

А. Л. ТЮТЬКИН (ДИИТ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ТОННЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Наведено результати дослідження основних параметрів вибухового впливу для практичних розрахунків міцності та стійкості тунельних конструкцій. Отримані залежності основних параметрів є функціями і носять прикладний характер.

Приведены результаты исследования основных параметров взрывного воздействия для практических расчетов прочности и устойчивости тоннельных конструкций. Полученные зависимости основных параметров являются функциями и носят прикладной характер.

The article presents the results of studying the basic parameters of explosive influence for practical calculations of durability and stability of tunnel constructions. The obtained dependences of basic parameters are functions and have an applied nature.

В настоящее время все большую актуальность приобретают исследования прочности и устойчивости тоннельных конструкций при особом сочетании нагрузок. Это обусловлено тем, что расчеты прочности и устойчивости на постоянное и временное сочетание недостаточно, так как влияние особого воздействия все чаще наблюдается в работе подземных сооружений, в том числе сооружений метрополитена глубокого и мелкого заложения – станций и перегонных тоннелей.

Следует отметить, что исследование прочности и устойчивости строительных конструкций концептуально построено на отыскании, дальнейшем анализе их напряженно-деформированного состояния (НДС) и сравнении его параметров с условиями прочности и устойчивости. Таким образом, исследование прочности и устойчивости строительных конструкций с учетом особых воздействий также должно опираться на определение НДС, но достаточно часто процесс расчета напряжений и деформаций в элементах конструкции на особое сочетание затруднен вследствие недостаточной разработанности математического аппарата методов расчета, отсутствия адекватных исследуемым реальным объектам моделей, а также недостаточной репрезентативностью аналитических данных о природе особых воздействий.

Последнее замечание особенно важно, так как в методах расчета подземных конструкций при наличии значительно разработанных расчетных схем, прикладываемые к ним особые воздействия представляют собой некоторые стандартные нагрузки, используемые в разде-

лах механики сплошной среды (теория упругости и строительная механика), которые не отражают специфическую природу их возникновения и кинетику распространения.

Следует также отметить, что грунтовый массив является в общем случае упруговязкопластичной средой, изменяющей свои свойства при изменении нагрузки и со временем. Причем многообразие грунтов, составляющих из общих упруговязкопластичных свойств отдельные комбинации (упругопластические, вязкопластические, упруговязкие и т. д.), до сих пор не систематизировано, и расчеты подземных сооружений при взаимодействии с окружающим массивом носят частный характер, так как учет всех основных свойств грунта очень сложен [1; 2].

Следовательно, проблема исследования прочности и устойчивости подземных конструкций актуальна, так как малая разработанность подхода к ней, отсутствие систематизации методов исследования НДС, а также недостаточная адекватность предложенных моделей их расчета на особое сочетание нагрузок, требует разработки нового подхода к этой проблеме, который даст возможность ее решения.

К особым воздействиям, входящим в особое сочетание, чаще всего относят сейсмическое воздействие [3] и специальные динамические нагрузки [4]. Следует отметить, что на данный момент практические расчеты на сейсмическое воздействие разработаны недостаточно и носят поверочный характер [5], а расчеты на специальные динамические нагрузки немногочисленны [6–10], их применение для расчетов подземных сооружений единично [11; 12].

Следует отметить, что недостаточная разработка проблемы расчета прочности и устойчивости на особое сочетание нагрузок заключается в характере особого воздействия, который можно классифицировать следующим образом:

- сейсмическое воздействие (нагрузка от землетрясений);
- импульсные воздействия различной природы (нагрузки от взрыва взрывчатых веществ, пыли- и газо-воздушных смесей, баллонов со сжатым газом, импульсные воздействия от движения поезда);
- ударные воздействия (различные удары аварийной природы).

Более подробно остановимся на исследовании импульсных воздействий, причем в данной работе рассматриваются взрывные нагрузки, так как их влияние на НДС подземных сооружений мало изучено, а появление в подземных условиях в результате террористических актов отмечено высокой вероятностью; также следует отметить вероятность взрыва в аварийных ситуациях [13] и при проведении взрывов при проходке выработок, расположенных в некоторой близости от действующих объектов метрополитена.

Известно, что особое взрывное воздействие является импульсным, что следует из определения взрыва [14] и из исследований его действия на конструкции [15]. Значение также имеет природа взрыва, так как форма импульса значительно влияет на величину полного импульса [15]

$$I = \int_0^{\tau} P(t) dt, \quad (1)$$

где I – значение полного импульса; $P(t)$ – функция, описывающая форму импульса; τ – длительность импульса.

Считается, что $P(t) = 0$, если $\tau < 0$ и $\tau > t$, то есть $P(t)$ существует в пределах $0 \dots \tau$ [15]. Некоторую двойственность в понимании взрывного воздействия на конструкцию вносит тот факт, что на выбор расчетной схемы конструкции для определения ее прочности и устойчивости влияет соотношение между периодом собственных колебаний конструкции T и длительностью импульса τ [16].

Если отношение $\tau/T \leq 1$, то расчет производится на импульс взрыва; если $\tau/T > 1$ – на остаточное максимальное давление, то есть в первом случае инерционные свойства конструкции учитываются, а во втором – постановка задачи становится квазистатической.

Таким образом, действие импульса взрыва отмечается только на близких расстояниях, поэтому часто расчеты ведутся в квазистатической постановке на максимальное давление, что практически не отличается от статических расчетов [16]. Исследователями предлагаются другие значения:

- расчет на импульсное воздействие при $\tau/T \leq 0,375$;
- расчет на полное давление [17] при $\tau/T > 0,375$.

Таким образом, подход к этому вопросу отличается противоречиями, о чем также могут свидетельствовать данные о периодах собственных колебаний различных сооружений, приведенные в работах [16; 17].

Следует также отметить, что выбор метода расчета для подземного сооружения значительно усложнен, так как определить для них период собственных колебаний сложно, что объясняется взаимодействием подземной конструкции с окружающим массивом, который, возможно, участвует в процессе колебания как присоединенная масса. Таким образом, в данном вопросе нет однозначности, тем более, что в справочной литературе представленное выше отношение равно

$$\tau/T \geq 2,5,$$

причем при $\tau/T = 0,1$ форма импульса может не учитываться [18].

Некоторая неоднозначность определения также присуща и основным зависимостям параметров импульсного взрывного воздействия: давление на фронте ΔP , длительность импульса τ и значение импульса I , предложенных академиком М. А. Садовским:

$$\Delta P = 10g \left(7 \frac{q}{R^3} + 2,7 \frac{q^{2/3}}{R^2} + 0,84 \frac{q^{1/3}}{R} \right), \quad (2)$$

$$\tau = 0,0015 \sqrt{R} \sqrt[6]{q}, \quad (3)$$

$$I = 40g \frac{q^{2/3}}{R}. \quad (4)$$

Данные формулы разработаны для взрыва сферического открытого заряда в воздухе [16; 19], где $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; q – масса тротилового заряда, кг; R – расстояние от места взрыва, м.

Коэффициенты в формулах (2)–(4) получены из условий теории подобия и обработки многочисленных экспериментов [19].

Границы применения формул (2)–(4) определены всеми значениями R и q больше нуля, но с выполнением следующего условия

$$R \geq r,$$

где r – радиус сферического тротилового заряда, то есть функциональные зависимости существуют при следующих условиях:

$$q > 0 \text{ и } R \geq r.$$

Известно, что переход детонационной волны в ударную (процесс взрывчатого превращения) характеризуется плоскостью Чепмена-Жуге, то есть плоскостью, на границе которой прекращается химическое превращение и образуются газообразные продукты взрыва. Проверочным условием формулы (2) является условие максимального давления ΔP_{\max} в плоскости Чепмена-Жуге, полученного в соответствии с гидродинамической теорией на основе законов сохранения энергии и импульса

$$\Delta P_{\max} = \frac{\rho_{BB} D^2}{n+1}, \quad (6)$$

где ρ_{BB} – начальная плотность ВВ, кг/м^3 ; D – скорость детонации, м/с ; n – показатель политропы, $n=3$ для обычных ВВ.

Из формулы (6) следует, что ΔP_{\max} для тротилового заряда с $\rho_{BB} = 1550 \dots 1600 \text{ кг/м}^3$, равно $9\,687,5 \dots 10\,000 \text{ МПа}$. Следует отметить, что плоскость Чепмена-Жуге в общем случае не совпадает с плоскостью раздела сред (заряда ВВ и воздуха) и следует давление ΔP_{\max} скорректировать с учетом скорости движения продуктов взрыва за плоскостью Чепмена-Жуге и характером ВВ (поправка на твердые ВВ):

$$\Delta P_{\max} = \frac{\rho_{BB} D^2}{4}, \quad (7)$$

откуда максимальное давление на границе раздела сред будет равняться для тротилового заряда с $\rho_{BB} = 1550 \dots 1600 \text{ кг/м}^3$ – $4\,690 \dots 5\,000 \text{ МПа}$.

Следует отметить, что максимальное давление тротилового заряда ΔP_{\max} было рассчитано для зарядов с массой $0,1 \dots 1\,000 \text{ кг}$. Для зарядов тротила с плотностью $1\,600 \text{ кг/м}^3$ изменение радиуса заряда удовлетворительно описывается зависимостью

$$r = 0,05 \sqrt[3]{m},$$

где m – масса заряда, что иллюстрируется аппроксимированным графиком (рис. 1).

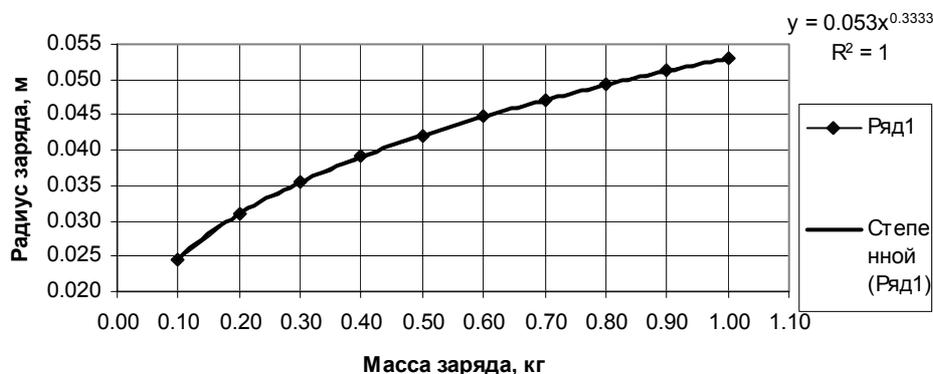


Рис. 1. График зависимости радиуса от массы заряда

Уравнение аппроксимации (см. рис. 1) приведено к несколько упрощенному типу, но это упрощение уменьшает точность аппроксимации на 5,7 %, что можно считать достаточно точным и свидетельствует о функциональной зависимости.

Используя формулу (7) и зависимость радиуса от массы заряда, полученные значения максимального давления на разделе двух сред – ВВ и воздуха, – равны $4\,694 \dots 4\,708 \text{ МПа}$, что совпадает со значением ΔP_{\max} (относительная погрешность

$$\delta = \frac{\Delta P - \Delta P_{\max}}{\Delta P_{\max}} 100\%$$

составляет не более 6 %, что свидетельствует о высокой точности). Из этого также следует, что на расстояниях, кратных радиусу r тротилового заряда разной массы m , давление на фронте взрывной или ударной воздушной волны (УВВ) является постоянной величиной.

Данное предположение косвенно доказывается полученным значением ΔP_{\max} на гра-

нице тротилового заряда и воздуха ($R = r$), и этот факт, логически следующий из анализа формулы (7), имеет практическое значение при расчетах строительных конструкций на особое сочетание нагрузок, так как качественно описывает параметры взрыва зарядов различной массы для их радиусов и кратных им расстояниям.

Следует разъяснить, что кроме разрушающего действия продуктов детонации (ПД), которое затухает на небольшом расстоянии от заряда [14], на конструкции также разрушительно действует ударная воздушная волна (УВВ), причины образования и характер распространения которой исследованы многими учеными [14; 16; 17; 19].

Параметры УВВ также описываются формулами академика М. А. Садовского (2)–(4), но для их практического использования в расчетах подземных конструкций, автор данной работы предлагает их применять с расстояния $(8...15)r$, что соответствует расстоянию отрыва УВВ от расширяющихся ПД, что было предложено профессором А. А. Гуриным [16] на основе экспериментов Ю. А. Юрманова [20].

Используя для расчетов формулы (2)–(4), автором получены значения ΔP для данных расстояний: при $8r$ $\Delta P = 10,66$ МПа; при $15r$ $\Delta P = 1,89$ МПа. При этом были аппроксимированы зависимости постоянного давления на фронте УВВ ΔP от массы m и радиуса r заряда (рис. 2 и 3).

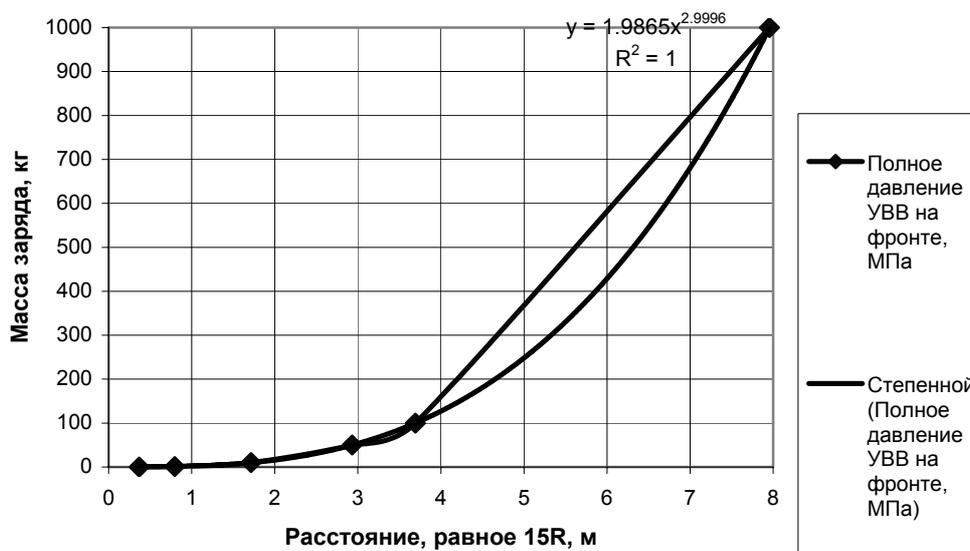


Рис. 2. Зависимость постоянного давления на фронте УВВ ΔP ($R = 15r$)

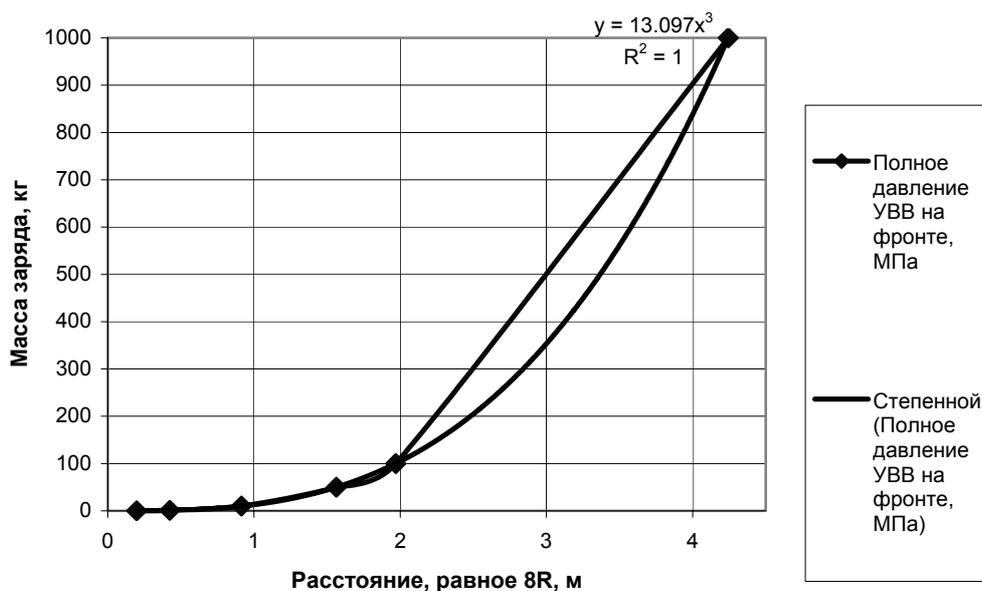


Рис. 3. Зависимость постоянного давления на фронте УВВ ΔP_{\max} ($R = 8r$)

Полученные тренды аппроксимации являются степенной функцией вида $r = am^3$, причем точность аппроксимации $R^2 = 1$ (см. рис. 2, 3), что свидетельствует о функциональной зависимости.

Коэффициент a при аргументе функции изменяется следующим образом: при $R = r$, $a = 6692,9$; при $R = 8r$, $a = 13,1$; при $R = 15r$, $a = 1,99$.

Изложенные аналитические построения можно непосредственно использовать при исследовании влияния импульсной нагрузки взрывного характера при действии УВВ на конструкции подземных сооружений. Автором построены и аппроксимированы графики основных параметров УВВ (рис. 4–6).

Характер графиков свидетельствует об их подобии, что закономерно отражает вид уравнений (2)–(4). Все аппроксимированные тренды степенного вида:

- для зависимости давления на фронте УВВ ΔP от расстояния, МПа

$$\Delta P = a_1 \frac{2,6}{R}; \quad (8)$$

- для зависимости времени действия τ от расстояния, с

$$\tau = a_2 \sqrt{R}; \quad (9)$$

- для зависимости импульса давления I от расстояния, МПа·с/м²

$$I = a_3 \frac{1}{R}. \quad (10)$$

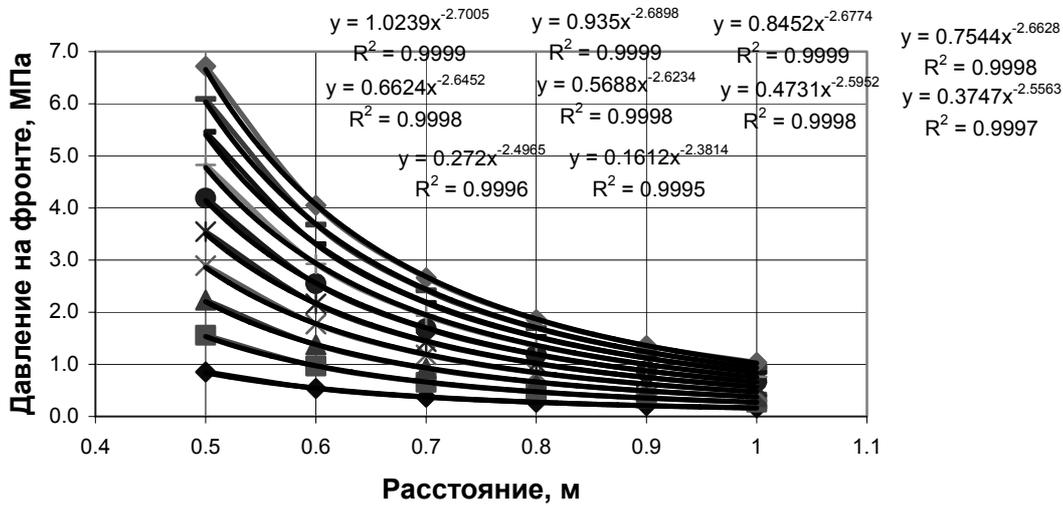


Рис. 4. Зависимость давления на фронте УВВ ΔP от расстояния

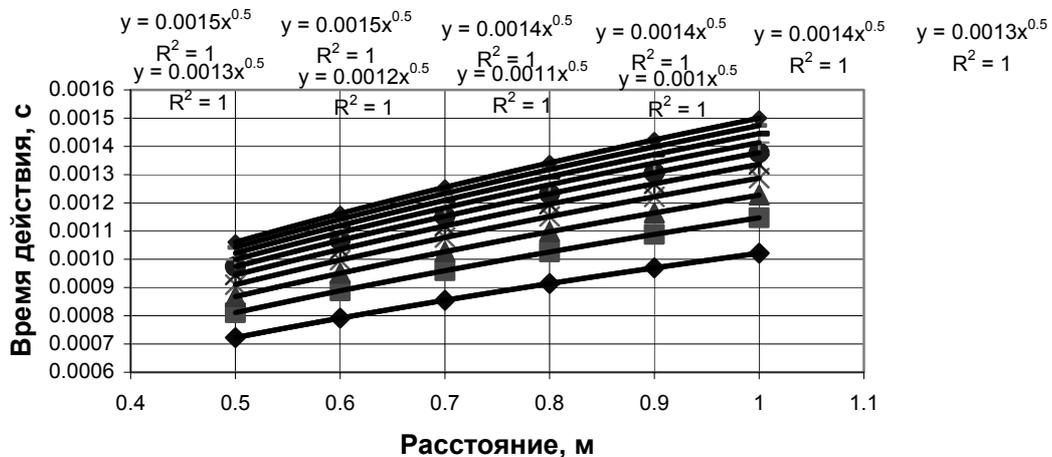


Рис. 5. Зависимость времени действия τ от расстояния

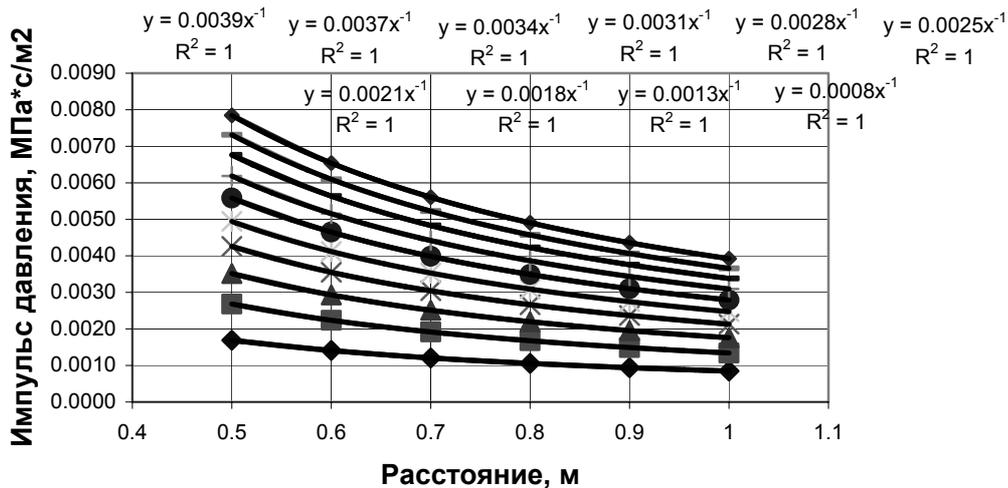


Рис. 6. Зависимость импульса давления I от расстояния

Как видно из данных аппроксимации (см. рис. 4–6), ее точность составляет $R^2 = 1$, что свидетельствует о функциональном характере зависимостей (8)–(10).

В практических расчетах конструкций подземных сооружений зависимости (8)–(10) можно использовать для расчетов основных параметров ударных и ударно-воздушных волн, не прибегая к однообразным вычислениям или использованию не слишком удобных номограмм [4].

Заканчивая анализ основных параметров УВВ, следует также отметить следующую полученную закономерность: для величины длительности импульса τ , рассчитанной по формулам (3) и (9), между массами зарядов, кратными 2, ее значения изменяются в 1,223 раза, а между расстояниями, кратными 2 – в 1,414 раза; для величины импульса I , рассчитанной по формулам (4) и (10), между массами зарядов, кратных 2, ее значения изменяются в 1,58 раза, а между расстояниями, кратными 2 – в 0,5 раза.

Эти данные носят прикладной характер, и их можно использовать при проведении значительного комплекса однотипных расчетов на динамические взрывные воздействия с шаговым изменением массы заряда и его расположения при выяснении закономерностей изменения частот и форм колебаний.

Таким образом, проблема исследования прочности и устойчивости конструкций подземных сооружений на особое сочетание нагрузок отличается большой сложностью и не отличается глубокой разработкой.

Предложенные аналитические построения для определения основных параметров взрывных волн могут быть применены в практических расчетах прочности и устойчивости таких конструкций, причем новизна этих построений относится не к исследованиям в области теории взрыва, а непосредственно к области расчетов на динамические импульсные воздействия.

Полученные вследствие обработки значительного массива данных функциональные зависимости носят прикладной характер и также могут применяться в практических расчетах. Исследование импульсных воздействий различной природы, в том числе и взрывных волн, с учетом характера их разработки и кинетики распространения, в дальнейшем даст возможность разработки новых методов расчета подземных сооружений на особое сочетание нагрузок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петренко В. І. Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін. – Д.: Наука і освіта, 2004. – 176 с.
2. Петренко В. І. Современные технологии строительства метрополитенов в Украине / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин. – Д.: Наука і освіта, 2005. – 252 с.
3. СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. – М.: Стройиздат, 1988. – 31 с.
4. Попов Н. Н. Расчет конструкций на динамические специальные нагрузки: Учебное пособие для вузов / Н. Н. Попов, Б. С. Расторгуев, А. В. Забегаев. – М.: Высш. шк., 1992. – 319 с.

5. Волков В. П. Тоннели и метрополитены / В. П. Волков, С. Н. Наумов, А. Н. Пирожкова, В. Г. Храпов; Под ред. В. П. Волкова. – М.: Транспорт, 1975. – 618 с.
6. Бондарь Н. Г. Устойчивость и колебания упругих систем в современной технике. – К.: Вища шк., 1987. – 200 с.
7. Кудрявцев И. А. Влияние вибрации на основания сооружений. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 274 с.
8. Филлипов А. П. Колебания деформируемых систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 736 с.
9. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия (Справочник проектировщика) / Под ред. Б. Г. Коренева и И. М. Рабиновича. – М.: Стройиздат, 1981. – 215 с.
10. Бондарь Н. Г. Нелинейные колебания, возбуждаемые импульсами. – К.; Донецк: Вища шк., 1978. – 213 с.
11. Дашевский М. А. Изучение упругих волн при движении пульсирующей нагрузки вдоль тоннеля кругового очертания, проложенного в грунте // Динамика сооружений: Сб. науч. трудов. – М.: Стройиздат, 1968. – С. 123–232.
12. Бакиров Р. О. Динамический расчет и оптимальное проектирование подземных сооружений: Учеб. пособие для вузов / Р. О. Бакиров, Ф. В. Лой. – М.: Стройиздат, 2002. – 464 с.
13. Власов С. Н. Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов / С. Н. Власов, Л. В. Маковский, В. В. Меркин. – М.: ТИМР, 2000. – 200 с.
14. Покровский Г. И. Взрыв. – М.: Недра, 1957. – 173 с.
15. Вибрации в технике: Справочник: в 6 т. – Т.6. Защита от вибрации и ударов. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.
16. Савенко С. К. Ударные воздушные волны в подземных выработках / С. К. Савенко, А. А. Гурин, П. С. Малый. – М.: Недра, 1973. – 152 с.
17. Попов Г. И. Железобетонные конструкции, подверженные действию импульсных нагрузок. – М.: Стройиздат, 1986. – 126 с.
18. Динамический расчет зданий и сооружений (Справочник проектировщика) / Под ред. Б. Г. Коренева и И. М. Рабиновича. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.
19. Садовский М. А. Опытные исследования механического действия ударной волны взрыва. – Л.: Изд-во АН СССР, 1945. – 43 с.
20. Юрманов Ю. А. Защита сооружений от действия ударной воздушной волны / Зап. ЛГИ, 1966. – Т. 52. – Вып. 1. – С. 117–121.

Поступила в редколлегию 03.02.2006.