

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК [624.191:622.235]:625.42

В. И. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>2</sup>, А. Л. ТЮТЬКИН<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Публичное акционерное общество «Киевметрострой», ул. Прорезная, 8, Киев, Украина, 01601, тел. +38 (044) 455 23 00, эл. почта petrenko@metrobud.kiev.ua

<sup>2</sup> Кафедра «Тоннели, основания и фундаменты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, эл. почта petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>3\*</sup> Кафедра «Тоннели, основания и фундаменты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, эл. почта tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

### ОБОСНОВАНИЕ И ОБЩИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ПРОБЛЕМЫ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

**Цель.** Метрополитен является транспортной системой, которая наиболее подвержена внутренним воздействиям, негативно влияющим на ее работу. Одним из таких воздействий является взрывное, причем проанализированная история взрывов в метрополитене свидетельствует о серьезной проблеме безопасности. Решение данной проблемы заключается в минимизации причины, вызывающей аварийные и катастрофические ситуации. **Методика.** Для решения проблемы взрывобезопасности и взрывозащиты объектов метрополитена предложены основы и методологические разработки динамического расчета конструкции на первом этапе. **Результаты.** Определены основные параметры ударных и ударно-воздушных волн при взрывах, которые воздействуют на внутренние и несущие конструкции метрополитена. Выяснено, что в случае падения давления и ослабления значения импульса динамический расчет следует проводить только на полное давление в фазе сжатия. В случае, когда действие полного давления и импульса равнозначно, определение нагрузки усложнено. Однако полученный график зависимости импульса давления ударно-воздушной волны в фазе сжатия от расстояния и массы заряда позволяет получить значения нагрузки для различных случаев. Используя положение динамических задач об анализе деформированного состояния (расчет по второму предельному состоянию) на базе метода конечных элементов можно использовать энергетический подход для определения состояния конструкции при взрывном воздействии. Предложены формулы в тензорной форме для практического определения энергии деформации или разрушения в точке, а также формулы энергии для ударных и ударно-воздушных волн. **Научная новизна.** Совместное решение предложенных уравнений энергетического подхода дает возможность оценить степень деформирования или разрушения конструкции подземного сооружения. **Практическая значимость.** Применение энергетического подхода к решению динамической задачи взрыва и определения его действия на конструкцию подземного сооружения позволяет вычислять энергию деформирования конструкций при динамических воздействиях.

**Ключевые слова:** метрополитен; взрыв; безопасность; ударная волна; ударно-воздушная волна; динамический расчет; энергетический подход

#### Введение

Анализ генезиса такой актуальной проблемы, как освоение подземного пространства, дает возможность сделать вывод о формировании общих тенденций, определяющих пути решения теоретических и практических вопросов в этой области. Формированию этих тенденций способствует общая глобализация и интеграция подходов при разработке основных принципов решения актуальных задач подземного строи-

тельства. Одной из этих тенденций является обеспечение безопасности подземных объектов. В концепцию безопасности входят составными частями безопасность строительства, эксплуатации и особый вид безопасности, определяемый некоторыми авторами, как «живучесть объекта в экстремальных условиях» [1].

Обозначив проблему безопасности, как составную, следует отметить, что, так как ее составляющие имеют различный характер, соот-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ветственно имеют разные пути решения. Безопасность строительства является, наряду с безопасностью эксплуатации объектов метрополитена, наиболее разработанной областью [2, 3]. Следует отметить, что причинами возникновения аварийных и катастрофических ситуаций при строительстве является неточное выполнение технологических операций, что напрямую связано с человеческим фактором, а также объективные причины, которые связаны с человеческой деятельностью опосредованно [3]. Во множество этих причин входит неверная интерпретация условий строительства и неадекватная реальным условиям разработка комплекса инженерных решений [4], выбор конструкции подземного сооружения и неверная технология его сооружения. Непонимание этой причины ведет к определению инженерной деятельности, как вмешательства, то есть неадекватные реальности решения не могут быть верными в силу того, что являются чужеродными ей [3, 5]. Следствием данной причины является и ухудшение условий эксплуатации, то есть неучет истории строительства ведет к тому, что выработка рациональных предложений часто становится невозможной.

### Цель

Решение проблемы безопасности в случае действия этих двух компонент заключается в разных подходах. Действие человеческого фактора, как причины аварийных и катастрофических ситуаций в строительстве и эксплуатации, минимизируется за счет возрастания уровня замены человека ЭВМ; в тех случаях, когда это невозможно, т.е. действие человека строго регламентируется нормативными документами, что является попыткой исключить ненамеренные ошибки в строительстве и эксплуатации. Действие объективных причин минимизируется за счет научно обоснованных решений, то есть накопление научного знания является единственно верным путем для выработки адекватного реальности подхода. Из приведенных аналитических построений видно, что основной концепцией решения проблемы безопасности является минимизация причин, вызывающих аварийные и катастрофические ситуации, так как полное устранение этих причин практически невозможно.

Следует также отметить, что причинами аварийных и катастрофических ситуаций является наличие ошибок в разработке тех или иных решений, причем их характер связан только с человеком. Отдельной причиной является незнание, в том числе и недостаточность научных теоретических и практических разработок, что также можно считать разновидностью ошибки. Таким образом, минимизация ошибок инженерной человеческой деятельности является решением проблемы безопасности объектов метрополитена, как, впрочем, и других инженерных сооружений. Но если сущность ошибки, а имеется в виду именно непреднамеренная ошибка, носит пассивный характер, то причина, вызывающая аварии и катастрофы в особых случаях, является активной. Эта активность непосредственно относится к человеческой деятельности, связанной с разрушением.

### Методика

Ниже приведен выборочный анализ террористических актов с использованием взрывчатых веществ в метрополитене.

8 января 1977 г. – взрыв самодельного устройства в Московском метрополитене на перегоне «Измайловская» – «Первомайская» (Арбатско-Покровский радиус). 7 человек погибли и свыше 40 получили ранения.

19 марта 1994 г. – взрыв бомбы в головном вагоне поезда на станции «20 января» Бакинского метрополитена. 12 человек погибли, 53 получили ранения.

25 июля 1995 г. – взрыв на станции «Сен-Мишель» (Saint-Michel) Парижского метрополитена (газовый баллон, начиненный металлической стружкой). 7 человек погибли и 117 раненых.

17 октября 1995 г. – взрыв в вагоне Парижского метрополитена, в перегонном тоннеле между станциями «Сен-Мишель» (Saint-Michel) и «Орсе» (Orse). Около 30 человек получили ранения.

11 июня 1996 г. – взрыв безоболочного взрывного устройства, эквивалентного 500 граммам тротила (по другой версии – 400 грамм) на Серпуховской линии Московского метрополитена 4 человека погибли, 15 получили серьезные ранения.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

8 августа 2000 г. – взрыв взрывного устройства мощностью от 400 до 800 граммов тротила в подземном переходе у станции метрополитена «Пушкинская» в центре Москвы. 13 человек погибли, более 90 получили ранения.

6 февраля 2004 г. – взрыв на Замоскворецкой линии Московского метрополитена на перегоне между станциями «Павелецкая» и «Автозаводская» (мощность взрывного устройства – 2 кг тротила; по другим данным – 5 кг). Сразу после взрыва в тоннеле начался пожар, которому была присвоена высшая категория сложности. 39 человек погибли, 134 получили ранения.

11 марта 2004 г. – взрывы в Мадридском метро. 191 человек погиб, более 1800 человек получили ранения.

31 августа 2004 г. – взрыв у станции метрополитена «Рижская» (мощность взрывного безоболочного устройства – 1 кг тротила, начинка из болтов). 8 человек погибли, 10 получили ранения.

7 июля 2005 г. – серия терактов в Лондонском метрополитене. Всего погибли 56 человека, 700 получили ранения.

Результаты анализа террористических актов на объектах метрополитена свидетельствуют об актуальности разработки систем их защиты, которые заключаются в комплексном подходе к безопасности этих объектов. Комплексность подхода заключается в разработке архитектурно-планировочных решений, устройств глобальной и локальной взрывозащиты и систем изоляции и уничтожения взрывчатых устройств.

Следует отметить, что первым этапом разработки взрывозащиты объектов метрополитена является разработка и расчет конструкции. Достаточно сложная ситуация складывается в разработке конструкций станций, так как выработанные на основе долгого применения, а также нормирование архитектурных и планировочных решений, не дает возможности кардинально, на глобальном уровне, создать взрывозащитную конструкцию станции. Также основные проблемы взрывозащиты заключаются в теоретическом расчете данных конструкций, что, в первую очередь, связано со сложностью проблемы, а, во вторую, со специфическим направлением решения ранее поставленных задач.

Данная специфика заключается в том, что существующие расчеты взрывозащиты строительных конструкций проводились на внешний источник взрыва, то есть взрыв изнутри прак-

тически не рассматривался из-за отсутствия таких случаев. Это еще раз доказывает, что разработка методов расчета и инженерных решений для данных случаев весьма актуальна при возрастании масс взрывных устройств и частоте возникновения терактов.

Развитие методов расчета на взрывные воздействия в случае терактов также дает возможность прогнозирования возможных последствий при разнообразии террористических сценариев, что позволит разработать глобальные и локальные системы взрывозащиты, не связанные с изменением конструктивных решений подземных объектов. Помимо прогноза последствий теракта с расчетом зон поражения, разлета осколков, возможных повреждений с ранжированием степени, можно прогнозировать и расположение зон повреждения внутренних и несущих конструкций [3, 4, 6], а также дальнейшего поведения системы «крепление подземного объекта–окружающий массив», так как динамическое воздействие может повлиять на свойства системы, долговременное изменение которых также может привести к аварийной или катастрофической ситуации. Особым вопросом взрывозащиты является разработка систем изоляции и уничтожения взрывных устройств, причем его решение позволит повысить взрывозащиту метрополитена.

### Результаты

Результаты действия взрывной нагрузки, имеющей импульсный характер, на конструкции подземных сооружений устанавливаются решением уравнений динамики сооружений, в которых учитываются инерционные (масса конструкции и ее элементов), жесткостные (жесткость конструкции, связанная с ее геометрическими размерами и свойствами материала) и прочностные параметры. Известно, что ответ сооружения (реакция-отклик конструкции сооружения) на динамические взрывные воздействия связан с его длительностью и временем релаксации конструкции, которое практически можно принимать равным периоду основного тона (первой формы) собственных колебаний.

Максимальное давление описывается зависимостью, определяемой на контакте двух сред «заряд ВВ – воздух» или плоскости Чепмена-Жуге [7], резко падает с расстоянием. На радиусе, равном некоторому пороговому значению

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

давления, наибольшее воздействие от взрыва на конструкцию определяется только импульсом, причем для практических расчетов применяется первый интеграл, так как более разрушительное действие взрыва определяется в фазе сжатия [7, 8].

Падение давления в зависимости от расстояния ослабляет значение импульса, а в некоторых случаях, например, при взрыве газопаровоздушных смесей, его значение незначительно. В таких случаях динамический расчет следует проводить только на полное давление в фазе сжатия. Более сложным случаем нагрузки является зона, в которой действие и полного давления и импульса равнозначно. Для оценки влияния взрывной нагрузки используются параметрические законы, которые представляют собой семейство кривых, учитывая которые можно оценивать степень изменения параметров взрыва по координатам (рис. 1) [3, 8].

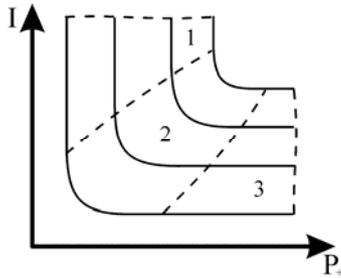


Рис. 1. Диаграмма поражения объектов ударной волной

Из рис. 1. видно, что в зоне 1 влияние описывается только импульсом; в зоне 2 – и давлением, и импульсом; в зоне 3 – только давлением. Функционально разграничение этих зон определяется отношением  $\tau_+/T$ , где  $T$  – период основного тона (первой формы) колебаний конструкции,  $\tau_+$  – время импульса сжатия.

В справочной и научной литературе данное отношение нормируется значением равным 1, то есть при  $\tau_+/T \gg 1$  влияние на конструкцию определяется давлением, при  $\tau_+/T \ll 1$  – импульсом. Следует отметить, что нормировочное значение этого отношения в некоторых работах изменено: в работе [7] оно равно 0,375; в работе [8] – 0,25.

Это обусловлено различным пониманием взрывной нагрузки, как ударного или импульсного воздействия. Сравнимое время, равное максимальному периоду  $T$ , взято по причине того, что при динамическом развитии напряжений и перемещений во времени, при нем достигают пиковых значений [9].

Проведя анализ изменения давления  $P_+$ , время импульса сжатия  $\tau_+$  и импульса  $I$  в зависимости от массы заряда  $m$  и расстояния до точки  $R$  (рис. 2), можно отметить, что характер кривых несколько иной, чем на приведенном выше рисунке (см. рис. 1).

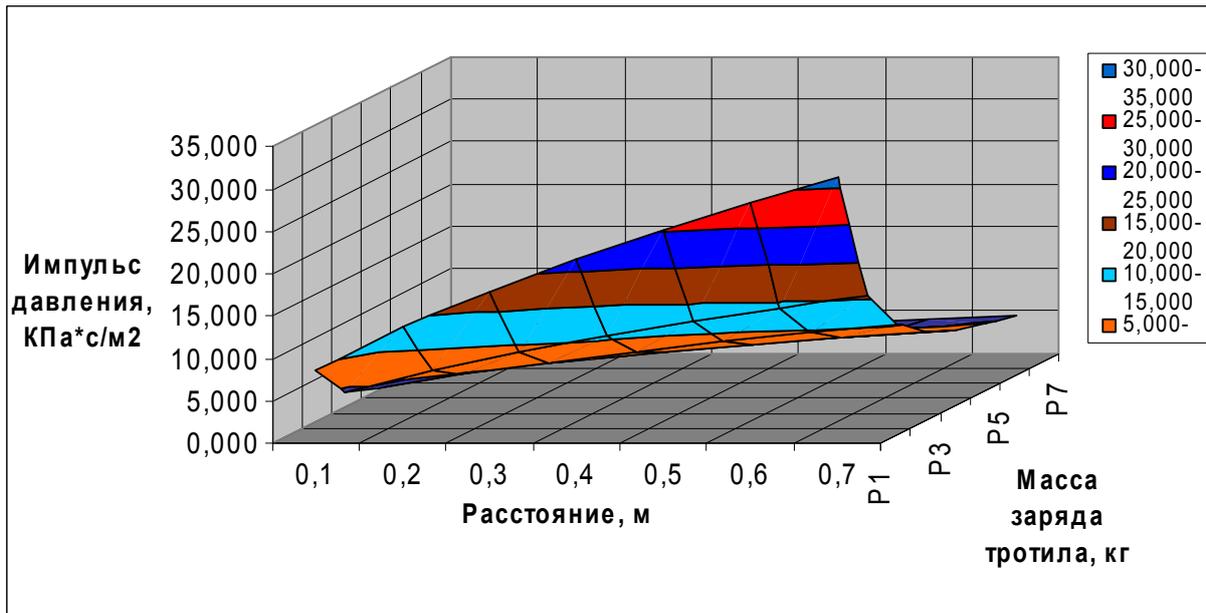


Рис. 2. Зависимость импульса давления УВВ в фазе сжатия от расстояния и массы заряда

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Это обусловлено тем, что функции на рис. 1 построены для постоянных  $m$  и  $R$ , то есть по асимптотическим значениям  $I$  и  $P_+$ , которые соединялись переходной кривой. Графики на рис. 2, предложенные авторами, более информативны, так как показывают изменение функций для постоянных масс зарядов ВВ с изменяющимся расстоянием, полученных по формулам академика М. А. Садовского [7].

Но, даже зная основные параметры ударно-взрывной или ударно-воздушной волны, динамический расчет сложных конструкций на импульсное воздействие остается вызывающим достаточные сложности. Причиной этого является применение очень упрощенных расчетных схем конструкций, которые не отражают особенности их работы, например, плоских стержневых схем с сосредоточенными массами вместо пространственных схем с объемными элементами [10].

Некоторую сложность также представляет процесс анализа полученных результатов, так как специфика динамических задач заключается в исследовании действия нагрузок, изменяющихся во времени. Таким образом, анализ напряженно-деформированного состояния конструкции сводится к анализу только деформированного состояния, как имеющего наиболее значительный массив информации, заключающийся в наборе форм колебаний с известными частотами и перемещениями. Анализ пиковых значений напряжений в динамических расчетах по известным деформациям встречается нечасто, так как поиск напряжений по известным деформациям на основе аналитического подхода затруднен. Но также известно, что с появлением метода конечных элементов стало возможным проводить не только модальный анализ, но и решать динамические задачи на ударные, импульсные и вибрационные воздействия [9, 11] с получением не только форм с их частотами и перемещениями, но и пиковых значений напряжений.

Используя положение динамических задач об анализе деформированного состояния (расчет по второму предельному состоянию) на базе МКЭ можно использовать энергетический подход для определения состояния конструкции при взрывном воздействии. Применение этого подхода позволяет более полно исследовать состояние конструкций и заключается в

сравнении энергии взрыва и энергии деформирования конструкции. Условие энергетического подхода записывается следующим образом: где

$$\left. \begin{aligned} E &> E_{раз}, \text{ конструкция разрушается} \\ E &= E_{раз}, \text{ конструкция в предельном состоянии} \\ E &< E_{раз}, \text{ конструкция не разрушается} \end{aligned} \right\} (1)$$

Соответственно, чтобы реализовать выражение (1) следует знать значение энергии (Дж) в каждой из частей. Известно, что энергия взрыва находится из условия [7]:

$$E = Qq, \quad (2)$$

где  $Q$  – теплота взрыва (Дж/кг);  $q$  – масса заряда, кг.

Работа взрыва распределяется на разрушение, перемещение среды и другие ее виды и ее полное значение  $A$  (Дж) по П. М. Чельцову [7] составляет часть полной энергии взрыва

$$A = Q \left[ 1 - \left( \frac{P_{max}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (3)$$

где  $P_{max}$  – максимальное давление в плоскости Чепмена–Жуге,  $P_0$  – атмосферное давление;  $k$  – показатель адиабаты продуктов детонации ( $k=3$ ).

Теплота взрыва, то есть теплота превращения ВВ в продукты взрыва (Дж/моль), определяется из разности теплот образования продуктов детонации  $Q_{nd}$  и исходных ВВ  $Q_{BB}$  [7]:

$$Q = Q_{nd} - Q_{BB}. \quad (4)$$

Энергия открытого заряда переходит в энергию ударной воздушной волны и определяется по К. П. Станюковичу [12, 13]:

$$E_{VBB} = Qq \left( 1 - \frac{P_0 V_\infty}{(k-1)\rho_{BB} Q V_3} \right), \quad (5)$$

где  $V_\infty$  – предельный объем расширения продуктов детонации;  $V_3$  – начальный объем заряда ВВ.

Из формулы (5) следует, что  $E_{VBB} = 0,7E$ , то есть при взрыве воздушного заряда в УВВ переходит 70 % общей энергии взрыва [13].

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Энергию деформации или разрушения в точке можно записать в тензорной форме:

$$E_{\text{деф}} = \sum_{i=1}^n |\sigma| |S|, \quad (6)$$

$$E_{\text{раз}} = \sum_{i=1}^n |\bar{\sigma}| |\bar{S}|, \quad (7)$$

где  $|\sigma|$  и  $|\bar{\sigma}|$  – соответственно тензоры главных напряжений в точке в некоторый момент времени и в момент разрушения;  $|S|$  и  $|\bar{S}|$  – соответственно тензоры главных перемещений (совпадающих по направлению с главными напряжениями) в некоторый момент времени и в момент разрушения.

#### Научная новизна и практическая значимость

Совместное решение уравнений (1) и (6) или (2) и (7) дает возможность оценить степень деформирования или разрушения конструкции подземного сооружения. Следует отметить, что сложность в проведении такого решения состоит не в отыскании двух частей уравнения (1), а в специфике их вычисления. Наиболее просто можно вычислить значение энергии деформирования  $E_{\text{деф}}$  по формуле (6) для статической или монотонно изменяющейся во времени нагрузки. Такие вычисления достаточно просты при использовании расчетных комплексов на основе МКЭ, в которых реализованы алгоритмы поиска энергии деформирования или удельной энергии модели (энергетический постпроцессоринг). Но в случае динамических нагрузок, такие вычисления очень сложны и не реализуются программно, так как значение  $E_{\text{деф}}$  не константно, а изменяется во времени, определяемом длительностью динамического воздействия. Задача вычисления  $E_{\text{деф}}$  для случая подземных сооружений значительно усложняется за счет того, что суммарная энергия деформирования системы складывается из компонент энергии деформирования от статической и динамической нагрузок. Решение данной задачи в случае динамических нагрузок может быть получено лишь для квазистатической постановки, то есть тогда, когда расчет ведется на полное давление.

Также достаточную сложность для вычисления составляет определение значений энергии взрыва как функции по координате. Этот вопрос очень важен, так как известно, что при удалении от источника взрыва его параметры (полное давление на фронте, импульс, скорость движения фронта, энергия) уменьшается при постоянном значении энтропии (изоэнтропический адиабатный процесс) [7]. Поэтому определение энергии взрыва возможно лишь в частных случаях, а именно для накладного заряда по формуле (3) и воздушного заряда на расстоянии (8...15)  $R$  по формуле (5), где  $R$  – радиус заряда. Расстояние во втором частном случае получено на основе опытов Ю. А. Юрманова [13] и соответствует расстоянию отрыва ударной воздушной волны от центра взрыва.

#### Выводы

Основным выводом аналитических построений разработки проблемы взрывобезопасности и взрывозащиты объектов метрополитенов являются намеченные пути его решения. Причем проблема является актуальной и предложенные решения, заключающиеся в комплексном подходе к решению проблемы, являются научно обоснованными и имеют практическую и научную ценность. Намеченные пути решения обеспечивают в дальнейшем более детальную разработку данной проблемы с позиции теоретических исследований и получения практических результатов обеспечения взрывобезопасности объектов метрополитена.

Из изложенного можно также сделать вывод, что применение энергетического подхода к решению динамической задачи взрыва и определения его действия на конструкцию подземного сооружения позволяет вычислять энергии деформирования конструкций при динамических воздействиях.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федунец, Б. И. Строительство крупногабаритных тоннелей в мегаполисе [Текст] / Б. И. Федунец, Е. В. Петренко // Метро и тоннели. – 2002. – № 2. – С. 23-25.
2. Фролов, Ю. С. Метрополитены. Учебник для вузов [Текст] / Ю. С. Фролов, Д. М. Голицынский, А. П. Ледаев. – Москва : Желдориздат, 2001. – 528 с.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

3. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий [Текст] / В. А. Котляревский, А. В. Виноградов, С. В. Еремин и др. – Москва : Изд-во Ассоциации строительных ВУЗов, 1996. – Кн. 2. – 384 с.
4. Fire R. H. An engineering tool to calculate heat release rates of multiple objects in underground structures. *Safety Journal*, 2011, Vol. 71, pp. 194-203. Access Mode : DOI : 10.1016/j.firesaf.2011.02.001
5. Fire R. H. Analysis of methodologies for calculating the heat release rates of mining vehicle fires in underground mines. *Safety Journal*, 2015, Vol. 71, pp. 194-216. Access Mode : DOI : 10.1016/j.firesaf.2014.11.008.
6. Evkin A. Yu., Kalamkarov A. L. Analysis of large deflection equilibrium states of composite shells of revolution. Pt.1. General model and singular perturbation analysis. *Int. J. Solids and Struct.* 2001. 38, № 50-51, pp. 8961-8974. Acces Mode : DOI : 10.1016/S0020-7683(01)00184-6
7. Физика взрыва [Текст] / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. – Москва : Наука, 1975. – 704 с.
8. Попов, Н. Н. Расчет конструкций на динамические специальные загрузки [Текст] : Учебное пособие для вузов / Н. Н. Попов, Б. С. Расторгуев, А. В. Забегаев. – Москва : Высшая школа, 1992. – 319 с.
9. Кандидов, В. П. Метод конечных элементов в задачах динамики [Текст] / В. П. Кандидов, С. С. Чесноков, В. А. Выслоух. – Москва : Изд-во Московского университета, 1980. – 165 с.
10. Тютькін, О. Л. Розробка теоретичних основ модифікованого методу розрахунку тунелів колового окреслення [Текст] / О. Л. Тютькін, В. А. Мірошник // Мости та тунелі : теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 2. – С. 96-100.
11. Петренко, В. Д. Обзор аналитических и экспериментальных методов исследования взаимодействия массива и крепи [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин, В. И. Петренко // Мости та тунелі : теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 1. – С. 75-81.
12. Савенко, С. К. Ударные воздушные волны в подземных выработках [Текст] / С. К. Савенко, А. А. Гурин, П. С. Малый. – Москва : Недра, 1973. – 152 с.
13. Юрманов, Ю. А. Защита сооружений от действия ударной воздушной волны [Текст] / Ю. А. Юрманов. – Зап. ЛПИ, 1966. – Т. 52. – Вип. 1. – С. 117-121.

В. І. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>2</sup>, О. Л. ТЮТЬКІН<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Публичне акціонерне товариство «Київметробуд», вул. Прорізна, 8, Київ, Україна, 01601, тел. +38 (044) 455 23 00, ел. пошта petrenko@metrobud.kiev.ua

<sup>2</sup> Кафедра «Тунелі, основи та фундаменти», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, ел. пошта petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>3\*</sup> Кафедра «Тунелі, основи та фундаменти», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

## ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ЗАГАЛЬНІ МЕТОДОЛОГІЧНІ РОЗРОБКИ ПРОБЛЕМИ ВИБУХОБЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ

**Мета.** Метрополітен є транспортною системою, яка найбільш схильна до внутрішніх дій, які негативно впливають на її роботу. Однією з таких дій є вибух, причому проаналізована історія вибухів в метрополітені свідчить про серйозну проблему безпеки. Рішення даної проблеми полягає в мінімізації причини, що викликає аварійні і катастрофічні ситуації. **Методика.** Для вирішення проблеми вибухобезпеки і вибухозахисту об'єктів метрополітену запропоновані основи і методологічні розробки динамічного розрахунку конструкції на першому етапі. **Результати.** Визначені основні параметри ударних і ударно-повітряних хвиль при вибухах, які впливають на внутрішні і несучі конструкції метрополітену. З'ясовано, що у разі падіння тиск і ослаблення значення імпульсу динамічний розрахунок слід проводити тільки на повний тиск у фазі стиску. У разі, коли дія повного тиску і імпульсу рівнозначна, визначення навантаження ускладнене. Проте одержаний графік залежності імпульсу тиску ударно-повітряної хвилі у фазі стиснення від відстані і маси заряду дозволяє набути значення навантаження для різних випадків. Використовуючи положення динамічних задач про аналіз деформованого стану (розрахунок за другим граничним станом) на базі методу скінченних елементів можна використовувати енергетичний підхід для визначення стану конструкції при вибуховій дії. Запропоновані формули в тензорній формі для практичного визначення енергії деформації або руйнування в точці, а також формули енергії для ударних і ударно-повітряних хвиль. **Наукова новизна.** Сумісне рішення

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

запропонованих рівнянь енергетичного підходу дає можливість оцінити ступінь деформації або руйнування конструкції підземної споруди. **Практична значимість.** Застосування енергетичного підходу до вирішення динамічної задачі вибуху і визначення його дії на конструкцію підземної споруди дозволяє обчислювати енергії деформації конструкцій при динамічних діях.

*Ключові слова:* метрополітен; вибух; безпека; ударна хвиля; ударно-повітряна хвиля; динамічний розрахунок; енергетичний підхід

V. I. PETRENKO<sup>1</sup>, V. D. PETRENKO<sup>2</sup>, O. L. TIUTKIN<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Public Joint-Stock Company “Kyivmetrobud”, Prorizna Str., 8, Kiev, Ukraine, 01601, tel. +38 (044) 455 23 00, e-mail petrenko@metrobud.kiev.ua

<sup>2</sup> Department “Tunnels bases and foundations” of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 50 69, e-mail petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>3\*</sup> Department “Tunnels bases and foundations” of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

## GROUND AND GENERAL METHODOLOGICAL DEVELOPMENTS OF SAFETY PROBLEM BY EXPLOSION OF THE METRO OBJECTS

**Purpose.** The metro is the transporting system, which is most subject to internal influences negatively influencing on its work. The blast impact is one of such influences, thus the analysed history of explosions in metro testifies to the serious problem of safety. The decision of this problem consists in minimization of reason causing emergency and catastrophic situations. **Methodology.** For the decision of safety problem by explosion and blast protection of objects of metro bases and methodological developments of dynamic calculation of construction on the first stage are offered. **Findings.** The basic parameters of impact and blast waves at the explosions which affect internal and bearing constructions of metro are certain. It is found out that in the case of falling pressures and weakening of impulse value it is necessary to conduct a dynamic calculation only on complete pressure in the compression phase. In the case when action of complete pressure and impulse is equivalent, determination of loading is complicated. The however got graph of dependence of pressure impulse of air-blast wave in the phase of compression from the distance and mass of charge allows to get the values of loading for different cases. Using position of dynamic tasks about the analysis of the deformed state (calculation on the second maximum state) on the base of finite elements method it is possible to take power approach for determination of the state of construction at explosive influence. Formulas in a tensor form for practical determination of energy of deformation or destruction in a point, and also formulas of energy for shock and shock and air waves are offered. **Originality.** The joint decision of the offered equalizations of power approach enables to estimate the degree of deformation or destruction of underground building construction. **Practical value.** Application of power approach to the decision of dynamic task of explosion and determination of his action on construction of underground building allows the calculations to energy of constructions deformation at dynamic influences.

*Keywords:* metro; explosion; safety; blast wave; air-blast wave; dynamic calculation; energy approach

### REFERENCES

1. Fedunets B. I., Petrenko Ye. V. Stroitelstvo krupnogabaritnykh tonneley v megapolise [Building of biggest tunnels in megapolise]. *Metro i tonneli – Metro and Tunnels*, 2002, no. 2. pp. 23-25.
2. Frolov Yu. S., Golitsynskiy D. M., Ledyayev A. P. *Metropoliteny* [Metro]. Moscow, Zheldorizdat Publ., 2001. 528 p.
3. Kotlyarevskiy V. A., Vinogradov A. V., Yeremin S. V. *Avarii i katastrofy. Preduprezhdenie i likvidatsiya posledstviy* [Failures and catastrophes. Warning and liquidation of consequences]. Moscow, Building Universities Publ., 1996, vol. 2. 384 p.
4. Fire R. H. An engineering tool to calculate heat release rates of multiple objects in underground structures. *Safety Journal*, 2011, vol. 71, pp. 194-203. doi: 10.1016/j.firesaf.2011.02.001
5. Fire R. H. Analysis of methodologies for calculating the heat release rates of mining vehicle fires in underground mines. *Safety Journal*, 2015, vol. 71. pp. 194-216. doi: 10.1016/j.firesaf.2014.11.008.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

6. Evkin A. Yu., Kalamkarov A. L. Analysis of large deflection equilibrium states of composite shells of revolution. Pt.I. General model and singular perturbation analysis. *Int. J. Solids and Struct.*, 2001. 38, № 50-51, pp. 8961-8974. doi: 10.1016/S0020-7683(01)00184-6
7. Baum F. A., Orlenko L. P., Stanyukovich K. P. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 704 p.
8. Popov N. N., Rastorguev B. S., Zabegaev A. V. *Raschet konstruksiy na dinamicheskie spetsialnye nagruzki*: [Calculation of constructions on the dynamic special loadings]. Moscow, High School Publ., 1992. 319 p.
9. Kandidov V. P., Chesnokov S. S., Vysloukh V. A. *Metod konechnykh elementov v zadachakh dinamiki* [Finite elements method in the tasks of dynamics]. Moscow, Moscow University Publ., 1980. 165 p.
10. Tjutjkin O. L., Miroshnyk V. A. Rozrobka teoretychnykh osnov modyfikovanogho metodu rozrakhunku tuneliv kolovogho okreslennja [Development of theoretical bases of the modified calculation method of circular outline tunnels]. *Mosty ta tuneli : teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels : theory, research, practice*, 2012, issue 5, pp. 96-100.
11. Petrenko V. D., Tyutkin A. L., Petrenko V. I. Obzor analiticheskikh i eksperimentalnykh metodov issledovaniya vzaimodeystviya massiva i krepі [Review of analytical and experimental methods of research of cooperation of massif and support]. *Mosty ta tuneli : teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels : theory, research, practice*, 2012, issue 1, pp. 75-81.
12. Savenko S. K., Gurin A. A., Malyy P. S. *Udarnye vozdushnye volny v podzemnykh vyrabotkakh* [Air-blast waves in the underground making]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 152 p.
13. Yurmanov Yu. A. Zashchita sooruzheniy ot deystviya udarnoy vozdushnoy volny [Defence of buildings from action of air-blast wave]. *Proseed. of LGI*, 1966, vol. 52, issue 1. pp. 117-121.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. М. М. Беляевым (Украина), д.т.н, проф. И. И. Лучко (Украина).*

Поступила в редколлегию 15.10.2015

Принята к печати 21.12.2015