field underwater explosion shock wave and cavitation // Appl. Ocean Res. — 2019. — V. 87. — P. 102–110.

Поступила в редакцию 05.08.2019.

После доработки 04.11.2019.

Принята к публикации 06.11.2019.