

УДК 622.235

А.Л. Кириченко,
Е.Б. Устименко, д-р техн. наук,
Л.Н. Шиман, д-р техн. наук,
В.В. Политов

Государственное предприятие „Научно-производственное объединение „Павлоградский химический завод“,
г. Павлоград, Украина, e-mail: al@pkhz.dp.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПУРОВЫХ ЗАРЯДОВ ПАТРОНИРОВАННЫХ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

A.L. Kirichenko,
Ye.B. Ustimenko, Dr. Sci. (Tech.),
L.N. Shyman, Dr. Sci. (Tech.),
V.V. Polítov

State Enterprise “Research-Industrial Complex
“Pavlograd Chemical Plant”, Ukraine, e-mail: al@pkhz.dp.ua

STUDY OF DETONATION CHARACTERISTICS OF BLAST-HOLE CHARGES OF PACKAGED EMULSION EXPLOSIVES

Цель. Оценка влияния воздействия упругой волны сжатия на изменение детонационных характеристик шпуровых зарядов патронированных эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ).

Методы. Измерение изменения скорости распространения детонационной волны во времени по заряду ЭВВ под воздействием упругой волны сжатия на заданных расстояниях от источника колебания.

Результаты. По результатам экспериментальных исследований для патронированных ЭВВ диаметром 32 мм получена зависимость скорости детонации от плотности ЭВВ. Установлен диапазон плотности, при котором достигается максимальное значение скорости детонации, и значения критической плотности, при котором ЭВВ теряет способность устойчиво воспринимать инициирующий импульс и детонировать от капсюль-детонатора (КД) с навеской 0,6 г РЕНТ. В ходе работы выполнена оценка влияния упругой волны, генерируемой взрывом заряда, на деформирование и развитие детонационных процессов в соседних шпуровых зарядах ЭВВ. Установлено, что воздействие упругой волны сжатия вызывает в заряде ЭВВ изменение плотности массы за счет объемной деформации сжатия и последующей разгрузки.

Научная новизна. Деформация сжатия в заряде протекает с постепенным увеличением плотности ЭВВ. В заряде ЭВВ диаметром 32 мм процесс деформирования, вызванный воздействием упругой волны, ограничен временем до 12 мс. Период нарастания деформации до максимума имеет одинаковую продолжительность во времени и уменьшается с удалением от источника колебаний более 0,6 м. После снятия нагрузки наступает фаза, которая сопровождается постепенным восстановлением плотности ЭВВ и на различных расстояниях от источника возмущений протекает по-разному.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований позволяют сформулировать задачи для выработки рекомендаций по выбору оптимальных параметров проведения буровзрывных работ с применением ЭВВ в проходческих забоях шахт и рудников.

Ключевые слова: *эмульсионные взрывчатые вещества, объемная деформация шпурового заряда, детонационные характеристики*

Введение. Опыт применения патронированных эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) в качестве шпуровых зарядов при проходке подземных выработок показал, что с увеличением плотности распределения шпуров в выработке снижается эффективность взрывных работ (ВР) [1]. Впоследствии также было установлено, что работоспособность шпуровых зарядов ЭВВ при фиксированных расстояниях между ними повышалась с увеличением временных интервалов инициирования между группами зарядов. Поэтому, основываясь на результатах взрывных работ, были сделаны предположения о том, что ухудшение параметров работы шпуровых зарядов может быть связано с увеличением плотности ЭВВ за счет сжатия упругой волной, распространяющейся в результате взрыва заряда предыдущей серии замедления.

Анализ предыдущих исследований. При взрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ) в окружающей среде на незначительном удалении от заряда ударная волна переходит в упругую волну, распространяющуюся со скоростью звука в данной среде. Распространение волны напряжений сопровождается деформацией среды и возникающими при этом изменениями плотности, температуры и других термодинамических параметров. Параметры таких волн напряжений зависят от скорости детонации ВВ, времени приложения нагрузки, акустических свойств среды и др. Последнее, в свою очередь, в значительной степени зависят от неоднородности среды. При оценке деформирования таких структурно-неоднородных сред как горные породы используют модель упругой среды [2].

При достижении волной сжатия полости шпура плотность шпурового заряда ЭВВ возрастает, она вызывает в нем различные виды деформации. В отличие

от горных пород эмульсионные ВВ являются гетерогенной средой, состоящей из жидкой фазы (эмульсии) с равномерно распределенными по объему твердыми частицами окислителя или наполнителя и газообразными включениями (пузырьками), не имеющей твердого скелета, способного оказать существенное сопротивление при сжатии. В таких средах, обладающих упругостью объема, но не упругостью формы, касательные напряжения равны нулю, а остаточные деформации могут быть обусловлены разрушением газовых пузырьков. Поэтому для оценки параметров волн сжатия следует процесс деформирования заряда ЭВВ рассматривать подобно деформации многокомпонентной жидкой среды, насыщенной пузырьками воздуха.

В этой связи кажется очевидным, что под воздействием кратковременной волновой нагрузки в заряде ЭВВ возрастает деформация сжатия. В момент приложения нагрузки эмульсия и твердые частицы, находящиеся вокруг пузырьков воздуха, воспринимают деформацию мгновенно. Деформация пузырьков протекает по мере заполнения их объема компонентами окружающей среды. При таком деформировании пузырьки колеблются относительно положения своего равновесия, при этом может происходить изменение их формы и объема. С уменьшением объема пузырьков воздуха продолжает увеличиваться плотность ЭВВ. Непосредственно после прохождения волны заряд ЭВВ остается в сжатом состоянии. Такая деформация заряда ЭВВ может сохраняться до завершения волновых процессов.

После снятия нагрузки газ в пузырьках расширяется, давления газа ($p_{га}$) уменьшается и уменьшается плотность ЭВВ, возвращаясь к исходному значению. Однако для случаев, когда в ЭВВ возникает остаточная деформация, вызванная выдавливанием газовых пузырьков и массы ЭВВ, их конечная плотность превышает начальное значение. Поскольку ЭВВ характеризуются достаточно узким интервалом значений плотности, в пределах которого обеспечивается устойчивое развитие детонации, нарушение плотности может привести к отклонениям от их заданных взрывчатых характеристик [3].

В этой связи для шпуровых зарядов патронированных ЭВВ необходима оценка процесса их деформирования под воздействием кратковременного нагружения при прохождении волны сжатия. Знание параметров протекания такого процесса позволяет эффективно использовать энергетический потенциал ЭВВ, обеспечивая при этом безопасность ведения взрывных работ.

Цель работы. Оценка влияния воздействия упругой волны сжатия на изменение детонационных характеристик шпуровых зарядов патронированных ЭВВ.

Материалы и методика исследований. В качестве объекта исследований были выбраны патронированные ЭВВ марки „ЕРА“-РЗ диаметром 32 мм. Это ЭВВ в своем объеме содержит эмульсию 67÷70% (α_1), твердую фазу (α_2) в виде 17÷18% гранулированной аммиачной селитры и 1,9÷2% алю-

миниевого порошка, а также газообразный компонент (α_3), содержание которого зависит от плотности ЭВВ. На рис. 1 приведены данные расчетов изменения величины α_3 от плотности ЭВВ. Значение α_3 было получено путем пересчета через обратную величину объема ЭВВ. Расчет выполнен при плотности эмульсии $\rho_{эм}=1,43\div 1,45$ г/см³, гранулированной селитры $\rho_{а.с.}\sim 1,6\div 1,8$ г/см³, газообразного компонента $\rho_{в}=0,0012$ г/см³.

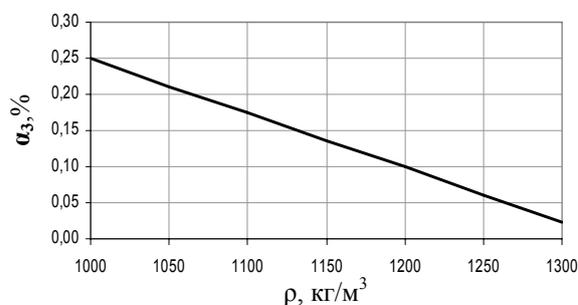


Рис. 1. Зависимость изменения величины газообразного компонента (α_3) от плотности (ρ) ЭВВ

Из представленных на диаграмме данных следует, что при уменьшении объемного содержания газообразного компонента α_3 увеличивается плотность ЭВВ „ЕРА“.

Для оценки влияния плотности газифицированной эмульсионной матрицы на детонационные характеристики проводили измерения скорости детонации образцов ЭВВ „ЕРА“-РЗ диаметром 32 мм с плотностью от 1,0 до 1,30 г/см³. Скорость детонации ЭВВ определяли экспериментальным методом с использованием прибора „Explometr“. Инициирование образцов ЭВВ осуществляли КД №8 системы неэлектрического взрывания (СНВ) „Прима-ЕРА“. Результаты измерений представлены на рис. 2.

Представленная на рис. 2 зависимость показывает, что максимум скорости детонации образцов ЭВВ достигается в узком диапазоне плотностей 1,12÷1,22 г/см³.

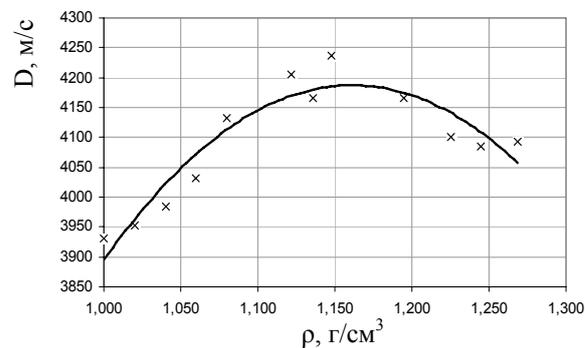


Рис. 2. Зависимость скорости детонации (D) от плотности (ρ) ЭВВ

При плотности ЭВВ менее 1,12 г/см³ или увеличении ее значений, превышающих 1,22 г/см³, скорость детонации снижается. При плотности более 1,27 г/см³ ЭВВ теряет способность устойчиво воспринимать иницирующий импульс и детонировать

от КД с навеской 0,6 г PENT, что затрудняет дальнейшее определение скорости детонации в открытом заряде диаметром 32 мм.

Математически представленная зависимость может быть описана уравнением следующего вида

$$D_{ЭВВ} = -a \cdot \rho_{эвв}^2 + b \cdot \rho_{эвв} - c, \quad (1)$$

где $D_{ЭВВ}$ – скорость детонации ЭВВ, м/с; $\rho_{эвв}$ – плотность ЭВВ г/см³; эмпирические коэффициенты: $a=11263$, $b=26156$, $c=10998$.

В дальнейших исследованиях полученная зависимость скорости детонации от плотности ЭВВ марки „ЕРА“-РЗ использовалась для описания процесса переуплотнения шпуровых зарядов под воздействием упругой волны сжатия.

Зависимость параметров объемной деформации заряда ЭВВ от величины и продолжительности воздействия упругой волны сжатия определяли на модельных шпуровых зарядах. Исследования проводили на испытательном полигоне в супесчаном грунте с плотностью скелета (γ_0) 1,44±1,5 г/см³ и влажностью (ω) 10±14%.

Для проведения эксперимента в грунте выбуривали два вертикальных шпура диаметром 55 мм, глубиной 400 мм, на расстоянии (R)=0,5 м друг от друга. В каждый шпур устанавливали монозаряд ЭВВ „ЕРА“-РЗ диаметром 32 мм, массой 0,35 кг. Плотность ЭВВ (ρ_0) в зарядах соответствовала 1,06 г/см³. Пространство между зарядом и стенками шпура заполнялось супесчаным грунтом. Предварительно на каждом заряде устанавливали по два оптоволоконных кабеля, подключенных к регистрационным каналам прибора измерения скорости детонации „Explometr“. Заряды инициировались обратным методом при помощи электронных детонаторов „DAVEYTRONIK“ с высокой точностью времени срабатывания.

При взрывании первой пары зарядов первый шпур взрывали с замедлением (τ_1) = 0 мс, а второй с $\tau_2 = 3$ мс. Для второй и последующих пар зарядов последовательно увеличивали τ_2 с шагом 6; 9; 12; 15; 20 и 25 мс соответственно, при этом, во всех случаях, $\tau_1 = 0$ мс. Всего было взорвано 7 пар шпуровых зарядов.

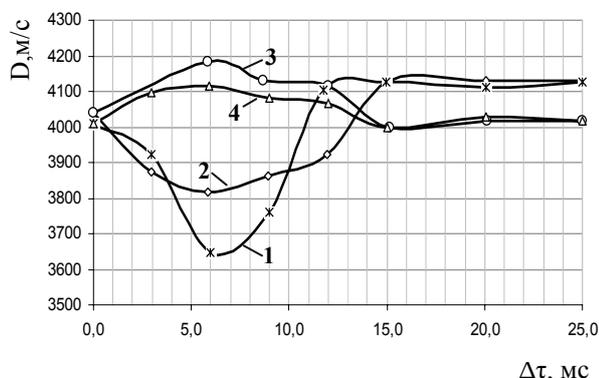


Рис. 3. Зависимость скорости детонации (D) ЭВВ „ЕРА“-РЗ от интервалов замедлений между шпурами ($\Delta\tau$) для расстояний между зарядами (R) = 0,5 м (1); 0,6 м (2); 0,8 м (3); 1,0 м (4)

Такие же аналогичные испытания были проведены на расстояниях между зарядами 0,6; 0,8 м и 1,0 м.

Результаты экспериментов приведены на рис. 3. На рис. 3 построены кривые изменения скорости детонации ЭВВ во времени (τ) под воздействием волновой нагрузки на удалении 0,5; 0,6; 0,8 и 1,0 м от источника колебаний. При сравнении графиков видно, что на каждом из указанных расстояний скорость детонации имеет различные значения.

В зарядах, инициирование которых начинается с $\tau_0 = 0$, скорость детонации ЭВВ не изменяется и составляет порядка 4030±10 м/с, что соответствует ее значениям при $\rho_0 = 1,06$ г/см³. С нарастанием времени $\Delta\tau$ в зарядах на расстоянии R = 0,5 м и 0,6 м скорость детонации снижается, а при R = 0,8 м и 1,0 м происходит увеличение ее значений. При этом в момент $\tau \approx 6$ мс кривые скорости характеризуются экстремальными значениями. В интервале $\Delta\tau$ 7–15 мс происходит восстановление свойств ЭВВ почти до первоначальных значений. Однако, при сближении зарядов на расстояние $R \leq 0,6$ м, наблюдается некоторое увеличение значений конечной скорости детонации ЭВВ на 8±12% для времени замедления более 12 мс. Это может быть объяснено деформированием массы ЭВВ в заряде после релаксационных процессов с остаточной плотностью большей, чем исходная.

Полученные опытные данные позволяют приближенно описать процесс деформирования заряда ЭВВ во времени. Используя зависимость скорости от плотности, на рис. 4 построены графики изменения плотности заряда при его деформировании во времени при воздействии упругой волны сжатия при R = 0,5 м (1); 0,6 м (2); 0,8 м (3) и 1,0 м (4).

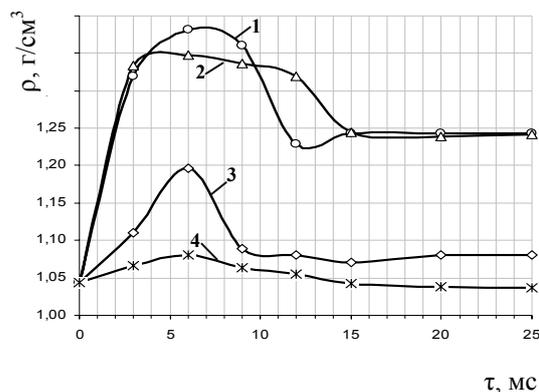


Рис. 4. Диаграмма изменения плотности заряда (ρ) ЭВВ во времени (τ) под воздействием упругой волны для расстояний между зарядами (R): 0,5 м (1); 0,6 м (2); 0,8 м (3); 1,0 м (4)

Из приведенных на рис. 4 данных видно, что на всех рассмотренных расстояниях воздействие упругой волны сжатия вызывает в заряде ЭВВ изменение плотности массы за счет объемной деформации сжатия и последующей разгрузки. Деформация сжатия в заряде протекает с постепенным увеличением плотности ЭВВ. Период нарастания деформации в заряде на всех расстояниях имеет одинаковую продолжительность во времени. Максимальная деформация за-

ряда ЭВВ достигается на расстоянии $R \leq 0,6$ м. При этом плотность ЭВВ в заряде приближается к плотности негазифицированной эмульсионной матрицы $> 1,4$ г/см³ и находится выше критической плотности и невосприимчивости к детонационному импульсу от КД №8 $\rho_{\max} > 1,27$ г/см³. С удалением от источника возмущений величина объемной деформации уменьшается и, соответственно, уровень изменения плотности не достигает критических отметок. На графиках, соответствующих значениям $R = 0,8$ и $1,0$ м в точке максимальной деформации, плотность ЭВВ в заряде составляет $\rho_{\max} \sim 1,2$ г/см³ и $1,08$ г/см³.

После снижения давления в упругой волне ($\rho_{сж}$) до значений меньше ρ_{a1} , наступает фаза разгрузки. На различных расстояниях этот процесс протекает по-разному. Как видно из графиков на рис. 4, фаза разгрузки сопровождается постепенным восстановлением плотности ЭВВ. Конечная плотность (ρ') в зарядах ЭВВ на расстояниях $R=0,8$ м и $1,0$ м восстанавливается почти до исходных значений ρ_0 через $\tau \approx 12 \div 15$ мс. В заряде ЭВВ на $R \leq 0,6$ м возникает остаточная деформация, в результате чего $\rho' > \rho_0$ и остаточная плотность составляет уровень $\sim 1,23$ г/см³. Продолжительность процесса разгрузки, приблизительно, совпадает со временем нарастания деформации и составляет 6–8 мс.

Выводы. Таким образом, в ходе работы определено, что деформация в заряде ЭВВ диаметром 32 мм при прохождении упругой волны ограничена временем до 12 мс и уменьшается с увеличением расстояния от источника возмущения более 0,6 м.

Для ЭВВ с химической газификацией существуют граничные условия, обусловленные необходимостью обеспечения оптимальных расстояний и интервалов замедления между зарядами либо группами зарядов для полной реализации энергетического потенциала ЭВВ.

Полученные результаты исследований позволяют сформулировать задачи для выработки рекомендаций по выбору оптимальных параметров проведения буровзрывных работ с применением ЭВВ в проходческих забоях шахт и рудников.

Список литературы / Reference

1. Оптимизация способов заряжания и инициирования шпуровых зарядов патронированных ЭВВ марки „ЕРА“ при проходческих работах в угленосных массивах / [Кириченко А.Л., Устименко Е.Б., Шиман Л.Н. и др.] // Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського – Кременчук: КДПУ, 2012. – вип. 2/2012 (73). – частина 2. – С. 84–87.

Kirichenko, A.L., Ustimenko, Ye.B., Shyman, L.N., Podkamennaya, L.I. and Politov, V.V. (2012), “Method optimization of loading and initiation of blast-hole charges of packaged emulsion “ERA” explosives during the drifting operations in coal-bearing massifs”, *Visnyk KDPU im. M. Ostrohradskoho*, Kremenichuk, KDPU, no. 2/2012 (73), part 2, pp. 84–87.

2. Орленко Л.П. Физика взрыва; изд. 3-е испр. / Орленко Л.П. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – Т.1 – С. 676–679.

Orlenko, L.P. (2004), *Fizika vzryva* [Physics of Explosion], Third Edition, In 2 volumes, vol.1, FIZMATLIT, Moscow, Russia, pp. 676–679.

3. Устименко Е.Б. Особенности свойств ЭВВ для безопасного их применения при взрывных работах / Устименко Е.Б., Шиман Л.Н., Кириченко А.Л. // Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського – Кременчук: КДПУ, 2009. – вип. 2/2009 (55) – частина 1. – С. 84–87.

Ustimenko, Ye.B., Shyman, L.N., Kirichenko, A.L. (2009), “Peculiarities of water-emulsion explosive features for safe use during blasting”, *Visnyk KDPU im. M. Ostrohradskoho*, no.2/2009 (55), part. 1, pp. 86–89.

Мета. Оцінка впливу пружної хвилі стиснення на зміни детонаційних властивостей шпурових зарядів патронуваних емульсійних вибухових речовин (ЕВР).

Методи. Вимірювання зміни швидкості розповсюдження детонаційної хвилі у часі по заряду ЕВР під впливом пружної хвилі стиснення на заданих відстанях від джерела коливань.

Результати. За результатами експериментальних досліджень для патронуваних ЕВР діаметром 32 мм отримано залежність швидкості детонації від щільності ЕВР. Встановлено діапазон щільності, при якому досягається максимальне значення швидкості детонації, та значення критичної щільності, при якому ЕВР втрачає здібність стійко сприймати ініціюючий імпульс і детонувати від капсуль-детонатора (КД) з навіскою 0,6 г РЕНТ.

У ході роботи виконано оцінку впливу пружної хвилі, генерованої вибухом заряду, на деформування й розвиток детонаційних процесів у сусідніх шпурових зарядів ЕВР. Встановлено, що вплив пружної хвилі стиснення викликає в заряді ЕВР зміну щільності маси за рахунок об'ємної деформації стиснення та наступного розвантаження.

Наукова новизна. Деформація стиснення в заряді протікає з поступовим збільшенням щільності ЕВР. У заряді ЕВР діаметром 32 мм процес деформування, що визваний впливом пружної хвилі, обмежений у часі до 12 мс. Період наростання деформації до максимуму має однакову тривалість у часі та зменшується з віддаленням від джерела коливань більше 0,6 м. Після зняття навантаження настає фаза, що супроводжується поступовим відновленням щільності ЕВР і на різних відстанях від джерела збурень протікає по-різному.

Практична значимість. Отримані результати досліджень дозволяють сформулювати завдання для розробки рекомендацій з вибору оптимальних параметрів буропідричних робіт (БПР) з використанням ЕВР у проходницьких забоях шахт і рудників.

Ключові слова: емульсійні вибухові речовини, об'ємна деформація шпурового заряду, детонаційні характеристики

Purpose. To estimate the influence of compression elastic wave effect on change in detonation characteristics of blast-hole charges of packaged emulsion explosives.

Methodology. Measurement of velocity variations of detonation wave propagation with time through emulsion

explosive charge affected by compression elastic wave at given distances from the wave source.

Findings. Experimental results for 32 mm packaged emulsion explosives showed dependence of detonation velocity on emulsion explosive density. The density range which produces maximum detonation velocity was determined, as well as the critical density value with which the emulsion explosive lost its capability to steadily receive initiating pulse and detonate from blasting cap with 0.6 g PENT core load. In the course of the work the influence of elastic wave generated by charge firing on deformation and developing of detonation processes in adjacent blast-hole emulsion explosive charges was evaluated. It was determined that the compression elastic wave effect caused mass density variation in emulsion explosive charge due to volume compression deformation and following load removal.

Originality. Compression deformation in charge proceeds with gradual increase in emulsion explosive

density. Deformation process caused by elastic wave effect is limited in time to 12 ms in 32 mm emulsion explosive charge. Period of deformation increasing to its maximum has the identical time duration and decreases with removal at more than 0.6 m distance from the wave source. After unloading the phase comes which is followed by gradual recovery of emulsion explosive density and which proceeds in different ways at various distances from the wave source.

Practical value. Study results obtained allow defining a problem for developing recommendations on selecting of drilling and blasting optimal parameters when blasting with application of emulsion explosives in mine and pit drifting faces.

Keywords: *emulsion explosives, volume deformation of blast-hole charge, detonation characteristics*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.В. Со-
болевим. Дата надходження рукопису 16.05.12.*

УДК 622.625.28

Н.А. Лубенец, канд. техн. наук, доц.,
Т.Н. Лубенец

Государственное высшее учебное заведение
„Национальный горный университет“, г. Днепропетровск,
Украина, e-mail: Lubenets tatyana@ukr.net

РЕЖИМ ТОРМОЖЕНИЯ ПОЕЗДА

N.A. Lubenets, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
T.N. Lubenets

State Higher Educational Institution “National Mining University”,
Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: Lubenets tatyana@ukr.net

TRAIN BRAKING MODE

Цель. Установление функциональных зависимостей длины тормозного пути и допустимой скорости движения поезда от параметров его движения в самых разнообразных условиях. Действующие в настоящее время методики не учитывают изменения скорости движения поезда в период так называемого времени подготовки тормозов к действию. Ошибка отчасти обусловлена тем обстоятельством, что толкование распространенного в технике термина „торможение“, заимствованного от слова „tormos“ из греческого языка, связано с уменьшением скорости движения машины при торможении и не отвечает его истинному значению.

Методика. Зависимости получены общепризнанными аналитическими методами с использованием законов механики, уравнений движения и учитывают действительные процессы, протекающие в тормозной системе самоходной транспортной машины.

Результаты. В настоящей статье обоснованы функциональные зависимости длины тормозного пути и допустимой скорости движения поезда при торможении от параметров его движения. Искомые параметры, отчасти, определяются интенсивностью движения поезда на участке торможения в период так называемого времени подготовки тормозов к действию. Они учитывают скорость поезда в момент начала торможения, время подготовки тормозов к действию, условные ускорения поезда в так называемые периоды подготовки тормозов к действию и приложения тормозной силы, а также нормативный тормозной путь.

Научная новизна. Установленные зависимости правильно (адекватно) описывают взаимосвязь между параметрами движения поезда в режиме торможения и увязаны с уравнением его движения. Обоснована также необходимость в приведении действующего в технике толкования термина „торможение“ к его истинному значению, которое связывается не с уменьшением скорости движения машины в период торможения, а с ее замедлением.

Практическая значимость. Использование полученных зависимостей в учебных заведениях и на производстве в практике эксплуатационных расчетов поездов и самоходных транспортных машин позволит повысить качество обучения студентов и безопасность движения поездов.

Ключевые слова: *поезд, торможение, время подготовки, движение поезда, тормозной путь, скорость, ускорение, замедление*

Постановка проблемы. Движение поезда (самоходной транспортной машины с прицепной частью)

характеризуется большим разнообразием: трогание, разгон, ускоренное движение, замедленное движение, установившееся движение, торможение, движение на тормозах, остановка. Эксплуатационные расчеты по-