

УДК 624.139.329

ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СЛОИСТОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ В ГРУНТОВОМ МАССИВЕ ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

В. В. БОЙКО, Н. С. РЕМЕЗ, Т. В. ХЛЕВНЮК, Ю. В. ШЕВЧЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 26.05.2003

Исследовано напряженно-деформированное состояние слоистой цилиндрической оболочки, расположенной в грунтовой массе, при взрыве сплошного шелевого заряда цилиндрической формы, соосно размещенного во внутреннем слое оболочки. Данная система моделирует волновые процессы, происходящие при проведении взрывных работ для разрушения шахт пусковых установок (ШПУ). В результате численного решения задачи установлены особенности напряженно-деформированного состояния оболочки и окружающего массива. Это позволило определить параметры взрыва, необходимые для разрушения ШПУ, с одновременным обеспечением сейсмобезопасности окружающих объектов.

Досліджено напружено-деформований стан шаруватої циліндричної оболонки, розташованої в ґрунтовому масиві, при вибуху суцільного шелевого заряду циліндричної форми, співвісно розміщеного у внутрішньому шарі оболонки. Дана система моделює хвильові процеси, які відбуваються при проведенні вибухових робіт для руйнування шахт пускових установок (ШПУ). В результаті чисельного розв'язку задачі встановлені особливості напружено-деформованого стану оболонки і навколишнього масиву. Це дозволило визначити параметри вибуху, необхідні для руйнування ШПУ, з одночасним забезпеченням сейсмобезпеки навколишніх об'єктів.

The stress-strain state of a layered cylindrical shell situated in a ground massif under the action of the slot charge of cylindrical shape placed inside the shell's inner layer is investigated. Mentioned system models wave processes occurring when conducting the explosive works for destruction of mines for starting equipment (MSE). As the result of numerical solution of this problem the peculiarities of the stress-strain state of the shell and the surrounding massif are studied. This allows to determine the parameters of explosion, which are necessary for destruction of MSE with simultaneous provision of the seismic safety of surrounding objects.

ВВЕДЕНИЕ

Технологии, основанные на использовании энергии взрыва, широко применяются в различных отраслях народного хозяйства Украины, в том числе при проведении специальных взрывных работ. В качестве примеров можно назвать разрушение зданий, фундаментов, труб, высотных антенных конструкций. В последнее время взрывные технологии активно используются при демонтаже шахт пусковых установок (ШПУ) по программе "Старт-1". Это позволяет добиться удешевления производимых работ, их интенсификации и обеспечить ресурсосбережение.

Взрывные работы зачастую ведутся на объектах, находящихся в непосредственной близости к населенным пунктам (в некоторых случаях, в их черте), а сопровождающие их сейсмические колебания воздействуют на прилегающие охраняемые объекты и могут вызвать опасные воздействия на них. В связи с этим на местах проведения мероприятий, связанных со взрывами, всегда возникает задача расчета рабочих параметров, обеспечивающих разрушение уничтожаемых объектов с одновременным обеспечением сейсмобезопасности охраняемых объектов. Результаты практических

исследований и данные наблюдений, ведущихся на протяжении многих лет, показывают, что решение проблемы дальнейшего использования таких оперативных методов демонтажа ненужных объектов с одновременной сохранностью существующих рядом промышленных, гражданских и природных объектов во многом зависит от обеспечения сейсмобезопасного ведения взрывных работ.

В настоящее время известно значительное количество публикаций по теоретическому и экспериментальному исследованию характеристик взрывных процессов в грунтах, горных породах, металле, воде и других средах. Однако взрывное воздействие зарядов взрывчатых химических веществ (ВВ) при разрушении верхней части ШПУ, представляющих собой объекты, в состав которых входят цилиндрические металлические оболочки с наполнителем, расположенными в земной коре, практически не изучено. Кроме того, существующие нормативные документы (в том числе и "Единые правила безопасности при взрывных работах" – ЕПБВР) не отражают явлений, происходящих при взрывных нагрузках, и не могут быть использованы в практических целях. Уничтожение ШПУ с применением энергии взрыва на территории Украины, кроме сейсмического воз-

действия на окружающие гражданские и природные объекты, связано с такими опасными явлениями как разлет кусков металла и породы, а также воздействием ударно-воздушной волны. Исследованию поведения оболочек под действием продуктов детонации и различного рода импульсных нагрузок посвящено большое количество работ (см., например, [1–3]). Тем не менее, вопросы взаимодействия оболочечных конструкций с окружающими и заполняющими их грунтовыми средами затрагивались лишь в немногих публикациях. В большинстве же случаев использовались упрощенные модели источника нагрузки, сред и конструкций [4–10].

При изучении сейсмического воздействия различных источников колебаний на охраняемые объекты, как правило, либо не рассматривается сам источник и используются упрощенные модели сред и сооружений [11, 12], либо строятся их эмпирические модели [13]. Поэтому исследования процессов деформирования слоистых оболочек в грунтовом массиве под действием взрывных волн с учетом трансформации их в сейсмические волны имеет большое научное и практическое значение.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе ШПУ моделируется слоистой оболочкой длиной l с внутренним радиусом r_1 и внешним радиусом r_2 , расположенной в грунтовом массиве (рис. 1). Считается, что слои оболочки 1 и 5 шириной Δh выполнены из металла, а внутренние слои (2 и 4), имеющие ширину $r_2 - r_1 - 2\Delta h$, из бетона. При решении задачи вместо серии шпуровых зарядов, закладываемых в отверстия, выбуриваемые в бетонном слое по кольцу, рассматривается сплошной по всей длине оболочки щелевой заряд цилиндрической формы в средней части бетонного слоя 3. Он имеет внутренний радиус r_3 и ширину Δh_1 .

Будем полагать, что заряд ВВ детонирует мгновенно, причем во всем его объеме продукты детонации (ПД) имеют одинаковую плотность ρ_n , равную начальной плотности ВВ, и давление P_n .

В системе координат r, z цилиндрический объем ШПУ можно представить как результат вращения прямоугольника со сторонами l и r_2 вокруг оси z . Уравнения движения рассматриваемых сред в рамках механики сплошной среды в случае использования подвижных лагранжевых переменных при условии цилиндрической симметрии име-

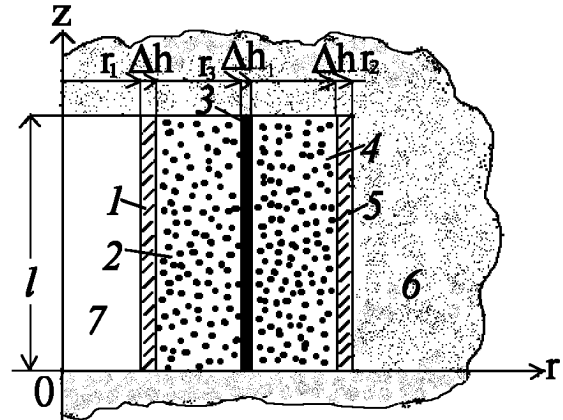


Рис. 1. Слоистая модель ШПУ с цилиндрическим щелевым зарядом

ют следующий вид:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}^{(i)}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}^{(i)}}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}^{(i)}}{z} = \rho^{(i)} \frac{du^{(i)}}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}^{(i)}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}^{(i)}}{\partial z} + \frac{\sigma_{zz}^{(i)} - \sigma_{\theta\theta}^{(i)}}{z} = \rho^{(i)} \frac{dw^{(i)}}{dt},$$

$$\frac{1}{V^{(i)}} \frac{dV^{(i)}}{dt} = \frac{\partial u^{(i)}}{\partial z} + \frac{\partial w^{(i)}}{\partial r} + \frac{u^{(i)}}{z}, \quad (2)$$

$$\sigma_{zz}^{(i)} = S_{zz}^{(i)} - P^{(i)},$$

$$\sigma_{rr}^{(i)} = S_{rr}^{(i)} - P^{(i)}, \quad (3)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{(i)} = S_{\theta\theta}^{(i)} - P^{(i)},$$

$$u^{(i)} = \frac{dz}{dt}, \quad w^{(i)} = \frac{dr}{dt}, \quad (4)$$

$$P^{(i)} = -\frac{1}{3} \left(\sigma_{rr}^{(i)} + \sigma_{\theta\theta}^{(i)} + \sigma_{zz}^{(i)} \right), \quad (5)$$

$$V^{(i)} = \frac{\rho_0^{(i)}}{\rho^{(i)}}, \quad (6)$$

где $\sigma_{rr}^{(i)}$, $\sigma_{\theta\theta}^{(i)}$, $\sigma_{zz}^{(i)}$ – нормальные напряжения; $\tau_{rz}^{(i)}$ – касательное напряжение; $S_{rr}^{(i)}$, $S_{zz}^{(i)}$, $S_{\theta\theta}^{(i)}$ – компоненты девиатора тензора напряжений (причем для продуктов детонации справедливо $S_{zz}^{(i)} = S_{rr}^{(i)} = S_{\theta\theta}^{(i)} = 0$); t – время; $\rho_0^{(i)}$, $\rho^{(i)}$ – начальная и текущая плотности сред соответственно. Значения индекса $i = 1 \dots 6$ соответствуют различным средам.

Грунт моделируется твердой пористой многокомпонентной вязкопластической средой [14]

$$\dot{\varepsilon} = \varphi(P, \varepsilon) \dot{P} - \frac{\alpha_1 \lambda(P, \varepsilon)}{\eta(P, \varepsilon)} \psi(P, \varepsilon), \quad (7)$$

с переменным коэффициентом объемной вязкости

$$\eta(\varepsilon) = \eta_D \left(\frac{\kappa - \rho_0 c_S^2}{k - \rho_0 c_S^2} \right)^{-m}, \quad m > 1. \quad (8)$$

Функции, входящие в уравнения (5), (7), определяются согласно [14]; ε и $\dot{\varepsilon}$ – объемная деформация и ее производная по времени соответственно.

Расширение продуктов детонации происходит в соответствии с двучленной изэнтропой [15, 16]:

$$P = A\rho^n + B\rho^{k+1}, \quad (9)$$

где константы A , n , B и k характеризуют тип ВВ и определяются через его детонационные характеристики.

Слоистая оболочка ($i=1, 2, 4, 5$) рассматривается в рамках модели идеальной упругопластической среды с условием текучести Мизеса [17]:

$$P^{(i)} = \left(\gamma_m^{(i)} - 1 \right) \rho^{(i)} E^{(i)} + C_0^2 \left(\rho^{(i)} - \rho_0^{(i)} \right), \quad (10)$$

$$\frac{\partial S_j^{(i)}}{\partial t} = 2\mu^{(i)} \left(\frac{\partial u^{(i)}}{\partial r} + \frac{1}{3\rho^{(i)}} \frac{\partial \rho^{(i)}}{\partial t} \right), \quad (11)$$

$$j = rr, \theta\theta, zz,$$

$$S_j^{(i)} = \begin{cases} S_j^{(i)}, & \text{если} \\ (S_{rr}^{(i)})^2 + (S_{\theta\theta}^{(i)})^2 + (S_{zz}^{(i)})^2 \leq \frac{2}{3}(Y^{(i)})^2, & \\ \frac{\sqrt{2/3} S_j^{(i)} Y^{(i)}}{\sqrt{(S_{rr}^{(i)})^2 + (S_{\theta\theta}^{(i)})^2 + (S_{zz}^{(i)})^2}} & \\ \text{в других случаях.} & \end{cases} \quad (12)$$

Здесь использованы следующие обозначения: C_0 – скорость звука; $Y^{(i)}$ – предел текучести; $\mu^{(i)}$ – модуль сдвига; $\gamma_m^{(i)}$ – константа материала, определяемая таким образом, чтобы выражение $P^{(i)}(\rho) + 2/3Y^{(i)}$ давало кривую Гюгонио для ударной волны с напряжениями выше предела упругости. Оболочка считается разрушенной, если в ней выполняется критерий разрушения Тейлора [18] – когда во всех ее точках действуют растягивающие напряжения ($\sigma_{\theta\theta} > 0$).

Приведем начальные условия задачи:

- для слоистой оболочки и грунта ($i=1, 2, 4, 5, 6$)

$$\begin{aligned} u^{(i)} &= 0, & w^{(i)} &= 0, \\ P^{(i)} &= 0, & \rho_0 &= \rho_0^{(i)}; \end{aligned} \quad (13)$$

- для продуктов детонации ($i=3$)

$$\begin{aligned} u^{(i)} &= 0, & w^{(i)} &= 0, \\ P^{(i)} &= P_n, & \rho_0 &= \rho_n. \end{aligned} \quad (14)$$

Предполагается, что между слоями обеспечивается жесткое сцепление без натяга по всей поверхности контакта. Граничные условия формулируются для каждой поверхности, ограничивающей области с определенными характеристиками сред:

- 1) на контактных поверхностях между продуктами детонации и оболочкой ($i=3$)

$$\begin{aligned} w^{(i)} &= w^{(i\pm 1)}, & -P^{(i)} &= (\sigma_{rr})^{(i\pm 1)}, \\ \tau_{rz}^{(i)} &= 0; \end{aligned} \quad (15)$$

- 2) на контактных поверхностях между слоями оболочки и оболочкой и грунтом ($i=1, 4, 5$)

$$\begin{aligned} w^{(i)} &= w^{(i+1)}, & \sigma_{rr}^{(i)} &= (\sigma_{rr})^{(i+1)}, \\ u^{(i)} &= u^{(i+1)}, & \tau_{rz}^{(i)} &= \tau_{rz}^{(i+1)}; \end{aligned} \quad (16)$$

- 3) на внутренней свободной поверхности оболочки при $r=r_1$

$$\sigma_{rr} = \tau_{rz} = 0; \quad (17)$$

- 4) на контактных поверхностях “торец оболочки – грунт” при $z=0, z=l$ ($i=1 \dots 5$)

$$\begin{aligned} u^{(i)} &= u^{(6)}, & \sigma_{zz}^{(i)} &= -P^{(6)}, \\ \tau_{rz}^{(6)} &= 0. \end{aligned} \quad (18)$$

2. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для решения поставленной задачи применялся конечно-разностный метод с использованием линейно-квадратичной искусственной вязкости в подвижных лагранжевых переменных. Применялась модифицированная конечно-разностная схема типа “крест” [17, 19] с подвижной сеткой, расширяющейся по мере распространения волн в средах. Для этого в конце каждого вычислительного цикла проводилась проверка условия достижения давлением в упругом предвестнике некоторого значения $P = P_0 + 0.01P_0$ (P_0 – атмосферное давление). Если это условие выполнялось в какой-либо ячейке, то расчетная область увеличивалась

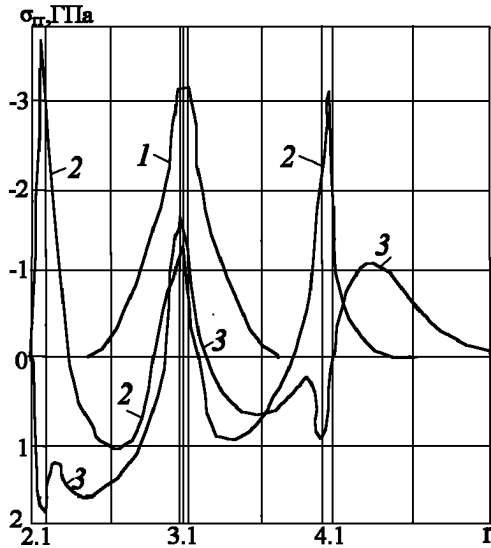


Рис. 2. Напряжения σ_{rr} в сечении $\theta=0, z=l/2$; ВВ – аммонит 6-ЖВ

в этом направлении на один слой, в котором задавались начальные параметры невозмущенной среды.

При решении задачи были выбраны следующие размеры оболочки (в метрах): $l=0.9, r_1=2.1, r_2=4.1, r_3=3.35, \Delta h=0.04, \Delta h_1=0.012$.

В качестве металла использовалась сталь с такими физико-механическими характеристиками: $\rho_1=7800 \text{ кг/м}^3, C_0=5600 \text{ м/с}, \gamma_m=2.73, Y=6.5 \cdot 10^8 \text{ Па}, \mu=9 \cdot 10^{10} \text{ Па}$.

Внутренний слой оболочки считался выполненным из бетона марки В25, имеющего следующие физико-механические параметры: $\rho_2=2300 \text{ кг/м}^3, C_0=4200 \text{ м/с}, \gamma_m=1.87, Y=3.2 \cdot 10^7 \text{ Па}, \mu=6.7 \cdot 10^9 \text{ Па}$.

В качестве ВВ выбирались литой тротил и аммонит 6-ЖВ. Характеристики тротила полагались следующими: $P_n=9.6 \cdot 10^9 \text{ Па}, \rho_n=1600 \text{ кг/м}^3, Q=4.87 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}, n=3.12, \gamma=0.25, D=6440 \text{ м/с}, A=0.884 \text{ Па}(\text{кг/м}^3)^{-n}, B=0.623 \cdot 10^5 \text{ Па}(\text{кг/м}^3)^{-\gamma}$. Для аммонита 6-ЖВ: $P_n=3.248 \cdot 10^9 \text{ Па}, \rho_n=1000 \text{ кг/м}^3, Q=4.313 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}, n=1.973, \gamma=0.25, D=4340 \text{ м/с}, A=4.33 \cdot 10^3 \text{ Па}(\text{кг/м}^3)^{-n}, B=0.583 \cdot 10^5 \text{ Па}(\text{кг/м}^3)^{-\gamma}$.

На рис. 2–4 представлены распределения напряжений $\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}$ и σ_{zz} соответственно, возникающие в сечении $\theta=0, z=l/2$. Нумерация кривых соответствует различным значениям времени: 1 – $t=2.3 \text{ мкс}$, 2 – $t=30 \text{ мкс}$, 3 – $t=54.7 \text{ мкс}$. Штриховые линии соответствуют границам раздела раз-

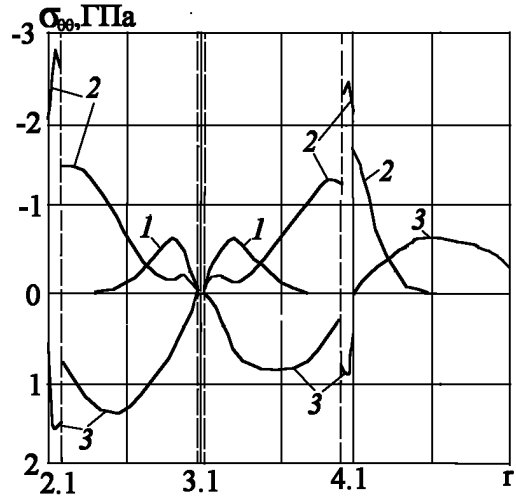


Рис. 3. Напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ в сечении $\theta=0, z=l/2$; ВВ – аммонит 6-ЖВ

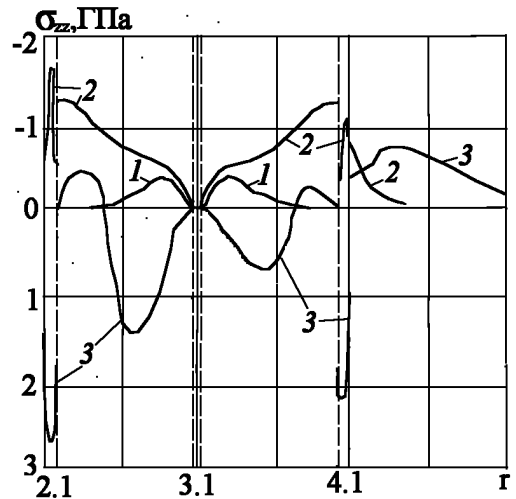


Рис. 4. Напряжения σ_{zz} в сечении $\theta=0, z=l/2$; ВВ – аммонит 6-ЖВ

личных сред.

Из графиков следует, что волна сжатия, достигнув металлических слоев оболочки, значительно увеличивает свою амплитуду, и, отразившись от более плотных слоев, вызывает откольные явления и разуплотнение бетона (кривая 2). При прохождении волн через стык материалов наблюдаются скачки напряжений $\sigma_{\theta\theta}, \sigma_{zz}$ (кривые 2 и 3 на рис. 3 и 4). В последующем растягивающие напряжения возникают и в металлических слоях оболочки, вызывая их разрушение (см. кривую 3). При выходе волны в грунтовой массив происходит значительное падение ее амплитуды, так как грунт обладает меньшей акустической жесткостью по сравне-

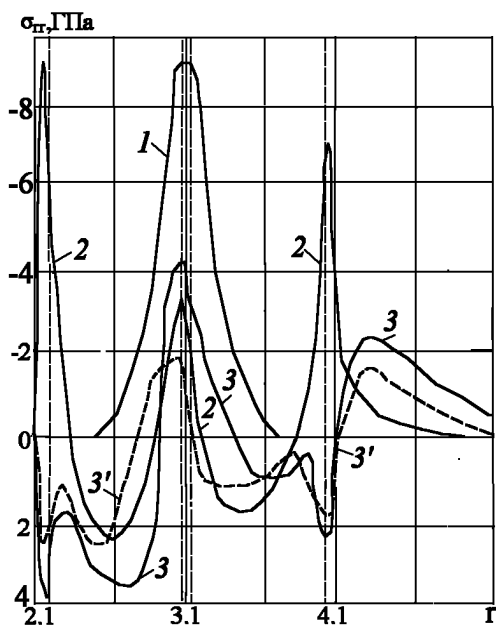


Рис. 5. Напряжения σ_{rr} в сечении $\theta=0, z=l/2$; ВВ – тротил

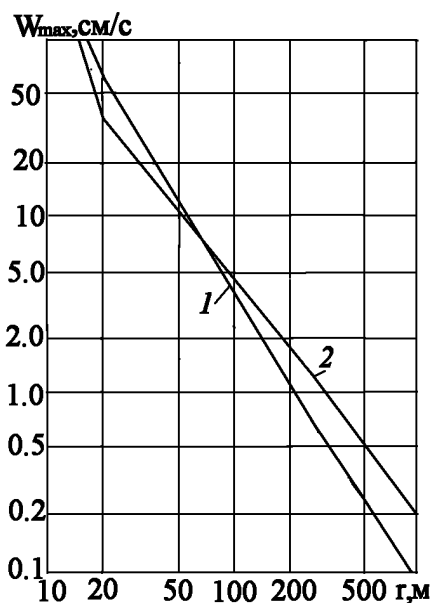


Рис. 6. Зависимость максимальной скорости w в сечении $\theta=0, z=l/2$ от расстояния

нию с оболочкой. Наличие пористости и вязкости грунта также способствует уменьшению параметров ударных волн. Кроме того, можно отметить, что с этого момента происходит отклонение волнового процесса от симметричного относительно заряда ВВ, поскольку часть энергии на границе с

грунтом передается последнему. Это влечет за собой уменьшение значений напряжений в оболочке. В результате этого внутренние слои разрушаются более интенсивно, причем слоистая оболочка оказывается полностью разрушенной при заданной величине заряда ВВ.

На рис. 5 изображены распределения напряжений σ_{rr} в том же сечении, что и на предыдущих рисунках, для взрыва заряда тротила того же радиуса, что и заряд аммонита 6-ЖВ. Нумерация кривых соответствует различным значениям времени: 1 – $t=1.8$ мкс, 2 – $t=25$ мкс, 3 – $t=44.8$ мкс. Кривая 3' соответствует времени $t=44.8$ мкс при взрыве щелевого заряда шириной 0.006 м. Штриховые линии соответствуют границам раздела различных сред. Из рисунка следует, что при взрыве заряда тротила наблюдаются волновые процессы, аналогичные рассмотренным ранее. Однако, так как детонационные характеристики тротила выше, чем у аммонита 6-ЖВ, то и амплитуды скоростей для ударных волн, распространяющихся в оболочке, оказываются значительно более высокими.

Из численных результатов вытекает, что для разрушения данной оболочки можно уменьшить ширину щелевого заряда с 0.012 до 0.006 м. Это соответствует снижению удельного расхода ВВ с 6.48 кг/м^3 (для аммонита 6-ЖВ) до 5.18 кг/м^3 (для тротила), что позволяет уменьшить сейсмическую нагрузку и значительно понизить стоимость проведения взрывных работ.

На рис. 6 показана в логарифмических координатах зависимость максимальной скорости w в сечении $\theta=0, z=l/2$ от расстояния r при взрывах аммонита 6-ЖВ (кривая 1) и тротила (кривая 2). Из графика следует, что в ближней к эпицентру взрыва зоне большая скорость достигается при взрыве заряда тротила, а с удалением – при взрыве аммонита 6-ЖВ. Этот факт объясняется следующим образом. Как известно из предыдущих исследований [19], хотя тротил имеет более высокие детонационные характеристики, возникающие при взрывах его зарядов цилиндрические взрывные волны затухают быстрее, чем при взрывах аммонита 6-ЖВ. При этом в спектре взрывных волн ВВ с высокими детонационными свойствами большая часть энергии переносится высокочастотными составляющими, а для ВВ с более низкими детонационными характеристиками – низкочастотными.

Поскольку зависимости максимумов скорости от расстояния в логарифмических координатах линейны (см. рис. 4), то были построены анали-

тические зависимости степенного вида:

$$U_m = K_1 \left(\frac{K_2}{r} \sqrt{\pi \rho_n} \right)^\beta. \quad (19)$$

Эти зависимости для заданных условий взрыва целевого заряда в трехслойной оболочке, расположенной в глинистом грунте, для расстояний $r \geq 20$ м имеют следующий вид:

- для тротила

$$\begin{aligned} U_m &= 1.01 \left(\frac{0.2}{r} \sqrt{\pi 1600} \right)^{1.6726} = \\ &= 1.01 \left(\frac{8}{r} \sqrt{\pi} \right)^{1.6726}; \end{aligned} \quad (20)$$

- для аммонита 6-ЖВ

$$\begin{aligned} U_m &= 3.948 \left(\frac{0.2}{r} \sqrt{\pi 100} \right)^{1.325} = \\ &= 3.948 \left(\frac{2}{r} \sqrt{\pi} \right)^{1.325}. \end{aligned} \quad (21)$$

Проведенные исследования послужили основой для расчета параметров взрывных волн, образовавшихся при взрыве цилиндрического заряда в цилиндрической оболочке. Эти параметры вошли в методику оценки сейсмического воздействия при разрушении ШПУ в Николаевской и Кировоградской областях [20]. Использование полученных при этом результатов позволило до проведения взрывных работ определить массу заряда, необходимую для получения требуемой нарушенности тела шахт при одновременном обеспечении сейсмобезопасности расположенных вокруг ШПУ объектов и нормальной психологической обстановки населения.

Например, в Кировоградской области ближайшее к ШПУ село Андреевка находилось в пределах 500 м от эпицентра взрыва. Рассчитанные по формулам (20) и (21) максимальные скорости колебаний составили 0.26 см/с для тротила и 0.56 см/с для аммонита 6-ЖВ. Допустимый уровень сейсмоколебаний, установленный на основании обследования технического состояния жилых и административных зданий села, составил 0.5 см/с. Исходя из этого, для разрушения ШПУ использовалось ВВ тротил, обеспечивающее сейсмобезопасность охраняемого объекта (реализуемый уровень колебаний – ниже допустимого предела).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Решена задача о действии цилиндрических взрывных волн в зоне разрушения и трансформации их в сейсмические колебания, которые, распространяясь, изменяют свои параметры в зависимости от свойств среды.
2. На основе современных модельных представлений взаимодействующих сред с учетом связанности динамических полей проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния слоистой цилиндрической оболочки в грунтовом массиве при взрывах целевых цилиндрических зарядов различных ВВ.
3. Показано, что для разрушения оболочки необходим меньший удельный расход тротила, по сравнению с удельным расходом аммонита 6-ЖВ.
4. На основе обработки полученных графиков выведены функциональные зависимости максимальной скорости от расстояния для взрывов рассмотренных ВВ в глине. Эти зависимости позволяют рассчитывать сейсмобезопасные расстояния от очага взрыва.
5. Разработанная методика расчета параметров взрывных волн в слоистых цилиндрических оболочках, находящихся в пористой многокомпонентной среде, при взрывах целевых цилиндрических зарядов может быть использована при проведении взрывных работ в различных слоистых средах (в том числе, при наличии неоднородностей и элементов конструкций) в условиях обеспечения сейсмобезопасности охраняемых объектов.

1. Гузь А. Н., Кубенко В. Д. Теория нестационарной гидроупругости оболочек. – К.: Наук. думка, 1982. – 400 с.
2. Луговой П. З. Динамика оболочечных конструкций при импульсных нагрузках (обзор) // Прикл. мех. – 1990. – 26, N 8. – С. 76–85.
3. Одинцов В. А., Чудов Л. А. Расширение и разрушение оболочек под действием продуктов детонации // Проблемы динамики упруго-пластических сред. – М.: Мир, 1975. – С. 85–154.
4. Баженов В. Г., Кочетков А. В., Крылов С. В., Фельдгун В. Р. Численное решение двумерных нестационарных задач взаимодействия тонкостенных конструкций с грунтовыми средами // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Всесоюз. межвуз. сб. – Горький: Горьк. ун-т, 1984. – С. 52–59.

5. Баженов В. Г., Кочетков А. В., Фельдгун В. Р. Деформирование цилиндрической оболочки в мягкой грунтовой среде под действием внутреннего импульсного нагружения // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Всесоюзн. межвуз. сб.– Горький: Горьк. ун-т, 1989.– С. 87–95.
6. Весняк А. В., Горшков А. Г., Тарлаковский Д. В. Нестационарное взаимодействие деформируемых тел с окружающей средой // Итоги науки и техники. МДТ.– 15.– 1983.– С. 69–148.
7. Кириленко Г. А. Метод разрывов для идеальной пластически уплотняющейся среды // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Всесоюзн. межвуз. сб.– Горький: Горьк. ун-т.– 1984.– С. 44–51.
8. Кочетков А. В., Фельдгун В. Р., Цветков А. Ф. Численное моделирование взрыва в цилиндрической оболочке, заполненной жидкостью // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Всесоюзн. межвуз. сб.– Горький: Горьк. ун-т.– 1991.– С. 76–85.
9. Ремез Н. С., Лучко И. А. Деформирование толстостенных цилиндрических оболочек с пористым наполнителем при внутреннем взрывном нагружении // Прикл. мех.– 1995.– 31, N 9.– С. 61–65.
10. Ремез Н. Нестационарное взаимодействие цилиндрической оболочки с ударными волнами при взрыве сферического заряда в грунтовой массе // Вісник НТТУ “КПІ”. Сер. “Гірництво”.– 2001.– Вип. 5.– С. 3–7.
11. Султанов К. С., Хусанов Б. Э. Оценка воздействия сейсмических нагрузок на подземные сооружения // Сейсмобезопасное строительство. Безопасность сооружений.– 2001.– N 1.– С. 29–32.
12. Некрасов В. В., Краснощеков Г. А., Капустяк А. В. Численный метод определения сейсмических нагрузок на сооружение // Сейсмобезопасное строительство. Безопасность сооружений.– 1998.– N 6.– С. 20–22.
13. Pronello C. Analysis of tram-induced vibrations affecting roads and buildings in standard urban sites // Int. J. Acous. Vib.– 2003.– 8, N 1.– P. 21–29.
14. Ремез Н. Особенности деформирования твердой многокомпонентной вязкопластической среды с переменным коэффициентом вязкости при динамических нагрузках // Вісник НТТУ “КПІ”. Сер. “Гірництво”.– 2000.– Вип. 3.– С. 34–39.
15. Каширский А. В., Орленко Л. П., Охитин В. Н. Влияние уравнения состояния на разлет продуктов детонации // Прикл. мех. техн. физ.– 1973.– N 2.– С. 71–74.
16. Ландау Л. Д., Станюкович К. П. Об изучении детонации конденсированных взрывчатых веществ // Докл. АН СССР.– 1945.– 46, N 9.– С. 112–117.
17. Уилкинс М. Л. Расчет упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике.– М.: Мир, 1967.– С. 212–263.
18. Taylor G. I. Scientific Papers: vol. 3.– Cambridge: Addish, 1963.– 203 с.
19. Лучко И. А., Плаксий В. А., Ремез Н. С. и др. Механический эффект взрыва в грунтах.– К.: Наук. думка, 1989.– 232 с.
20. Бойко В. В., Лавренов Л. В. Методы ведения буровзрывных работ при ликвидации шахт пусковых установок, расположенных вблизи населенных пунктов // Сб. мат. II Всеукр. науч.-практ. конф. по охране труда “Охрана труда в Украине”.– Киев, 1998.– С. 314–317.