

УДК 51-74

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЪЕКТЫ

С. А. Вальгер<sup>1,2</sup>, Н. Н. Фёдорова<sup>1,2</sup>, А. В. Фёдоров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
630008 Новосибирск, swetla-ya@mail.ru

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН  
630090 Новосибирск

Представлены результаты моделирования задачи о распространении ударной волны, образовавшейся в результате взрыва сферического заряда взрывчатого вещества, в полубесконечном пространстве, ограниченном плоской подложкой. Исследованы задачи о воздействии такой волны на жестко закрепленные на подложке объекты (одиночную призму и комплекс призм, имитирующих городскую застройку). Расчеты выполнены в трехмерной невязкой постановке с использованием модуля AUTODYN коммерческого программного комплекса ANSYS. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными о распределении статического давления в датчиках, расположенных на стенках призм. Продемонстрирована возможность корректного описания нестационарной волновой картины, реализующейся в окрестности установленных на подложке препятствий. На основе данных моделирования выполнена оценка интенсивности воздействия на различные объекты.

Ключевые слова: взрыв, ударно-волновые воздействия, программные комплексы, ANSYS, AUTODYN.

DOI 10.15372/FGV20170407

### ВВЕДЕНИЕ

Защита гражданских сооружений от угрозы террористических взрывов или техногенных катастроф, сопровождающихся взрывными явлениями, — одна из наиболее актуальных задач современной инженерии. Для обеспечения безопасности зданий и сооружений необходимо повышать их возможности противостоять взрывным воздействиям. Для этого прежде всего нужно уметь предсказывать параметры взрывного воздействия в зависимости от конкретной геометрии и силы взрыва, а также оценивать степень возможных разрушений сооружений при таком воздействии.

В России и других странах проводится активная деятельность по разработке методов оценки динамических/взрывных воздействий на сооружения. Эти методы положены в основу государственных норм, регулирующих проектирование и эксплуатацию зданий и сооружений. Как правило, они основаны на полуэмпи-

рических теориях и представляют собой набор формул, которые следует применять в той или другой ситуации (см., например, регламенты нормативно-технических документов и пособия [1–5], аналогичные документы существуют и за рубежом [6–9]).

В [1, 5] расчет зданий и сооружений по предельным состояниям рекомендуется выполнять с учетом неблагоприятных сочетаний нагрузок при взрывных воздействиях. Проектирование промышленных зданий с взрывоопасными технологиями осуществляется в соответствии с рекомендациями СП 20.13330.2011 [2].

Однако нормативная база позволяет определять параметры ударно-волновых воздействий на строительные объекты только в простейших случаях. Упрощенная методика не может выполнить оценку с учетом сложной ударно-волновой картины течения, реализующейся при взрыве зарядов взрывчатого вещества (ВВ) вблизи нескольких объектов. В силу многопараметричности и сложности задачи разработка универсальных инженерных формул, способных описать указанное явление с достаточной степенью точности, представляется весьма затруднительной задачей.

Быстрый рост производительности совре-

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00010) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-07-06581).

менных ЭВМ, совершенствование алгоритмов расчета и развитие современных программных комплексов позволяют проводить численное моделирование распространения детонационных и ударных волн в окружающей среде с учетом их взаимодействия с поверхностью земли и расположенными на ней объектами, а также с учетом деформации и разрушения конструкций. В общем случае расчеты устойчивости зданий под воздействием ударно-волновых нагрузок подразумевают решение сопряженной задачи, включающей в себя расчет реализующегося при взрыве внешнего течения совместно с определением отклика конструкции на внешнее динамическое воздействие.

Для моделирования этих явлений используются оригинальные и коммерческие программные комплексы инженерного анализа (CAE), такие как ANSYS CFD, ANSYS AUTODYN, LS-DYNA и др., позволяющие решать широкий спектр прикладных задач газовой динамики, механики деформируемого твердого тела, а также проводить сопряженные расчеты взаимодействия потоков со структурами (FSI).

В предыдущих работах авторов [10–12] разработана расчетная технология решения задач о распространении ударных волн и взрывном воздействии на строительные конструкции, основанная на использовании достаточно адекватных математических моделей и современных программных средств компьютерной инженерии, а также выполнено моделирование ударно-волнового воздействия на конструкции.

В данной статье представлены результаты расчета распространения ударных волн, образовавшихся в результате детонации конденсированного ВВ в окрестности призмы (*задача 1*) и комплекса призм, имитирующих городскую застройку (*задача 2*). Для расчета используется модуль ANSYS AUTODYN, предназначенный для моделирования быстропротекающих процессов в сплошной среде, который позволяет провести исследование сложной ударно-волновой структуры течения, сформировавшейся в результате отражения ударной волны (УВ) от подложки и стен зданий, дифракции УВ на элементах застройки и интерференции многочисленных УВ.

## 1. ВЗРЫВ И ЕГО ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОБЪЕКТЫ

Предварительно приведем некоторые эле-

ментарные сведения из теории взрывных явлений и их воздействия на окружающую среду. Взрыв — это крупномасштабный физический процесс с внезапным выбросом большого количества энергии, в результате чего образуется область горячих газов с давлением до 300 кбар и температурой  $3\,000 \div 4\,000$  °С [13, 14]. Расширяющиеся продукты детонации формируют сферическую УВ, которая распространяется во внешнюю область. УВ имеет характерный профиль с узким и крутым фронтом повышения давления и других параметров, за которым следует зона снижения параметров в направлении к эпицентру взрыва [15].

Взрывная волна создает избыточное давление в окружающей среде, существенно превышающее атмосферное. Профиль давления имеет крутой фронт, за которым следует зона разгрузки, которая начиная с некоторого расстояния от источника может приводить к падению избыточного давления ниже нуля. Наступает фаза разрежения, которая имеет небольшую амплитуду, но большую продолжительность по сравнению с «положительной» фазой [15].

Интенсивность УВ зависит от энергии, выделившейся в результате взрыва, и быстро убывает в зависимости от расстояния до эпицентра. УВ вовлекает в движение окружающий воздух, что приводит к образованию сильного ветра, оказывающего динамическое давление  $p_{q0}$ . Когда фронт УВ подходит к препятствию, он отражается и дифрагирует вокруг его поверхности с образованием зоны разрежения вблизи верхней грани. Суммарное воздействие взрыва на препятствие складывается из обусловленного ветром динамического давления  $p_{q0}$ , давления падающей  $p_{s0}$  и отраженной  $p_r$  УВ, в результате чего действующее на объект давление существенно превышает пиковое давление  $p_{s0}$  [5].

Повреждение строительных конструкций вызывает избыточное давление, превышающее атмосферный уровень всего лишь на  $3 \div 5$  %. Кроме того, опасны отрицательные значения избыточного давления, которые приводят к повреждению стеклянных и других легкобросаемых конструкций. Поэтому необходимо точно моделировать процесс прохождения УВ и ее воздействие на конструкции с учетом возможных отражений от поверхности земли и окружающих объектов, а также дифракции и интерференции УВ.

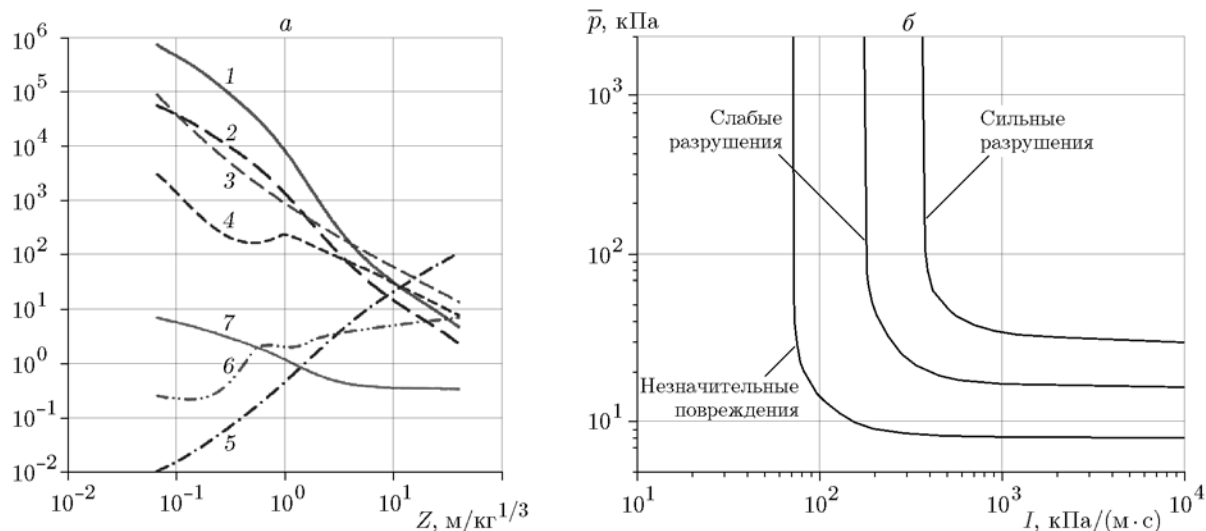


Рис. 1. Параметры ударной волны, действующей на объект (а), и диапазоны критических значений избыточного давления и импульса взрывной волны (б):

1 —  $p_r$ , кПа; 2 —  $p_{s0}$ , кПа; 3 —  $I_r$ ,  $\text{kPa}\cdot\text{мс}/\text{кг}^{1/3}$ ; 4 —  $I_s$ ,  $\text{kPa}\cdot\text{мс}/\text{кг}^{1/3}$ ; 5 —  $t_a$ ,  $\text{мс}/\text{кг}^{1/3}$ ; 6 —  $t_o$ ,  $\text{мс}/\text{кг}^{1/3}$ ; 7 —  $u_s$ ,  $\text{м}/\text{мс}$

Параметры взрывов и образовавшихся УВ интенсивно изучались в середине XX в. [13]. Было показано, что параметры УВ зависят от количества высвободившейся в результате взрыва энергии  $E$  [кДж], вместо которой часто используют тротильный эквивалент массой  $W$  [кг], и от расстояния от точки взрыва  $R$ . Поведение параметров УВ описывают как функцию автомодельного параметра

$$Z = R/W^{1/3}. \quad (1)$$

В литературе можно найти экспериментальные корреляционные зависимости, описывающие параметры УВ. Значения избыточного давления  $p_{s0}$ , отраженного давления  $p_r$ , скорости УВ  $u_s$ , а также время прихода УВ  $t_a$  и длительность отрицательной фазы  $t_o$  в зависимости от  $Z$  представлены на рис. 1,а [9, 16]. Для оценки воздействия на сооружение важно не только вычислить избыточное давление, действующее на конструкцию, но и оценить значение импульса. Диаграмма [17] на рис. 1,б показывает диапазон критических значений избыточного давления  $\bar{p} = p - p_0$  и импульса взрывной волны

$$I(t) = \int_0^t p(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где  $p_0$  — давление окружающей среды.

## 2. ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу 1 о воздействии воздушного взрыва заряда конденсированного ВВ на призму прямоугольного сечения, установленную на поверхности земли на некотором расстоянии от эпицентра взрыва. Моделирование проведено в условиях, соответствующих экспериментальным данным [18]. В эксперименте давление измеряли в ряде точек, расположенных на наветренной и подветренной сторонах призмы. Это позволяет сравнить данные численного и натурного экспериментов по времени прихода взрывной УВ в эти точки и по пиковым давлениям УВ на стенках призмы.

Размеры призмы составляют  $0.061 \times 0.183 \times 0.183$  м. Взрыв ВВ Demex массой 23.7 г (тротильный эквивалент  $W_{\text{ТНТ}} = 27.26$  г) происходит на расстоянии 1.5 м от фронтальной поверхности призмы на высоте 0.1 м над поверхностью земли.

На рис. 2 представлена схема расчетной области задачи 1 в изометрии. С целью сокращения расчетных ресурсов задача решена в симметричной постановке относительно плоскости  $XZ$ . Характерные размеры расчетной области  $2.6 \times 0.6 \times 0.6$  м.

На рис. 3 показана схема расчетной области задачи 2, включающей уже семь призм различного сечения и высоты. Максимальная высота призм (призмы А и G) достигает 0.45 м, в

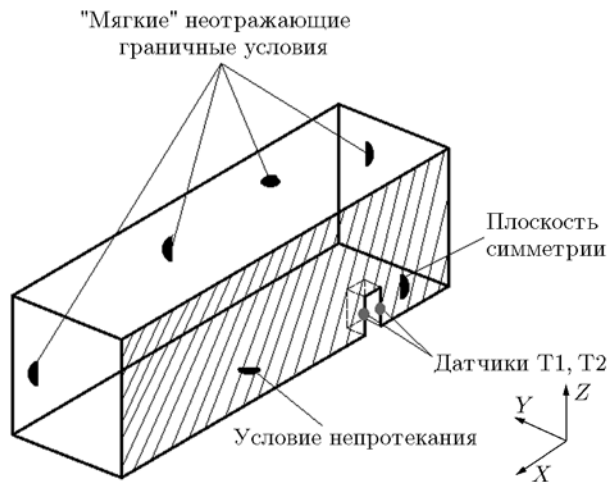


Рис. 2. Схема расчетной области задачи 1 в изометрии

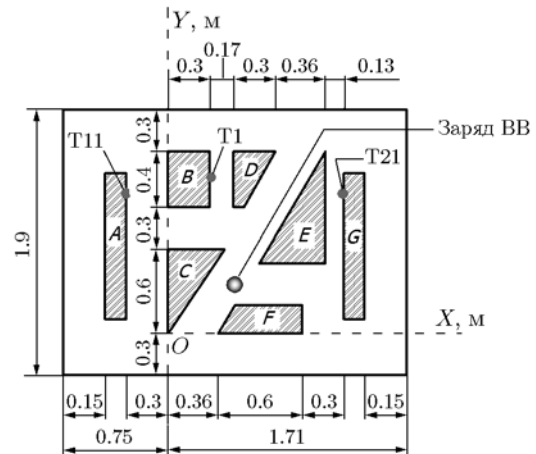


Рис. 3. Схема расчетной области задачи 2 в плане

то время как наиболее низкие объекты *D* и *F* имеют высоту 0.3 м. Расстояние между соседними объектами меньше или сопоставимо по масштабу с поперечными размерами обтекаемых объектов, что характеризует данную конфигурацию застройки как плотную. В отличие от задачи 1, моделирование ударно-волнового течения в окрестности данной конфигурации тел не может проходить в симметричной постановке и требует построения полной трехмерной расчетной области.

Заряд ВВ массой  $m_{\text{ТНТ}} = 0.016$  кг находится в точке с координатами (0.478, 0.35, 0.04 м). Постановка задачи выбрана в соответствии с данными эксперимента [19], в котором проведены замеры давления в зависимости от времени в ряде точек, расположенных на стенках призм. Координаты датчиков давления даны в табл. 1, их расположение показано также на рис. 3.

Таблица 1  
Координаты точек замеров давления

Датчик	Координаты, м		
	X	Y	Z
T1	0.3	1.1	0.105
T11	-0.3	1.0	0.075
T21	1.26	1.0	0.075

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Воздушная среда и заряд конденсированного ВВ моделируются на основе единого гидродинамического подхода. Для расчетов использован модуль AUTODYN программного комплекса ANSYS\*, предназначенный для моделирования быстропротекающих процессов механики сплошной среды. Используется эйлеров решатель, основанный на методе конечных разностей, хорошо зарекомендовавший себя в задачах с высокими градиентами и разрывными решениями.

Моделирование выполнено в невязкой постановке. Движение воздушной среды описывается системой трехмерных уравнений Эйлера, дополненной уравнением состояния идеального газа. Течение расширяющихся продуктов детонации ВВ описывается с помощью гидродинамической модели материала [13] с использованием уравнения состояния Джона — Вилкинса — Ли (JWL):

$$P = A \left( 1 - \frac{\lambda \eta}{R_1} \right) \exp \left( - \frac{R_1}{\eta} \right) + B \left( 1 - \frac{\lambda \eta}{R_2} \right) \exp \left( - \frac{R_2}{\eta} \right) + \lambda \rho e, \quad (3)$$

где эмпирические константы равны  $A = 3.737 \cdot 10^8$  кПа,  $B = 3.747 \cdot 10^6$  кПа,  $R_1 = 4.15$ ,  $R_2 = 0.9$ ,  $\lambda = 0.35$ ;  $e = 6.0 \cdot 10^6$  кДж/м<sup>3</sup> — удельная внутренняя энергия,  $\eta = \rho/\rho_0$  — относительная удельная плотность,  $\rho_0 = 1630$  кг/м<sup>3</sup>.

\* Academic Research, Custom number 531495.

Таблица 2

Данные о расчетных сетках для задачи 1

№ п/п	$d_X$ , см	$d_Y$ , см	$d_Z$ , см	$N_X$	$N_Y$	$N_Z$	$N_X \times N_Y \times N_Z$
1	1	1	1	260	60	60	$9.36 \cdot 10^5$
2	0.5	1	1	520	60	60	$1.872 \cdot 10^6$
3	0.25	1	1	1040	60	60	$3.744 \cdot 10^6$
4	0.5	0.5	0.5	520	120	120	$7.488 \cdot 10^6$

Подложка и закрепленные на ней призмы предполагаются абсолютно жесткими. На твердых границах заданы условия непротекания, т. е. равенство нулю нормальной к границе компоненты скорости. На внешних границах расчетной области применены «мягкие» экстраполирующие граничные условия, обеспечивающие выход возмущений за границы области.

Начальное распределение параметров воздушной среды соответствует нормальным атмосферным условиям: плотность  $1.225 \text{ кг/м}^3$ , температура  $298.15 \text{ К}$ , статическое давление  $101325 \text{ Па}$ , удельная теплоемкость  $1004 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ .

Решение нестационарных трехмерных уравнений Эйлера выполнено методом конечных разностей. Интегрирование уравнений по времени осуществлялось с помощью явной схемы первого порядка с соблюдением условия устойчивости схемы по числу Куранта. Для аппроксимации уравнений использованы модифицированный метод Годунова [20, 21] и метод коррекции потоков FCT [22] второго порядка точности по пространству.

Поскольку на начальной стадии процесс детонации ВВ в открытом пространстве развивается симметрично, задача до того момента, как фронт УВ достигает поверхности ближайшей призмы, решается в двумерном осесимметричном приближении. Затем данные, полученные в двумерной задаче, интерполируются на трехмерную расчетную область и моделируется распространение сформировавшейся воздушной УВ и ее взаимодействие с подложкой и призмами.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ 1

На первом этапе проведено тестирование используемого метода решения, для чего исследовалась сеточная сходимость решения. Была выполнена серия расчетов на равномерных

сетках различного разрешения, параметры которых показаны в табл. 2. Самая грубая расчетная сетка имела характерный масштаб  $d = 0.01 \text{ м}$  и включала порядка  $10^6$  ячеек. Наиболее подробная расчетная сетка имела характерный масштаб ячейки  $d = 0.005 \text{ м}$  во всех направлениях и включала около  $7.5 \cdot 10^6$  ячеек.

На рис. 4 показаны профили статического давления в точке Т1, рассчитанные на различных сетках с использованием модификации схемы Годунова второго порядка точности и полученные в эксперименте [18]. Точка Т1 расположена на наветренной стороне призмы на высоте  $h = 0.0915 \text{ м}$  от поверхности земли, что соответствует расположению датчика в эксперименте. Как видно из рис. 4, значения времени прихода первичной УВ в решениях на различных сетках существенно не отличаются, однако решение на сетке 4 наиболее близко к экспериментальным значениям пикового давления. Результаты, представленные в этом параграфе, получены на наиболее подробной сетке 4.

Полученный в расчетах режим распространения УВ согласуется с описанными в ли-

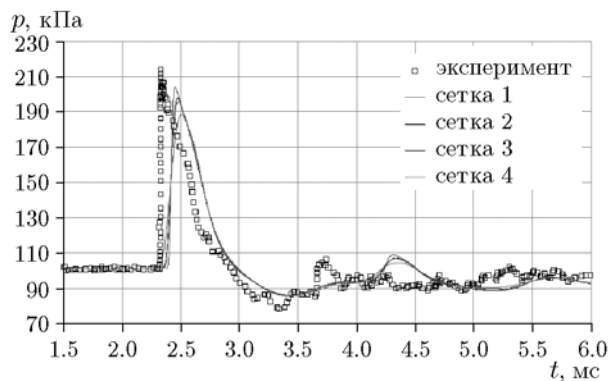


Рис. 4. Зависимости статического давления в точке Т1 от времени, полученные в эксперименте [18] и в расчетах на различных сетках с использованием схемы Годунова второго порядка точности

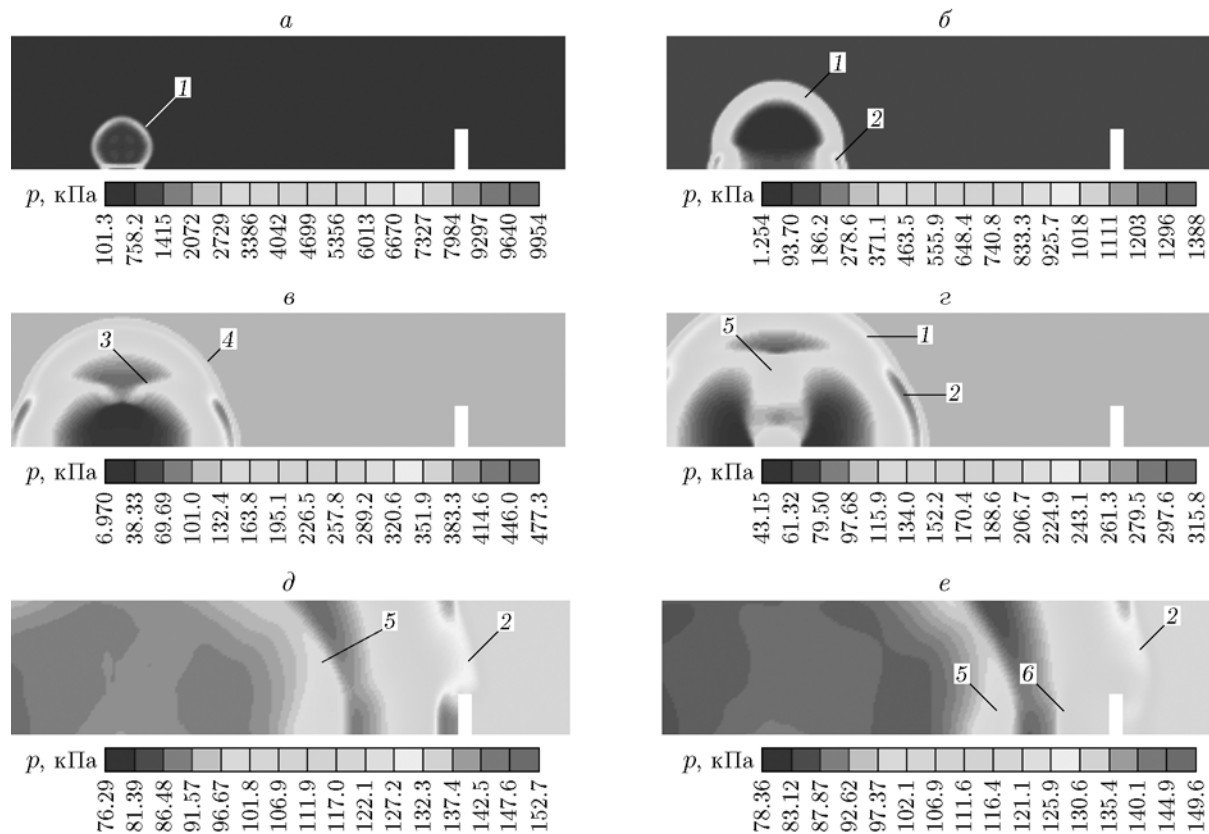


Рис. 5. Мгновенные поля статического давления в моменты времени 0.018 (а), 0.13 (б), 0.36 (в), 0.62 (г), 2.72 (д), 2.95 мс (е)

температуре. При распространении взрывная волна отражается от подложки и препятствий, что приводит к ее усилению. Поскольку взрыв произошел на некоторой высоте над поверхностью земли, при достижении земли взрывной ударной волной происходит отражение фронта сферической УВ. По мере распространения УВ угол, под которым волна подходит к поверхности, возрастает. В некоторый момент времени регулярный режим отражения изменяется на нерегулярный с образованием ножки Маха и тройной точки. Известно, что давление за прямым скачком (ножкой Маха) существенно выше, чем за косой УВ. Отраженные волны интерферируют между собой и движутся в направлении эпицентра, где в некоторый момент времени происходит «схлопывание» волн. В результате образуется фронт новой более слабой УВ, распространяющейся во внешнюю среду от эпицентра (вторичный фронт).

Волновая картина взрывного воздействия осложняется многочисленными интерференционными явлениями между первичными, вто-

ричными и отраженными фронтами, дифракцией и отражением УВ от подложки и призмы, что приводит к образованию вторичных пиков давления.

На рис. 5 приведены полученные в расчетах поля статического давления в плоскости симметрии в некоторые характерные моменты времени. Как видно из рис. 5,а, соответствующего моменту времени  $t = 0.018$  мс, фронт первичной УВ 1 отражается от поверхности земли регулярным образом.

На рис. 5,б режим отражения УВ от подложки изменился на нерегулярный с образованием ножки Маха 2. Фронт волны, состоящий из участков первичной волны 1 и ножки Маха 2, распространяется в воздушной среде от эпицентра по направлению к призме. В это же время отраженные волны 3 и 4, исходящие из тройной точки маховской конфигурации, движутся к эпицентру (рис. 5,в), где после их взаимодействия (рис. 5,г) образуется фронт вторичной волны 5.

В момент времени  $t = 2.45$  мс первичная

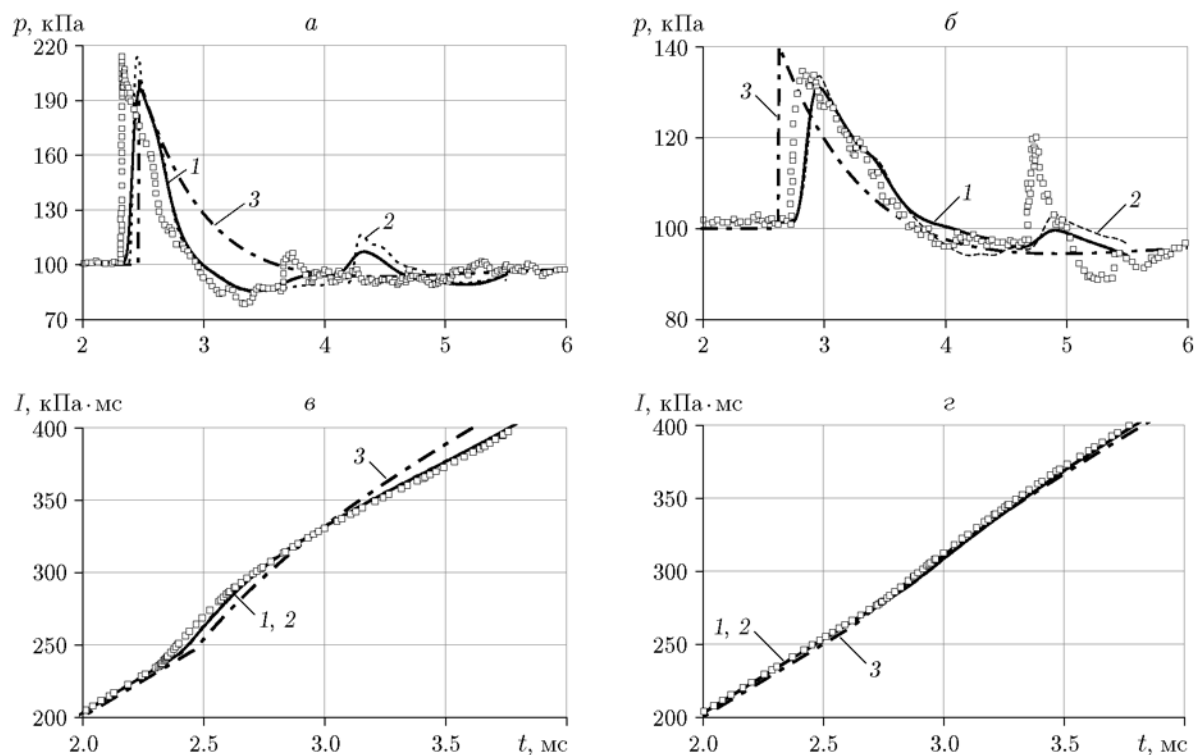


Рис. 6. Зависимости статического давления (*a, б*) и импульса (*в, з*) в точках Т1 (*a, в*) и Т2 (*б, з*), полученные в эксперименте (точки) и в расчете по схеме Годунова (1), схеме FCT (2) и с помощью функции CONWEP (3)

УВ 2 приходит на фронтальную стенку призмы и отражается от нее ударной волной 6, что сопровождается резким увеличением статического давления. Далее давление на стенке призмы начинает падать и наступает «отрицательная» фаза, при которой статическое давление вблизи стенки опускается ниже 1 атм. Рис. 5, *д, е* показывают дифракцию волны 2 на призме и распространение отраженной УВ 6 в направлении эпицентра. В дальнейшем отраженная УВ 6 и вторичная волна 5 интерферируют, что приводит к образованию новой системы ударных фронтов меньшей интенсивности, которая оказывает влияние на распределение давления на поверхности призмы.

Значение автомодельной переменной (1), вычисленное по массе заряда ВВ и характерному расстоянию, равно в этом случае  $Z = 5$ . В соответствии с графиком, приведенным на рис. 1, избыточное давление падающей на фронтальную стенку призмы УВ равно 40 кПа, отраженной — 100 кПа, время прихода УВ в точку Т1 — 2.4 мс, падающий импульс — 70 кПа·мс, отраженный импульс — 180 кПа·мс. Характер воздействия ударно-вол-

новых структур на стенки призмы можно оценить по зависимости статического давления  $p(t)$  и импульса  $I(t)$  (2). На рис. 6 показаны зависимости статического давления и импульса от времени в точках Т1 и Т2, полученные с использованием модифицированной схемы Годунова второго порядка точности и метода коррекции потоков FCT. На рис. 6 представлены также зависимости статического давления и эффективного импульса от времени в точках Т1 и Т2, полученные с помощью полуэмпирической функции CONWEP [17]. Функция описывает зависимости параметров УВ от времени и позволяет определить взрывную нагрузку на конструкцию. Однако функция CONWEP не позволяет учитывать эффекты «затенения» УВ объектами, лежащими на пути ее распространения, и локальные эффекты ее отражения от элементов конструкции. Кроме того, область применения функции ограничена значениями приведенного расстояния:  $0.178 < Z < 40.0$ .

Как видно из рис. 6, *а*, на фронтальной поверхности призмы наблюдается несколько локальных максимумов давления. Первый пик

$p_{\max} \approx 213$  кПа фиксируется в момент времени  $t \approx 2.45$  мс и обусловлен приходом основной УВ. Второй пик  $p_{\max} \approx 115$  кПа при  $t \approx 4.3$  мс обусловлен приходом УВ, образовавшейся в результате взаимодействия УВ 3 и 4 (см. рис. 5). Стоит заметить, что численные расчеты с использованием схемы Годунова несколько занижают пики давления на наветренной и подветренной сторонах призмы, а также дают задержку во времени прихода первого пика УВ на 0.13 мс в точках Т1 и Т2.

Зависимость статического давления от времени на подветренной стороне призмы изображена на рис. 6,б. Первый пик давления связан с воздействием обогнувшей призму первой УВ. Второй пик, обусловленный воздействием этой же УВ, отразившейся от подложки, количественно предсказывается обеими схемами с погрешностью. Следствием этого является небольшое занижение эффективного импульса в точке Т2, при этом предсказание этого параметра в точке, расположенной на фронтальной поверхности, можно считать удовлетворительным. Сравнение графиков показывает, что расчет методом коррекции потоков позволяет более точно предсказывать пиковое давление и эффективный импульс по сравнению со схемой Годунова и с большей точностью разрешать вторичные максимумы давления. Расхождения с экспериментом связаны в первую очередь с диссипативными свойствами использованных разностных схем. Тем не менее, количественное сравнение расчетных и экспериментальных данных, приведенное в табл. 3, можно считать вполне удовлетворительным.

Результаты расчетов с использованием полуэмпирической функции CONWEP хорошо согласуются с экспериментальными данными по максимальному давлению и времени прихода

УВ. Этот подход позволяет точно определить пиковое значение взрывной нагрузки на исследуемую конструкцию. Однако, как видно из рис. 6,б, он не позволяет определить вторичные и отраженные УВ в структуре течения. Поэтому данный метод неприменим для застроек сложной конфигурации, где на распределение давления на стенках объектов существенно влияют многие интерференционные эффекты.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ 2

Опишем структуру ударно-волнового течения в окрестности комплекса призм, восстановленную на основе мгновенных полей статического давления в характерные моменты времени (рис. 7), а также зависимостей статического давления от времени в характерных точках замеров Т1, Т11 и Т21 (рис. 8).

На рис. 7 показаны мгновенные поля статического давления в характерные моменты времени  $t$  в горизонтальном сечении  $h = 0.105$  м. Сферическая УВ 1, сформированная в результате высвобождения энергии при детонации ВВ, распространяется в свободном пространстве. В момент времени  $t \approx 0.1$  мс она приходит на угол призмы  $F$  и отражается от него. Максимальное давление во фронте УВ 1 в момент отражения составляет  $\approx 6$  МПа. Через некоторое время УВ 1 приходит на стенку призмы  $C$  и острый угол призмы  $E$ . Отражение УВ 1 от стенок призм  $E$  и  $F$  носит нерегулярный характер, что приводит к формированию ножек Маха и тройных точек 3, 4 и 5 (рис. 7,б). При отражении УВ 1 от стенки призмы  $C$  формируется УВ 2, которая движется по направлению к эпицентру взрыва. Отраженная от стенок призмы  $F$  УВ 6 (рис. 7,в) в момент времени  $t \approx 0.4$  мс начинает взаимодействовать с отраженной УВ 2 и образует ударно-волновую структуру 7 (рис. 7,г). При этом УВ 2 огибает острый угол здания  $C$ , взаимодействуя с первичной УВ 1 (рис. 7,в,г).

В относительно узком канале между призмами  $E$  и  $F$  в момент времени  $\approx 0.4$  мс начинается интерференция структур 3 и 4. УВ 5 движется от эпицентра взрыва и огибает острую кромку призмы  $F$  (рис. 7,г). В момент времени  $t \approx 0.5$  мс УВ, образованная в ходе взаимодействия УВ 1 и УВ 2, приходит на стенку призмы  $D$  и через некоторое время на стенку призмы  $B$ , в результате чего происходит формирование более мелких отраженных УВ, фрон-

Таблица 3  
Время прихода УВ  
и максимальное статическое давление

Данные	Т1		Т2	
	$p_{st,max}$ , кПа	$t_1$ , мс	$p_{st,max}$ , кПа	$t_2$ , мс
Эксперимент [22]	112	2.32	34	2.82
Схема Годунова	94	2.46	31	2.95
Метод FCT	113	2.45	34	2.95
CONWEP	101	2.47	40	2.63



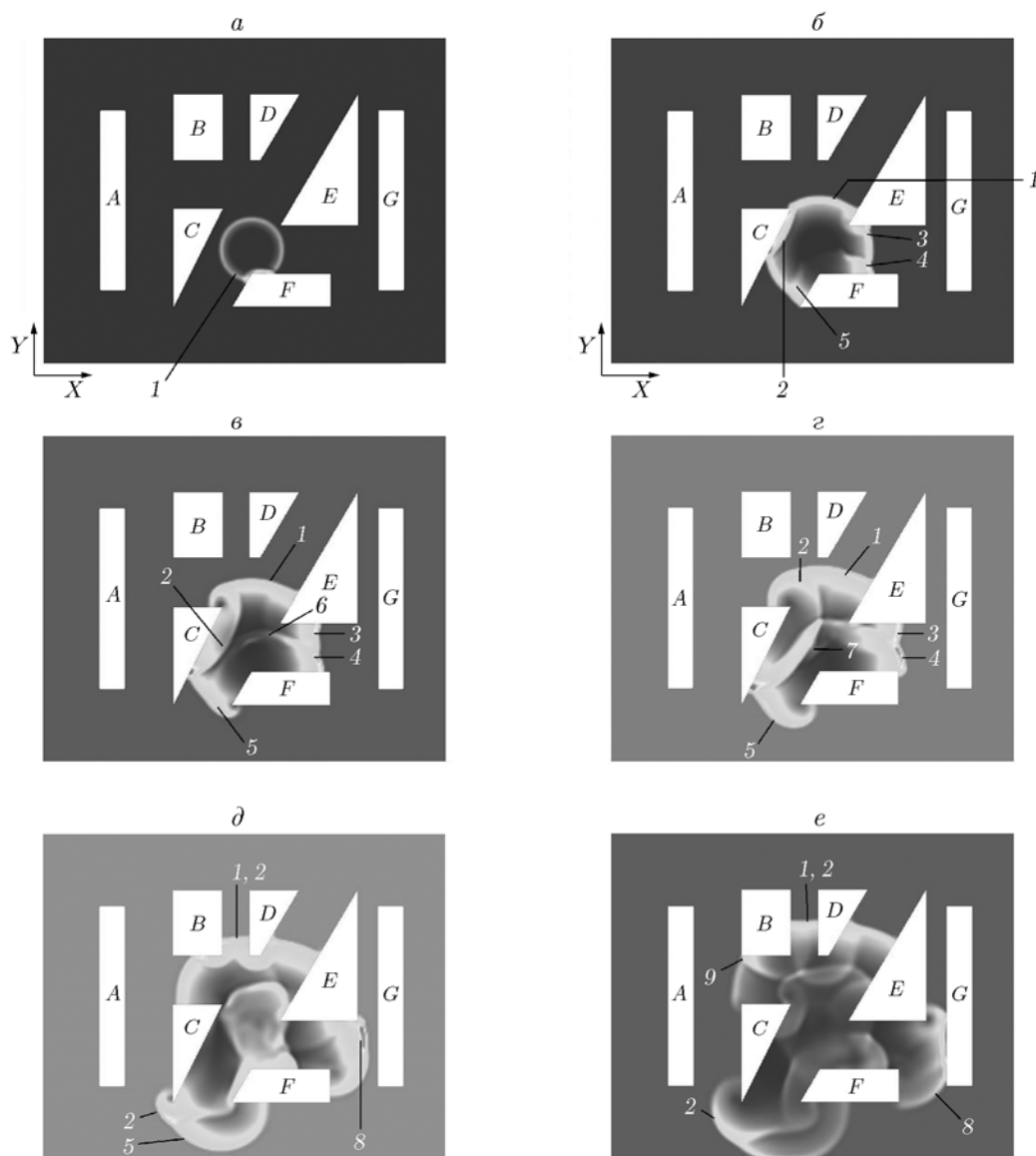


Рис. 7. Мгновенные поля статического давления в моменты времени 0.1 (а), 0.2 (б), 0.3 (в), 0.4 (г), 0.7 (д), 0.9 мс (е)

ты которых движутся по направлению к эпицентру взрыва (рис. 7,д). Сформировавшийся вследствие взаимодействия УВ 3 и УВ 4 фронт УВ 8 движется по направлению к стенке призмы  $G$ .

С другой стороны, УВ 2 после отражения от поверхности призмы  $C$  взаимодействует с УВ 5. В эпицентре взрыва возникает сложная ударно-волновая структура, образовавшаяся в результате взаимодействия УВ 7 и УВ, сформировавшихся из тройных точек 3 и 4. В момент времени  $t = 0.9$  мс ударно-волновая структура 1, 2 приходит в точку  $T1$  (рис. 7,е)

на призме  $B$ . УВ 8 приходит на стенку призмы  $G$  и отражается от нее регулярным образом (рис. 7,е). В это же время УВ 9, сформировавшаяся в результате нерегулярного отражения УВ 2 от стенки призмы  $B$ , движется по направлению к стенке призмы  $A$ .

Если рассмотреть далее мгновенное распределение относительного статического давления в момент времени  $t \approx 1.3$  мс, оказывается, что при отражении от стенки призмы  $G$  УВ 8 образуется отраженная УВ, которая распространяется к эпицентру взрыва, где взаимодействует с более слабой вторичной УВ. УВ 8

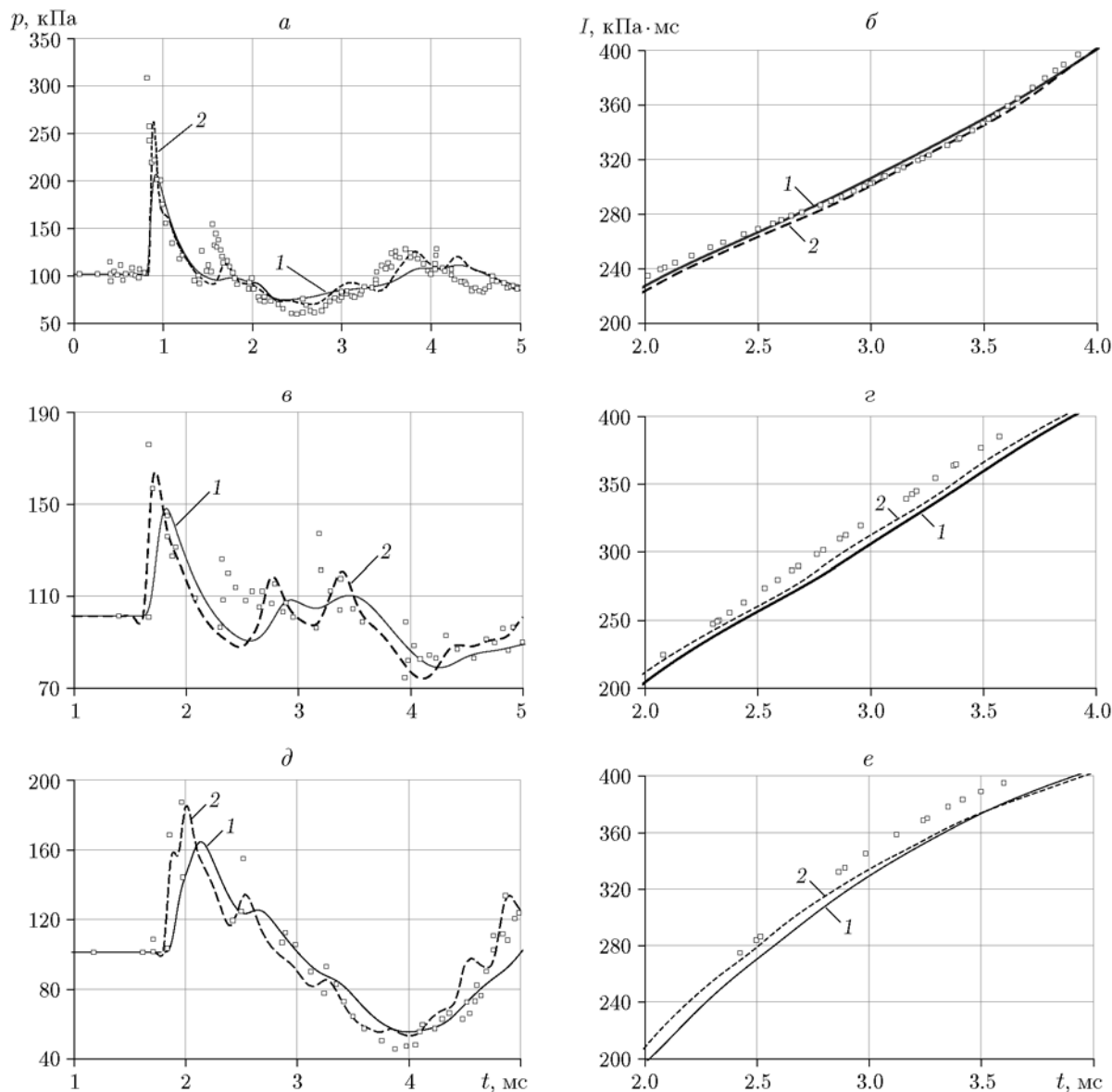


Рис. 8. Зависимости статического давления ( $a$ ,  $в$ ,  $д$ ) и эффективного импульса ( $б$ ,  $г$ ,  $e$ ) в точках Т1 ( $a$ ,  $б$ ), Т11 ( $в$ ,  $г$ ) и Т21 ( $д$ ,  $e$ ), полученные в эксперименте (символы) и рассчитанные по схеме Годунова (1) и методу FCT (2)

распространяется между призмами  $E$  и  $G$ , многократно отражаясь от их стенок. Это обуславливает пики статического давления в точке Т21, расположенной на стенке призмы  $G$ , в моменты времени  $t = 2$  и  $2.5$  мс. При этом за УВ 8 в этой зоне формируется зона разрежения с падением давления ниже 1 атм (до 43 кПа).

В момент времени  $t = 1.7$  мс УВ 9 приходит в точку Т11 на стенке призмы  $A$ , что сопровождается увеличением избыточного давления в этой точке до 165 кПа.

Серия небольших локальных пиков в точ-

ке Т1 связана с приходом слабых вторичных УВ, возникших в результате интерференции более слабой вторичной УВ и отраженных от стенок призм  $B$  и  $D$  слабых УВ. На более поздних этапах времени структура течения характеризуется многократными переотражениями, дифракцией и интерференцией УВ, что приводит к возникновению локальных пиков нагрузки на стенки призм и ряда локальных зон разрежения за фронтами УВ.

Сравнение результатов расчетов и экспериментов [19] по зависимостям статического

давления (см. рис. 8, *a, в, д*) и эффективного импульса (см. рис. 8, *б, г, е*) от времени в точках T1, T11, T21, расположенных на стенках призм B, A и G соответственно, показало, что расчеты по обеим схемам — FCT и Годунова — качественно воспроизводят изменение ударно-волновой нагрузки на стенки призм, однако схема коррекции потоков, как и в предыдущих расчетах, существенно лучше предсказывает пиковые значения нагрузки. Для всех точек численные расчеты хорошо предсказывают фазу разрежения за фронтом УВ.

Максимальные значения избыточного давления, полученные по схемам Годунова и FCT в точке T1, составляют 200 и 260 кПа соответственно (см. рис. 8, *a*). Максимальное избыточное давление в эксперименте в этой точке равно примерно 300 кПа.

Фаза разрежения носит продолжительный характер: в точке T1 около 1.5 мс, в точке T21 около 1.7 мс. В точке T21 амплитуда давления в отрицательной фазе существенна ( $\approx 60$  кПа) и сопоставима с пиковой нагрузкой ( $\approx 80$  кПа), связанной с приходом УВ 8 на стенку здания G. Наличие фазы разрежения с существенно более низкими давлениями относительно 1 атм является неблагоприятным для строительного объекта и в ряде случаев может привести к «выталкиванию» оконных и дверных проемов, срыву и разрушению кровли, опор.

Импульсная нагрузка, приходящаяся на стенки призм в рассматриваемых точках, показана на рис. 8, *б, г, е*. Интервалы эффективного действия на стенки призм A, B и G включают в себя фазы сжатия и разрежения волн, приходящих на стенки.

Таким образом, представленные результаты расчетов позволяют подробно проанализировать сложную волновую структуру течения, образованную в результате детонации заряда конденсированного ВВ. Результаты расчетов удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными, что дает основание для использования описанных выше методов математического моделирования для прогнозирования ударно-волновых нагрузок на стенки зданий и сооружений в условиях плотной городской застройки.

Сопоставление расчетных данных с  $p$ - $I$ -диаграммой (рис. 9) показало, что графики  $p(I)$ , построенные для точек T1 (задача 1) и T21 (задача 2), захватывают области, соответствующие слабым и средним разрушениям кон-

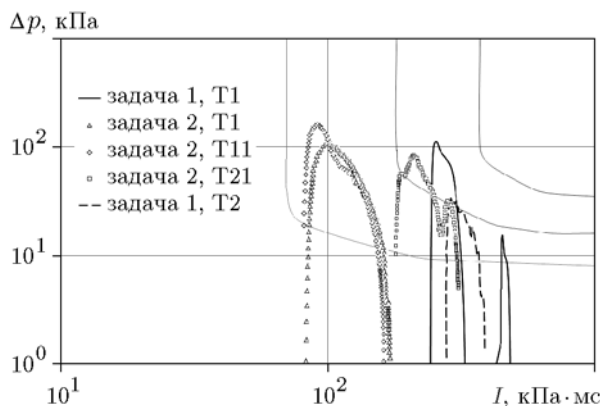


Рис. 9.  $p$ - $I$ -диаграмма нагрузок в различных точках

струкции. Профили, построенные для остальных точек, захватывают только область слабых разрушений.

## ВЫВОДЫ

В работе представлена физико-математическая модель в трехмерном эйлеровом приближении механики сплошных сред. Математическая технология тестирована в рамках пакета прикладных программ AUTODYN коммерческого программного комплекса ANSYS для решения задач о взрывном воздействии на окружающую среду, моделирующую городскую застройку.

В задачах о воздействии взрывных волн на одиночную призму и их совокупность выявлена газодинамическая структура интерференционных волн, и проведено сопоставление полученных численно нагрузок на призмы с данными замеров, показавшее неплохое воспроизведение первого пика давления и некоторую погрешность в предсказании вторичных пиков.

Эмпирическая функция CONWEP не воспроизводит «отрицательную» фазу воздействия, не учитывает эффекты затенения и некорректно предсказывает время прихода ударной волны на подветренную сторону призмы и вторые пиковые значения ударно-волновой нагрузки.

В целом можно заключить, что современные программные средства компьютерной инженерии достаточно точно предсказывают сложную ударно-волновую картину, реализующуюся в окрестности расположенных на подложке объектов. Сопоставление результатов расчета с  $p$ - $I$ -диаграммой (рис. 1, *б*) позволя-

ет определить области возможных разрушений объектов.

В качестве недостатков используемого модуля AUTODYN можно отметить отсутствие инструментов динамической адаптации расчетной сетки, что затрудняет точность описания деталей сложного течения и снижает точность предсказания вторичных пиков нагрузки.

## ЛИТЕРАТУРА

- СП 20.13330.2011. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* (утв. Приказом Минрегиона РФ от 27.12.2010 № 787): введ. 2011-05-20 // КонсультантПлюс. ВерсияПроф [Электронный ресурс].
- СП 56.13330.2011. Свод правил. Производственные здания. Актуализированная редакция СНиП 31-03-2001 (утв. Приказом Минрегиона РФ от 30.12.2010 № 850): введ. 2011-05-20 // КонсультантПлюс. ВерсияПроф [Электронный ресурс].
- Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах»: приказ Ростехнадзора от 16.12.2013 № 605 (зарегистрировано в Минюсте России 01.04.2014 № 31796) // КонсультантПлюс. ВерсияПроф [Электронный ресурс].
- ТР ТС 012/2011. Технический регламент Таможенного союза. О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах: решение Комиссии Таможенного союза от 18.10.2011 № 825 (ред. от 13.05.2014) // КонсультантПлюс. ВерсияПроф [Электронный ресурс].
- Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: учебное пособие в 3 кн. / под ред. К. Е. Кочеткова, В. А. Котляревского, А. В. Забегаева. — М.: Изд-во АСВ, 1995. — Кн. 1.
- ENV 1991: Eurocode 1: Basis Design and Action on Structures. Pt 2-4: Wind Action. — CEN, 1994.
- Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, TM 5-1300. — U. S. Departments of the Army, Navy, and Air Force, 1990.
- The Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects (DAHS CWE). — 1998.
- Unified Facility Criteria (UFC), Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. — U. S. Army Corps of Engineering Command. Air Force Civil Engineer Support Agency, UFC 3-340-02, 5, December 2008.
- Вальгер С. А., Данилов М. Н., Федорова Н. Н., Федоров А. В. Сравнение данных моделирования ударно-волнового воздействия на сооружения с использованием ПК ANSYS AUTODYN и LS-DYNA // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 9. — С. 85–96.
- Вальгер С. А., Федорова Н. Н., Федоров А. В. Моделирование ударно-волновой нагрузки от взрыва на отдельно стоящую призму прямоугольного сечения и комплекс призм, имитирующих городскую застройку // Динамика многофазных сред: тр. XIV Всерос. семинара, приуроченного к 75-летию акад. РАН В. М. Фомина. — Новосибирск: Автограф, 2015. — С. 23–26.
- Захарова Ю. В., Федорова Н. Н. Моделирование взрыва в ограниченном пространстве с помощью ANSYS AUTODYN // Динамика многофазных сред: тр. XIV Всерос. семинара, приуроченного к 75-летию акад. РАН В. М. Фомина. — Новосибирск: Автограф, 2015. — С. 174–176.
- Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкевич, В. П. Чельшев, Б. И. Шехтер. — М.: Наука, 1975.
- Покровский Г. И. Взрыв. — 3-е изд. — М.: Недра, 1973.
- Ngo T., Mendis P., Gupta A., Ramsay J. Blast loading and blast effects on structures — an overview // Electron. J. Structur. Eng. Spec. Iss.: Loading on Structures. — 2007. — P. 76–91.
- Hyde D. User's Guide for Microcomputer Programs CONWEP and FUNPRO — Applications of TM 5-855-1. — U. S. Army Engineer Waterways Experimental Station, Vicksburg, 1988.
- Remennikov A. M. A review of methods for predicting bomb blast effects on buildings // J. of Battlefield Technol. — 2003. — V. 6, N 3. — P. 5–10.
- Rose T. A. An Approach to the Evaluation of Blast Loads on Finite and Semi-Infinite Structures: PhD Thesis / Engineering Systems Department, Cranfield Univ., Royal Military College of Science. — February, 2001.
- Brittle M. A. Blast Propagation in a Geometrically Complex Environment: MSc Dissertation / Cranfield Univ., Defence College of Management and Technology, Defence Academy of the UK. — Shrivenham, Swindon, UK, July 2004.
- Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов, А. Н. Крайко, Г. П. Прокопов. — М.: Наука, 1976.
- Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme V. A second-order sequel to Godunov's method // J. Comput. Phys. — 1979. — V. 32, iss. 1. — P. 101–136.
- Zalesak S. T. Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids // J. Comput. Phys. — 1979. — V. 31, iss. 3. — P. 335–362.