

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СРЕДЫ В ОЧАГЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВА НА ПАРАМЕТРЫ ВОРОНКИ ВЫБРОСА

И. Л. Зельманов, А. И. Канунов, В. И. Куликов
В. А. Найденов, А. М. Тихомиров

(Москва)

Делается попытка сопоставить электровзрыв со взрывом ВВ при взрывах на выброс в сухом насыпном песке и оценить влияние теплофизических свойств среды в зоне очага электровзрыва на параметры воронки выброса.

Следует отметить, что, как было показано в работе [1], введение в зону очага электровзрыва легко возгоняющихся веществ увеличивает интенсивность волны сжатия, однако, как вытекает из представлений о развитии взрыва на выброс, изложенных в работах [2,3], результаты по камуфлетному взрыву не могут быть автоматически перенесены на явление выброса и требуется специальное рассмотрение поставленных выше вопросов.

Получены экспериментальные зависимости показателя выброса, величины объема воронки, отнесенного к единице энергии взрыва, и величины отношения глубины воронки к глубине заложения от приведенного заглубления источника взрыва. Показано, что величина воронки выброса при электровзрыве существенно зависит от теплофизических свойств вещества, находящегося в очаге взрыва. Для исследованных типов взрывов можно указать значение тротилового эквивалента, обеспечивающее энергетическое подобие взрывов по всем параметрам, характеризующим воронку выброса.

Постановка эксперимента. В качестве источника взрыва использовались мощный электрический разряд и сферические заряды ВВ (ТЭН). Опыты проводились в бассейне размером $1.2 \times 1.2 \text{ м}^2$, заполненном сухим песком объемной плотностью 1.55 г/см^3 . Расстояние от центра взрыва до дна бассейна было равно 170 мм , что в 2.5 раза превышало наибольшую величину заглубления источника взрыва, имевшую место в опытах. Схема опыта представлена на фиг. 1.

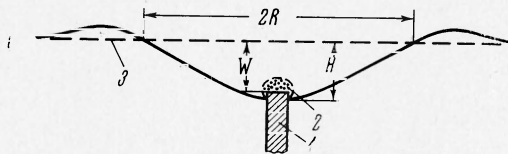
Электрический разряд происходил на торце коаксиального разрядника диаметром 16 мм (I на фиг. 1). Величина выделявшейся энергии, которая измерялась в каждом опыте путем осциллографирования тока и напряжения на разрядном промежутке, незначительно отклонялась от опыта к опыту от 8 кдж . Длительность выделения энергии при электровзрыве составляла около 50 мксек . В контрольных опытах по измерению массовой скорости в волне сжатия при камуфлетном электровзрыве в песке (методика эксперимента описана в работе [4]) было установлено сопоставлением с аналогичными данными по электровзрыву на полупространстве [5], что данная конструкция разрядника не искажает движение грунта в направлении к свободной поверхности: параметры волны сжатия соответствуют выделяемой энергии.

Для обеспечения лучшей сопоставимости с результатами взрывов на выброс при электровзрыве заряды ТЭНа помещались на металлический стержень, который воспроизводил устройство и размеры коаксиального разрядника. Заряды весом 0.8 г готовились путем прессования. Иницирование зарядов осуществлялось пропусканием импульса электрического тока через вмонтированную в заряд проволочку.

В опытах непосредственно регистрировались профили воронки выброса по двум взаимно перпендикулярным направлениям, по которым затем строился средний профиль. Отличие линейных размеров усредненного профиля от обоих зарегистрированных профилей не превышало 5% .

Для регистрации профиля воронки выброса в работе был использован простой метод, который обеспечил получение достаточно точных результатов, несмотря на очень малый масштаб взрывов. После проведения взрыва в песок по специальным направляющим вдвигался тонкий (толщина 1 мм) дюралевый лист с наклеенной на нем миллиметровой бумагой, причем плоскость листа проходила через центр взрыва. Затем на бумагу, на которой предварительно отмечалось положение свободной поверхности (β на фиг. 1), с помощью пульверизатора напылялась краска. Контур окрашенного участка и представляет собой профиль воронки выброса. Ошибка отсчета линейных размеров при таком способе измерений составляла не более $1-2 \text{ мм}$.

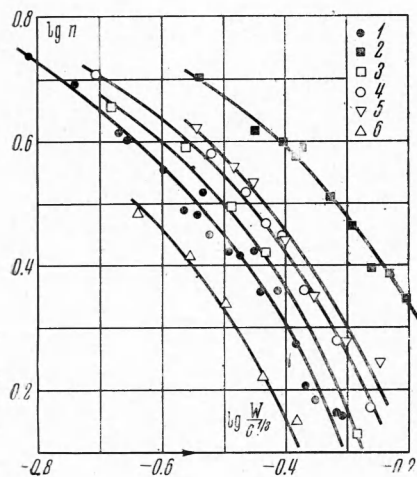
Основными измеряемыми параметрами (см. фиг. 1) были R — радиус воронки, измеряемый на уровне свободной поверхности, H — глубина воронки и V — объем воронки, который вычислялся как объем тела, образованного вращением усредненного профиля воронки вокруг вертикальной оси.



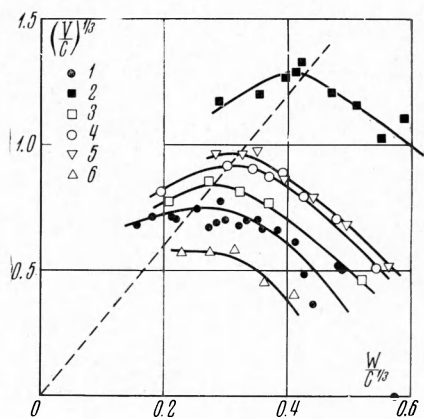
Фиг. 1

Результаты эксперимента. На фиг. 2 представлены в двойном логарифмическом масштабе зависимости показателя выброса $n = R / W$ от величины приведенного заглупления источника взрыва $W / C^{1/3}$, где R и W измеряются в м, а C — вес заряда тротила в кг, эквивалентного по энергии электровзрыву или взрыву ВВ. Кривая 1 на фиг. 2 соответствует электровзрыву, кривая 2 — взрыву зарядов ТЭНа. Логарифмическая шкала по оси абсцисс введена для того, чтобы наглядно была видна возможность введения тротилового эквивалента электровзрыва.

Сопоставление электровзрыва и взрыва ВВ по объему воронки выброса, отнесенному к единице энергии взрыва V / C , в зависимости от величины приведенного заглупления дано на фиг. 3. Здесь объем V измеряется в м³, а остальные единицы и обозначения те же, что и на фиг. 2.



Фиг. 2



Фиг. 3

Из обеих фигур видно, что электровзрыв на выброс гораздо менее эффективен, чем взрыв ВВ той же энергии. Тротильный эквивалент электровзрыва по показателю выброса равен 0.21. Оценка тротилового эквивалента электровзрыва по зависимости величины V / C от приведенного заглупления, проведенная пока для простоты в одной точке этой зависимости — точке максимума — дает значение 0.18, что весьма близко к величине тротилового эквивалента по показателю выброса. Сравнение относительной эффективности этих взрывов по другим параметрам воронки выброса будет проведено ниже.

Одно из основных отличий электровзрыва от взрыва ВВ состоит в том, что он практически не имеет собственных продуктов взрыва. При выделении энергии в разрядном промежутке кроме высокотемпературной плазмы образуются продукты испарения окружающей среды. Очевидно, что свойства вещества, находящегося в очаге электровзрыва, будут определять состав и количество газообразных продуктов и их работоспособность. Таким образом, эффективность передачи энергии электровзрыва окружающей среде, а вместе с этим и параметры воронки выброса будут изменяться при варьировании вещества, помещаемого непосредственно вокруг разрядного промежутка.

Для исследования были выбраны серноокислая медь $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, карбонат цинка ZnCO_3 , иод и карбид бора B_4C .

Все эти вещества вводились в очаг электровзрыва в виде навесок мелкокристаллического порошка (2 на фиг. 1), которым придавалась по возможности сферическая форма. Малые размеры навесок (радиус навесок не превышал 15 мкм), примерное совпадение насыпной плотности и гранулометрического состава у вводимых веществ с песком позволяют ожидать, что механические свойства среды непосредственно у разрядника практически не изменяются и, следовательно, наблюдаемые эффекты будут обусловлены изменением теплофизических свойств вещества, помещаемого в очаг электровзрыва. Это предположение было проверено посредством контрольных опытов, в которых производились камуфлетные взрывы зарядов ВВ, окруженных навесками серноокислой меди и йода. Результаты этих опытов (по величине максимальной массовой скорости) не разошлись с результатами взрыва ВВ в чистом песке.

Практический интерес представляет вопрос о влиянии наличия воды в очаге взрыва на эффект выброса. Вода в горных породах может находиться как в несвязанном состоянии, так и в виде кристаллизационной воды, которая, как известно, относительно легко освобождается при нагревании кристаллогидрата.

Серникоислая медь является кристаллогидратом, полное обезвоживание которого наступает при 150°C . Соединение содержит 36% кристаллизационной воды, энергия связи кристаллизационной воды равна 284 ккал/г соединения.

Первоначально была исследована зависимость объема воронки выброса от величины навески серникоислой меди. Результаты этих опытов представлены на фиг. 4, где по оси ординат отложено отношение объема воронки при электровзрыве с навеской $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ к объему воронки при электровзрыве в чистом песке, а по оси абсцисс — величина навески в г. Все опыты были проведены при одной энергии электровзрыва $\approx 8.8 \text{ кдж}$ и при неизменном заглублении разрядника $W = 39 \text{ мм}$. Такая величина заглубления ($W/C^2 = 0.305$), при которой объем воронки практически не меняется при незначительном изменении проведенного заглубления, была выбрана не случайно, а для того чтобы избежать изменения объема воронки из-за незначительных колебаний энергии взрыва. Зависимость на фиг. 4 показывает, что, начиная с навески примерно в 5 г, дальнейшее увеличение навески в очаге электровзрыва заметного увеличения эффекта не вызывает. Эта цифра по порядку величины не противоречит результату простой оценки, которая показывает, что энергии электровзрыва хватает на отрыв кристаллизационной воды от 7.4 г серникоислой меди.

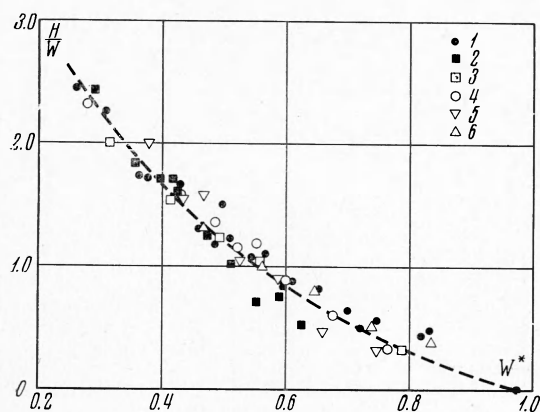
Следует также отметить, что факт наличия «насыщения» у зависимости, изображенной на фиг. 4, является дополнительным подтверждением высказанного предположения о практической неизменности механических свойств среды при введении в очаг электровзрыва исследуемых веществ.

В соответствии с полученным результатом для дальнейших экспериментов по выбросу была выбрана навеска серникоислой меди в 10 г. Результаты опытов представлены кривыми 4 на фиг. 2 и 3. Из обеих фигур видно, что эффективность электровзрыва при введении навески серникоислой меди заметно возросла по показателю выброса в 1.7 раза, а по максимальному объему воронки, отнесенному к единице энергии, в 2.0 раза.

Карбонаты представляют собой другой пример относительно нестойких соединений, которые довольно часто встречаются в природе (известняк, магнезит, доломит и др.). При нагревании карбонаты разлагаются на окисел металла и углекислый газ.

Для данных опытов был выбран карбонат цинка, так как среди практически наиболее доступных углекислых солей он имеет наименьшие энергию (16 ккал/моль) и температуру диссоциации (300°C при атмосферном давлении). Экспериментальные данные по выбросу при введении в очаг электровзрыва 5 г карбоната цинка на фиг. 2 и 3 изображены кривыми 3. Анализ полученных результатов показывает, что эффективность электровзрыва увеличилась в 1.4 раза по показателю выброса и в 1.6 раза по максимальной величине V/C .

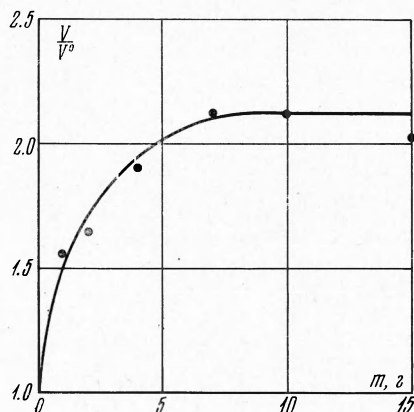
Аналогичные опыты были проведены с кристаллическим йодом. Величина навески (6 г) была выбрана на основании результатов работы [1]. Данные опытов с йодом изображены кривыми 5 на фиг. 2



Фиг. 5

и 3. Эффективность электровзрыва возросла по показателю выброса в 2.3 раза.

Испытанные до сих пор вещества (как и в исследовании, проведенном в уже упомянутой работе [1]) образуют газообразные продукты при более низких температурах и с меньшими энергетическими затратами, чем кварцевый песок, поэтому в качественном отношении увеличение эффективности использования энергии электровзрыва при вве-



Фиг. 4

дений в очаг взрыва таких веществ понятно. В связи с этим интересно было проследить эту тенденцию и на веществах, обладающих более высокой температурой кипения и более высокой теплотой парообразования, чем песок.

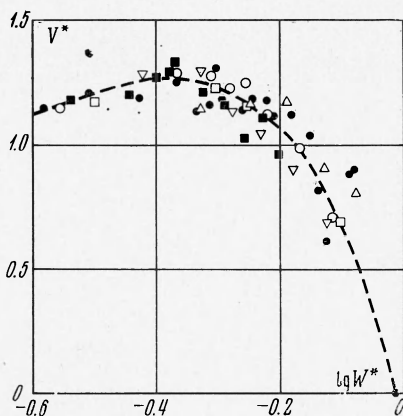
В качестве такого вещества был взят карбид бора (температура кипения больше 3500°C). Результаты экспериментов с навесками карбида бора в 17 г описываются кривыми 6 на фиг. 2 и 3. Как и можно было ожидать, эффективность электровзрыва уменьшилась (по показателю выброса — в 1.75 раза, по максимальной величине V/C — примерно в 1.9 раза).

Обратимся теперь к выяснению вопроса, имеет ли место энергетическое подобие между электровзрывом в чистом песке, электровзрывом с различными добавками и взрывом химического ВВ по другим параметрам, характеризующим воронку выброса, и к краткому обсуждению результатов.

На фиг. 5 и фиг. 6 приведены зависимости соответственно величины отношения глубины воронки к глубине заложения H/W и величины $V^* = (V/\eta C)^{1/3}$ от приведенной величины заглупления источника взрыва

$W^* = W/(\eta C)^{1/3}$; здесь η — тротильный эквивалент электровзрыва, введенный по показателю выброса; для электровзрыва в чистом песке $\eta = 0.21$, в сернокислой меди $\eta = 0.36$, в карбонате цинка $\eta = 0.29$, в йоде $\eta = 0.43$, в карбиде бора $\eta = 0.12$. Обозначения различных серий опытов на обеих фигурах те же, что и на фиг. 2 и фиг. 3. Как видно из обеих фигур, существует удовлетворительное подобие между всеми рассмотренными типами взрывов и по остальным параметрам, характеризующим воронку выброса, причем значение тротильного эквивалента для всех параметров остается постоянным.

Как видно из фиг. 3, во всех случаях (за исключением опытов с добавкой карбида бора, где малое число опытов было проведено в недостаточно широком интервале изменения величины приведенного заглупления) зависимость V/C имеет точку максимума. Уменьшение объема воронки выброса



Фиг. 6

при небольших заглуплениях источника взрыва обусловлено неэффективным использованием энергии продуктов взрыва, которые при таких условиях опыта прорываются в атмосферу через тонкий слой грунта. Максимальный объем воронки выброса, отнесенный к единице энергии взрыва, достигается практически при одном и том же показателе выброса $n \approx 3.6$ и одной и той же приведенной глубине заложения $W^* \approx 0.42 \text{ м/кг}^{1/3}$.

Можно еще отметить, что при наличии энергетического подобия между рассматриваемыми типами взрывов точки максимума всех кривых на фиг. 3 должны лежать на одной прямой, проходящей через начало координат. Как следует из фиг. 3, этот факт с достаточной точностью действительно имеет место.

Поступила 20 XI 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельманов И. Л., Колков О. С., Тихомиров А. М., Шацкевич А. Ф. Влияние газообразующих веществ в очаге электровзрыва на движения слабосвязанного грунта. Докл. АН СССР, 1968, т. 178, № 1.
2. Докучаев М. М., Родионов В. Н., Ромашов А. Н. Взрыв на выброс. М., Изд-во АН СССР, 1963.
3. Садовский М. А., Адушкин В. В., Родионов В. Н., Старцев Г. Н. Об одном способе моделирования крупных взрывов на выброс. Физика горения и взрыва, 1967, т. 3, № 1.
4. Зельманов И. Л., Колков О. С., Тихомиров А. М., Шацкевич А. Ф. Движение песчаного грунта при камуфлетном взрыве. Физика горения и взрыва, 1968, т. 4, № 1.
5. Зельманов И. Л., Колков О. С., Тихомиров А. М., Шацкевич А. Ф. Об электровзрыве в песчаном грунте. Физика горения и взрыва, 1968, т. 4, № 3.