

УДК 622.235:622.281.4

## Качественные параметры взрывного способа возведения торкретбетонной крепи взрывным способом

Хоменчук О. В., Чухлебов С. В.

*Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина*

---

### Аннотация

Установлены условия формирования однородного многофазного потока цементно-песчаной смеси при возведении торкретбетонной крепи взрывным способом. Впервые разработана методика определения оптимальных скоростных и пространственных параметров взрывного способа торкретбетонирования.

---

Анализ состояния подготовительных выработок шахт Украины показывает, что в большинстве подготовительных горных выработках на сегодняшний день выполняются работы по ремонту крепи. Кроме того, почти половина всех действующих на шахтах Донбасса вертикальных стволов также имеют нарушения крепи.

В условиях новых рыночных отношений актуальны вопросы снижения стоимости, энергоемкости и трудоемкости ремонта крепи горных выработок.

Одним из перспективных способов поддержания и ремонта крепи горных выработок, который позволяет снизить трудоемкость и материалоемкость, является усиление крепи набрызгбетоном или торкретбетоном в местах проявления повышенного горного давления. Однако ряд особенностей технологии набрызгбетонирования препятствуют широкому применению данного способа. К ним относятся: необходимость специального оборудования, источников энергии; нерациональное применение при небольших объемах работ (высокие транспортные затраты, продолжительный подготовительный период) и в камерных выработках большого пересечения, зависимость качества покрытия от опыта и квалификации сопловщика. Так же присутствует опасность отравления аэрозолями бетонной смеси и ускорителей схватывания, поражения отскакивающим материалом, (в особенности при применении сталефибробрызгбетона).

В работе [1] изложены основные параметры и схемы разработанного в ДонНТУ взрывного способа набрызгбетонирования. Этот способ обладает рядом преимуществ перед традиционными видами набрызгбетонирования, в частности, это использование только энергии взрыва для подготовки поверхности и нанесения на нее омоноличивающего раствора. Раствор наносится на всю поверхность одновременно, что повышает производительность и исключает образование неоднородного покрытия. Кроме того, в результате воздействия взрыва на компоненты смеси и на саму смесь, набрызгбетон дополнительно уплотняется, образуя более прочный по своим характеристикам материал.

В своей работе [2] исследователи Безматерных В. А., Щукин А. С. и Артеменко А. П. отметили, что при разлете песчано-гравийной смеси после взрыва имеет место такое явление как расслоение потока, т. е. движение частиц разной массы с разными скоростями. Очевидно, что усиление или ослабление изменения плотности в случае набрызгбетонирования имеет важное значение для эффективности процесса. Кроме того, при сильном расслоении потока песчано-гравийной или цементно-песчаной смеси актуален вопрос качества слоя формируемой крепи.

В работах [1, 3–5] приводятся схемы и эффективные параметры взрывного способа набрызгбетонирования применительно к различным условиям применения, однако вопрос качественного состава полученной крепи остался не затронут. При изменении качественного состава смеси трудно определить прочностные характеристики возводимой крепи. Поэтому необходимо детально изучить процесс расслоения потока и установить такие технологические режимы, при которых расслоение будет минимальным. Это и является целью данной работы.

В работе [6] для достижения поставленной цели был теоретически и практически описан и изучен разлет не связанных между собою частиц с учетом сил инерции и аэродинамического сопротивления. Для этого было рассмотрено последовательное движение фронта частиц

заданного размера. Установлено, что движение частиц в окружающем воздухе описывается рядом нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка.

Для последовательного рассмотрения движения фронта частиц был применен метод конечных разностей. Для этого для каждого дифференциального уравнения были составлены рекуррентные соотношения.

В результате сравнительного анализа разлета частиц размером 0,05...1,00 г под действием центрального взрыва тротила (он имеет стабильные взрывотехнические характеристики) массой 1,0 кг, было установлено, что в начальный момент разлета твердые частицы ускоряются под действием статического и динамического напора без затрат энергии на торможение. Частицы маленького размера ускоряются значительно быстрее частиц большого размера, и движутся в облаке сжатого воздуха сферической ударной волной, а частицы большого размера двигаются в облаке частиц маленького размера. Это приводит к выравниванию скоростей движения фронта разлета частиц разных размеров.

Если динамический напор компенсируется движением частиц, то возникает динамическое торможение вследствие затрат энергии на динамический разлет окружающего воздуха и на работу адиабатического сжатия воздуха за фронтом ударной волны при сверхзвуковом движении. Скорость движения всех частиц разных размеров имеет максимум. Для частиц маленького размера этот максимум ярко выражен. При движении частиц со скоростью звука в воздухе реализуется дозвуковое движение и длится такое движение до момента, когда

статическое давление, которое возникает вследствие взрыва, не станет равным давлению окружающей среды.

В результате расчетов был построенный график (рис. 1). Как видно из рис. 1 при движении частиц без взаимодействия друг с другом в потоке разлетающегося вещества, происходит «расслоение» потока в начале движения 0...1,5 м и в конце движения 3,0...4,0 м. Основным фактором, который вызывает данное явление, является воздушная ударная волна, вызванная детонацией взрывчатого вещества и веществом, которое двигается со сверхзвуковой скоростью.

На основании выше сказанного был сделан вывод о том, что необходимо определить, как изменяется скорость разлета вещества в зависимости от параметров взрывного вещества и цементно-песчаной смеси, а, так же, как эти

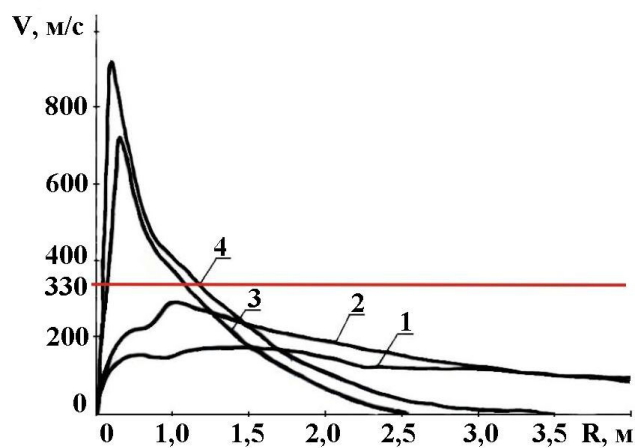


Рис. 1. Скорость фронта движения частиц в зависимости от радиуса удаления от центра взрыва:  
 1 – для частиц радиусом  $r_0 = 1$  мм;  
 2 – для  $r_0 = 0,5$  мм; 3 – для  $r_0 = 0,1$  мм;  
 4 – для  $r_0 = 0,05$  мм.

параметры влияют на «расслоение» разлетающейся цементно-песчаной смеси.

Согласно [1] скорость разлета вещества равна

$$V = \frac{R}{b} \cdot \left( \ln\left(\frac{R}{A}\right) \right)^2, \quad (1)$$

где R – радиус, на котором необходимо определить скорость;  
 A и b – эмпирические коэффициенты:

$$A = 3,96 + 0,58 \cdot (M_{f_3} - 2,58) - 0,59 \cdot (M_{f_3} - 2,58) \cdot th\left(\frac{M_{f_3} - 2,58}{6,66}\right) \quad (2)$$

$$b = \frac{A \cdot (1 - 0,60 \cdot \exp(-0,16 \cdot M_{f_3}))}{0,58}, \quad (3)$$

где  $M_{f_3}$  – масса приведенной порошковой оболочки, при взрывном распылении которой формируется облако с такими же пространственными размерами, как и при распылении оболочки, с отличающимися от порошковой физическими характеристиками (жидкость, жидкость + порошок):

$$M_{f_3} = \psi \cdot M \cdot \frac{88,3 \cdot 10^8}{f_{зар}}, \quad (4)$$

где  $\psi$  – безразмерный коэффициент (критерий), учитывающий физические характеристики распыляемого взрывом материала, согласно [1] для цементно-песчаной смеси  $\psi = 1,8$ ;

$M$  – фактическая масса распыляемой взрывом навески (оболочки), кг;

$f_{зар}$  – энергетический критерий фактического распыляющего заряда ВВ (для эталонного заряда 0,2 кг угленита Э-6 равен  $88,3 \cdot 10^8 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1/2} \cdot \text{Дж}^{3/2}$ ):

$$f_{зар} = \frac{m_{зар}^{\frac{5}{2}} \cdot q_{ВВ}^{\frac{3}{2}} \cdot D^{\frac{1}{2}}}{l_{зар}^{\frac{1}{2}}}, \quad (5)$$

где  $m_{зар}$  – масса заряда ВВ, кг;

$q_{ВВ}$  – удельная теплота взрыва ВВ, Дж/кг;

$D$  – скорость детонации ВВ, м/с;

$l_{зар}$  – длина заряда, м.

Используя формулы (1)–(5) методом последовательных приближений была определена величина удельного, относительно массы вещества, энергетического критерия, при котором расслоение не наблюдается на удалении до 4,0 м от центра взрыва, то есть вещество двигается с дозвуковой скоростью. Этот показатель для цементно-песчаной смеси должен быть не более чем  $9,2 \cdot 10^8 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1/2} \cdot \text{Дж}^{3/2}$  на каждый килограмм смеси. При увеличении данного соотношения происходит интенсивное расслоение на начальном этапе разлета смеси.

Косвенная проверка данного вывода выполнена путем определения прочности торкретбетона, нанесенного на стенки взрывной камеры в соответствии с условием, описанным выше. В качестве критерия данной проверки была принята прочность торкретбетона проектного состава, не подвергавшегося воздействию взрыва. При «расслоении» смеси под действием центрального взрыва во время нанесения ее на стенки камеры, будет наблюдаться снижение прочности нанесенного торкретбетона.

Для проведения исследования использованы компоненты, необходимые для выполнения работы, а именно: песок из карьера села Максимельяновки, цемент марки 400 Амвросиевского цементного завода ОАО «Донцемент».

Проверочные эксперименты проводились в условиях взрывной камеры ДонНТУ [3]. Суть экспериментов заключалась в следующем. В центре камеры подвешивался пластиковый сосуд. Общий вид схемы расположения сосуда для нанесения торкретбетона представлен на рис. 2.

Для торкретирования камеры использовалась цементно-песчаная смесь с соотношением компонентов 1:3 соответственно и водоцементным соотношением 0,6. Плотность смеси составила 1800 кг/м<sup>3</sup>. В качестве сосуда для размещения цементно-песчаной смеси применялся пластиковый мешок размером 570×900 мм. Он был подвешен к двутавровой балке на высоте 1,5 м от днища мешка до почвы камеры (см. рис. 3). Для устойчивости мешок опирался на

специально изготовленную и подвешенную к двутавровой балке деревянную рамку размером 550×550 мм.

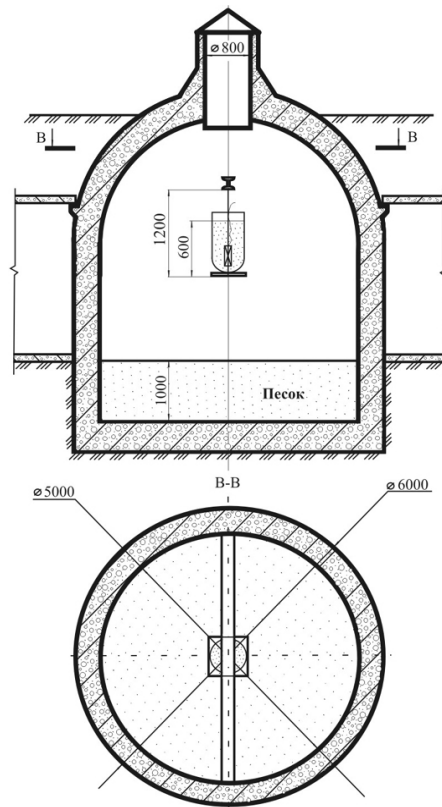


Рис. 2. Схема расположения  
пластикового сосуда при  
торкретировании стенок взрывной  
камеры

Смесь приготавливалась на месте и загружалась вручную в подвешенный мешок с размещенным зарядом ВВ. Для центрирования и закрепления заряда в центре мешке была установлена деревянная рейка, которая крепилась к двутавровой балке. К этой рейке на высоте 180 мм от днища мешка был привязан распыляющий заряд ВВ – патрон аммонита Т-19 массой 300 г, который инициировался электродетонатором ЭДКЗ-ПМ снизу вверх (обратное инициирование). Общая масса цементно-песчаной смеси, загруженной в мешок, составила 100 кг.

На рис. 3 показан снаряженное устройство с цементно-песчаной смесью во взрывной камере ДонНТУ перед взрыванием.

В результате взрывного распыления этой массы цементно-песчаной смеси на стенках камеры по всему ее периметру образовался гладкий слой толщиной 2...3 мм и высотой 1,7 м (со стороны левого смотрового окна – возле баллистического маятника – высота слоя достигала 3,4 м). В основном слой начинался снизу на расстоянии равном 1,0 м от уровня почвы камеры и поднимался вверх до уровня двутавровой балки, т. е. угол раствора факела, считая от центра патрона ВВ, составил примерно 38°. На уровне мешка толщина слоя достигала 5...10 мм по всему периметру камеры.

По истечении срока полного твердения, производилось определение прочности нанесенного слоя при помощи склерометра (молотка Шмидта), методом упругого отскока.

Методика экспериментального определения прочностных характеристик исследуемых образцов была принята стандартной с учетом особенностей решаемых технических задач.

Прочность бетона определялась по градуировочной зависимости между высотой отскока и прочностью бетона на сжатие, заранее установленным путем параллельных испытаний контрольных кубиков бетона склерометром и на прессе по ГОСТ 10180-78 «Бетоны. Методы

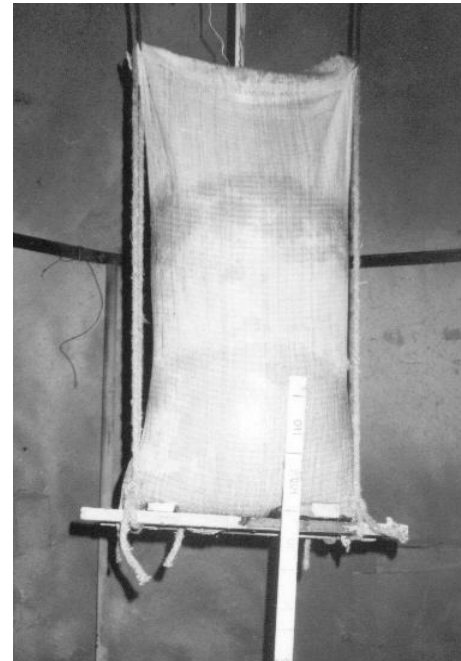


Рис. 3. Снаряженный сосуд перед  
взрыванием

определения прочности на сжатие и растяжение» и с ДСТУ 2824-94 «Види і методи механічних випробувань».

Прочность бетона определялась на стандартных образцах в строительной лаборатории ДонНТУ с применением стандартного оборудования, в том числе механического и гидравлического прессов, в соответствии с ГОСТ 10180-78. Для изготовления образцов-кубов размером 100x100x100 мм при выполнении работы использовалось стандартное лабораторное оборудование в виде металлической опалубки.

Результаты измерений сведены в табл. 1. Как видно из сравнительных данных, прочность нанесенного взрывом торкретбетона не ниже (а даже выше) прочности бетона, полученного из той же смеси с использованием вибростола.

Табл. 1. Среднее значение прочности нанесенной взрывом цементно-песчаной смеси

Конечная прочность цементно-песчаной смеси, нанесенной взрывом, МПа	Конечная прочность бетона, полученного на вибростоле, МПа
20,3	17,0
18,7	16,6
21,3	20,7

Проведенные исследования подтверждаются данными, полученными В. С. Ягнышевым и И. В. Дементьевым [7], согласно которым прочность образцов, из подвергнутого действию взрыва торкретбетона, в начальный момент твердения на 30 % выше и после полного набора прочности не отличаются от образцов из обычного раствора.

Увеличение прочности монолитной бетонной крепи, возводимой в непосредственной близости от места взрывных работ, под действием ударных волн отмечалось также при проведении околотвольного двора на шахте «Щегловка Глубокая» Н.Г. Жаворонковым и И.М. Берковичем. Так, марка бетона, установленная испытанием образцов, подвергшихся воздействию ударных волн составила М300 вместо проектной М200.

Кроме того, была исследована адгезия нанесенного слоя. Адгезия проверялась простым срезыванием нанесенного на стенки взрывной камеры торкретбетона (прочность стенок камеры была примерно одинакова с прочностью торкретбетона). Опыты показали, что срез происходил или по телу камеры или по нанесенному цементно-песчаному слою. Линия контакта оказалась прочнее самих материалов.

Алгоритм определения оптимальных скоростных и пространственных параметров взрывного способа состоит в проверке и установлении параметров взрывчатого вещества и цементно-песчаной смеси, при которых не будет происходить расслоение и будет выполняться нанесение смеси с минимальным отскоком.

Оптимальная, с точки зрения минимизации потерь и максимизации прочности, скорость соударения частиц об стенки выработки для торкретбетонной смеси равняется 30...40 м/с, согласно данным, полученным В. И. Шавриным [8]. Это подтверждается также исследованиями в области моделирования процессов автоматизированного нанесения набрызгбетона, выполненными А. Н. Шашенко, Е. В. Кухаревым и др. [9].

Таким образом, успешно решена поставленная задача. Технологические режимы торкретбетонирования взрывным способом, при которых расслоение потока будет минимальным, можно найти, используя методику описанную в работе [5] добавив к ней проверку соотношения энергетического критерия взрывчатого вещества к массе цементно-песчаной смеси. Данное соотношение должно быть не более чем  $9,2 \cdot 10^8 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1/2} \cdot \text{Дж}^{3/2}$  на каждый килограмм смеси. При увеличении этого параметра происходит интенсивное расслоение потока на начальном этапе разлета смеси.

### Библиографический список

1. Шевцов Н.Р., Хоменчук О.В. Взрывной способ набрызгбетонирования // Сб. научн. труд. НГУ. – № 17, том 2. – Днепропетровск: РИК НГУ, 2003. – С. 43-49.
2. Безматерных В.А., Щукин А.С., Артеменко А. П. Экспериментальные исследования крепления горных выработок с помощью взрыва // Известия вузов. Горный журнал. – 1982. – № 4. – С. 31 -33.
3. Н.Р. Шевцов, О.В. Хоменчук. Взрывной способ набрызгбетонирования и побелки горных выработок // Технология и проектирование подземного строительства. Вып.3. – Донецк: Норд-пресс. – 2003. – С. 164-169.
4. Шевцов Н. Р., Хоменчук О. В. Промышленные испытания технологии возведения набрызгбетонной крепи взрывным способом. // Наукові праці ДонНТУ: серія гірничо-геологічна. – Донецьк: ДонНТУ. – 2002. – № 54. – С. 94-99.
5. Шевцов Н.Р., Хоменчук О.В., Рублева О.И. Параметры взрывного способа возведения набрызгбетонной крепи и методика их определения // Современные проблемы шахтного и подземного строительства. Вып. 6. – Донецк: Норд-Пресс. – 2005. – С. 66-74.
6. Гречихин Л.И., Шевцов Н.Р., Хоменчук О.В. Динамика распыления оболочек из жидких и порошковых материалов // Наукові праці ДонНТУ: серія гірничо-геологічна. Вип. 72. – Донецьк: ДонНТУ. – 2004. – С. 41-46.
7. Ягнышев В.С., Дементьев И.В., Пропп В.Д. Возведение набрызгбетонной крепи взрывным способом // Известия вузов. Горный журнал. – 1982. – № 12. – С. 19 -23.
8. Шаврин В.И. Структура свободной струи при набрызге бетона. – Киев: Госстрой, 1969. – 34 с.
9. Шашенко А.Н., Кухарев Е.В., Андорская Л.Г. Моделирование процесса автоматического нанесения набрызгбетона // Известия вузов: Горный журнал. – 1990. – № 5. – С. 29-33.

© Хоменчук О. В., Чухлебов С. В., 2009 г.