

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА РЫХЛЕНИЯ РАЗРУШЕННОЙ СРЕДЫ

Ю. С. Вахрамеев

РФЯЦ, ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск, nto2@vniitf.ru

Проведено изучение эффекта рыхления с помощью решения упрощенных задач о схождении и движении наружу сферического слоя, а также путем экспериментального исследования плоского движения вещества, испытывающего сдвиговые деформации. Получено выражение для функции рыхления, позволяющее описывать изменение плотности в диапазоне $1,67 < \rho < 2,3$ г/см³ при сдвиговых деформациях в условиях постоянного давления.

Ключевые слова: рыхление, внутреннее трение, сдвиговая деформация, обработка опытов, взрыв на выброс.

1. При анализе результатов крупных взрывов на выброс, которые в свое время были проведены в США и СССР, из параметров, характеризующих свойства среды, была исключена прочность, а в качестве наиболее важных параметров, влияющих на процесс выброса, приняты характеристики внутреннего (сухого) трения и рыхления породы. При таком подходе значительно облегчается систематизация результатов выброса, поскольку измерить прочность среды в опытах невозможно из-за имеющихся в земле каверн и трещин. По этой же причине эффективная прочность грунта намного меньше прочности отдельных кусков материала.

Таким образом, среда, в которой происходит взрыв, принималась в виде непрочного вещества, состоящего из плотно уложенных кусков. Для его описания автором была предложена модель разрушенной среды [1]. Правильность выбранного подхода доказана тем, что на этом пути удалось систематизировать результаты практически всех крупных взрывов и описать, исходя из результатов обработки опытов [2, 3], величину объема максимальной воронки единой формулой:

$$V_{\max}^{1/3} = C(E_0/\rho_0)^{1/3,6}. \quad (1)$$

Здесь ρ_0 — плотность грунта, E_0 — мощность взрыва. Для ядерных зарядов эффективная мощность взрыва принимается в 1,35 раза меньше, чем для заряда из обычной взрывчатки. Значение параметра C зависит от типа

грунта (все породы поделены на четыре группы, отличающиеся количеством примесей глины и окатанностью кусков, т. е. тем, что влияет на величину внутреннего трения).

2. В отсутствие прочности край истинной воронки является границей между той областью, где грунт движется, и той, где он «заперт» из-за невыполнения условий текучести. Отсюда видно, насколько важен правильный учет сил сопротивления движению разрушенного вещества.

В обладающей свойствами рыхления непрочной среде сопротивление сдвигу связано не только с трением, но и с преодолением сил давления, препятствующих увеличению объема вещества. При учете рыхления в известном соотношении Прандтля — Рейсса следует заменить коэффициент сухого трения k суммой $k + \Phi$, где Φ — безразмерная функция (функция рыхления), которая входит в уравнение, описывающее изменение плотности материала ρ при сдвиге при постоянном давлении:

$$\frac{d \ln \rho}{d\gamma} = -\Phi(p, \rho). \quad (2)$$

Здесь γ — эффективный угол сдвига (в радианах), $d\gamma = \sqrt{(2/3)J_2'} dt = \sqrt{(2/3)[(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2]} dt$, J_2' — второй инвариант девиатора тензора скоростей деформаций, e_i — главные компоненты тензора скоростей деформаций. Физическое (скорее, геометрическое) толкование формулы (2) содержится в [2]. Уточнение соотношения Прандтля — Рейсса легко получить, суммируя энергию нагрева $dQ = \bar{p}k(V d\gamma)$ в объеме V с работой $dW = \bar{p}dV = \bar{p}(-d\rho/\rho)V = \bar{p}\Phi(V d\gamma)$.

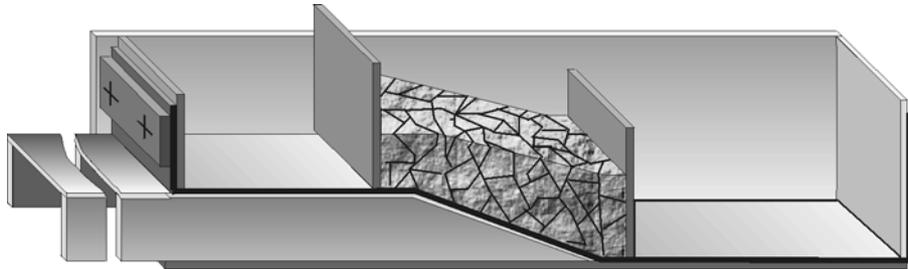


Рис. 1. Установка «Клин» для испытания образцов на сдвиг: передняя стенка не показана

Учитывать рыхление, конечно, необходимо и для того, чтобы знать объем разрушенного грунта.

3. Несмотря на важную роль рыхления, подробное изучение этого эффекта применительно к разрушенному веществу с достаточно плотно уложенными кусками ранее практически не проводилось.

До проведения опытов влияние рыхления на движение среды изучалось автором путем решения аналитических задач в простой постановке. Рассматривалось движение сферически-симметричного слоя несжимаемого, но способного к разрыхлению разрушенного вещества, обладающего сухим трением. Были получены следующие зависимости между радиальной (p_r) и угловыми ($p_\varphi = p_\theta$) компонентами давления:

$$\frac{p_\varphi}{p_r} = \frac{\sqrt{3} \pm (k + \Phi)}{\sqrt{3} \mp 2(k + \Phi)}. \quad (3)$$

Верхний знак относится к движению к центру симметрии, нижний — к движению от центра (последняя задача решалась совместно с С. В. Демьяновским [4]). Из (3) следует, что движение от центра возможно всегда, а к центру — только при $(k + \Phi) < \sqrt{3}/2$. При $(k + \Phi) \rightarrow \sqrt{3}/2$ величина p_φ стремится к бесконечности, что приводит к «запиранию» вещества. Аналогичная картина получается при решении задач с цилиндрическим слоем.

Изучать рыхление лучше всего в случае, когда течение не прерывается из-за «запирания». К сожалению, в лабораторных условиях такое течение трудно реализовать, на практике приходится довольствоваться плоским движением, свойства которого промежуточные между сферическим движением наружу и внутрь. В результате возможно «запирание» вещества. Так оно и оказалось.

Опыты по рыхлению* проводились на двух установках.

На установке «Клин» (рис. 1) образец скользит по поверхности, состоящей из двух горизонтальных участков и участка между ними, наклоненного под углом α к горизонту. Вещество дважды испытывает сдвиговую деформацию: при входе на наклонный участок и при выходе из него. Полная величина сдвига $\gamma = 2\alpha$. Деформация вещества происходит без участия внешних сил, только под действием своего веса. Давление в веществе ≈ 1 кПа.

В установке «Рычаги» (рис. 2) образец помещается внутрь параллелепипеда, у которого две боковые параллельные стенки могут менять угол наклона. Вещество испытывает сдвиг под действием силы, прикладываемой к этим стенкам извне. Характерные давления в образце на два порядка больше, чем в опытах на установке «Клин».

Испытывались три вещества: раздробленный гранит и алевролит (затвердевшая смесь песка с глиной), насыпной аллювий. Начальная плотность образцов менялась за счет их пресования. На обеих установках верхняя поверхность образцов была открытой.

До проведения опытов представлялось, что безразмерная функция $\Phi(p, \rho)$ зависит от одного безразмерного параметра $\rho_{\min}(p)/\rho$, где $\rho_{\min}(p)$ — уравнение крайней нагрузочной кривой на плоскости (p, ρ) для данного разрушенного вещества (при $p = 0$ ρ_{\min} — насыпная плотность этого вещества). Опыты же на установке «Клин» показали более сложную картину: при равных значениях ρ_{\min}/ρ алевролит и

*Эксперименты проводили сотрудники Научно-исследовательского испытательного комплекса РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина: А. Ф. Васильев, А. А. Шахов, А. П. Иванеев, С. Н. Косоруков, А. М. Засыпкин, В. Н. Толочек и др. Окончательной обработкой результатов занимался автор статьи.

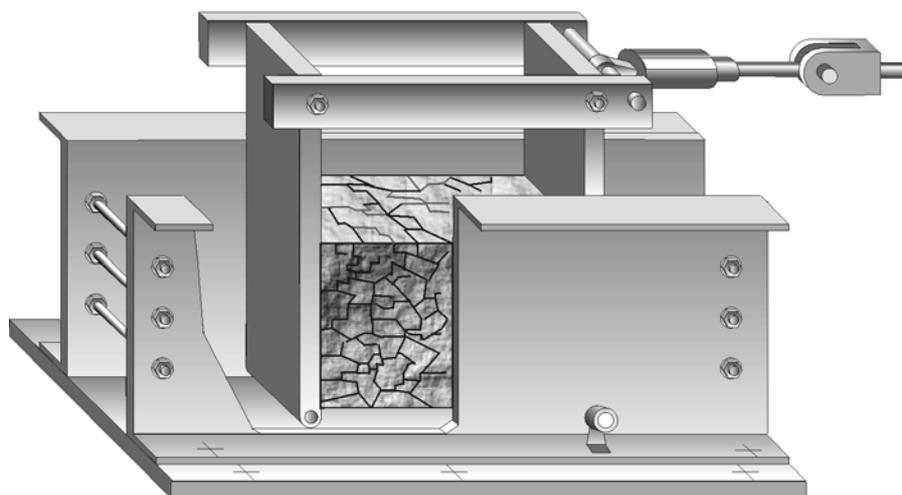


Рис. 2. Установка «Рычаги» для испытания образцов на сдвиг

аллювий по рыхлению значительно «отставали» от гранита. В связи с этим автором было высказано предположение, что в условиях естественной влажности проявляется небольшой эффект слипания кусков из-за наличия примесей. Это подтвердилось в опытах на установке «Рычаги», где силы сжатия в веществе существенно выше сил слипания. Здесь зафиксирована одинаковая зависимость рыхления от параметра $\rho_{\min}(p)/\rho$ для всех трех веществ.

На установке «Рычаги» обнаружился недостаток другого свойства: возникли помехи, связанные с появлением в образце зон «запирания». Их меньше, если образец меняет форму от косоугольного параллелепипеда к прямоугольному, а не наоборот. Но даже и в этом случае при начальном угле наклона стенок $\beta = 30^\circ$ помехи возникают уже при изменении угла наклона на $10 \div 15^\circ$. Разобраться с этим помогли численные расчеты П. Ю. Твердохлебова по созданной им программе.

Несмотря на все трудности, удалось построить искомую функцию $\Phi(\rho_{\min}/\rho)$. В основу легли исследования с гранитом на установке «Клин» и эксперименты при малых углах сдвига на установке «Рычаги». Начальная плотность образцов из гранита выбиралась близкой к значению $2,3 \text{ г/см}^3$ ($\rho_{\min} \approx 1,67 \text{ г/см}^3$).

Опыты показали, что влияние эффекта рыхления зависит также от гранулометрического состава щебня. Поэтому состав подбирался таким, чтобы в среднем он был близок к «естественному», который характерен для

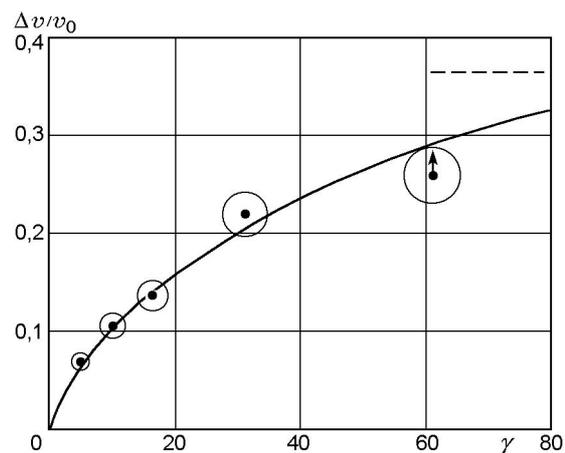


Рис. 3. Зависимость относительного изменения удельного объема от эффективного угла сдвига по результатам опытов с гранитом:

радиусы окружностей соответствуют 10 %-му отклонению от средневзвешенных значений $\Delta v/v_0$; штриховая линия — $(\Delta v/v_0)_{\max} = \text{const}$ (предельное значение)

щебня, образующегося при взрывах на выброс.

Несмотря на значительный разброс отдельных результатов, разброс осредненных значений параметров в опытах, включая гранулометрический состав, оказался небольшим. Осреднение велось по данным $5 \div 6$ опытов.

На плоскости $(\Delta v/v_0, \gamma)$ полученные точки неплохо описываются одной кривой (рис. 3). На ее основе А. С. Жариковым построена аналитическая зависимость $\Phi(\rho_{\min}/\rho)$ вида

$$\Phi = Z(1,5 + 0,769Z - 38,8Z^2 + 218Z^3),$$

$$Z = 1 - \rho_{\min}(p)/\rho.$$

На рис. 3 $v_0 = 1/\rho_0$ — удельный объем вещества перед опытом на сдвиг, v — его величина после опыта, $\Delta v = v - v_0$. Хотя приведенное выражение получено в интервале плотностей $1,67 < \rho \leq 2,3 \text{ г/см}^3$, можно предполагать, что построенная зависимость будет справедлива и при больших плотностях (например, до $\rho = 2,4 \text{ г/см}^3$).

Опыты проводились при малых давлениях. Возможность распространения результатов на случай больших давлений не доказана. Но этот способ не противоречив, удовлетворяет предельным случаям. При больших давлениях значение ρ_{\min} резко возрастает, эффект рыхления значительно снижается, поэтому большой точности при его описании не требуется.

Поскольку эффект рыхления совпадает для трех материалов, отличающихся коэффициентом трения и окатанностью кусков, можно надеяться, что полученная функция годится для описания процессов и в других веществах в разрушенном состоянии. Принятая модель позволяет также рассчитывать плотность вещества в момент приземления свободно разлетающихся кусков. Это следует из геометрических соображений. Коэффициент трения здесь вообще роли не играет.

4. В заключение остановимся на двух вопросах, касающихся эффекта рыхления.

4.1. Хотя эффект рыхления непосредственно на выделение тепла не влияет, при равных значениях коэффициента трения k в рыхлящейся среде диссипация энергии при сдвиге больше, чем в не рыхлящейся. Действительно, поскольку рыхление приводит к увеличению сил сопротивления сдвигу, то для сохранения движения в среде обязано повыситься и давление \bar{p} , а вместе с ним и затраченная на тепло энергия, которая пропорциональна $k\bar{p}$ (\bar{p} — средняя величина главных значений тензора отрицательных напряжений).

Конечно, всё это справедливо в том случае, если возрастание \bar{p} не приводит к «запиранию» движения.

4.2. В нашей стране на явление дилатансии впервые обратил внимание В. Н. Николаевский, который сделал краткий обзор зарубежных публикаций по поведению мягких материалов при сдвиге [5]. Считалось, что изменение плотности может быть разного знака. Отсюда название «дилатансия», а не рыхление.

Сомнений в том, что плотные материалы в условиях постоянного давления при сдвиге рыхляются, нет. Поэтому если уплотнение где-то и может проявляться, то только при малых плотностях среды.

На самом деле для изотропной среды этого быть не может. Действительно, если бы функция $\Phi(\rho_{\min}/\rho)$ при каком-то значении $\rho = \rho_{cr}$ меняла знак, в результате чего плотность при сдвиге стала бы возрастать, то при одинаковых характеристиках материала (плотности, гранулометрическом составе и давлении) в одних случаях сдвиг приводил бы к рыхлению, а в других — к уплотнению. Такое возможно в том случае, если свойства среды зависят не только от перечисленных параметров, но и от тех, что не учитываются в данной модели.

Одним из главных предположений в модели принимается изотропность свойств вещества. На самом деле это условие не всегда выполняется. Учитывать неизотропность очень сложно, но ее влияние проявляется, особенно у вещества в рыхлом состоянии. Замечено, что в среде, испытавшей одностороннее нагружение, при последующих деформациях поведение вещества зависит от того, в каком направлении эти деформации происходят. Неизотропность, по-видимому, служит причиной отмеченного ранее большого разброса результатов измерений в опытах со сдвигом, особенно при большой пористости образцов (см. рис. 3). Следствием неизотропности, вероятно, является также тот факт, что в некоторых работах вместо снижения плотности песка при сдвиге наблюдалось его уплотнение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вахрамеев Ю. С. Модель разрушенной среды // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика. 1994. Вып. 1. С. 22–31.
2. Вахрамеев Ю. С., Михальков Н. Г. О подобию взрывов в грунте и возможностях приближенного моделирования выброса // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика. 1988. Вып. 1. С. 63–72.
3. Вахрамеев Ю. С. Физические основы приближенного моделирования взрывов на выброс // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 1. С. 123–130.
4. Вахрамеев Ю. С., Демьяновский С. В. Расширение газовой полости в рыхлящейся среде с сухим трением // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 1974. № 1. С. 38–42.

(Статьи [1–4] и часть других на эту тему содержатся также в сборнике: Вахрамеев Ю. С. Некоторые вопросы физики взрыва и кумуляции. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997.)

5. **Николаевский В. Н.** О связи объемных и сдвиговых деформаций и ударных волн в мягких грунтах // Докл. АН СССР. 1967. Т. 177, № 3. С. 542–545.

Поступила в редакцию 21/1 2002 г.
