

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТОВ ПРИ ВЗРЫВАХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ НОВЫХ СМЕСЕВЫХ ВВ

*Н. С. Ремез, докт. техн. наук (ИГМ НАН Украины, НТУУ “КПИ”), А. И. Лучко,  
инж. (ПИ “Укрспецтуннельпроект”)*

*Наведено результати чисельних розрахунків напружено-деформованого стану ґрунтів під дією камуфлетних вибухів циліндричних зарядів нових сумішевих вибухових речовин.*

### Введение

Применение новых промышленных смесевых взрывчатых веществ (ВВ) местного приготовления [1] обусловлено, прежде всего, увеличением требований как к качеству дробления горной массы, так и к улучшению экологической обстановки по сравнению с использованием традиционных заводских ВВ. Для разработки эффективных методик расчета параметров взрывных работ с применением новых смесевых ВВ необходимы точные знания о механизме действия этих ВВ на грунты и горные породы. Поэтому численное исследование механического действия взрыва промышленных смесевых ВВ в мягких и твердых горных породах является актуальным вопросом.

В данной работе на основе численного моделирования волновых процессов в продуктах детонации и грунте проводится сравнение действия взрыва зарядов ВВ заводского и местного приготовления.

### Математическая постановка задачи

Математическая постановка задачи состоит в следующем. Полагается, что в грунтовом пространстве вдали от свободной поверхности расположен цилиндрический заряд ВВ бесконечной длины и радиусом  $r_0$ , который детонирует мгновенно. По всему объему заряда устанавливается одинаковое давление  $P_n$  и плотность продуктов детонации (ПД)  $\rho_n$ , равная начальной плотности ВВ. Движение ПД и грунта описывается законами сохранения импульса, массы и внутренней энергии, которые для случая осевой симметрии имеют вид [2].

Расширение продуктов детонации полагается происходящим по двучленной изоэнтропе, уравнение которой предложено в [3]:

$$P = Ar^n + Br^{\gamma+1}. \quad (1)$$

Из уравнения (1) при  $P \rightarrow P_n$  вытекает уравнение

$$P = P_n \left( \frac{\rho}{\rho_n} \right)^{k_n}, \quad (2)$$

где  $k_n$  – показатель изоэнтропы на фронте детонационной волны.

При  $P \rightarrow P_0$  ( $P_0$  – атмосферное давление) из (1) следует уравнение

$$P = P_0 \left( \frac{\rho}{\rho_n} \right)^{k_0}, \quad (3)$$

где  $\rho_0, k_0$  – плотность и показатель изоэнтропы при  $P = P_0$ ,  $P_n, \rho_n$  – значения давления и плотности в точке сопряжения кривых (2) и (3).

Внутренняя энергия продуктов детонации на фронте детонационной волны  $E$  складывается из суммы теплоты взрывчатого превращения  $Q$  и энергии ударного перехода

$$E = Q + \frac{P_n - P_0}{2} \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_n} \right). \quad (4)$$

Константы  $A, B, n, \gamma$  в уравнении (1) определяются из следующих условий. Кривые линии (1) и (2) имеют общую точку  $(P_n, \rho_n)$  и касательную в этой точке. Линии (1) и (3) имеют общую касательную при  $P \rightarrow P_0$ . Продукты детонации при расширении от  $P_n$  до  $P_0$  совершают работу, равную энергии взрывчатого превращения  $Q$ . Эти условия совместно с уравнением (1) дают систему уравнений для определения вышеназванных констант

$$k_n = \frac{N + B \rho_n^{\gamma+1} (\gamma + 1 - N)}{\rho_n}, \quad \gamma = k_0 - 1, \quad (5)$$

$$Q = \frac{(\rho_n - \rho_0)(V_0 - V_n)}{2} = \frac{P_n - P_0}{\rho_n(N-1)} + \frac{B \rho_n^\gamma (N-1-\gamma)}{\gamma(N-1)}.$$

Поскольку на фронте детонационной волны выполняются условия

$$P_n = \frac{\rho_0 D_n^2}{k_n + 1}, \quad \rho_n = \frac{\rho_0}{k_n} (k_n + 1), \quad (6)$$

где  $D_n$  – скорость детонации, то константы  $A, B, N, \gamma$  в уравнении (1) однозначно определяются из уравнений (5)–(6) при известных детонационных характеристиках ВВ ( $D_n, k_n, k_0, Q$  и  $\rho_0$ ).

Динамическое поведение грунта описывается в рамках модели твердой пористой многокомпонентной вязкопластической среды с переменным коэффициентом объемной вязкости [4]. Уравнение сжатия–разгрузки среды имеет одинаковый вид записи для нагрузки и разгрузки, однако с различными значениями параметров модели для этих ветвей.

Исследования проводились с лессовидным суглинком, физико-механические характеристики которого приведены в [5]. Радиус цилиндрического заряда составлял 0,1 м.

Исходные и расчетные детонационные характеристики ВВ приведены в таблице, где наряду с традиционными (граммонит 79/21 и игданит) рассматриваются новые смесевые ВВ.

#### Исходные и расчетные детонационные характеристики ВВ

ВВ	Теплота взрыва, кДж/кг	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Скорость детонации, м/с	$A$ , Па(кг·м <sup>3</sup> ) <sup>-<math>n_0</math></sup>	$n_0$	$B \cdot 10^{-5}$ , Па(кг/м <sup>3</sup> ) <sup>-<math>\gamma_0-1</math></sup>	$\gamma_0 + 1$	Давление, Га
Граммонит 79/21	4312,4	950	3300	2,7769	2,823	1,452	1,248	1,46
Игданит	3809,9	850	2500	$1,112 \cdot 10^{-5}$	4,409	1,502	1,261	0,834
Полимикс ГР4-Т10	3864,4	872	3150	5,67	2,732	1,279	1,253	1,234
Полимикс ГР1/8 на пористой АС	3944,0	875	3600	56,682	2,474	1,015	1,258	1,587
Полимикс ГР1/8 (85%)–КЖУ К2 (15%)	3604,0	1060	3900	16,627	2,637	0,772	1,261	2,085
Полимикс ГР1/8 (74%)–КЖУ К2 (26%)	3366,0	1250	4500	14,851	2,669	0,4048	1,262	3,07
Комполайт ГС6	3977,0	1030	2400	$0,283 \cdot 10^{-16}$	7,907	1,583	1,252	0,95

#### Результаты численных расчетов и их анализ

На рис. 1 представлены зависимости среднего гидростатического давления  $P$  и объемной деформации  $\epsilon$  от времени в лессовидном суглинке на границе с полостью при взрывах различных ВВ: рис. 1, *а* – граммонит 79/21 (кривая 1), полимикс ГР-1/8 на пористой аммиачной селитре (АС) (кривая 4), полимикс ГР1/8 (85%) – КЖУ К2 (15%) (кривая 5), полимикс ГР1/8 (74%)–КЖУ К2 (26%) (кривая 6); рис. 1, *б* – игданит (кривая 2), полимикс ГР4-Т10 (кривая 3), комполайт ГС6 (кривая 7). Из анализа кривых на рис. 1, *а* и 1, *б* следует, что максимум давления на границе с полостью достигается при взрывах зарядов полимикса ГР1/8 (74%)–КЖУ К2 (26%), затем – полимикса ГР1/8 (85%)–КЖУ К2 (15%), полимикса ГР1/8 на пористой АС и граммонита 79/21, далее полимикса ГР4-Т10, комполайта ГС6 и игданита. Такой характер распределения максимальных давлений в лессовидном суглинке на границе с полостью полностью соответствует характеру распределения давления в продуктах взрыва для этих ВВ (см. таблицу), то есть большее давление в продуктах взрыва вызывает большее давление в грунте на границе полость–грунт.

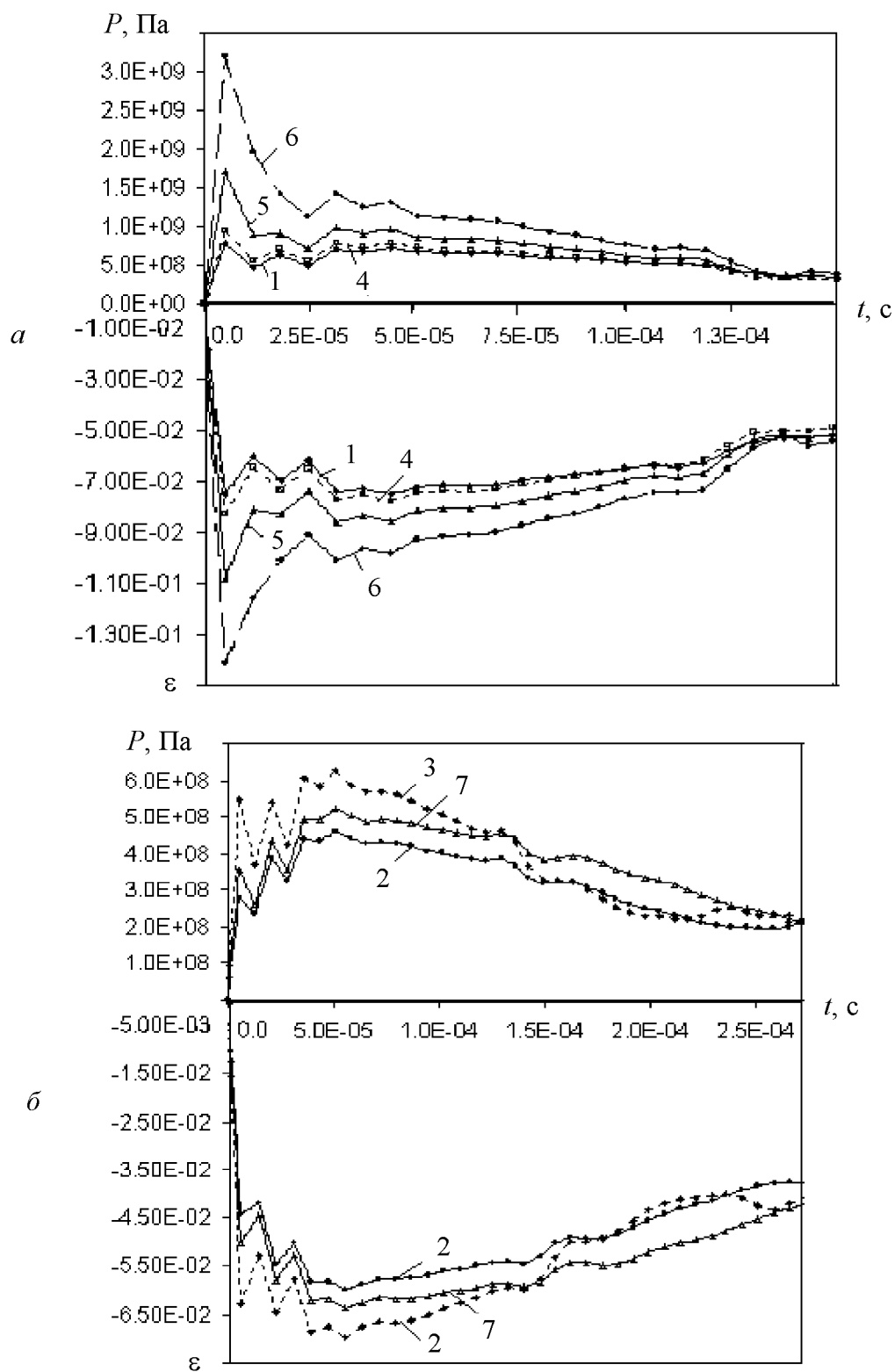


Рис. 1. Зависимость давления  $P$  и объемной деформации  $\epsilon$  от времени в лессовидном суглинке на границе с полостью при взрывах различных ВВ

Следует отметить, что наблюдаются 3–4 повторных максимума давления. И если для ВВ, имеющих более высокие детонационные характеристики, по величине они значительно меньше первого максимума (рис. 1, а), то для ВВ с меньшими детонационными характеристиками наблюдается рост повторных пиков давления. Появление повторных пиков объясняется следующими волновыми явлениями, происходящими в продуктах детонации (ПД) и в грунте. При воздействии высокого давления на грунт по нему начинает распространяться ударная волна, а внутрь ПД движется сходящаяся волна,

которая, отразившись от оси симметрии цилиндрического заряда, генерирует вторичные ударные волны. И если у «сильных» ВВ основная часть энергии уносится с головной ударной волной, то у более «слабых» импульс давления значительно более растянут во времени, что способствует более медленной передаче энергии продуктами детонации грунту и росту повторных пиков давления. Волновые процессы в «слабых» ВВ протекают более медленно.

Аналогичным образом изменяется и объемная деформация от времени в зависимости от типа ВВ.

На рис. 2 показаны зависимости давления  $P$  и объемной деформации  $\varepsilon$  от времени в суглинке на относительном расстоянии  $\bar{r} = r/r_0 = 24,3$  при взрывах различных ВВ. Обозначения такие же, как на рис. 1.

Из анализа кривых на рис. 2 следует, что ударная волна приходит на такое расстояние тем быстрее, чем больше скорость детонации ВВ. Наибольшее максимальное давление на данном расстоянии достигается для полимикса ГР1/8 (74%)–КЖУ К2 (26%) (кривая 6), затем – полимикса ГР1/8 (85%)–КЖУ К2 (15%) (кривая 5), далее для граммонита 79/21 (кривая 1), комполайта ГС6 (кривая 7), полимикса ГР1/8 на пористой АС (кривая 4), полимикса ГР4-Т10 (кривая 3) и игданита (кривая 2). Такое перераспределение в максимумах давления объясняется тем, что с удалением от очага взрыва на их значения влияет не только величина давления в ПД, но и другие детонационные характеристики, прежде всего плотность ВВ. Например, у полимикса ГР1/8 на пористой АС и полимикса ГР4-Т10 начальное давление продуктов детонации выше, чем у комполайта ГС6, но у последнего значительно большая плотность, что приводит к тому, что с удалением от заряда максимальное давление в волне у него больше.

Подобным образом изменяются и максимальные объемные деформации в зависимости от типа ВВ.

Из анализа результатов численного решения задачи вытекает, что с удалением от заряда отмеченная на рис. 2 закономерность проявляется еще сильнее. Это можно проследить по рис. 3, где показаны зависимости максимального давления от расстояния при взрывах зарядов различных ВВ в суглинке.

Из рис. 3, а следует, что для группы ВВ с высокими детонационными характеристиками для расстояний, превышающих 20 радиусов заряда, наибольшее давление достигается при взрывах полимикса ГР1/8 (74%) – КЖУ К2 (26%) (кривая 6), наименьшее – для полимикса ГР1/8 на пористой АС (кривая 4). И хотя последнее ВВ имеет большее начальное давление, чем у граммонита 79/21, у граммонита 79/21 большая плотность и теплота взрыва, что и ведет к такому перераспределению максимальных давлений с расстоянием.

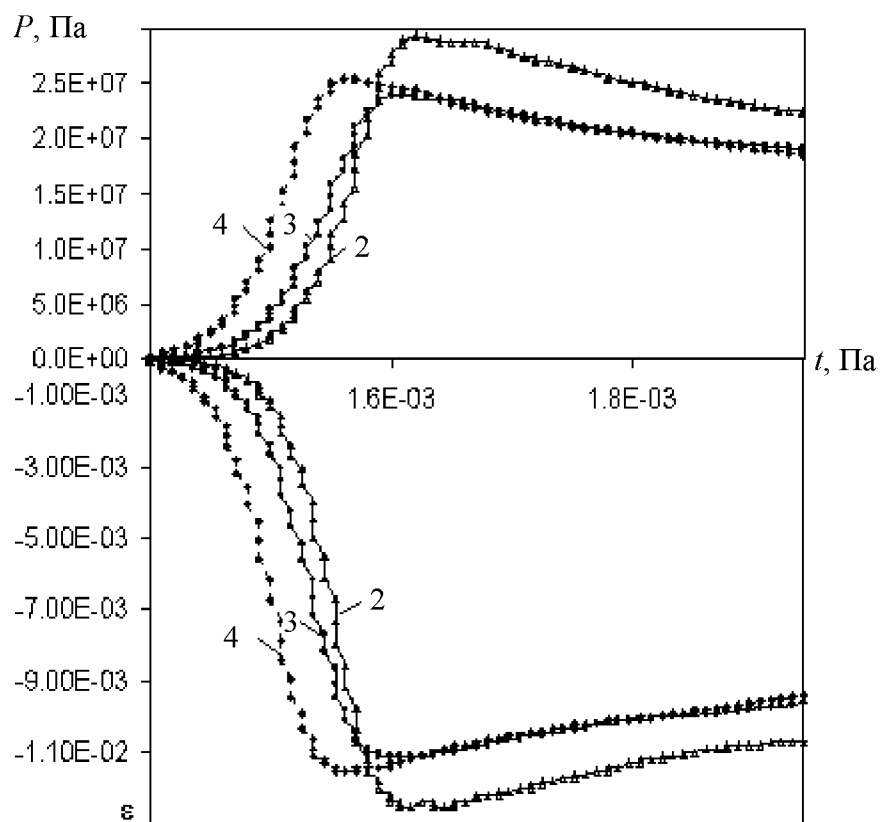
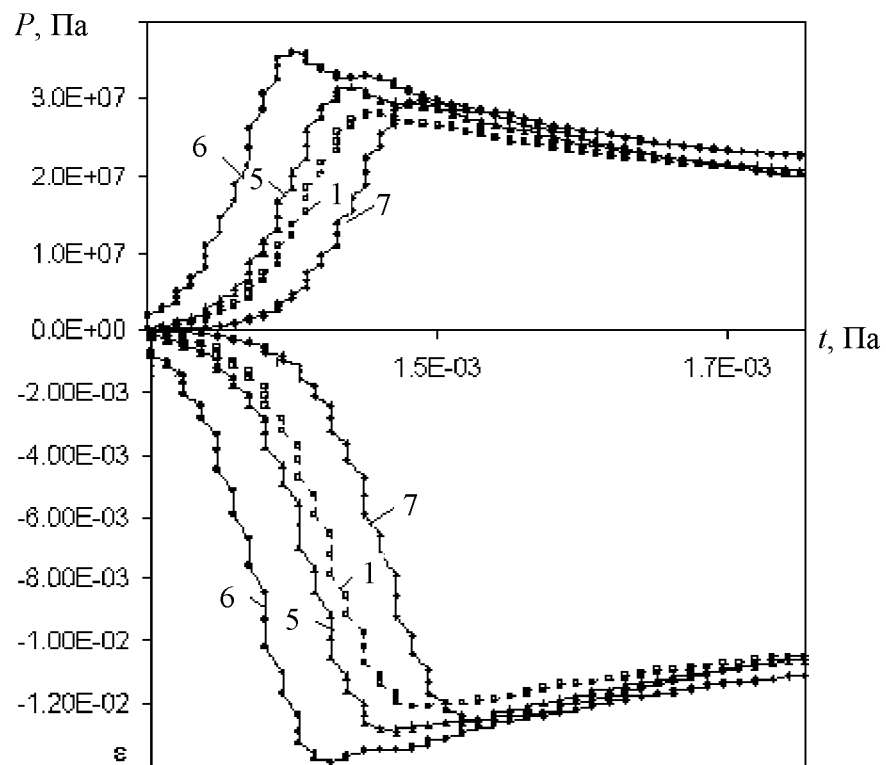


Рис. 2. Зависимость давления  $P$  и объемной деформации  $\epsilon$  от времени в суглинке на относительном расстоянии  $\bar{r} = r/r_0 = 24,3$  при взрывах различных ВВ

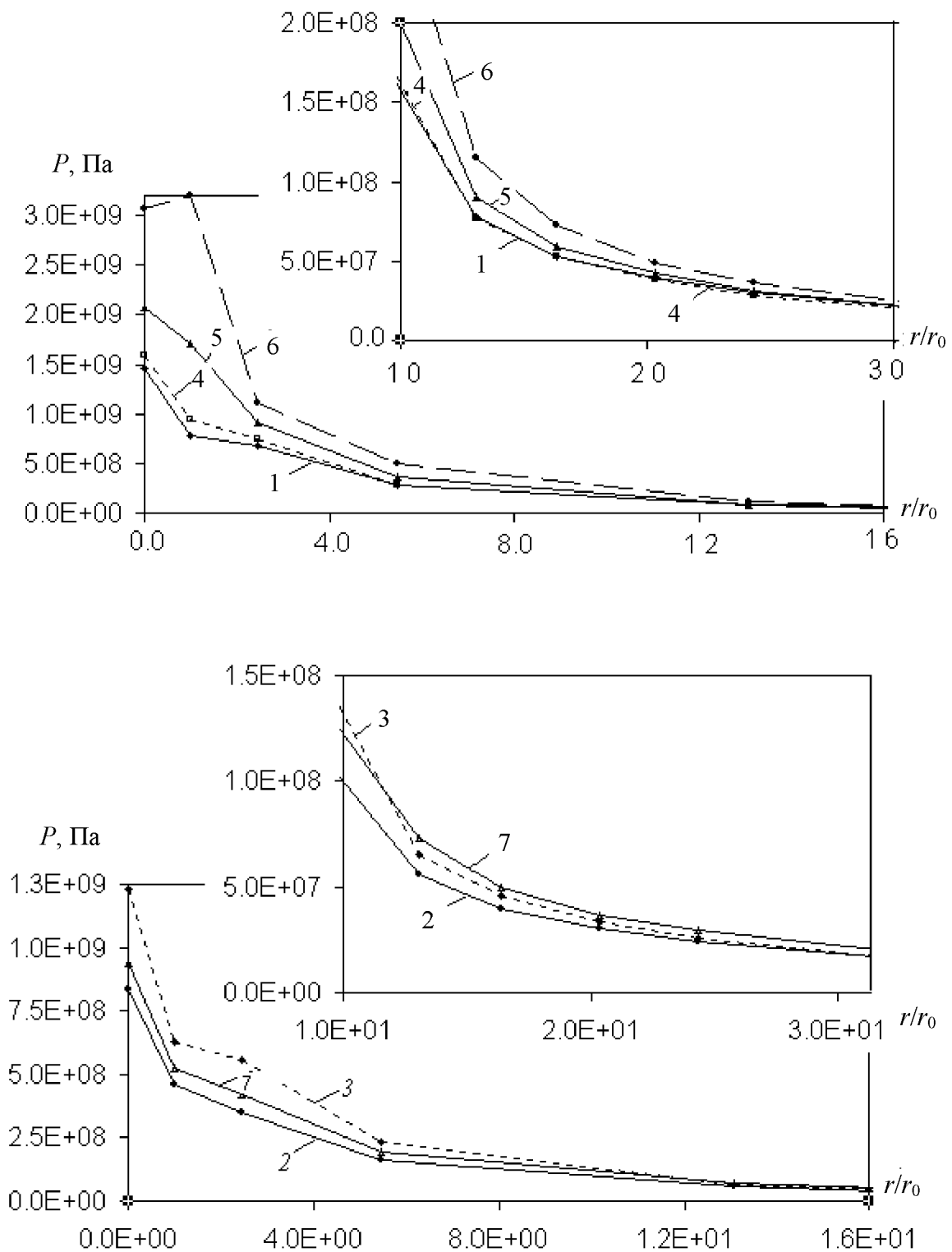


Рис. 3. Зависимость максимального давления от расстояния при взрывах различных ВВ в лессовидном суглинке

Для ВВ с меньшими детонационными характеристиками с увеличением расстояния от очага взрыва максимальное давление достигается при взрыве компаунда ГС6, который хотя и уступает полимиксу ГР4-Т10 (кривая 3) по давлению в ближней зоне, но имеет большую плотность и теплоту взрыва, поэтому с удалением от заряда кривая 7 лежит выше кривой 3.

Интересно отметить также полученный численными расчетами результат, состоящий в том, что на расстояниях, превышающих  $40r_0$ , наибольшее давление и объемная деформация достигаются при взрывах комполайта ГС6, который по этим параметрам превосходит такие «сильные» ВВ, как полимикс ГР1/8 (74%)–КЖУ К2 (26%) и полимикс ГР1/8 (85%)–КЖУ К2 (15%).

### Выводы

Параметры ударных волн при взрывах зарядов новых смесевых взрывчатых веществ сравнимы с такими же параметрами волн при взрывах зарядов традиционных промышленных ВВ (граммонит 79/21, игданит), а в средней и дальней зоне взрыва превосходят их. Поэтому можно сделать вывод об эффективности применения новых смесевых ВВ при уплотнении грунтов для различных нужд народного хозяйства.

Полученные результаты могут быть использованы для расчета параметров взрывных работ по уплотнению грунтовых оснований удлиненными зарядами.

1. *Прокопенко В. С., Лотоус В. В.* Разрушение твердых горных пород взрывами скважинных зарядов взрывчатых веществ в рукавах. – К.: Випол, 2003. – 82 с.

2. Механический эффект взрыва в грунтах / И. А. Лучко, В. А. Плаксий, Н. С. Ремез и др. – К.: Наук. думка, 1989. – 232 с.

3. *Ландау Л. Д., Станюкович К. П.* Об изучении детонации конденсированных взрывчатых веществ // Докл. Академии наук СССР, 1945. – Т. 46. – № 9. – С. 112–117.

4. *Ремез Н. С.* Особливості деформування твердого багатоконпонентного в'язкопластичного середовища зі змінним коефіцієнтом в'язкості при динамічних навантаженнях // Вісник НТУ України «Київський політехнічний інститут». Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К., 2000. – Вип. 3. – С. 34–39.

5. *Лучко І. А., Ремез Н. С., Лучко А. І.* Хвильові процеси в ґрунтових масивах під час вибухів нових сумішевих вибухових речовинах // Вісник НТУ України «Київський політехнічний інститут». Серія „Гірництво”: Збірник наукових праць. – К., 2006. – Вип. 14. – С. 24–30.