

О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛОСТЕЙ, СОЗДАНЫХ ВЗРЫВОМ НА БОЛЬШОЙ ГЛУБИНЕ В МАССИВЕ КАМЕННОЙ СОЛИ

В. Н. Родионов, И. А. Сизов, В. М. Цветков

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, sizov@idg.chph.ras.ru

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование деформации и разрушения со временем полостей, созданных для хранения газового конденсата в соляном массиве 15 ядерными взрывами на глубинах $920 \div 1100$ м. На основании проведенных исследований предложен способ сохранения объема полостей после взрыва путем создания в них противодействия.

Ключевые слова: подземные полости, ядерный взрыв.

ВВЕДЕНИЕ

В период 1980–1984 гг. в соляном массиве Сеитовского купола на Астраханском газоконденсатном месторождении (АГКМ) на глубинах $920 \div 1100$ м с помощью ядерных взрывов было создано 15 полостей объемом от 15 до 35 тыс. м³ каждая, из них 13 предназначены для хранения газового конденсата и две — для освоения эксплуатационных скважин [1]. Обследования подземных емкостей, проведенные при их вскрытии примерно через 1,5–2 года после каждого взрыва, показали, что емкости сохраняют проектные объемы. Однако при проведении повторных исследований в 1984–1991 гг. обнаружено прогрессирующее уменьшение объемов емкостей до 10 и более раз, при этом 6 подземных хранилищ утратили промышленное значение. В конце 1991 г. другие 7 подземных хранилищ были заполнены газовым конденсатом, причем объем их перед заполнением составлял примерно половину и менее от первоначального.

Проведенные исследования показали [2], что сокращение объема полостей во времени происходит за счет развития чрезмерных деформаций ползучести соли, превышающих предельные значения деформаций, приводящих к разрушению сферического слоя соли на контуре полости и последующему сближению свода и дна полости за счет заполнения свободного объема разрушенным материалом.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОСТЕЙ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА В КАМЕННОЙ СОЛИ

Приведенные выше результаты наблюдений показывают, что образованная подземным ядерным взрывом полость в каменной соли может инициировать развитие разрушения в окружающем массиве. В этой связи необходимо разрешить два вопроса: как описать уменьшение свободного объема полости во времени и как предотвратить разрушение полости и обеспечить ее устойчивость на длительное время. С этой целью сначала оценим уменьшение свободного объема полостей во времени и развитие зоны разрушения в массиве, используя задачу о самоподдерживающемся разрушении, решение которой приведено в работе [3].

Рассматривается безграничная среда, нагруженная на бесконечности гидростатическим давлением p_0 . Среда предполагается упругой, но в ней содержатся неоднородности, и возникающие на них локальные напряжения могут быть сжимающими или растягивающими в зависимости от знака изменения деформации и скорости этого изменения.

Можно показать, что в среде с указанными свойствами возможно существование режима самоподдерживающегося разрушения, когда, например, объем, образованный в среде полости, будет уменьшаться за счет разрушения материала стенок, а радиус полости будет увеличиваться линейно со временем. Однако условием поддержания режима самоподдерживающегося разрушения является отсутствие значительного противодействия. Для существования

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номера проектов 04-05-64456 и 03-05-64525).

устойчивого режима разрушения противодействие p_1 не должно превышать половины давления на бесконечности p_0 , т. е.

$$p_1/p_0 < 1/2. \quad (1)$$

Таким образом, в реальных условиях существование режима самоподдерживающегося разрушения возможно только при удалении разрушенного материала из полости. В противном случае скапливающийся в полости разрушенный материал, обладающий меньшей плотностью, чем сплошная среда, в конце концов заполнит весь объем расширяющейся полости и возникающий отпор от разрушенного материала создаст противодействие, приводящее к затуханию процесса.

Воспользоваться непосредственно условием (1) для определения времени затухания процесса саморазрушения затруднительно без знания реологических свойств разрушенного материала, точнее, коэффициента всестороннего сжатия большого объема, сложенного кусками разрушенного материала с пустотами между ними. Однако можно считать, что достаточно надежная оценка будет получена, если положить отношение плотности исходного материала (ρ_0) к средней плотности материала в объеме разрушения (ρ_1) равным $\rho_0/\rho_1 = 1,1$, что соответствует средней пористости 10 %.

При этом мы полагаем, что, когда весь объем расширяющейся полости будет заполнен кусками обрушающегося материала, создавшееся противодействие резко остановит процесс дальнейшего разрушения. Выпишем согласно [3] соответствующие формулы для необходимых вычислений.

Закон движения фронта разрушения (радиуса растущей при самоподдерживающемся разрушении полости) имеет вид

$$R = \omega t, \quad (2)$$

где ω — скорость фронта разрушения.

Скорость фронта разрушения определяется зависимостью [3]

$$\omega = 2v \left(\frac{\pi}{2} Q \right)^{1/3} \left[1 + \frac{1}{3} \frac{\sigma_p^* R}{p_0 L} \right], \quad (3)$$

где v — скорость релаксации напряжений на неоднородностях; Q — механическая добротность среды; σ_p^* — прочность материала среды на отрыв; $p_0 = \rho_0 g H$ — литостатическое давление на глубине H ; R — радиус зоны самоподдерживающегося разрушения, на котором происходит отделение кусков материала от стенок

полости; L — ширина зоны отрывного разрушения перед полостью. В расчете для каменной соли приняты следующие значения перечисленных выше величин: $v = 2 \cdot 10^{-8}$ м/с; $Q = 10^2$; $\sigma_p^* \approx 3$ МПа; $\rho_0 = 2,16 \cdot 10^3$ кг/м³; $H = 10^3$ м.

Условием существования режима самоподдерживающегося разрушения, как показывает анализ соответствующей задачи [3], оказывается требование постоянства отношения R/L . В наших расчетах для оценки этого отношения использовался начальный радиус полости R_0 , а ширина зоны отрывного разрушения перед полостью L отождествлялась с мощностью зоны, в которой наблюдалась потеря циркуляции при бурении в полость. При указанных допущениях получим формулу для вычисления объема полости V_g , возникшей после обрушения разрушенной соли:

$$V_g = \frac{4}{3}\pi \left\{ \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_1} \left[\omega^3 \left(\frac{R_0}{\omega} + t \right)^3 - R_0^3 \right] \right\} = \frac{4}{3}\pi \frac{\Delta\rho}{\rho_1} \left[\omega^3 \left(\frac{R_0}{\omega} + t \right)^3 - R_0^3 \right]. \quad (4)$$

Здесь время t отсчитывается от момента создания первоначальной полости взрывом. С учетом выражения (4) можно записать зависимость, определяющую изменение свободного объема полости V :

$$V = V_0 - V_g = V_0 - \frac{4}{3}\pi \frac{\Delta\rho}{\rho_1} \left[\omega^3 \left(\frac{R_0}{\omega} + t \right)^3 - R_0^3 \right]. \quad (5)$$

Зависимости, соответствующие формуле (5), построены для взрывов 5Т и 9Т [3] (рис. 1, 2) в сравнении с данными реальных замеров остаточных объемов полостей по результатам бурения.

Как видно из рисунков, расчетные значения удовлетворительно согласуются с данными фактических замеров. Этот результат можно истолковать в пользу того, что причиной уменьшения свободного объема полостей является развитие самоподдерживающегося разрушения.

В этой связи можно указать способ сохранения объема полостей путем создания в них противодействия. Для этого изменим вид неравенства (1), смысл которого поясним следующим образом. Решение задачи для упругой среды с неоднородностями показывает [3],

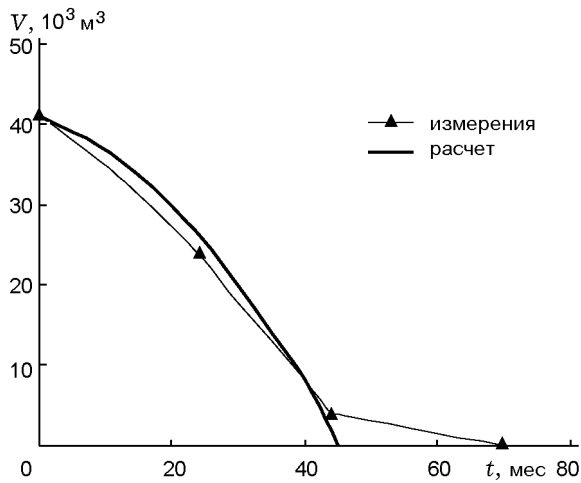


Рис. 1. Уменьшение объема полости со временем из-за обрушения. Экспериментальные точки и расчет для взрыва 5Т

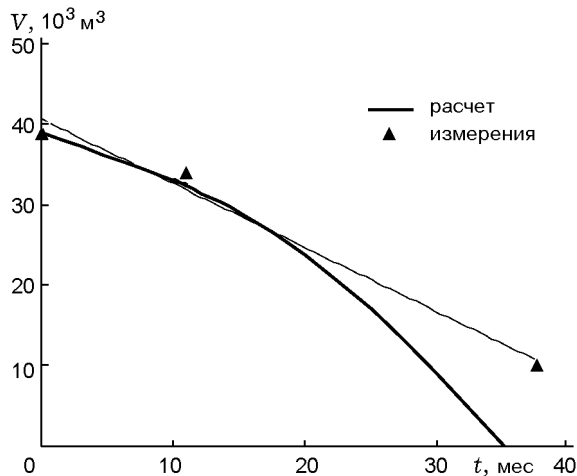


Рис. 2. Уменьшение объема полости со временем из-за обрушения. Экспериментальные точки и расчет для взрыва 9Т

что вблизи полости, в которой давление отсутствует, на неоднородностях появляются растягивающие напряжения. Эти напряжения максимальны у стенок полости, где достигают половины литостатического давления p_0 , спадая по мере удаления от полости по кубическому закону. Отсюда следует, что противодействие в полости должно превышать эти растягивающие напряжения с тем, чтобы препятствовать развитию отрывного разрушения со стенок полости. В общем случае, если в среде дополнительно действует горизонтальное тектоническое напряжение σ_t , это напряжение оказывает

такое же действие, как и литостатическое давление, и должно суммироваться с последним. Тогда критерий долговременной устойчивости полости записывается в следующем виде:

$$p_1 \geq \frac{1}{2}(p_0 + \sigma_t) \geq \sigma_p^*. \quad (6)$$

Если же полусумма литостатического и тектонического напряжений (максимальное возникающее растягивающее напряжение) оказывается меньше прочности среды на отрыв, то устойчивое состояние полости должно сохраняться без создания противодействия.

Воспользовавшись критерием (6), оценим противодействие для полостей, созданных в Сеитовском соляном куполе на АГКМ. На глубине $H = 1$ км, где были созданы полости, литостатическое давление составляет $p_0 = \rho_0 g H = 2,16 \cdot 10^3 \cdot 10^4 \cong 20$ МПа, а горизонтальное тектоническое напряжение по порядку величины близко к $\sigma_t \cong 10$ МПа. Таким образом, по условию (6) противодействие, подавляющее возникновение самоподдерживающегося разрушения, должно составлять не менее $p_1 \geq (20 + 10)/2 = 15$ МПа, что достаточно хорошо согласуется с опытными данными. Так, на АГКМ после заполнения частично сохранившихся полостей конденсатом до устья загерметизированных скважин уменьшение объема полостей прекратилось при установившемся противодействии на уровне $p_1 = 17 \div 19$ МПа, который, как видно, близок к полученной выше оценке.

ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное и теоретическое исследование деформации и разрушения со временем полостей, созданных для хранения газового конденсата в соляном массиве 15 ядерными взрывами на глубинах $920 \div 1100$ м.
2. На основании проведенных исследований предложен способ сохранения объема полостей после взрыва путем создания в них противодействия.
3. Проведенные расчетные оценки согласуются с экспериментальными данными для опытов 5Т и 9Т.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ядерные взрывы в СССР. Вып. 4. Мирное использование ядерных взрывов: Информ. сб. /

Под ред. В. М. Михайлова и др. М.: Сборник ВНИИПромтехнологии, НПО Радиевый ин-т, 1994. С. 1–166.

2. **Кедровский О. Л., Мясников К. В., Ромадин Н. М. и др.** Применение камуфлетных ядерных взрывов для создания подземных

емкостей и опыт их эксплуатации при хранении газового конденсата // Peacef Nuclear Explosions, IV. Vienne: Intern. Atomic Energy Agency, 1975. P. 227–256.

3. **Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М.** Основы геомеханики. М.: Недра, 1986.

Поступила в редакцию 28/V 2004 г.
