

УДК 532.546.3

ОБРАЗОВАНИЕ ВОРОНОК ПРИ ВЫБРОСЕ ГАЗА В СЛАБОСВЯЗНОЙ СРЕДЕ

© 2025 г. А. А. Таирова*, Н. А. Юдочкин, Г. В. Беляков

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: tairova.aa@idg.ras.ru

В статье приведены результаты экспериментов, проведенных на двумерной оптически прозрачной модели, задачей которой являлось физическое моделирование выброса газа в слабосвязной гранулированной среде. Предложенная модель позволяет визуализировать процессы разрушения среды при фильтрации газа в ней с последующим выбросом разрушенного массива. Получены картины образования куполов над дневной поверхностью и их разрушения в режиме реального времени. После выброса возникают воронки, которые сохраняют свою форму в случае смоченного песка благодаря прочности, возникающей за счет капиллярных сил. По результатам опытов определены геометрические параметры воронок в зависимости от глубины заложения источника газа.

Ключевые слова: фильтрация газа, слабосвязная гранулированная среда, выброс газа, образование воронок.

Для цитирования: Таирова А.А., Юдочкин Н.А., Беляков Г.В. Образование воронок при выбросе газа в слабосвязной среде // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 4. С. 44–53.
https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_4_44

Введение

Конусообразные воронки или покмарки образуются в рыхлых, тонкозернистых осадках на поверхности морского дна. Чаще всего покмарки приурочены к активным континентальным окраинам [Hovland, Judd, 1988], но могут встречаться и в зонах перехода от шельфа к континентальному склону [Rybak, Stupina, 2019]. Они образуются в результате накопления и последующего выброса газа, который поднимается через рыхлые осадочные слои. Этот процесс может быть вызван различными факторами, включая глубинную геологическую активность и изменения термобарических условий на глубине залегания газогидратов. В результате диссоциации газогидратов на газ и воду, газ начинает накапливаться под низкопроницаемыми слоями, создавая давление, которое в конечном итоге приводит к взрывному выбросу. В результате выброса образуется воронка диаметром до нескольких сотен метров и глубиной до нескольких десятков [Böttner et al., 2024]. Её геометрические параметры зависят от геологического строения, длительности формирования, а также механизма поддержания [Böttner et al., 2019; Karstens et al., 2022], заключающегося в том, что поток под большим давлением продолжает выходить из основания воронки после ее образования. При расширении рабочего тела во время выброса и разрушении породы образуются трещины, которые окаймляют стенки воронки [Адушкин, Спивак 1993; Collins et al., 2004].

Цель данного исследования состояла в рассмотрении процесса возникновения выброса в сухой и увлажненной слабосвязной гранулированной среде.

Экспериментальная установка и методика проведения опытов

На рис. 1 представлена экспериментальная установка, состоящая из двух оптически прозрачных стеклянных пластин, расположенных вертикально (1), зазор между которыми составлял 3 мм. Ячейка

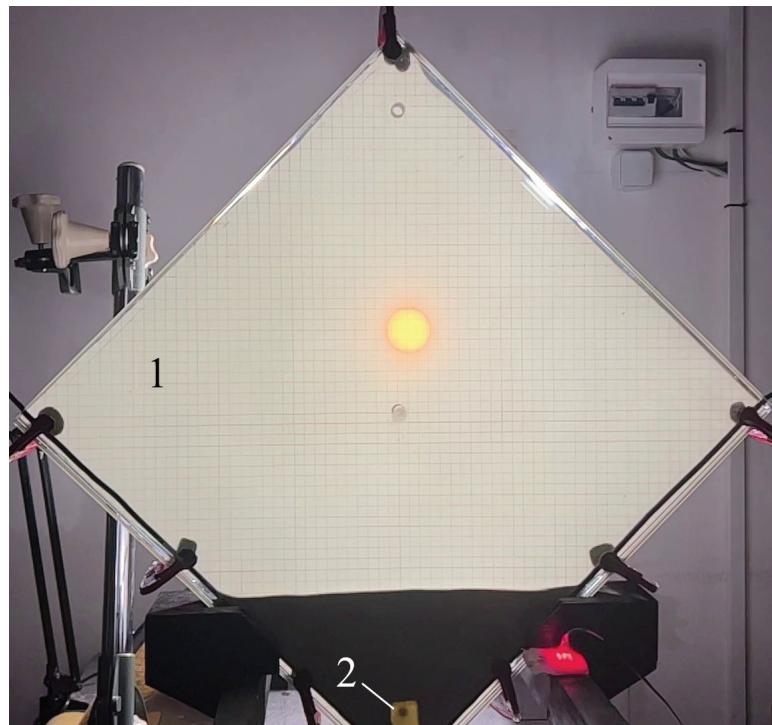


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – ячейка, 2 – входное отверстие для подачи газа

расположена таким образом, что диагональ пластин расположена вертикально. Это позволяет направить потоки в середину ячейки и уменьшить скорость выброса песка. Песок засыпался в нижнюю часть ячейки и одновременно утрамбовывался при помощи вибростола, насыпная плотность песка составила $1.5 \text{ г}/\text{см}^3$. Входное отверстие (2) для подачи газа, подаваемого под давлением из баллона, располагалось в нижнем углу одной из стеклянных квадратных пластин. Давление подаваемого газа измерялось на входном патрубке и передавалось на АЦП. Верхняя часть ячейки была соединена с атмосферой. Эксперименты проводились на сухом и смоченном песке при различных давлениях подаваемого в ячейку газа, а также различных глубинах залегания источника газа. Картина происходящих в ячейке процессов регистрировалась скоростной видеокамерой.

Результаты экспериментов

Эксперименты в сухой среде

На рис. 2 представлены стадии эксперимента по выбросу газа в сухом песке. Высота слоя песка от источника до дневной поверхности составила 8 см (рис. 2а). Поток газа, подаваемый в ячейку, не успевает отфильтровываться сквозь насыпанный слой песка, в результате происходит резкое повышение давления, что видно на рис. 2б и на зависимости давления от времени (рис. 3). Рост давления приводит к увеличению скорости песка и подъему купола. Подъем песчаного купола происходит с постоянной скоростью порядка 80 см/с (рис. 2в). Со временем рост купола останавливается, поскольку происходит разуплотнение пористой среды (рис. 2г). Картина движения этого слоя напоминает раздувание воздушного шарика. Частицы, захваченные потоком, разлетаются на большое расстояние относительно своего начального положения. После достижения максимальной величины размера купола происходит его разуплотнение (рис. 2д), и давление резко начинает снижаться. В связи с этим частицы под действием силы тяжести, превышающей силу давления потока газа, осыпаются. Осыпаясь, песок создает форму воронки с бруствером (рис. 2е) глубиной 10 см, тогда как начальная высота слоя составляла 8 см, что стало возможным в результате выноса объема песка и распределения

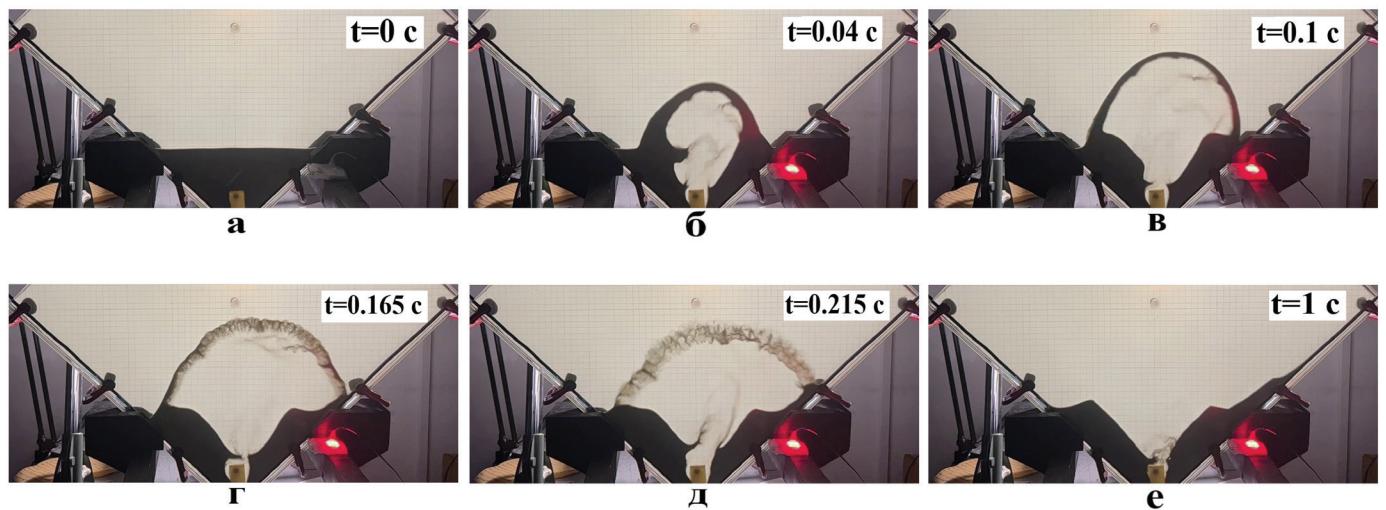


Рис. 2. Выброс газа в сухом песке при глубине источника 8 см

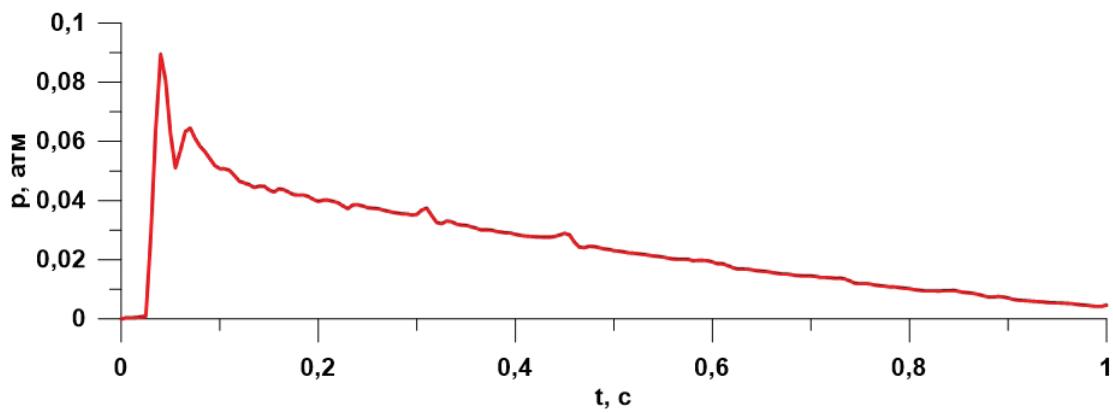


Рис. 3. Изменение давления газа на входе в ячейку при глубине источника 8 см в сухом песке

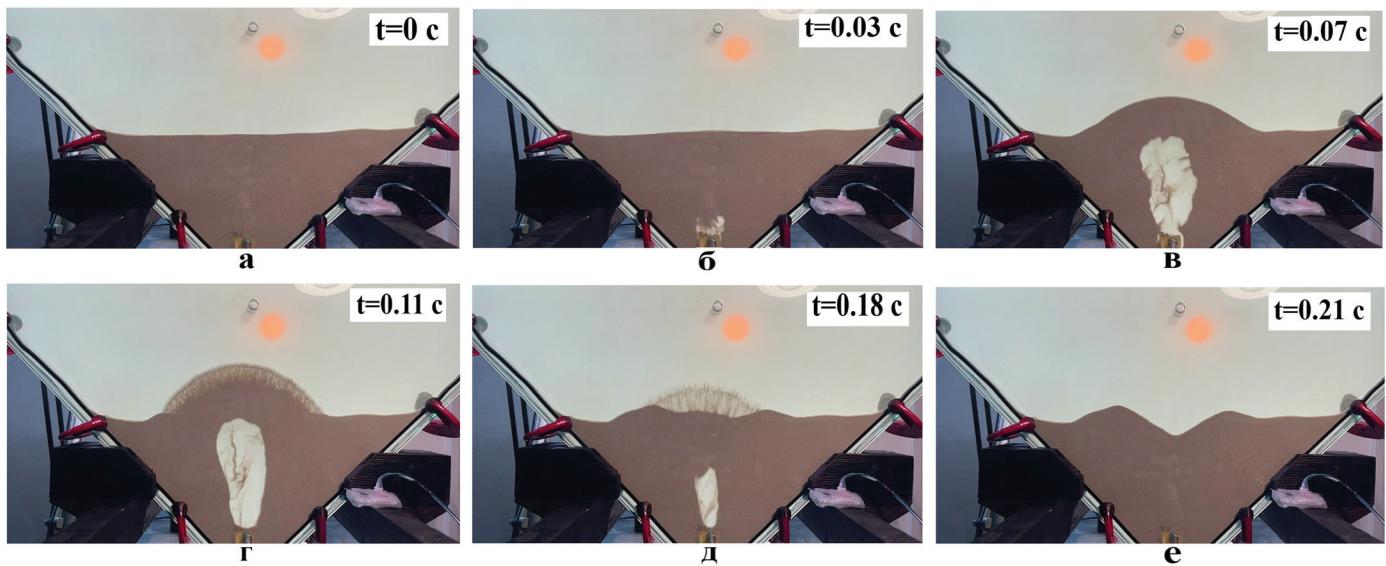


Рис. 4. Выброс газа в сухом песке при глубине источника 15 см при кратковременной подаче газа

его на свободной поверхности. При этом малая часть материала осыпалась обратно в воронку. Диаметр воронки составил 19 см.

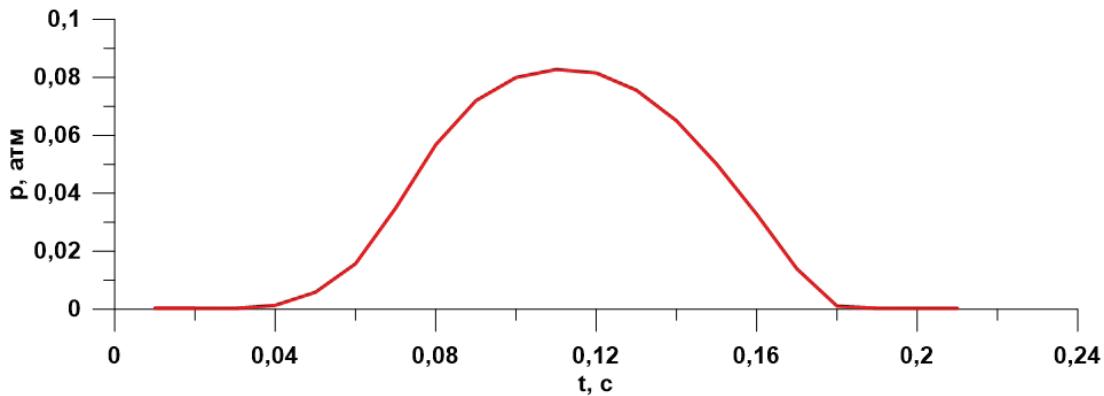


Рис. 5. Изменение давления при кратковременной подаче газа в сухой песок

В следующем эксперименте слой песка увеличили примерно в 2 раза до 15 см (рис. 4а). Давление подаваемого газа было тем же, порядка $p = 0.08$ атм, при этом подача газа была кратковременная. Происходит постепенный рост давления, что можно видеть из графика на рис. 5. Как и в предыдущем случае возникает купол, растущий со скоростью 50 см/с (рис. 4в), только толщина его слоя больше. Через 0.1 с купол достигает своей максимальной высоты и начинает разуплотняться (рис. 4г). При этом его проницаемость увеличивается. Тем временем давление потока падает и рост купола прекращается, частицы устремляются вниз. В этом эксперименте, в результате кратковременного воздействия и из-за значительной толщины слоя, основная масса частиц устремляется вниз, лишь верхние частички купола продолжают двигаться вверх по инерции, а затем их скорость падает (рис. 4д). Глубина воронки, образованной в результате такого кратковременного воздействия небольшая, всего 2.8 см, а ее диаметр составил 11 см (рис. 4е).

В экспериментах с глубиной залегания источника газа $h = 15$ см, но при меньшем нагнетаемом давлении $p = 0.05$ атм и при длительном режиме подачи газа (рис. 6), скорость подъема купола достигала 42 см/с. Вначале развитие купола (рис. 6б, в) происходит, как описано ранее (рисунки 2, 4). В момент времени $t = 0.15$ с, когда купол достигнет своего максимального размера при видимой постоянной плотности, начинается разуплотнение, проницаемость его увеличивается и давление падает (рис. 7). Некоторое время все частицы разрозненно движутся по инерции в направлении роста купола (рис. 6д). Далее слой все более разуплотняется и частицы под действием силы тяжести устремляются вниз, но испытывают некоторое сопротивление восходящего газового потока (рис. 6е).

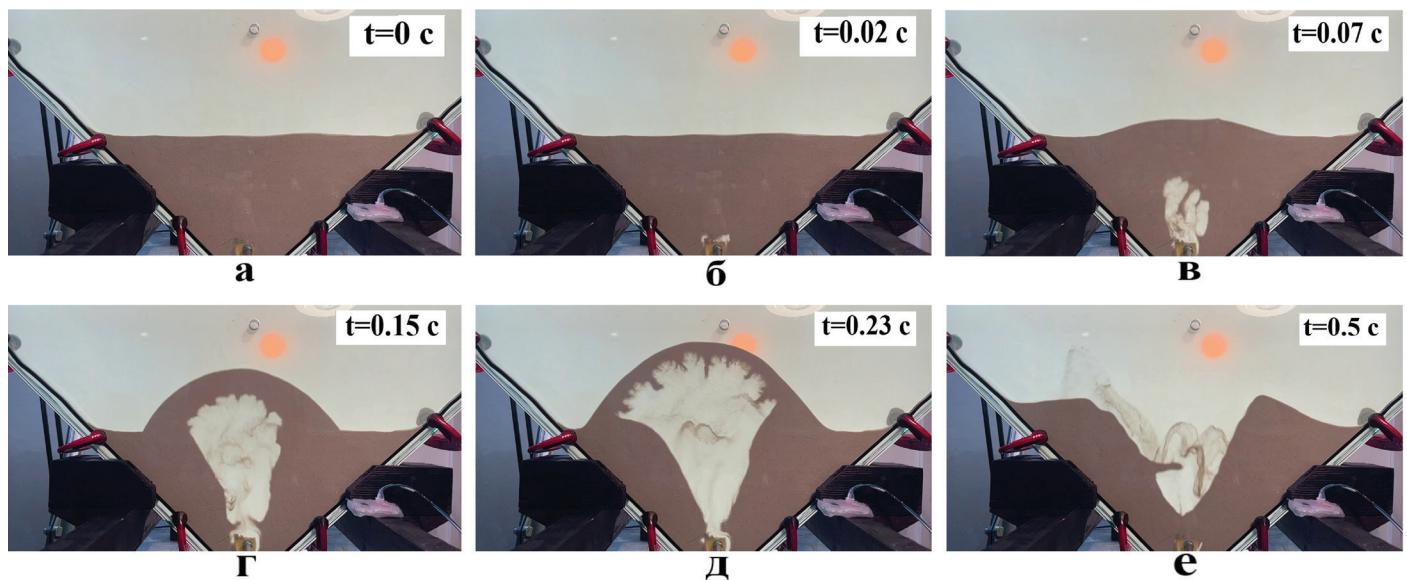


Рис. 6. Выброс газа в сухом песке при глубине источника 15 см при продолжительной подаче газа

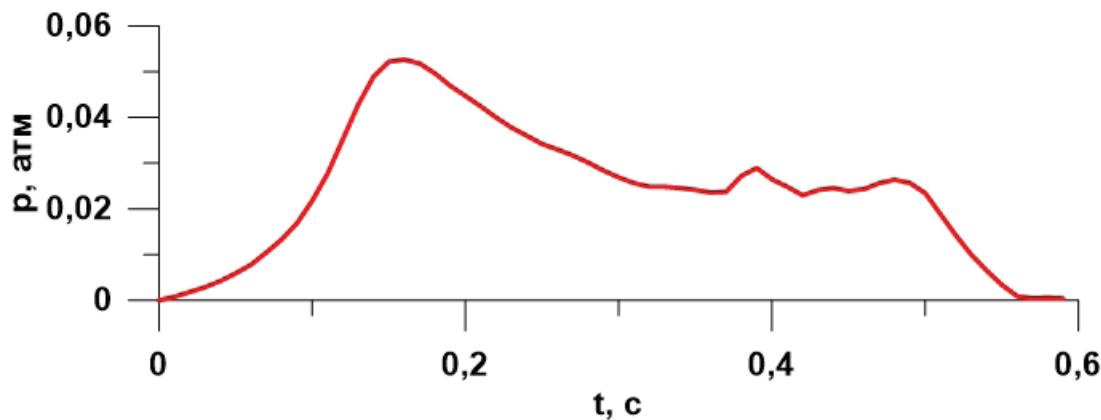


Рис. 7. Изменение давления при продолжительной подаче газа в сухой песок

Эксперименты в насыщенной среде

В следующем эксперименте для увеличения связности песок был смочен водой таким образом, что сначала ячейка с песком полностью заполнялась водой, затем жидкость из ячейки сливалась из нижнего отверстия до тех пор, пока не переставала вытекать из нее. Глубина залегания источника газа составила 15 см, давление подаваемого газа 0.2 атм (рис. 8). В начальный момент газ, как поршень приподнимает весь песчаный массив на несколько миллиметров (рис. 8б), при этом возникают нарушения сплошности материала, в результате чего проницаемость массива изменяется. Затем на границах образовавшейся полости возникают трещины (рис. 8в), которые устремляются к свободной поверхности. По мере продвижения образующихся каналов свободная поверхность поднимается в виде купола со скоростью 15 см/с (рис. 8г). Далее один из магистральных каналов пробивает свободную поверхность (рис. 8д), происходит выброс газа и части смоченных песчаных сгустков со скоростью 50 см/с (рис. 8е), давление падает (рис. 9). В результате образуется воронка диаметром 3.5 см и глубиной 15 см.

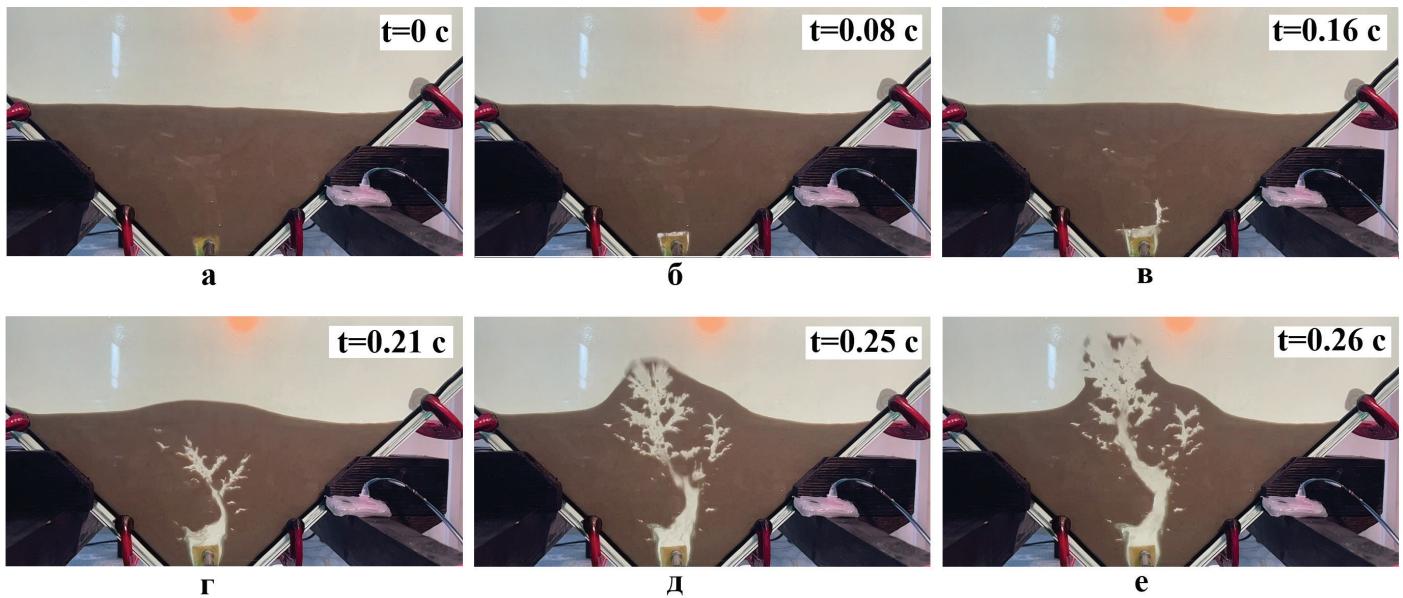


Рис. 8. Выброс газа в увлажненном песке при глубине источника 15 см

С увеличением глубины до 25 см и давления до 0.8 атм (рис. 10а) картина распространения газа в смоченной среде отличается от описанных ранее. В начальный момент при воздействии газа давление растет (рис. 11). Затем (рис. 10б) возникает полость, при этом свободная поверхность покойится. Из этой полости начинают прорастать трещины как в вертикальном (магистральная), так и в горизонтальном

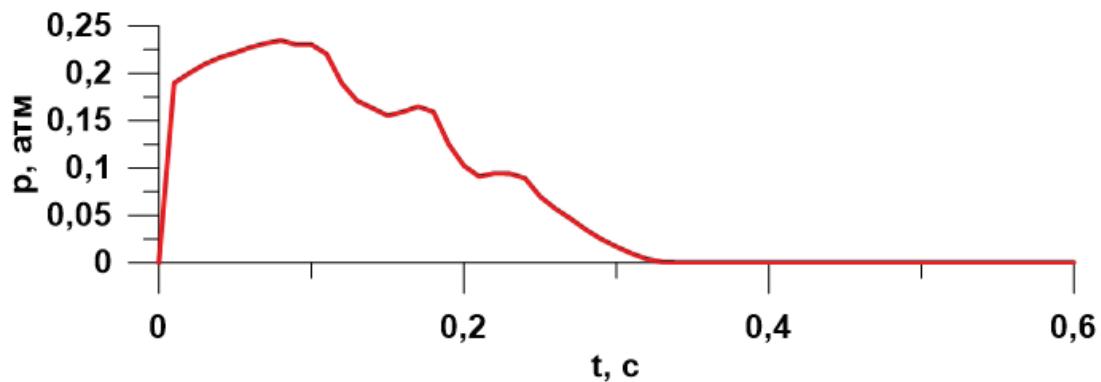


Рис. 9. Изменение давления газа при выбросе в увлажненном песке на глубине 15 см

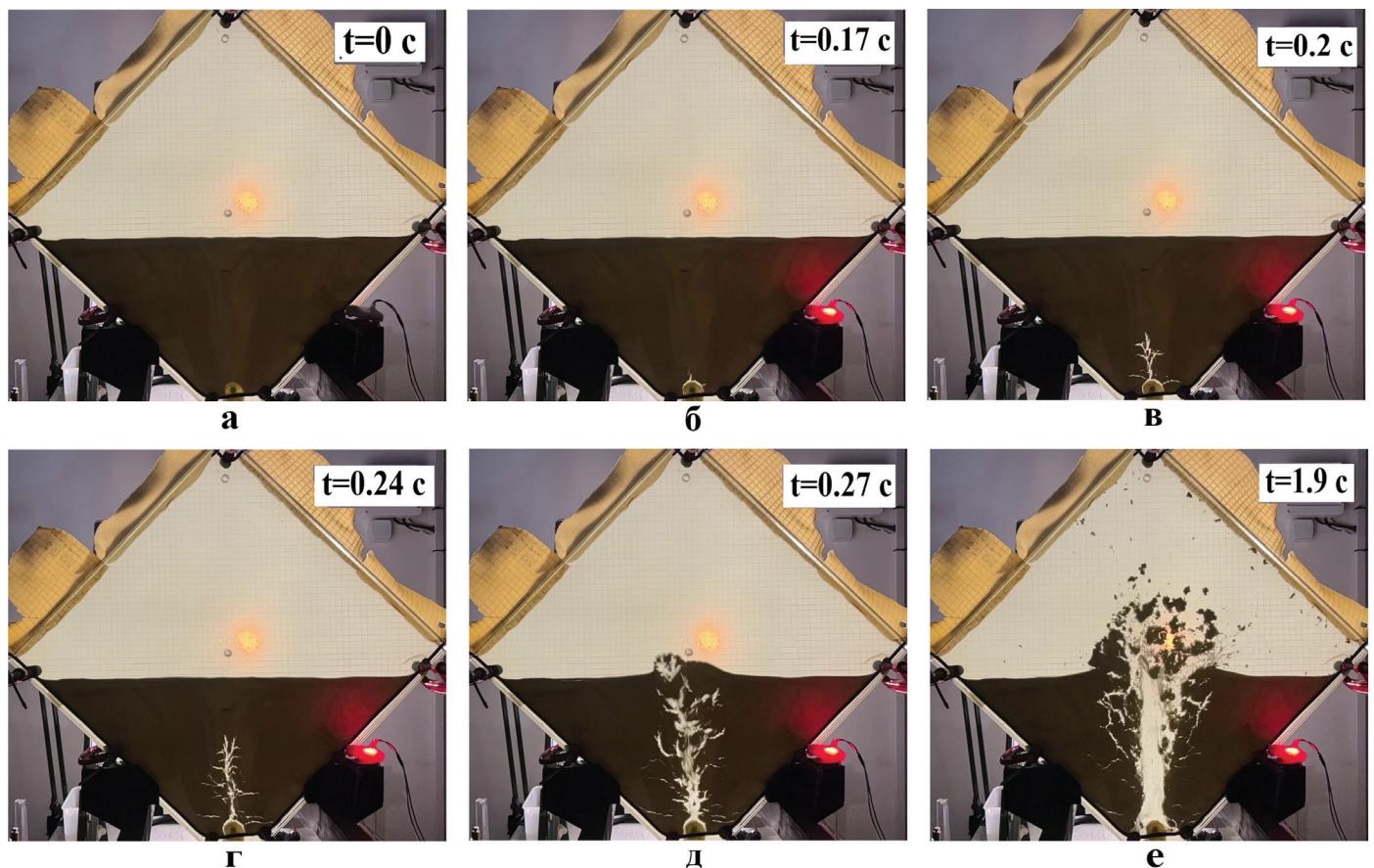


Рис. 10. Выброс газа в увлажненном песке при глубине источника 25 см

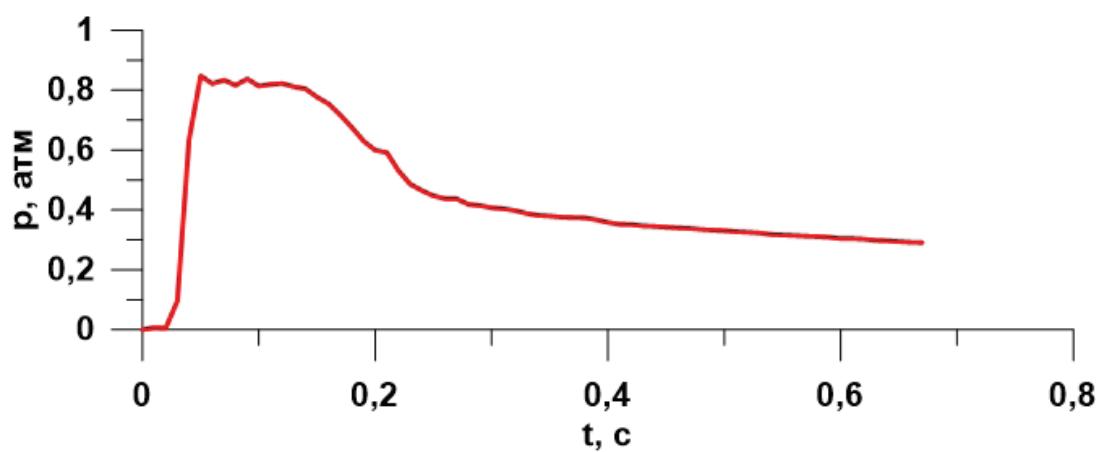


Рис. 11. Изменение давления газа при выбросе в увлажненном песке на глубине 25 см

направлениях (рис. 10в). При достижении глубины в 10 см газ, восходящий по вертикальному каналу, поднимает свободную поверхность в виде купола (рис. 10г). По мере роста магистральной трещины (вертикальной) происходит рост боковых, ответвляющихся от нее трещин. При прорыве основной трещиной свободной поверхности (рис. 10д), выбросе газа и песчаных сгустков, боковые трещины консервируются, а горизонтальные сужаются (рис.10е).

Обсуждение

В представленном исследовании методом оптической визуализации были рассмотрены различные режимы фильтрации через сухую и увлажненную сыпучую среду. В режиме реального времени удалось зафиксировать моменты образования и развития выбросов газа. В случае с сухим песком работает только трение частиц на их контактах, прочность на разрыв такой среды, если она не ограничена по всему периметру – мала. Добавление жидкой фазы в песок, но без насыщения, позволяет добиться связности за счет капиллярных сил. Таким образом, разрушение структуры увлажненного сыпучего слоя напоминает картину развития трещин в твердых телах. При разлете сгустков влажного песка жидкость отделяется от частиц со скоростью, превосходящей скорость песчинок. При образовании купола в опытах в сухой среде песок движется сначала как твердое тело, затем происходит разуплотнение, приводящее к увеличению расхода газа, а его давление снижается. Эксперименты при различных скоростях закачки газа в ячейку показывают, что по образованной после выброса воронке можно предположить, какой объем полости, содержащей газ, находится в глубине массива. Так, если время роста купола мало, то и выброс будет небольшим, а воронка мелкой.

Параметры образованных воронок в основном зависят от глубины заложения, источника подаваемого газа и прочности породы. На графике рис. 12 представлены зависимости глубины образованной воронки от глубины источника газа. Исходя из графика, можно заключить, что глубина воронки в большей степени зависит от глубины источника газа, особенно в случае смоченного песка (обозначено кругами). Диаметр воронки больше зависит от прочности породы. Так, на графике рис. 13 представлен эксперимент (красный круг) – давление 0.85 атм для смоченного песка с источником на большой глубине 25 см. При этом диаметр воронки оказался всего лишь 11 см, тогда как сухой песок (голубой крест) при давлении 0.22 атм и глубине источника 25 см дает диаметр воронки 61 см.

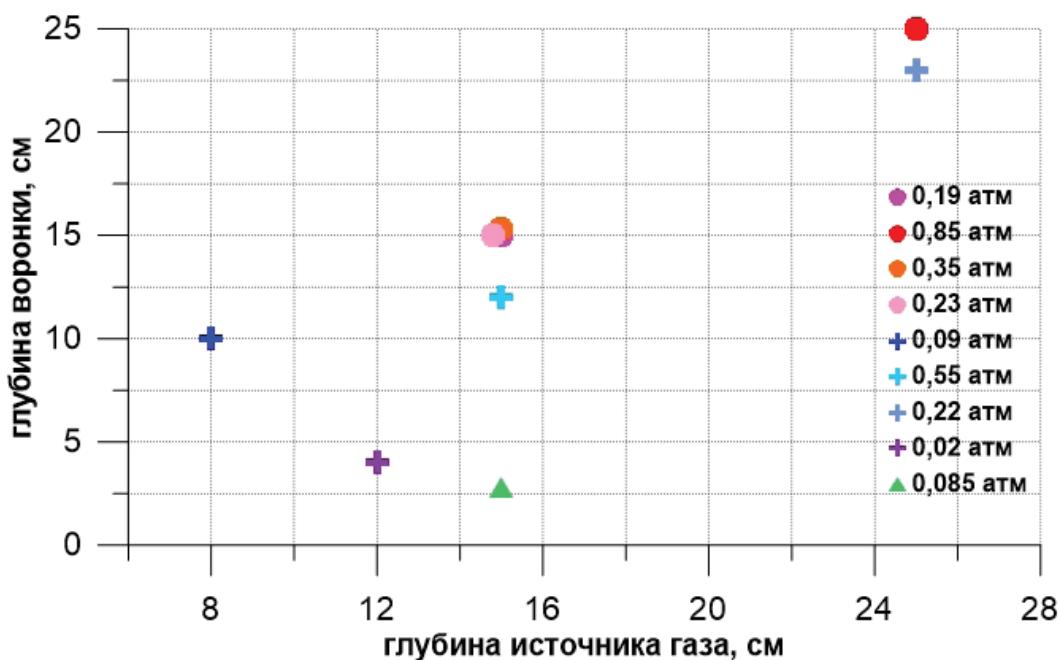


Рис. 12. Зависимость глубины воронки от глубины источника газа (круги – смоченный песок, кресты – сухой песок, треугольник – сухой песок с кратковременной подачей давления)

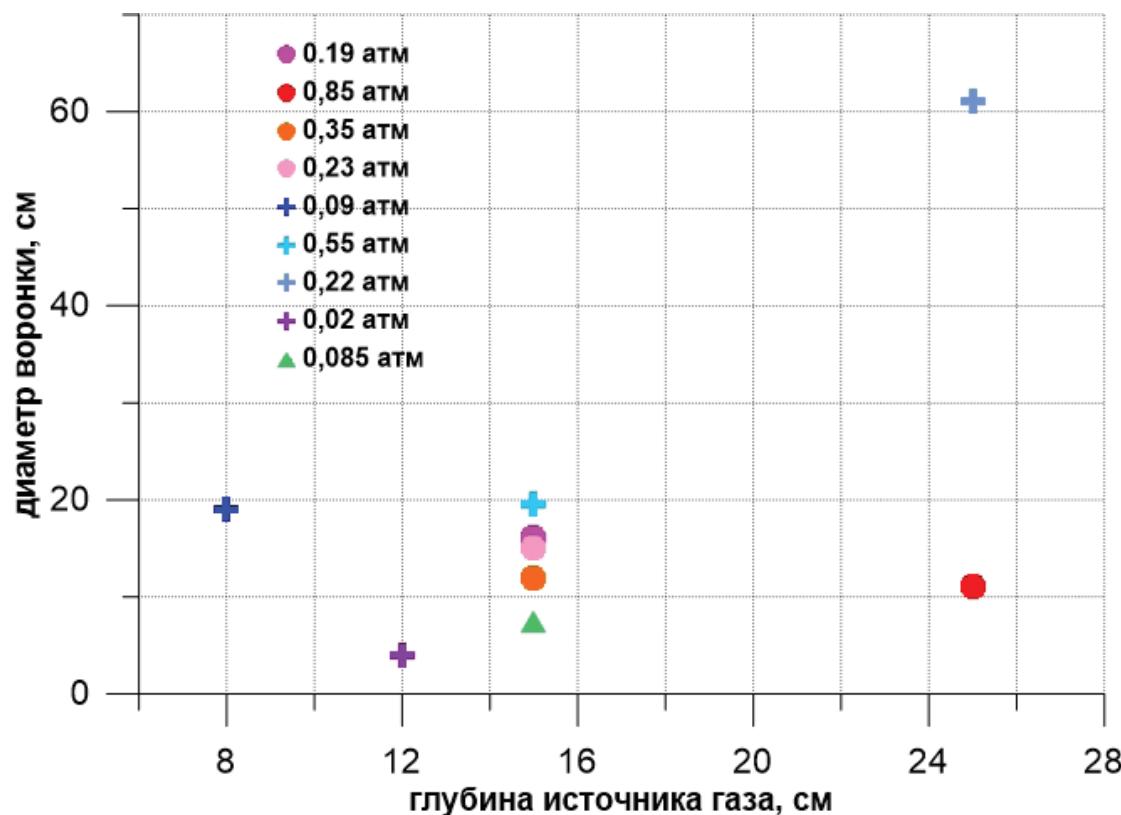


Рис. 13. Зависимость диаметра воронки от глубины источника газа (круги – смоченный песок, кресты – сухой песок, треугольник – сухой песок с кратковременной подачей давления)

Выводы

Проведено лабораторное исследование фильтрации газа в сухой и смоченной гранулированной среде в плоском случае с последующим ее разрушением. В результате анализа фотоизображений было установлено, что фронт движения газа в начальный момент носит неустойчивый характер, в результате чего развивается магистральная трещина, приводящая к разрушению и выбросу материала. В экспериментах на смоченном песке замечено, что с увеличением глубины источника газа масштаб разрушения уменьшается, также уменьшается и размер купола. Диаметр воронки по большей части зависит от прочности породы, тогда как ее глубина – от глубины заложения источника газа.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 22-67-00025), а также государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012100531-7).

Список литературы

- Адушкин В.В., Спивак А.А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. М. : Недра. 1993. – 319 с.
- Böttner C., Hoffmann J.J.L., Unverricht D., Schmidt M., Spiegel T., Geersen J. et al. The enigmatic pockmarks of the sandy southeastern North Sea // Geophysics. Geosystems. Geochemistry. 2024. Vol. 25. P. e2024GC011837. <https://doi.org/10.1029/2024GC011837>
- Böttner C., Berndt C., Reinardy B.T., Geersen J., Karstens J., Bull J.M. et al. Pockmarks in the Witch Ground Basin, Central North Sea // Geochemistry. Geophysics. Geosystems. 2019. Vol. 20 (4). P. 1698–1719. <https://doi.org/10.1029/2018gc008068>

Collins G.S., Melosh H.J., Ivanov B.A. Modeling damage and deformation in impact simulations // Meteoritics & Planet. Sci. 2004. Vol. 39 (2). P. 217–231. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00337.x>

Hovland Martin, Judd Alan. Seabed pockmarks and seepages: Impact on geology, biology and the marine environment. 1988. Publisher : Graham & Trotman. ISBN 0860109488. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1414.1286>.

Karstens J., Schneider von Deimling J., Berndt C., Böttner C., Kühn M., Reinardy B.T.I. et al. Formation of the Figge Maar Seafloor Crater during the 1964 B1 Blowout in the German North Sea // Earth Science. Systems and Society. 2022. Vol. 2. <https://doi.org/10.3389/esss.2022.1005>

Rybak Ye.N., Stupina, L.V. Black sea pockmarks // Geology and Mineral Resources of World Ocean. 2019. Vol. 15. P. 16–34. <https://doi.org/10.15407/gpimo2019.02.016>

FORMATION OF CRATERS DURING GAS EMISSION IN A WEAKLY COHESIVE MEDIUM

© 2025 A. A. Tairova*, N. A. Yudochkin, G. V. Belyakov

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: tairova.aa@idg.ras.ru

This article presents the results of experiments conducted on a two-dimensional optically transparent model, aimed at physically modeling a gas outburst in a loosely cohesive granular medium. The proposed model allows for visualization of the processes of gas destruction in the medium during gas filtration, followed by the release of the destroyed mass. Images of the formation of domes above the daylight surface and their destruction are obtained in real time. After the outburst, craters form, which retain their shape in the case of wet sand due to the strength generated by capillary forces. Based on the experimental results, the geometric parameters of the craters were determined depending on the depth of the gas source.

Keywords: gas filtration, loosely cohesive granular medium, gas outburst, crater formation.