УДК 622.235

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ ПРИ ВИБУХУ ПОРУЧ РОЗТАШОВАНИХ ЗАРЯДІВ

О. О. Фролов, канд. техн. наук (НТУУ «КПІ»)

Наведено результати експериментальних досліджень взаємодії енергетичних потоків при підриванні шпурових зарядів ТЕНу на різних відстанях між ними. Підтверджено наявність додаткової зони руйнування та отримані її параметри. Досліджено зміну гранулометричного складу матеріалу моделі в залежності від відстані між зарядами при їх підриванні.

Ключові слова: енергетичні потоки, концентрація напружень, модель, зона руйнування, вибух, шпуровий заряд, гранулометричний склад, середній діаметр куска.

Приведены результаты экспериментальных исследований взаимодействия энергетических потоков при взрывании шпуровых зарядов ТЭНа на различных расстояниях между ними. Подтверждено наличие дополнительной зоны взрывания и получены ее параметры. Исследовано изменение гранулометрического состава материала модели в зависимости от расстояния между зарядами при их взрывании.

Ключевые слова: энергетические потоки, концентрация напряжений, модель, зона разрушения, взрыв, шпуровой заряд, гранулометрический состав, средний размер куска.

Experimental results on power streams interaction when blasting of TEN charges on different distances between them are specified. The presence of additional blasting area is confirmed and its parameters are got. The change of particle-size of model material depending on distance between charges is investigated.

Keywords: power streams, stress concentration, model, area of destruction, explosion, blast-hole charge, grain size, mean size of piece.

Вступ. Теоретичними дослідженнями, результати яких викладено у працях [1–3], встановлено, що під час вибуху двох поруч розташованих зарядів вибухових речовин (ВР) хвилі напружень, які поширюються від кожного заряду, взаємодіють між собою. Результатом такої взаємодії є формування діаграми спрямованості потоку енергії, який характеризується концентрацією напружень, що виникають в скельному масиві гірських порід під час вибуху [4]. При такій спрямованій концентрації напружень спостерігається руйнування масиву гірських порід в напрямку, який є перпендикулярним лінії розташування свердловинних зарядів.

При одночасному підриванні зарядів додаткова зона руйнування масиву гірських порід розміщується посередині між зонами руйнування від вибухів окремих зарядів в напрямку, перпендикулярному до лінії їх з’єднання. Довжина цієї зони при певних відстанях між зарядами перевищує радіус основних зон руйнування. Зокрема, при відстані між свердловинними зарядами 5 м довжина додаткової зони в 1,26 рази більша за радіус основної зони [3].

Постановка задачі досліджень. Дослідження взаємодії енергетичних потоків вибухів свердловинних зарядів ВР при їх одночасному і короткосповільненому підриванні неможливе без проведення лабораторних дослідів, в яких

може бути відображена не тільки якісна, але в деяких випадках і кількісна оцінка впливу того чи іншого параметра на кінцевий результат вибухової дії. Тому було проведено серію експериментів щодо визначення розмірів зон руйнування при одночасному підриванні двох зарядів ВР на різних відстанях один від одного.

Викладення матеріалу досліджень. Згідно з [5] при вивченні закономірностей поширення хвиль напружень та їх дії на середовище доцільно застосовувати моделювання за допомогою методу еквівалентних матеріалів. Для отримання достовірних даних достатньо застосувати геометричний критерій подібності, рівність міцнісних та пружних властивостей середовищ та критерій Коші. Матеріалом, який відповідає вищезазначеним вимогам, є сургуч.

Дію вибуху двох шпурових зарядів досліджували в моделі з сургучу розмірами 400×230×60 мм. Заряди розміщували в центральній частині моделі. Згідно з проведеними експериментальними дослідженнями з метою встановлення зони руйнування при підриванні одиночного заряду ВР приймаємо таку конструкцію та розміри шпурових зарядів ТЕНу: діаметр заряду – 5 мм; довжина заряду – 20 мм; довжина шпуру – 30 мм. Вибухи виконані при відстанях між шпуровими зарядами 50, 60, 70, 80, 90 та 100 мм.

Згідно з [6] кількість вимірювань при значенні надійності $\alpha = 0{,}9$ приймаємо $n = 5$ в кожній серії. При порівнянні вибухового руйнування моделей оцінка якості подрібнення проводилася за величинами діаметра середнього куска. Оцінка гранулометричного складу моделей після вибуху здійснювалася методом ситового аналізу. Результати руйнування моделей наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Розміри зон руйнування в моделях з різними відстанями між зарядами

№ серії	Відстань між зарядами, мм	Середня довжина зони руйнування по лінії зарядів, мм	Середня ширина зони руйнування по лінії зарядів, мм	Середній розмір руйнування в перпендикуляр-ному напрямку до лінії з'єднання зарядів, мм	Середній об'єм зони руйнування, $см^3$	Середній діаметр куска сургучу, мм
1	50	163	114	205	347,6	5,76
2	60	174	113	172	374,7	6,07
3	70	183	114	141	405,4	6,33
4	80	192	112	132	422,9	6,52
5	90	205	111	82	438,1	6,62
6	100	214	108	79	446,1	6,67

Обробка отриманих експериментальних даних свідчить про те, що основні показники, які характеризують достовірність результатів вимірювань не мають значних відхилень від середніх значень розмірів зон руйнування і тому є надійними.

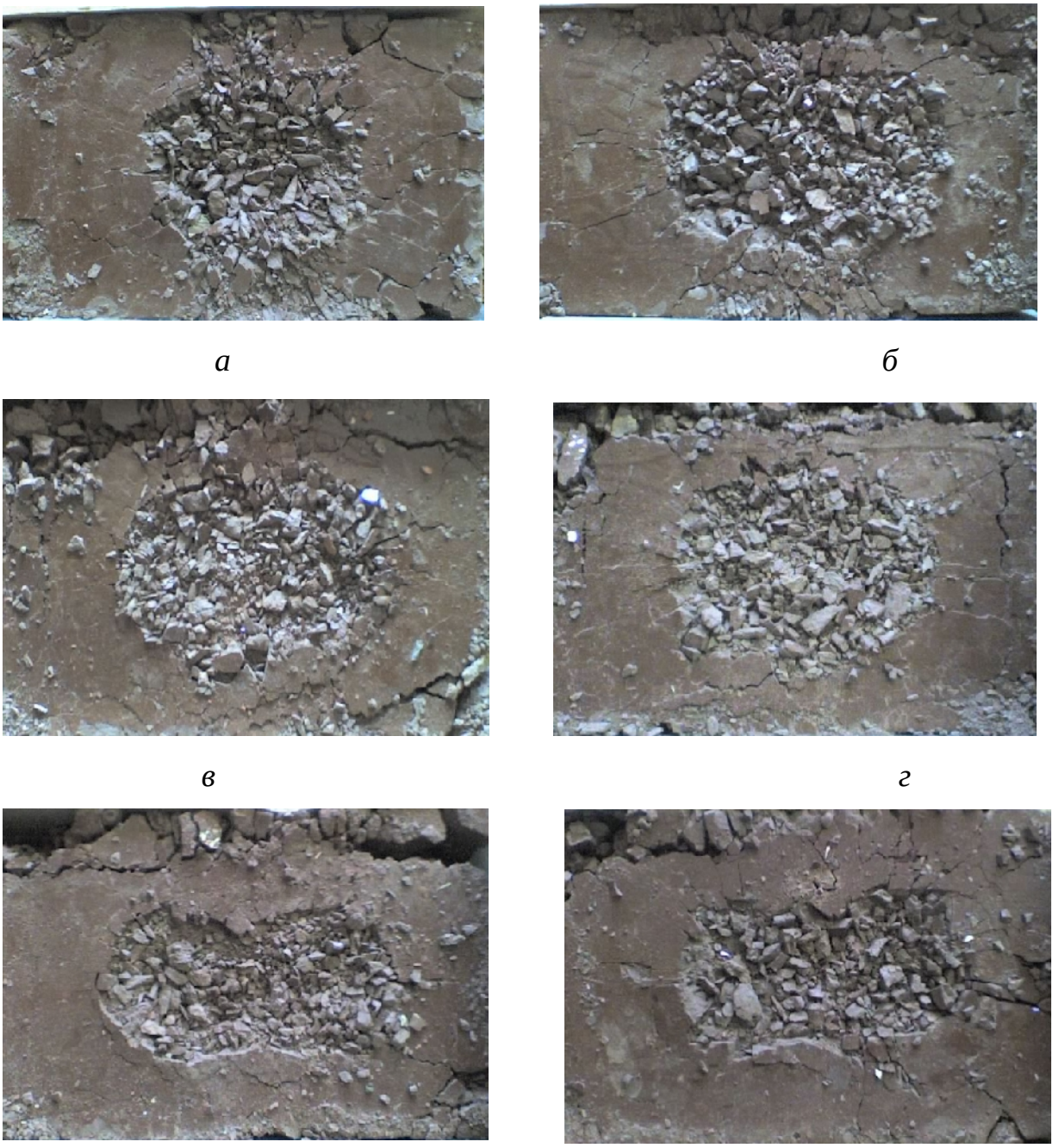
На рис. 1, *а* показано характерну зону руйнування від одночасного вибуху двох шпурових зарядів ТЕНу на відстані 50 мм один від одного. Аналіз показує, що в результаті вибуху відбулася інтенсивна взаємодія енергетичних потоків внаслідок концентрації хвиль напружень по лінії, перпендикулярній до напрямку з'єднання зарядів. В результаті цього утворилася додаткова зона руйнування, яка поширюється майже до меж моделі. Якщо середнє значення ширини зони руйнування, що відображує діаметр зони від вибуху одиночного заряду, становить 114 мм, то середній розмір руйнування в напрямку, перпендикулярному до лінії з'єднання зарядів, становить 205 мм. Таким чином, розмір руйнувань у цьому напрямку збільшується в 1,8 рази порівняно з основною зоною руйнування.

Це підтверджує теоретичні висновки, наведені в [1, 2], щодо взаємодії енергетичних потоків та концентрації хвиль напружень, які поширюються від кожного шпурового заряду при підриванні. Результатом такої концентрації в напрямку, перпендикулярному до лінії розташування зарядів, є більш інтенсивне руйнування моделі з сургучу в місці контакту зон руйнування.

При підриванні зарядів ТЕНу на відстані 60 мм один від одного спостерігається також утворення додаткової зони руйнування (рис. 1, *б*). Однак руйнування в цьому напрямку менш інтенсивні. Зокрема, середня ширина зони руйнування по лінії зарядів становить 113 мм, а середній розмір руйнування в перпендикулярному напрямку до лінії з'єднання зарядів – 172 мм, тобто розмір додаткової зони руйнування збільшується лише в 1,5 рази (див. табл. 1). Форма зони руйнування на поверхні масиву також зазнала значних змін. Якщо при відстані між зарядами 50 мм зона має форму, подібну до правильного еліпсу, то при відстані 60 мм її форма стає схожою на неправильний овал, і в ній можна виділити зони руйнування від вибухів окремих шпурових зарядів. Слід відмітити більш значне тріщиноутворення в інших напрямках моделі.

Підривання шпурових зарядів на відстані 70 мм (рис. 1, *в*) характеризується ще більшим зменшенням зони руйнування в напрямку, перпендикулярному лінії з'єднання зарядів. Розмір додаткової зони руйнування збільшується в порівнянні з шириною основної зони руйнування лише в 1,24 рази. Крім того, спостерігається поступове відокремлення зон руйнування окремих вибухів шпурових зарядів одна від одної та збільшення крупності фракційного складу зруйнованої маси.

На рис. 1, *г* показана зона руйнування при вибуху двох зарядів ТЕНу на відстані 80 мм один від одного. Аналіз цієї зони свідчить про те, що на модельному блоці з'явилась більша кількість радіальних тріщин від місць розміщення шпурових зарядів до меж блока в порівнянні з попередньою зоною руйнування. Збільшилась також крупність зруйнованого матеріалу, і спостерігається наявність незначної додаткової зони руйнування в напрямку, перпендикулярному до лінії розташування шпурів. Розмір додаткової зони руйнування перевищує ширину зони в 1,18 рази.



а *б*

в *г*

Рис. 1. Характерні зони руйнування від вибуху поруч розташованих зарядів ВР при відстані між шпурами: *а* – 50 мм; *б* – 60 мм; *в* – 70 мм; *г* – 80 мм; *д* – 90 мм; *е* – 100 мм

При відстані між зарядами ТЕНу 90 мм зони руйнування від вибухів окремих зарядів ВР розмежувалися більш чітко (рис. 1, *д*). Видимої взаємодії енергетичних потоків не спостерігається. Руйнування в місці контакту зон від вибухів окремих зарядів в напрямку, перпендикулярному лінії їх з’єднання, не відбувається. Ширина зони руйнування в місці взаємодії окремих вибухів менша за середнє значення зони руйнування в 1,35 рази і становить в середньому 82 мм (див. табл. 1). Крупність зруйнованого матеріалу в порівнянні з попередніми серіями вибухів також збільшилась. З’явились декілька магістральних тріщин, які поширюються до меж блока.

Підривання зарядів на відстані 100 мм один від одного характеризується ще більшим, у порівнянні з попереднім вибухом, зростанням середнього розміру куска зруйнованого матеріалу та розвитком системи тріщин до меж модельного блока (рис. 1, *е*). Ширина зони руйнування в місці взаємодії вибухів становить в середньому 78 мм. Спостерігається також подальше відокремлення зон руйнування, утворених вибухами одиночних зарядів.

В табл. 1 наведено також значення об’ємів воронок руйнування від вибухів двох поруч розташованих зарядів та середній розмір куска зруйнованого матеріалу. Аналіз даних показує, що об’єм зони руйнування від вибуху системи зарядів ВР збільшується зі збільшенням відстані між шпурами. Це пояснюється зменшенням коефіцієнта перекривання зон подрібнення при вибухах окремих зарядів, а при відстанях між шпурами 70 та 80 мм ще й існуванням додаткової зони руйнування, утвореної в результаті взаємодії енергетичних потоків і спрямованої концентрації напружень під час вибуху. При віддаленні шпурових зарядів один від одного збільшується також розмір середнього куска зруйнованого матеріалу сургучу, оскільки ступінь взаємодії вибухів від окремих зарядів зменшується.

На рис. 2 наведено графік залежності об’єму руйнування $V_р$ матеріалу моделі від відстані a між шпуровими зарядами ТЕНу під час їх вибуху. Порівнюючи характер зміни об’єму руйнувань з теоретичними розрахунками, наведеними в [1, 2], в діапазоні відстаней від 5 до 10 м, можна стверджувати, що вони ідентичні. Зокрема, об’єм руйнувань матеріалу моделей в наведеному діапазоні при відстані між шпурами 100 мм збільшується в порівнянні з початковим значенням (50 мм) в 1,28 рази, а при теоретичних розрахунках – в 1,17 рази, тобто розбіжність в результатах експериментальних і теоретичних досліджень становить не більш ніж 10 %.

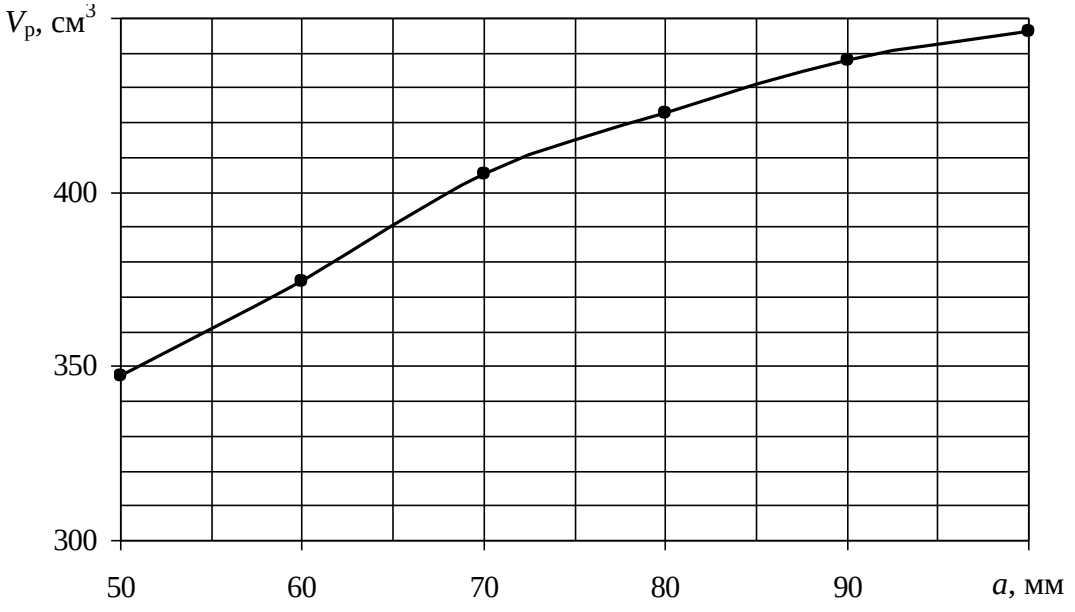


Рис. 2. Середній об’єм зони руйнування, утвореної під час одночасного вибуху поруч розташованих зарядів ТЕНу, в залежності від відстані між шпурами

На рис. 3 та 4 наведено гістограми характерного розподілу гранулометричного складу сургучу при руйнуванні моделі шпуровими зарядами ТЕНу на відстанях 50 і 100 мм один від одного.

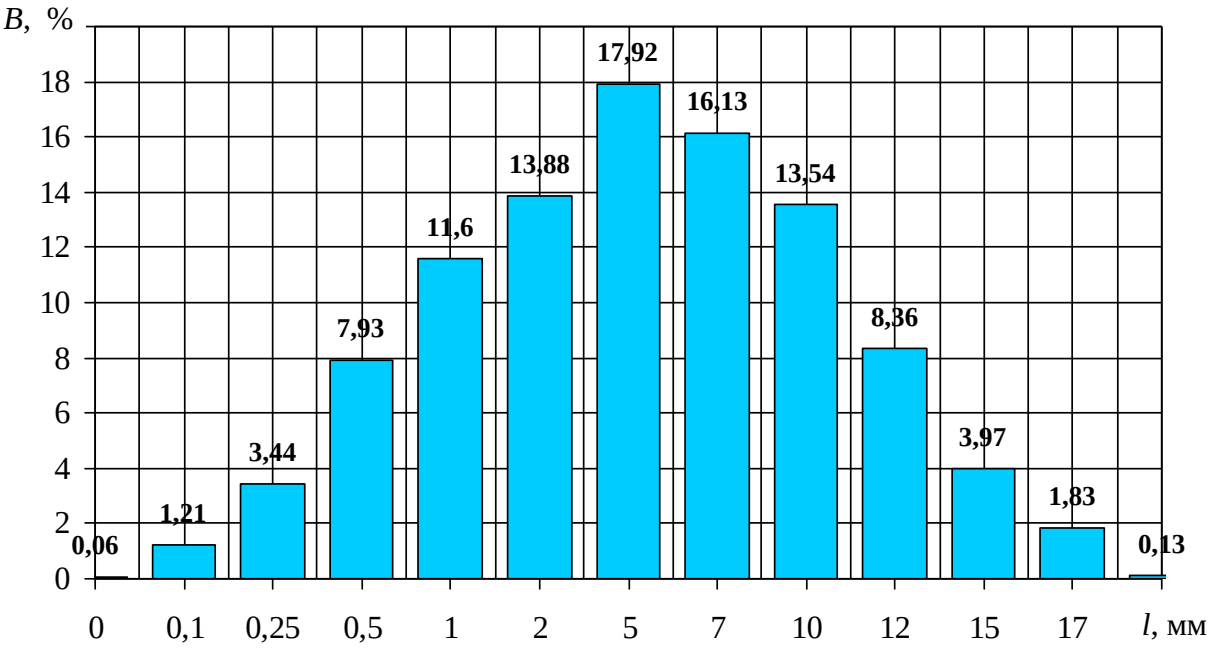


Рис. 3. Гістограма розподілу гранулометричного складу сургучу при руйнуванні моделі шпуровими зарядами на відстані 50 мм один від одного

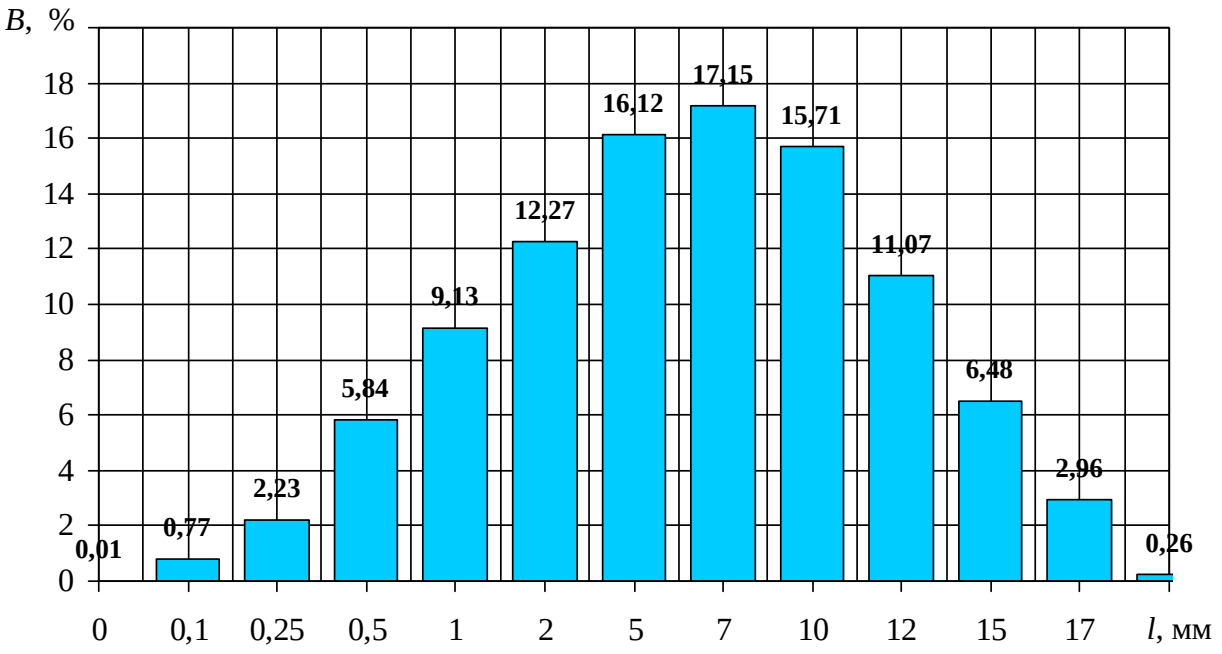


Рис. 4. Гістограма розподілу гранулометричного складу сургучу при руйнуванні моделі шпуровими зарядами на відстані 100 мм один від одного

Аналіз рисунків показує, що крупність фракцій сургучу збільшується зі збільшенням відстані між зарядами, тобто максимальні значення гістограм

розподілу сургучу зміщуються праворуч. Цей висновок підтверджується також даними табл. 2, в якій наведено розподіл фракційного складу сургучу при його руйнування зарядами на відстанях 50–100 мм.

Таблиця 2. Розподіл гранулометричного складу сургучу після руйнування

Відстань між зарядами, мм	Розміри фракційного складу, мм												
	0–0,1	0,1–0,25	0,25–0,5	0,5–1	1–2	2–5	5–7	7–10	10–12	12–15	15–17	17–20	>20
50	0,06	1,21	3,44	7,93	11,6	13,88	17,92	16,13	13,54	8,36	3,97	1,83	0,13
60	0,05	1,05	3,28	7,13	10,08	13,01	18,73	16,86	14,21	8,85	4,37	2,16	0,22
70	0,02	0,91	2,26	6,51	9,71	12,51	18,01	18,34	14,68	9,42	5,04	2,33	0,26
80	0,02	0,77	2,06	6,27	9,52	12,14	17,48	18,57	15,31	10,01	5,3	2,3	0,25
90	0,01	0,81	2,11	5,99	9,41	12,42	16,85	17,62	15,18	10,18	6,23	2,86	0,33
100	0,01	0,77	2,23	5,84	9,13	12,27	16,12	17,15	15,71	11,07	6,48	2,96	0,26

На рис. 5 наведено зміну середнього розміру куска зруйнованого матеріалу від відстані між шпуровими зарядами. Аналіз залежності показує, що зі збільшенням відстані a між зарядами середнє значення куска l зменшується за поліноміальною залежністю, яку можна представити у вигляді:

$$l = 3{,}11 - 0{,}0003a^2 + 0{,}07a.$$

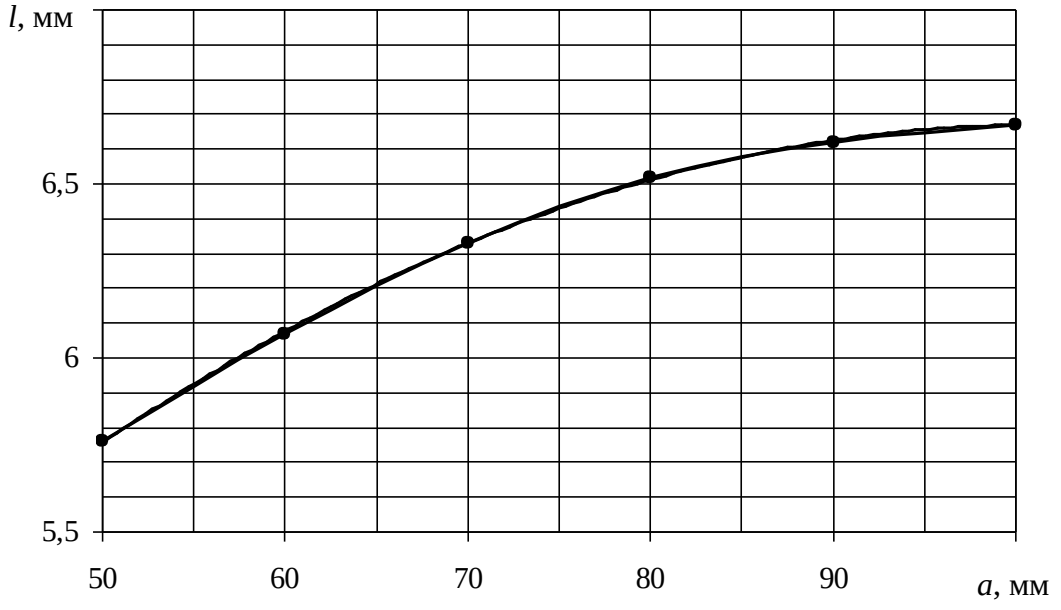


Рис. 5. Залежність середнього діаметра l куска зруйнованого матеріалу від відстані a між шпуровими зарядами

Слід також зазначити, що при відстані між шпуровими зарядами 80 мм і більше інтервал між середніми значеннями розміру зруйнованих кусків сургучу зменшується, тобто графічна залежність наближається до горизонталі.

Висновки

1. Лабораторні експериментальні досліди з вивчення взаємодії енергетичних потоків при вибуху поруч розташованих циліндричних зарядів ВР підтверджують основні результати теоретичних досліджень щодо наявності додаткової зони руйнування, яка утворюється при спрямованій концентрації напружень в напрямку, перпендикулярному до лінії розташування зарядів.

2. При відстані між зарядами 50 мм довжина додаткової зони руйнування перевищує середній радіус руйнування під час вибуху одного заряду в 1,8 рази; при відстані 60 мм – в 1,5 рази; 70 мм – в 1,24 рази; 80 мм – в 1,18 рази; при відстанях 90 і 100 мм додаткової зони руйнування не спостерігається.

3. Установлено, що значення середнього куска зруйнованого матеріалу в межах зони руйнування, утвореної в результаті одночасного підривання поруч розташованих циліндричних зарядів, зменшується з 6,67 до 5,76 мм зі зменшенням відстані між зарядами зі 100 до 50 мм відповідно, тобто на 16 %.

4. Об’єм руйнування матеріалу моделей у наведеному діапазоні при відстані між шпурами 100 мм збільшується в порівнянні з початковим значенням (50 мм) в 1,28 рази, а при теоретичних розрахунках при зміні відстані з 10 м до 5 м – в 1,17 рази. Розбіжність результатів не перевищує 10 %.

1. *Фролов О. О.* Теоретичні передумови розрахунку об’єму руйнування гірських порід під час вибуху систем подовжених зарядів / О. О. Фролов // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво": Зб. наук. праць. – К.: НТУУ "КПІ". – 2008. – Вип. 16. – С. 13–16.

2. *Фролов О. О.* Встановлення розмірів і форми зони руйнування при вибуху системи свердловинних зарядів / О. О. Фролов // Збірник «Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва»: Науково-виробничий збірник. – 2009. – Вип. 1/2009 (3). – С. 100–105.

3. *Фролов О. О.* Дослідження параметрів зони руйнування при вибуху системи свердловинних зарядів / О. О. Фролов // Вісник Криворізького технічного університету: Зб. наук. праць. – 2009. – Вип. 23. – С. 186–189.

4. *Партон В. З.* Механика разрушения: От теории к практике / В. З. Партон. – М.: Наука, 1990. – 240 с.

5. *Боровиков В. А.* Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород / В. А. Боровиков, И. Ф. Ванягин. – М.: Недра, 1990. – 231 с.

6. *Повышение эффективности* действия взрыва в твердой среде / В. М. Комир, В. М. Кузнецов, В. В. Воробьев, В. Н. Чебенко. – М.: Недра, 1988. – 209 с.

Надійшла до редакції 11.12.2012 р.
Рекомендовано до друку докт. техн. наук В. Д. Воробйовим