

УДК 624.131.21 + 539.37 + 66.067.1

**О ВЛИЯНИИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА НА ДИЛАТАНСИЮ
И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА**

А. П. Бобряков, А. Ф. Ревуженко

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: bobriakov@ngs.ru, revuzhenko@yandex.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Разработано устройство нагружения сдвигом сыпучего материала с принудительным нагнетанием через него воздушного потока, не вызывающего псевдооживления. Измерены внутренние напряжения и дилатансия образца в зависимости от угла сдвига. Показано, что модуль сдвига, характеризующий способность материала сопротивляться сдвиговой деформации с увеличением расхода фильтрационного потока, уменьшается, а дилатансия образца — увеличивается.

Сыпучая среда, сдвиговая прочность, воздушная фильтрация, объемный расход воздуха, напряжение, дилатансия

DOI: 10.15372/FTPRPI20180303

Некоторые технологические процессы горного дела и химической промышленности связаны с деформированием сыпучих материалов в условиях фильтрации газа. Сюда относятся процессы истечения сыпучих (дисперсных) материалов из емкостей в условиях противотока или попутного течения газа; деформирование гранулированного материала в химических реакторах и др. [1–4].

Процессы деформирования с одновременной фильтрацией происходят и в естественных условиях. В первую очередь они вызваны так называемым “дыханием Земли”, т. е. ее дегазацией. В последние десятилетия интерес к проблемам дегазации значительно вырос [5, 6]. Дегазация влияет на напряженно-деформированное состояние земных недр и на формирование месторождений углеводородов. С дегазацией (водорода) связываются и некоторые катастрофические события (взрыв в Сасово и другие подобные явления) [7, 8]. В реальных горных породах фильтрация газа происходит через системы сообщающихся между собой трещин и пор. В ряде случаев процессы аналогичны фильтрации сквозь гранулярную среду. Особо следует отметить фильтрацию, которая происходит на разломах и границах блоков различных масштабов. Характерные деформации на границах блоков превышают деформации самих блоков на несколько порядков, поэтому материал разломов становится более раздробленным и близким к сыпучему. В связи с этим на разломах могут создаваться особые условия как для сегрегации мате-

риала, так и для фильтрации газов и других флюидов [9, 10]. Процессы деформирования, разрушения и фильтрации тесно переплетаются при реализации различных способов дегазации угольных пластов [11].

Исследование подобных процессов методами механики сплошной среды предполагает построение адекватных математических моделей процесса. Математическая модель, в свою очередь, — это описание однородных (и, значит, простейших) типов деформаций с наложенным на них однородным фильтрационным потоком.

Представляют интерес экспериментальные результаты, в которых можно реализовать простейшие способы деформирования. Общая их классификация дана в [12]. Далее ограничимся простым сдвигом без поворота осей тензора деформаций, а также слабыми фильтрационными потоками, не вызывающими псевдооживления материала.

Деформирование материала осуществлялось в приборе однородного сдвига. Конструкция прибора представляет собой камеру с вертикальными стенками [13]. При сдвиге размеры передней и задней стенок 1, 2 (рис. 1а) остаются неизменными (250×250 мм), а боковые стенки при сдвигах (от -12 до $+12^\circ$) несколько удлиняются, так что расстояние между стенками 1, 2 остается неизменным. Объем камеры при любых сдвигах постояен и по изменению высоты образца сразу определяется его дилатансия и текущая пористость.

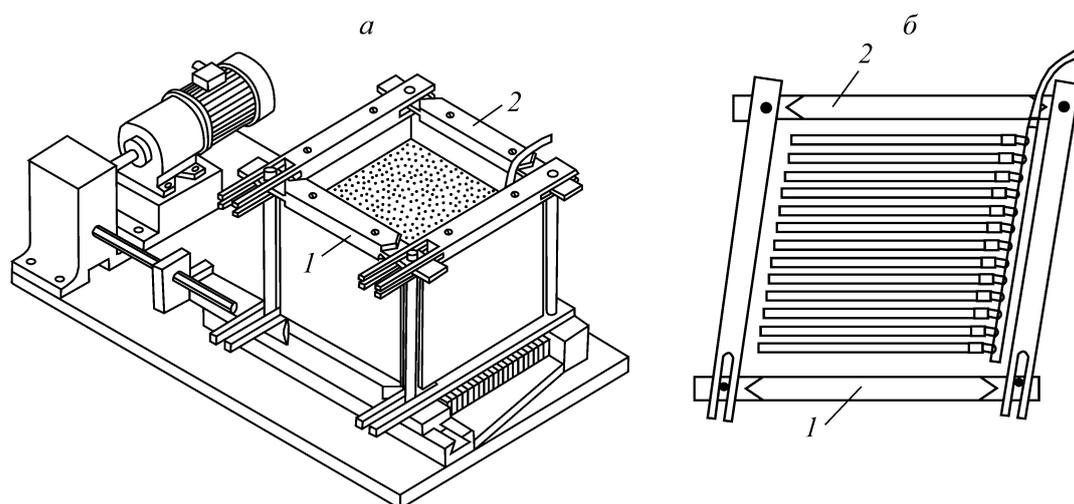


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки: а — устройство нагружения; б — устройство подачи воздуха; 1, 2 — задняя и передняя стенки камеры

Подача воздуха осуществлялась с помощью компрессора Pacific-24 с ресивером на 24 л (давление 6–8 атм) и регулируемым выходным давлением воздуха. На дне камеры размещалось 13 металлических трубок (внутренний и внешний диаметры 4 и 6 мм), перфорированных отверстиями диаметром 2 мм с шагом 15 мм. С одного конца трубки заглушены, а с другого — через гибкие полиуретановые патрубки соединены с распределительной трубкой, подключенной к шлангу компрессора (рис. 1б). Для исключения попадания частиц в отверстия протоков воздуха поверхность трубок закрывалась тремя слоями нетканого воздухопроницаемого полотна спанбонд, использованного в производстве медицинских масок.

Опыты проводились в следующем порядке. В центре камеры у дна устанавливались плавающие датчики нормальных и касательных напряжений [14]. Затем камера заполнялась сыпучим материалом струей через воронку. Фиксировались исходные напряжения и высота образца. Затем образец подвергался знакопеременным циклическим сдвигам с фиксированной ампли-

тудой. Это позволило достичь достаточно плотной и бездефектной упаковки частиц [13]. Опыты показали, что полученная таким образом упаковка не зависит от способа формирования исходного образца. Это имеет значение при анализе степени повторяемости результатов от эксперимента к эксперименту.

На рис. 2 представлена типичная диаграмма для нормальных напряжений (штриховыми линиями отмечены переброски пера, стрелками — направления сдвига камеры, отрезок OA — запись статического давления от нуля). После 14 циклов давление выходит на периодический режим. При изменении амплитуды новый периодический режим устанавливается через 1–2 цикла. Подача воздуха (точка B диаграммы) приводит к снижению уровня нормальных напряжений. Из диаграммы видно, что снижается как минимальное в цикле значение напряжения, так и среднее (за счет уменьшения амплитуды изменения напряжений). Для касательных напряжений и дилатансии переход от исходного состояния упаковки к стационарному будет аналогичным, поэтому далее приводятся диаграммы только на стационарной стадии деформирования.

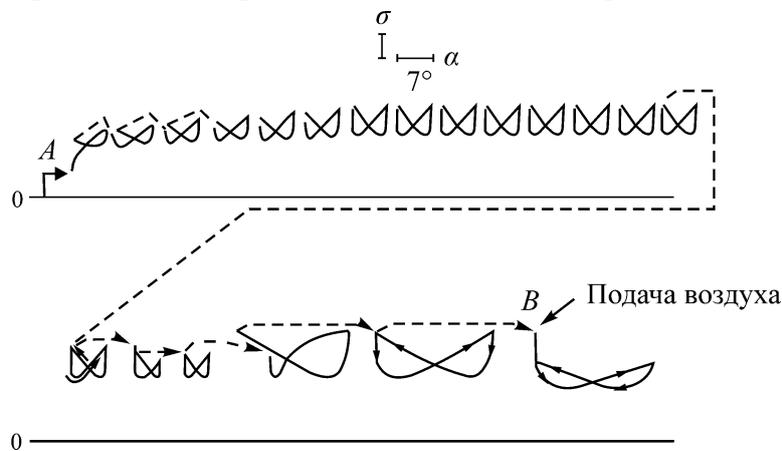


Рис. 2. Нормальные напряжения при циклическом деформировании образца от рыхлой засыпки до стационарного состояния (верхний ряд кривых) с последующим переходом на другие углы и под воздействием на образец фильтрации воздуха

Все данные приведены для сухого кварцевого песка со следующими характеристиками: удельный вес $\rho = 2.6 \text{ г/см}^3$, вес образца $G = 100 \text{ Н}$, средний размер частиц $d \sim 0.3 \text{ мм}$. Засыпка в камеру осуществлялась через воронку (рыхлая засыпка), начальная высота образца $H_0 = 11 \text{ см}$, объем образца $V_0 = 6875 \text{ см}^3$, насыпной вес $\gamma = 1.45 \text{ г/см}^3$, начальная пористость (объемная доля пустот в образце) $\Pi_0 = (1 - \gamma / \rho)100\% = 44.2\%$.

На рис. 3 показаны стационарные диаграммы деформирования для циклических сдвигов с амплитудами 7, 16 и 24°. В каждом ряду первые три диаграммы получены без подачи воздуха, последние три — с подачей воздуха с удельным объемным расходом $q = 3.7 \text{ см}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ (q — объем подаваемого воздуха на единицу площади дна камеры).

В экспериментах соблюдалось условие, при котором воздушный поток, проходящий через зернистую среду сквозь пустоты между частицами, воздействовал на них, но не превосходил порог перехода неподвижного слоя в кипящий. Это условие выполняется в том случае, когда газодинамическое давление потока, направленного вверх, неспособно уравновесить силу тяжести частиц и перевести их во взвешенное состояние (псевдооживление).

Из диаграммы (рис. 3а) видно, что подача воздуха приводит к падению пластического модуля сдвига $\mu = \tau / \gamma$, $\gamma = \text{tg} 2\alpha$ — сдвиг (таблица). Согласно данным таблицы, наличие слабого потока газа может значительно изменить модуль сдвига.

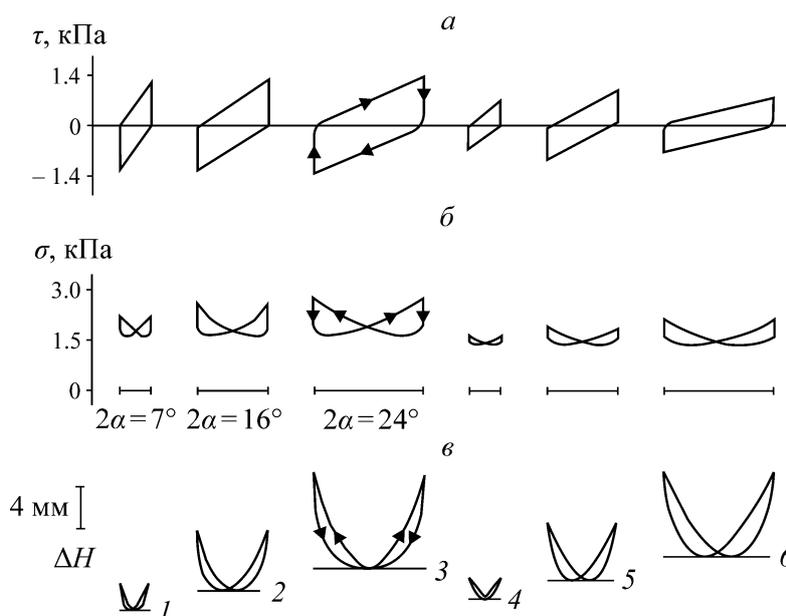


Рис. 3. Стационарные диаграммы напряжений и дилатансии в отсутствии и под воздействием фильтрации воздуха через образец кварцевого песка при циклических сдвигах на углах размаха 7, 16, 24°: *a* — касательные напряжения; *б* — нормальные напряжения; *в* — дилатансия. Последние три цикла в каждом ряду получены под воздействием фильтрации с постоянным удельным объемом расходом воздуха ($q = 3.67 \text{ см}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$)

Изменение модуля сдвига и минимальной пористости кварцевого песка в зависимости от амплитуды сдвига и воздействия на образец фильтрационного потока

Деформирование без фильтрации воздуха			Деформирование с фильтрацией воздуха		
$2\alpha = 7^\circ$	$2\alpha = 16^\circ$	$2\alpha = 24^\circ$	$2\alpha = 7^\circ$	$2\alpha = 16^\circ$	$2\alpha = 24^\circ$
$\mu_1 = 10.92 \text{ кПа}$	$\mu_2 = 3.90 \text{ кПа}$	$\mu_3 = 3.13 \text{ кПа}$	$\mu_4 = 5.98 \text{ кПа}$	$\mu_5 = 2.11 \text{ кПа}$	$\mu_6 = 1.81 \text{ кПа}$
$\Pi_{\min 1} = 38.5\%$	$\Pi_{\min 2} = 39.6\%$	$\Pi_{\min 3} = 40.7\%$	$\Pi_{\min 4} = 39.2\%$	$\Pi_{\min 5} = 40.2\%$	$\Pi_{\min 6} = 41.5\%$

По экспериментальным графикам рис. 3*a, б* вычислены и приведены на рис. 4 значения отношений τ/σ при двух режимах деформирования — однонаправленным сдвигом стационарной упаковки для угла $2\alpha = 24^\circ$ (кривая 1) и деформированием с подключением воздуха (кривая 2). Видно, что деформирование с подключением фильтрации приводит к разупрочнению материала и уменьшению угла внутреннего трения (в зависимости от величины сдвига γ значение τ/σ уменьшается от 50 до 20 %).

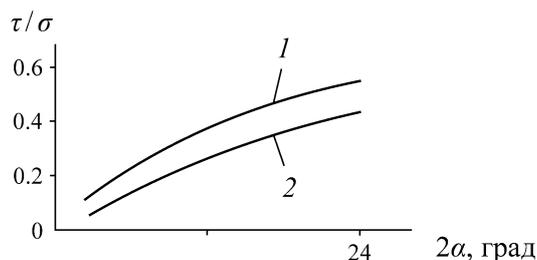


Рис. 4. Отношения τ/σ при деформировании без фильтрации (1) и с фильтрацией (2)

Это связано с тем, что поток воздуха выводится через дно камеры с сыпучим материалом и движется вверх через поры между частицами. При малых расходах и скорости потока процесс прохождения воздуха вызывает силы аэродинамического сопротивления каждой из частиц, которые также невелики по сравнению с их весом. Поэтому слой остается в “связанном” состоянии. Максимальный удельный объемный расход воздуха, используемый в экспериментах, не способен вызвать противодействие силам гравитации и привести материал во взвешенное состояние.

Однако в том случае, когда материал испытывает совместное воздействие фильтрации со сдвиговым деформированием, даже незначительная потеря веса частицы, вызванная воздушным потоком, начинает влиять на кинематику движения частиц при сдвиге, поскольку преодоление внешней силой сухого трения в направлении сдвига влечет снятие трения во всех других направлениях. При циклическом деформировании каждая частица от своего прежнего положения переместится на новый уровень так, что ее потенциальная энергия увеличится. Механизм перехода одной упаковки в другую рассмотрен в [13].

Уменьшение веса образца под воздействием фильтрационного потока можно оценить следующим образом. Ранее было показано, что минимальное в стационарном цикле напряжение на вертикальной площадке практически равно нормальному напряжению на горизонтальной площадке. Если взять это свойство за основу, то влияние фильтрации можно оценить по диаграмме σ (рис. 3). Замечено, что напряжение при циклическом сдвиге независимо от величины угла изменяется относительно двух минимальных уровней — когда фильтрация отсутствует $\sigma_{\min} = 1.61$ кПа и деформирование с фильтрацией воздуха $\sigma_{\min \text{ в}} = 1.38$ кПа. Минимальные уровни нормальных напряжений, измеренных на дне камеры, равны давлению веса образца соответственно без фильтрации $G = \sigma_{\min} s = 100$ Н и под воздействием фильтрации $G_{\text{в}} = \sigma_{\min \text{ в}} s = 86.5$ Н, где s — площадь дна камеры. При таком удельном расходе воздуха вес материала при аэродинамическом давлении воздушного потока уменьшился на величину $P = G - G_{\text{в}} = 13.5$ Н и составляет от веса частиц $P / G \cdot 100\% \approx 13.5\%$. Максимальный воздушный поток, создаваемый в эксперименте, на 13.5% уравнивает силу тяжести частиц, т. е. условие устойчивого состояния и покоя сыпучей среды в опытах выполняется с запасом.

Рассмотрим влияние удельного объема расхода воздуха на максимальные касательные напряжения, возникающие при деформировании материала в стационарном состоянии для угла $2\alpha = 16^\circ$. Измерения проведены на вертикальной площадке максимальных касательных напряжений (площадка параллельна неподвижной стенке камеры). На рис. 5 представлены зависимости, из которых следует, что с увеличением удельного объемного расхода воздуха амплитуды касательных и нормальных напряжений линейно падают. Увеличение расхода воздуха будет приводить к дальнейшему падению пластического модуля сдвига.

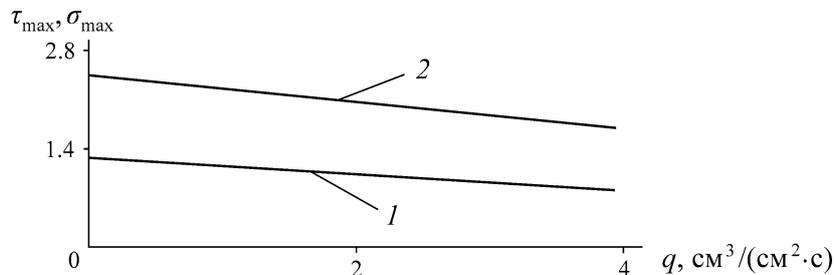


Рис. 5. Влияние удельного объемного расхода фильтрации воздуха q через образец кварцевого песка на максимальные напряжения при сдвиге: 1 — касательные; 2 — нормальные (средний размер частиц $d = 0.3$ мм, угол сдвига $2\alpha = 16^\circ$)

ВЫВОДЫ

Разработана экспериментальная установка для исследования прочностных свойств сыпучей среды при сдвиге под воздействием воздушного фильтрационного потока, скорость которого не превышает порог перехода неподвижного слоя в “кипящий”. Измерены внутренние напряжения и дилатансия образца в зависимости от угла сдвига. Воздушный поток при деформировании стационарной упаковки частиц приводит материал к разупрочнению, связанному с падением нормальных и касательных напряжений и возрастанию пористости. Модуль сдвига, характеризующий способность материала сопротивляться сдвиговой деформации, уменьшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кувшинов Г. Г.** Истечение зернистого материала из отверстия при наличии противотока газа // ПМТФ. — 1995. — Т. 36. — № 6. — С. 85–93.
2. **Цубанов А. Г., Забродский С. С., Антонишин Н. В.** О влиянии фильтрации газа на истечение сыпучего материала // Исследование процессов в аппаратах с дисперсными системами: сб. трудов. — Минск: Наука и техника, 1969. — С. 133–137.
3. **Борисов Ю. И., Ходак Л. З.** Механизм движения сыпучих тел при истечении их через отверстие // Инж.-физ. журн. — 1965. — № 6. — Т. 8. — С. 712–719.
4. **Цубанов А. Г.** О влиянии перепада давления на перетекание сыпучего материала по вертикальному каналу // Инж.-физ. журн. — 1969. — № 2. — Т. 7. — С. 254–260.
5. **Гуфельд И. Л., Новоселов О. Н.** Сейсмический процесс в зоне субдукции. Мониторинг фонового режима. — М.: МГУЛ, 2014. — 100 с.
6. **Дмитриевский А. Н., Валяев Б. М.** Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь. — М.: Геос, 2010. — 712 с.
7. **Ларин В. Н.** Гипотеза изначально гибридной Земли. — М.: Недра, 1980. — 216 с.
8. **Ларин В. Н.** Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гибридной Земли). — М.: Агар, 2005. — 248 с.
9. **Кочарян Г. Г., Остапчук А. А., Мартынов В. С.** Изменение режима деформирования разлома в результате инъекции флюида // ФТПРПИ. — 2017. — № 3. — С. 20–28.
10. **Кочарян Г. Г.** Геомеханика разломов. — М.: Геос, 2016. — 424 с.
11. **Курленя М. В., Сердюков С. В.** Десорбция и миграция метана в термодинамически неравновесном угольном пласте // ФТПРПИ. — 2010. — № 1. — С. 61–68.
12. **Ревуженко А. Ф.** О самых простых течениях сплошной среды // ДАН СССР. — 1988. — Т. 303. — № 1. — С. 54–58.
13. **Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф.** Однородный сдвиг сыпучего материала. Дилатансия // ФТПРПИ. — 1982. — № 5. — С. 23–29.
14. **А. с. № 1485046.** Датчик для измерения касательных напряжений / А. П. Бобряков, А. Ф. Ревуженко, В. П. Косых // Оpubл. в БИ. — 1989. — № 21.

Поступила в редакцию 20/IV 2018