

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА ИЗ КАМУФЛЕТНОЙ ПОЛОСТИ ПРИ ЗАГЛУБЛЕННОМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ВЫБРОСЕ

УДК 534.222.2

В. В. Боровиков

Военная инженерно-космическая академия им. А. Ф. Можайского,
197082 Санкт-Петербург

Рассматривается процесс получения камуфлетной полости при внезапном выбросе сжатого холодного газа из заглубленного источника. Дана оценка интенсивности оттока газа из полости за счет фильтрации его в поровом пространстве. Показано, что с точки зрения совершения полезной работы пластических деформаций и глубинного смещения массива малосвязного грунта целесообразно обеспечить оптимальные расходные характеристики газа при невысокой плотности сложения массива, которая соответствует малым глубинам заложения источника энергии.

В [1] рассматривается совместное действие пары газовых источников, расположенных под слоем сыпучего материала. В результате их одновременного срабатывания образуются воронки, которые в зависимости от интенсивности выброса и расстояния между источниками могут сливаться в одну или же разделяться. Срабатывание тех же источников с задержкой по времени обуславливает несимметричное движение массива, что в технологиях взрывного дела известно как направленный взрыв на выброс. Однако направленное движение массива возможно и в том случае, когда результатом отдельных газодинамических выбросов будут камуфлетные полости. Суть процесса поясняется схемой, представленной на рис. 1. В результате срабатывания k -го газового источника в слое образуется симметричная камуфлетная полость A . После этого с задержкой по времени срабатывает $k + 1$ -й источник, и масса сыпучего материала получает скорость, направленную по линии наименьшего сопротивления в сторону полости A или же в сторону транспортирования. Затем может срабатывать $k + 2$ -й источник и т. д.

Интенсивность транспортирования материала определяется энергией отдельного газового импульса E , расходом газа Q , расстоянием между источниками a и временем T задержки до начала срабатывания последующего источника. Транспортирование массива также зависит от градиента давления в слое между соседними полостями, что определяется интенсивностью оттока газа из полостей за счет фильтрации его в поровом пространстве окружающего массива.

Исследованию утечки продуктов детонации химических взрывчатых веществ из камуфлетной полости посвящен ряд работ (см., например, [2, 3]). Однако рассматриваемое явление выброса в грунт дозы холодного газа протекает в другом диапазоне параметров, для которого характерны давления газа $\sim 0,2$ – 10 МПа и расход, определяемый скоростью истечения газа из критического сечения источника. Эти характерные физические особенности явления вызывают необходимость дальнейших исследований.

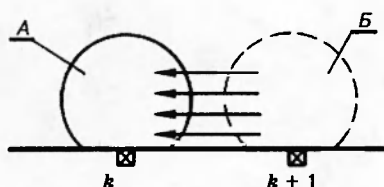


Рис. 1. Схема транспортирования сыпучего материала

Для представления в безразмерном виде определяющих параметров воспользуемся методами теории подобия и размерностей. Внутренняя энергия выбрасываемого газа выражается соотношением $E = p_3 V_3 / (k - 1)$, где p_3 , V_3 , k — давление, объем и показатель адиабаты газа в зарядной емкости. Согласно [4] полная работа выброса определяется степенью расширения газа

$$E_{\pi} = E \varepsilon = E \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_3} \right)^{(k-1)/k} \right],$$

где ε — КПД выброса; p_a — атмосферное давление.

На основе энергетического закона подобия выражение для относительной энергии можно представить в виде

$$\bar{E}_{\pi} = \frac{E_{\pi}}{(\gamma W + p_a)(W^3 + V_D)}. \quad (1)$$

Здесь γ — удельный вес сыпучего материала, W — глубина заложения газового источника, V_D — объем зоны пластических деформаций [5].

Относительная масса, по существу, определяется выражением (1):

$$G = \frac{G R_1 T_1 \varepsilon}{(k - 1)(\gamma W + p_a)(W^3 + V_D)}, \quad (2)$$

где $G = p_3 V_3 / R_1 T_1$; R_1 — газовая постоянная; T_1 — температура газа.

Для определения относительной скорости примем, что кинетическая энергия $\rho u^2 W^3$ единичной массы материала ρW^3 в зоне пластических деформаций пропорциональна потенциальной энергии заряда. Тогда $\bar{u} = u \rho^{0,5} / (\gamma W + p_a)^{0,5}$, где u — скорость, ρ — насыпная плотность сыпучего материала.

Относительное время определяется делением характерной длины на характерную скорость:

$$\bar{T} = \frac{T}{W} \sqrt{\frac{\gamma W + p_a}{\rho}}. \quad (3)$$

Здесь T — время развития процесса.

Относительное значение массового расхода газа определяется через относительную массу и время:

$$Q = \frac{G}{T} = \frac{Q \rho^{0,5} W \varepsilon R_1 T_1}{(k - 1)(\gamma W + p_a)^{1,5} (W^3 + V_D)}. \quad (4)$$

Выражение для относительного давления получим согласно теории размерностей, для чего воспользуемся, например, масштабами расхода, времени и длины. Тогда

$$\bar{p} = \frac{\rho \varepsilon R_1 T_1}{(k - 1)(\gamma W + p_a)^2}. \quad (5)$$

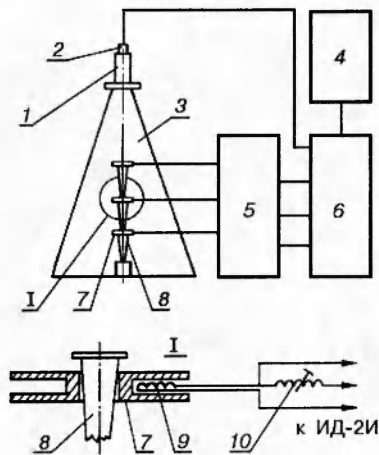


Рис. 2

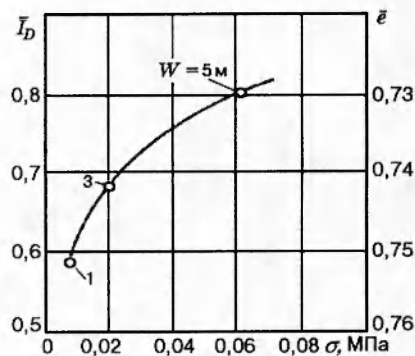


Рис. 3

Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Рис. 3. Изменение свойств исследуемого материала

Исследования интенсивности фильтрации газа из полости проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 2. Контрольный сосуд 3 выполнен из стали толщиной 10 мм в виде конуса высотой 0,34 м и с углом при вершине 35° . Его внутреннее пространство заполнялось кварцевым песком со средней дисперсностью 0,5 мм, насыпной плотностью в естественном состоянии $\rho = 1350 \text{ кг/м}^3$ и влажностью 5–7%. К верхней части емкости подсоединена газовая камера 1 с внутренним объемом $5,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$. Камера герметизирована мембраной из лавсанового пластика, давление газа в ней измерялось датчиком 2. Между газовой камерой и сосудом устанавливались дюзы различного диаметра.

Выброс сжатого газа происходил после прожига мембраны нитью накалывания, на которую подавался электрический ток от блока питания. Для заполнения газовой камеры использовался блок баллонов, от которого через пневмоцист поступал сжатый воздух, а его давление контролировалось манометром.

В условиях естественного залегания грунтовый массив с увеличением глубины имеет более высокую плотность сложения. Мерой данного свойства может являться индекс плотности сложения [6] $\bar{I}_D = \rho_{\max}(\rho_i - \rho_{\min}) / \rho_i(\rho_{\max} - \rho_{\min})$, где ρ_i — текущее значение плотности сложения массива; ρ_{\max} — максимально возможная плотность, которая в экспериментах получалась посредством плотной утрамбовки материала в мерной емкости постукиванием по ней; ρ_{\min} — минимально возможная плотность сложения, которая получалась при осторожном насыпании материала в емкость. Исследования фильтрационных процессов проводились преимущественно в диапазоне средних плотностей сложения песка при $\bar{I}_D = 0,58, 0,68$ и $0,8$. Указанным значениям \bar{I}_D соответствуют коэффициенты пористости $\bar{e} = 0,752, 0,743$ и $0,73$, которые определяли экспериментально методом водонасыщения (рис. 3).

Дадим сопоставление конкретного значения плотности сложения исследуемого материала глубине его залегания (при такой плотности) в естественных условиях. На осно-

вании данных [7] по испытаниям песчаного массива методом статического зондирования коэффициент пористости \bar{e} можно сопоставить удельному сопротивлению зондирования массива с указанными физическими свойствами. С другой стороны, в [8] приведен линейный график статического зондирования песчаных грунтов на глубинах до 32 м, что позволяет сопоставить удельное сопротивление зондирования конкретной глубине проникания зонда W . Рассматриваемые в эксперименте значения плотности сложения массива соответствуют глубинам, равным примерно 1, 3 и 5 м (см. рис. 3). Параметр \bar{I}_D в опытах менялся при послойной (по 0,03 м) укладке песка в емкости и последующем прижатии слоев штампом с фиксированной массой, создающей давление на поверхности σ . Энергия газа в импульсе изменялась выбором давления зарядки газовой камеры, расход — выбором диаметра дюзы на выходе из камеры.

На первом этапе исследований определяли характер изменения давления газа p и общее время развития полости T_k от начала процесса до прекращения пластических деформаций в окружающем массиве. Для этого экспериментальная установка (см. рис. 2) была снабжена индуктивной измерительной системой, содержащей три стальные конические шпильки 8, которые устанавливались неподвижно вдоль продольной оси емкости. Соосно со шпильками в массиве размещались подвижные катушки индуктивности 7 с рабочей обмоткой 9, которые совместно с дополнительной катушкой 10 составляли два плеча измерительного моста и подсоединялись к индикатору ИД-2И 6. Чтобы индуктивность катушек 10 могла меняться (для балансировки моста), их вынесли в блок настройки 5. Смещение катушек после разгерметизации газовой камеры позволило шлейфовым осциллографом Н-145 4 фиксировать смещение слоев массива.

В экспериментах значения определяющих параметров изменялись в следующих диапазонах: $\bar{E}_n = 9,3 \cdot 10^{-7} \div 8,8 \cdot 10^{-4}$, $\bar{T} = 0 \div 6,37$, $\bar{Q} = 6,2 \cdot 10^{-5} \div 2,1 \cdot 10^{-2}$. Величина относительного давления \bar{p} изменялась в пределах $250 \div 8460$.

Изменение давления во времени показано на рис. 4 линией 4. Методом наименьших квадратов получена эмпирическая зависимость, которая с точностью 20 % описывает изменения p при различных значениях параметров рассматриваемого явления:

$$\bar{p} = \frac{1600 \bar{E}_n^{0,26} \exp(0,7\bar{T})}{\bar{Q}^{0,1} \bar{e}^{1,4} [\exp(0,7\bar{T}) - 0,9]} \quad (6)$$

Линии 1–3 на рис. 4 соответствуют смещениям катушек. Наиболее близкие к газовой камере частицы начинают движение с незначительной задержкой относительно начала выброса, а более удаленные слои трогаются с места позже. Окончание движения всего массива, охваченного зоной пластических деформаций, происходит одновременно. Интервал времени, в течение которого происходит смещение массива, обозначен на рис. 4 штриховыми линиями. Момент остановки частиц \bar{T}_k соответствует времени формирования камуфлетной полости до ее наибольших размеров, что с точностью 15 % описывается зависимостью

$$\bar{T}_k = \frac{0,7 \bar{E}_n^{0,36}}{\bar{e}^2 \bar{Q}^{0,31}} \quad (7)$$

Для анализа интенсивности фильтрации газа из полости примем [9], что давление в полости меняется по адиабате:

$$p = p_3 \left(\frac{V_3}{V} \right)^k$$

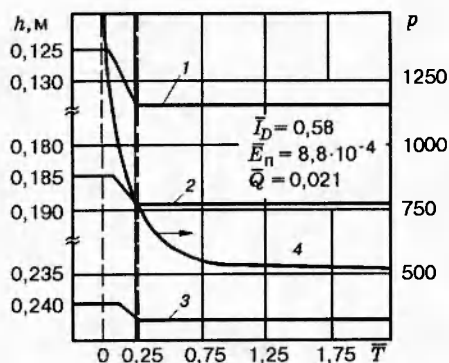


Рис. 4

Рис. 4. Пластическое деформирование массива

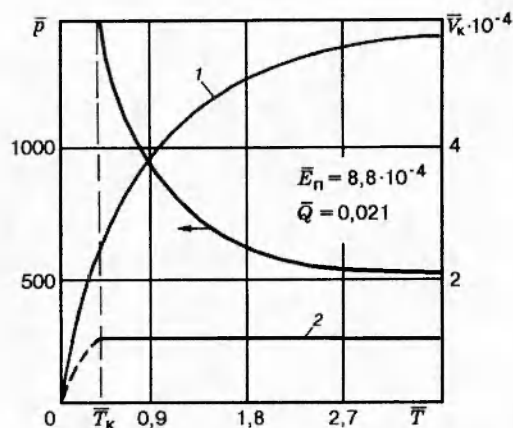


Рис. 5

Рис. 5. Интенсивность фильтрации газа из полости во времени

Тогда с учетом (5) и (6)

$$\frac{p}{p_3} = \frac{1600(k-1)(\gamma W + p_a)^2 \bar{E}_n^{0,26} \exp(0,7\bar{T})}{Q^{0,1} e^{1,4} p_3 \rho \alpha R_1 T_1 [\exp(0,7\bar{T}) - 0,9]} = \left(\frac{V_3}{V}\right)^k,$$

откуда получаем выражение для изменения объема полости во времени без учета утечки газа в поровое пространство:

$$V_i = V_3 \left[\frac{p_3 \rho \alpha R_1 T_1 \bar{Q}^{0,1} e^{1,4} [\exp(0,7\bar{T}) - 0,9]}{1600(k-1)(\gamma W + p_a)^2 \bar{E}_n^{0,26} \exp(0,7\bar{T})} \right]^{1/k}. \quad (8)$$

Зависимости (8) соответствует кривая 1 на рис. 5. Однако в действительности при подводе газа в массив на активной стадии развития полости и после прекращения движения грунта часть его фильтруется за пределы полости. Следовательно, полость будет иметь меньшие размеры, чем это предполагалось согласно (8).

Для экспериментального определения конечного объема полости после каждого опыта контрольная емкость снималась, а уплотненный газодинамическим выбросом массив оставался в виде усеченного конуса на горизонтальной плите. Это позволило контролировать геометрические размеры полости. На основе этих данных получена эмпирическая зависимость, которая позволяет с точностью 20% прогнозировать объем полости:

$$\bar{V}_k = 1,8 \bar{E}_n \bar{e}^{0,9} \left[\frac{\bar{Q} \ln(73\bar{Q})}{(73\bar{Q})^2 - 1} \right]^{0,5}, \quad (9)$$

где $V_k = V_k / (W^3 + V_D)$.

Вычисленное по (9) значение конечного объема полости для конкретного выброса с заданными \bar{E}_n и \bar{Q} представлено на рис. 5 горизонтальной линией 2. С другой стороны, из (7) известно время развития полости \bar{T}_k (значению \bar{T}_k для конкретного выброса на рис. 5 соответствует вертикальная штриховая линия). Это позволяет оценить отставание

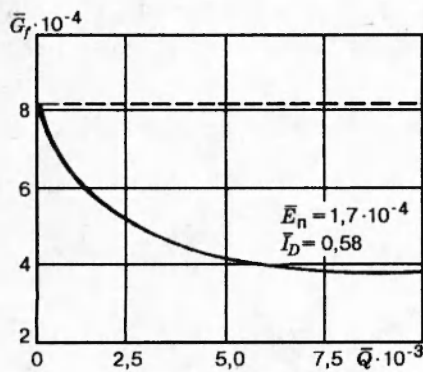


Рис. 6. Отток массы газа из полости при изменении скорости его подвода

реальной скорости развития полости от предполагаемой согласно (8).

Таким образом, соотнеся конечный объем V_k , полученный в эксперименте, и значение V , полученное по соотношению (8) в предположении адиабатического закона расширения газа, можно определить относительную долю массы газа, оставшуюся в полости на момент прекращения ее развития. При этом в (8) вместо текущего времени должно учитываться конечное время развития полости \bar{T}_k , рассчитанное по зависимости (7). В таком случае соотношение будет представлено как

$$\frac{V_k}{V} = \frac{1,8 \bar{E}_n \bar{e}^{0,9}}{V_3(W^3 + V_D)^{-1}} \left[\frac{Q \ln(73Q)}{(73Q)^2 - 1} \right]^{0,5} \left[\frac{1600(k-1)(\gamma W + p_a)^2 E_n^{0,26} \exp(0,7\bar{T}_k)}{Q^{0,1} e^{1,4} p_3 \rho \alpha R_1 T_1 [\exp(0,7T_k) - 0,9]} \right]^{1/k} \quad (10)$$

Очевидно, что с целью снижения энергии газа в выбросе, требуемой для совершения полезной работы по перемещению массива, наиболее рациональным будет тот диапазон параметров, в котором величина V_k/V максимальна. Для конкретного выброса газа с заданным \bar{E}_n максимум можно получить, исследуя функцию (10) на экстремум. При этом энергия выброса в наибольшей мере будет перераспределена на пластическое деформирование среды, а следовательно, и перемещение массива.

Для количественной оценки интенсивности фильтрации газа из полости представим массу отфильтрованного газа в общем виде:

$$G_f = \frac{p_3 V_3 - p_k V_k}{R_1 T_1}, \quad (11)$$

где p_k — давление в полости на момент прекращения ее роста. Учитывая зависимости (5)–(9), соотношение (11) можно записать в развернутом виде, при этом зависимость (9) должна трансформироваться для описания абсолютного значения V_k .

Обратившись к (2), приведем выражение (11) к безразмерному виду:

$$G_f = \frac{p_3 V_3}{(k-1)(\gamma W + p_a)(W^3 + V_D)} - \frac{2880 \bar{E}_n^{1,26} \bar{Q}^{0,4} \exp(0,7\bar{T}_k)(\gamma W + p_a)}{\bar{e}^{0,5} [\exp(0,7T_k) - 0,9] \rho \alpha R_1 T_1} \left[\frac{\ln(73\bar{Q})}{(73\bar{Q})^2 - 1} \right]^{0,5}. \quad (12)$$

Интенсивность фильтрации газа из полости при различном расходе, рассчитанная по (12), отражает сплошная линия на рис. 6. Видно, что для газодинамического выброса в грунте с заданными свойствами отток газа из полости довольно значителен. Неучет фильтрации и занижение скорости подвода газа могут привести к значительным производительным потерям энергоносителя. Относительный отток газа снижается при довольно

высоком расходе ($Q > 8 \cdot 10^{-3}$), компенсирующем фильтрационные утечки газа, и при невысокой плотности сложения массива. Это соответствует режиму предельного камуфлетного выброса при малых глубинах заложения заряда.

Автор выражает благодарность В. И. Буйневичу за участие в проведении экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков В. В., Иванов А. С. О влиянии интенсивности подачи газа под слой грунта на результат совместного действия газовых источников // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 4. С. 84–86.
2. Захарова И. Г. Расчет утечки продуктов детонации из камуфлетной полости при взрыве // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 149–151.
3. Адушкин В. В., Каазик П. Б. Расчет выхода газообразных продуктов подземного взрыва в атмосферу // ПМТФ. 1976. № 1.
4. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
5. Боровиков В. В., Иванов А. С., Любарский С. Д., Пивак Б. А. Моделирование интенсивной подачи газа в слой грунта в условиях ограниченного пространства // Физ.-техн. пробл. разработки полез. ископаемых. 1994. № 5.
6. Иванов П. Л. Уплотнение малосвязных грунтов взрывами. М.: Недра, 1983.
7. СНиП 2-15-74 Основания зданий и сооружений. Нормы проектирования. М.: Стройиздат, 1975.
8. Разоренов В. Ф. Пенетрационные испытания грунтов. М.: Стройиздат, 1980.
9. Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М. Исследование развития полости при камуфлетном взрыве // Взрывное дело № 64/21. М.: Недра, 1969. С. 5–24.

*Поступила в редакцию 10/V 1995 г.,
в окончательном варианте — 16/XI 1995 г.*
