

**ОБ ОЦЕНКЕ ЗОН РАЗРУШЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОЛОСТЕЙ, ВОЗВОДИМЫХ В
ВЯЗКОУПРУГИХ СРЕДАХ**

Аршинов Г.А. – канд. физ.-мат. наук

Кубанский государственный аграрный университет

Предложен метод оценки допустимых размеров подземных полостей, сооружаемых в горных породах. Определены зоны возможного разрушения в окрестности полостей реальной геометрии.

Широкое использование осесимметричных полостей в соляных отложениях в качестве подземных хранилищ нефти и газа требует оценки устойчивости таких сооружений. Анализ их прочности предполагает определение напряженно-деформированного состояния массива с полостью и применение подходящего критерия прочности. Поскольку соляные породы обладают вязкоупругими свойствами, то в начальный момент формируется линейно-упругое поле напряжений. Их концентрация в результате релаксации с течением времени уменьшается. Поэтому анализ прочности полости уместно выполнять на основе упругого распределения напряжений, компоненты которых вблизи полостей исследуемых форм определялись методом конечных элементов. Для аппроксимации массива с полостью применялась неравномерная сеть кольцевых конечных элементов треугольного поперечного сечения (рис.1).

Экспериментальные исследования прочностных свойств соляных пород свидетельствуют о применимости критерия Мора к анализу прочности стенок подземных сооружений, возводимых в соляных

отложениях. Поэтому для вычисления приведенного напряжения использовали:

- линейный критерий прочности Мора

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{1 - \sin \delta} [\sigma_1 - \sigma_3 - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \delta], \quad (1)$$

где σ_1, σ_2 – главные напряжения ($\sigma_1 > \sigma_3$), δ – угол внутреннего трения породы;

- нелинейную огибающую Мора

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 \sigma_1'}{\sigma_1' + 1} \quad \tau_{nt} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(\sigma_1')^{\frac{1}{2}}}{\sigma_1' + 1} \quad \sigma_1' = \frac{b \sigma_c^a}{a \sigma_p \sigma_1^{a-1}}, \quad (2)$$

где σ_c, σ_c – напряжения разрушения при одноосных сжатии и растяжении, a, b – параметры, принимающие для одного из видов каменной соли числовые значения $a = 2, b = 1$; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения;

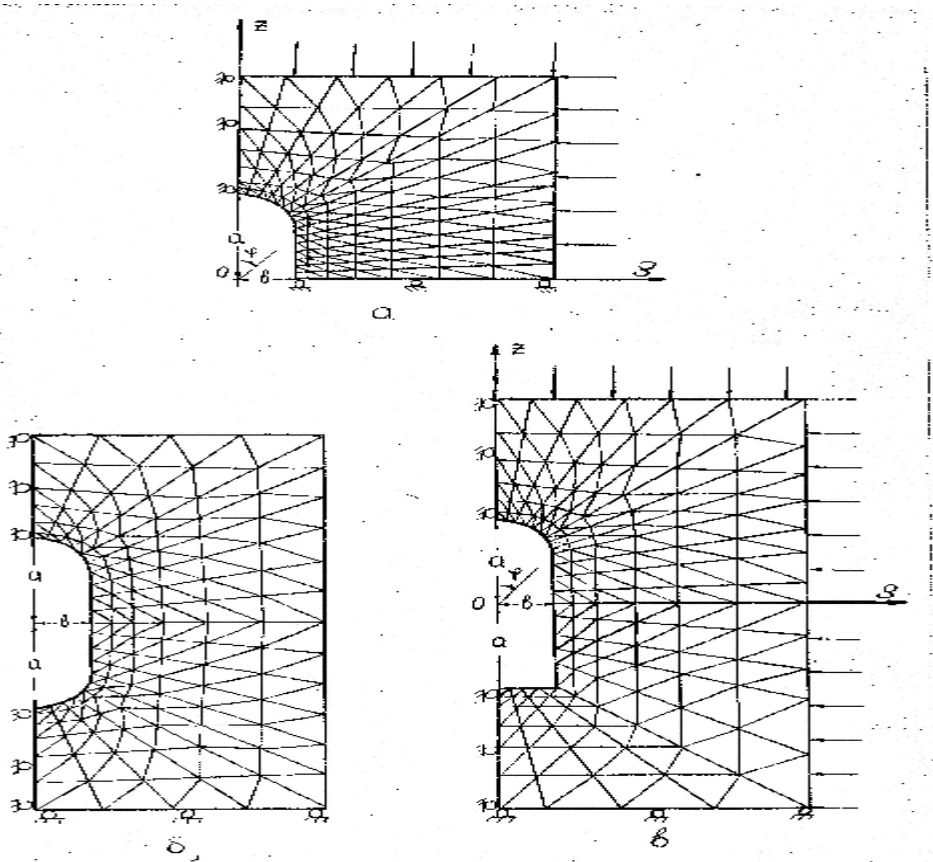


Рис. 1. Конечно-элементная аппроксимация

массива с полостью

- критерий Г.С. Писаренко, А.А. Лебедева

$$\bar{\sigma} = \chi[\sigma_{\text{н}} - \sigma_1] + \sigma_1, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{н}}$ – интенсивность напряжений, σ_1 – максимальное главное напряжение, χ – параметр, определяющий степень участия в разрушении нормальных и сдвиговых напряжений; при $\chi = 0$ из соотношения (3) вытекает теория прочности по максимальным нормальным напряжениям, а при $\chi = 1$ – критерий Мизеса. В расчетах δ и χ варьировали соответственно в промежутках $(0,25^\circ)$ с шагом 5° и в $(0,1-0,5)$ с шагом $0,1$.

На рисунке 2 показана зависимость площади зон разрушения от коэффициента бокового распора λ и параметра χ вблизи эллипсоидальной полости ($b/a = 0,2$).

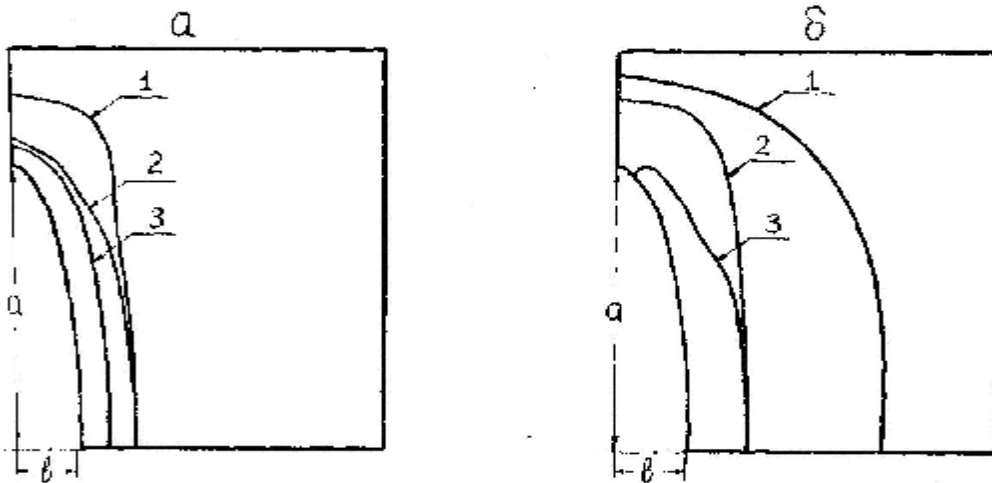


Рис. 2. Зоны возможного разрушения вблизи эллипсоидальной полости ($b/a = 0,2$): а) $\lambda=1$, б) $\chi = 0,1$; 1– $\chi=0,1$; $\lambda=1,25$; 2– $\chi=0,2$; $\lambda=1$; 3– $\chi=0,3$ $\lambda=0,25$

Эти и дальнейшие построения получены в предположении, что на внешней горизонтальной границе области с полостью (см. рис. 1) действует равномерно распределенная нагрузка с интенсивностью σ_c (σ_c – средний предел прочности образцов каменной соли на одноосное сжатие). С возрастанием χ при постоянном $\lambda = 1$ и с убыванием λ при постоянном $\chi = 0,1$ размер зон уменьшается (см. рис. 2).

На рисунке 3 схематично показаны полости, в окрестности которых заштрихованы зоны вероятного разрушения, соответствующие нелинейной огибающей Мора (2) с параметрами $a = 2$, $b = 1$, $\sigma_p/\sigma_c = 0,03$ (σ_p – средний предел прочности каменной соли на одноосное растяжение). Цилиндрическая с шаровыми торцами и эллипсоидальная конфигурации с отношением характерных размеров $b/a = 0,4$ (см. рис. 3, а, б) в сравнении с подобными, но более вытянутыми ($b/a = 0,2$; см. рис. 3, в, г) формируют меньшие по размеру площади зоны вероятного разрушения.

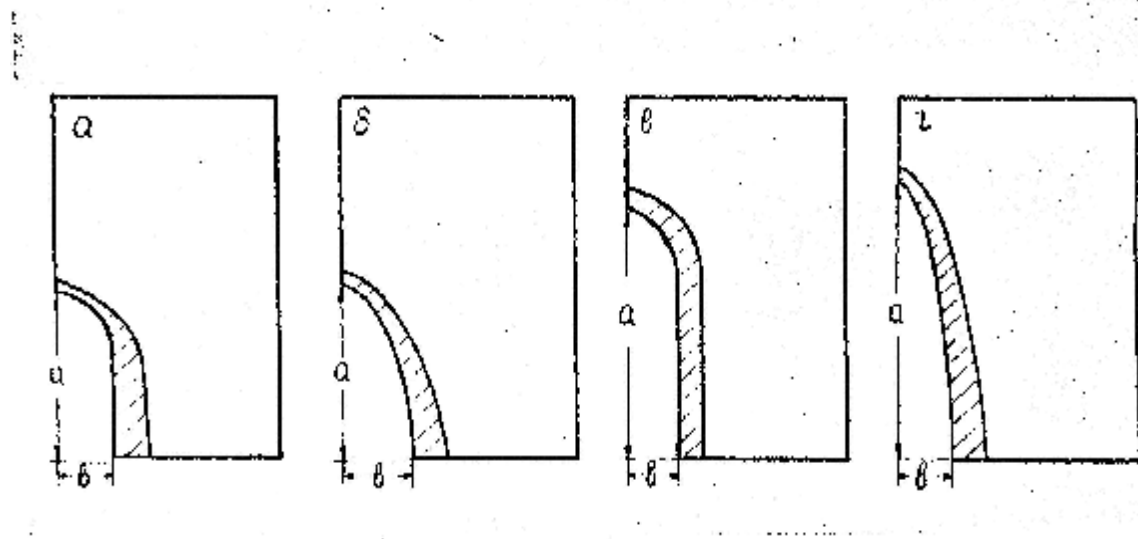


Рис.3. Зоны возможного разрушения вблизи равнообъемных полостей: комбинированной цилиндрической и эллипсоидальной форм:

а, б) $b/a = 0,4$; в, г) $b/a = 0,2$

Аналогичное соотношение имеет место и для линейного критерия Мора (1) при $\delta = 5^\circ$ (рис. 4, 5).

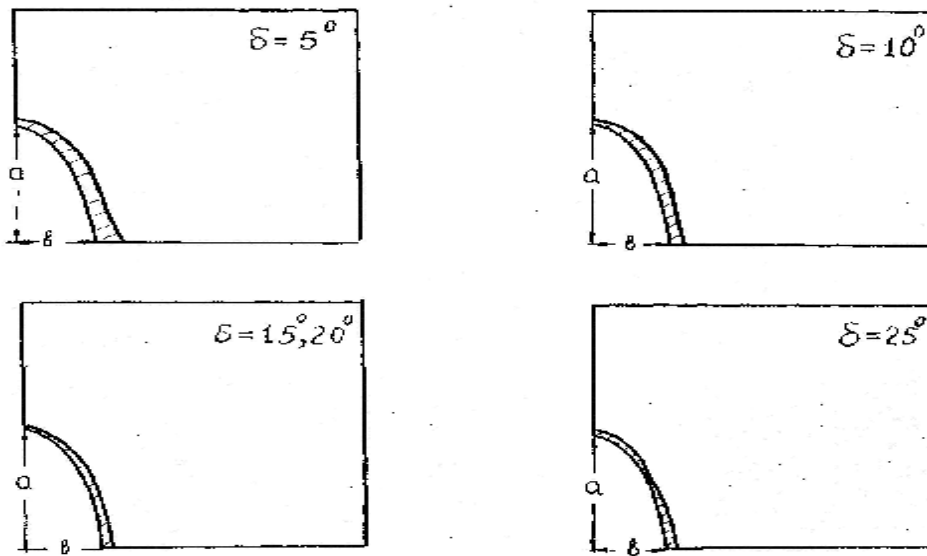


Рис.4. Зависимость зон разрушения от угла внутреннего трения δ вблизи эллипсоидальной полости ($v/a = 0,4$)

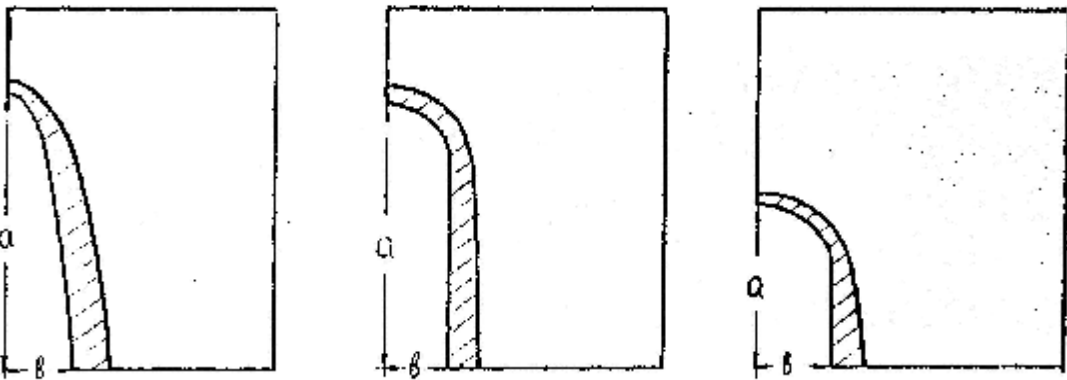


Рис.5. Зоны разрушения вблизи равнообъемных полостей: 1 – эллипсоидальной ($v/a = 0,2$), 2 – цилиндрической с шаровыми торцами ($v/a = 0,2$), 3 – той же геометрии ($v/a = 0,4$)

Рисунок 4 демонстрирует зависимость размера зоны возможного разрушения от величины угла внутреннего трения δ в окрестности эллипсоидальной полости. Как и следовало ожидать, при возрастании δ размер зон уменьшается.

На рисунках 5, 6 изображены зоны разрушения в окрестности равнообъемных полостей, полученных по критерию (3) при $\chi = 0,1$. Вновь эллипсоидальная и цилиндрическая с шаровыми торцами полости ($v/a = 0,4$; см. рис. 3, в, г) отличаются меньшими по площади зонами.

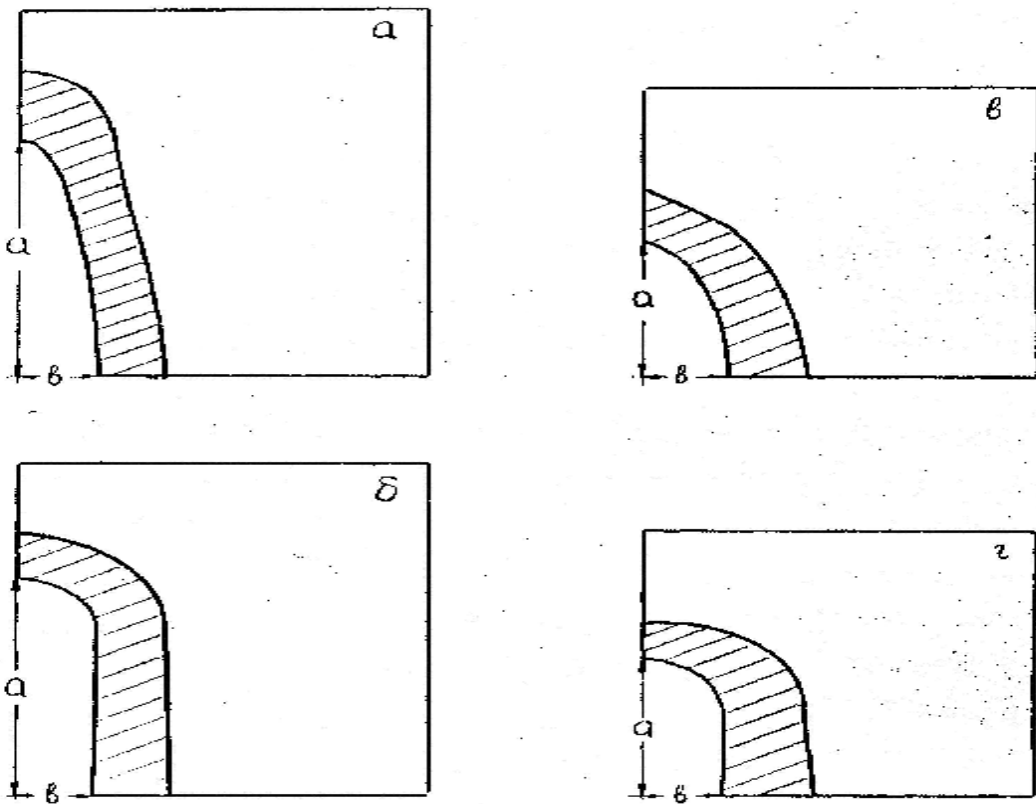


Рис. 6. Зоны возможного разрушения вблизи равнообъемных полостей при $\chi = 0,1$: а) эллипсоидальной ($v/a=0,2$), комбинированной цилиндрической: б) $v/a = 0,2$; г) $v/a = 0,4$

На рисунке 7, в, г представлены зоны разрушения, определенные по критерию (3) и нелинейной огибающей Мора (2) для полостей, не имеющих экваториальной плоскости симметрии. Цилиндрические полости с отношением $b/a = 0,4$ (см. рис. 7, б, г) порождают менее развитые зоны ожидаемого разрушения, чем подобные им более вытянутые емкости ($b/a = 0,2$); (см. рис. 7, а, в).

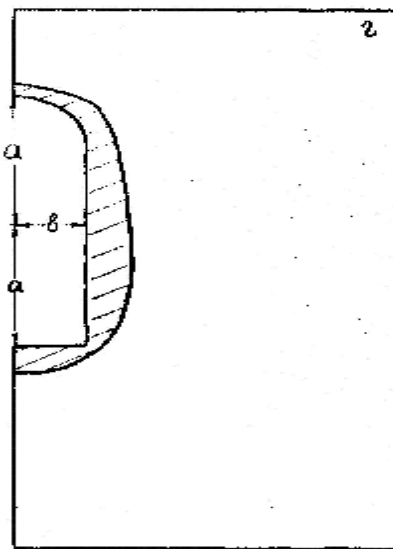
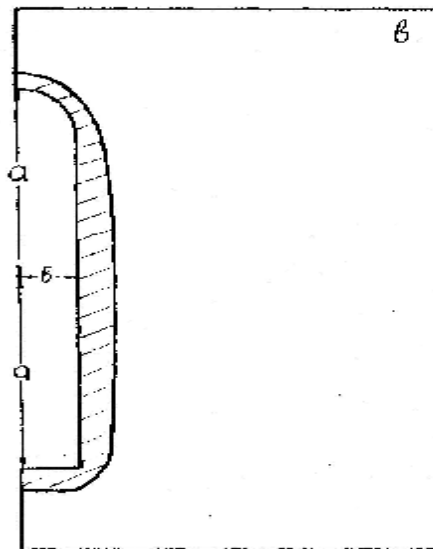
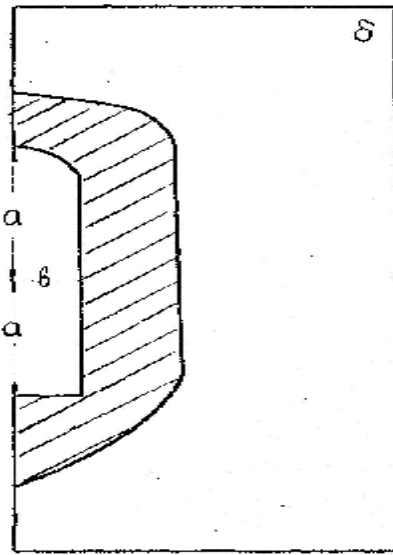
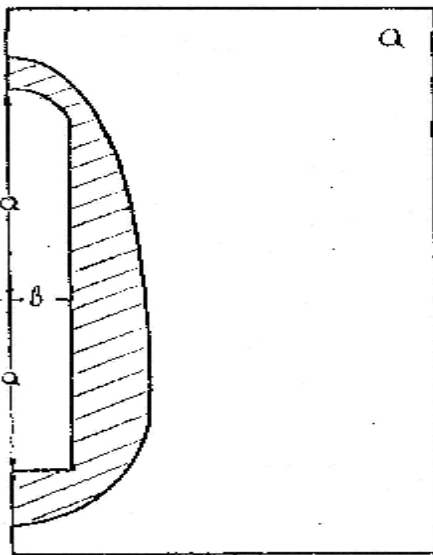


Рис.7. Зоны вероятного разрушения вблизи равнообъемных полостей комбинированной цилиндрической формы: а, б) $v/a = 0,2$ и $0,4$; критерий (3), $\chi = 0,1$; в, г) $v/a = 0,2$ и $0,4$; критерий (2)

Таким образом, судя по величине зон разрушения, более устойчивы полости эллипсоидальной и комбинированной цилиндрической конфигураций, обладающих отношением характерных размеров $v/a = 0,4$.