

УДК 539.3:534:532.5
ББК 38.112

UDC 539.3:534:532.5
ББК 38.112

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex

РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ВБЛИЗИ ПОДЗЕМНОГО ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ГАЗОХРАНИЛИЩА ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ, ОБРАЗОВАННОГО МЕТОДОМ РАЗМЫВА В МАССИВЕ КАМЕННОЙ СОЛИ

STRESS RELAXATION NEAR AN UNDERGROUND OPERATED ELLIPTICAL GAS STORAGE FORMED BY THE METHOD OF EROSION IN A ROCK SALT MASSIF

Аршинов Георгий Александрович
д. т. н., профессор

Arshinov Georgy Aleksandrovich
Dr.Sci.Tech., Professor

Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Физико-механические свойства массива каменной соли определяются нелинейными интегральными зависимостями наследственной теории вязкоупругости. Исследуется процесс нелинейной релаксации поля напряжений, возникающего в окрестности эллипсоидального эксплуатируемого газохранилища, образованного методом размыва в толще каменной соли

The physical and mechanical properties of rock salt massif are determined by nonlinear integral dependencies of the hereditary theory of viscoelasticity. The process of nonlinear relaxation of the stress field arising in the vicinity of an ellipsoidal exploited gas storage facility formed by erosion in the rock salt mass is investigated

Ключевые слова: ЭЛЛИПСОИДАЛЬНОЕ ГАЗОХРАНИЛИЩЕ, НАПРЯЖЕНИЯ, ДЕФОРМАЦИИ, РЕЛАКСАЦИЯ, ПОЛЗУЧЕСТЬ, СОЛЯНОЙ МАССИВ, ДАВЛЕНИЕ, КОНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, АППРОКСИМАЦИЯ, УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ, НЕЛИНЕЙНОСТЬ

Keywords: ELLIPSOIDAL GAS STORAGE, STRESSES, DEFORMATIONS, RELAXATION, CREEP, SALT MASSIF, PRESSURE, FINITE ELEMENTS, APPROXIMATION, EQUATIONS OF STATE, NONLINEARITY

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-211-002>

Применение подземных полостей в отложениях каменной соли для хранения углеводородов и утилизации промышленных отходов относится к рациональным, эффективным и безопасным методам организации хранилищ. Использование подобных сооружений обосновано тем, что соли – идеальный материал для создания в них полостей-хранилищ благодаря хорошей растворимости в воде, поэтому возможно возводить емкости относительно недорогим методом глубинного размыва, попутно добывая соляной раствор. Подземные хранилища не наносят ущерба экологии.

Соляные породы обладают необходимыми прочностными характеристиками, допускающими образование полостей с большим

<http://ej.kubagro.ru/2025/07/pdf/02.pdf>

объемом, практически непроницаемы для углеводородов благодаря свойству ползучести.

Эксплуатация подземных газохранилищ, сооружаемых методом размыва в толщах каменной соли, сопровождается нелинейными деформационными процессами ползучести среды вблизи полости, поэтому физико-механические свойства галита, проявляющего ярко выраженные вязкоупругие свойства, необходимо определять законом деформирования, учитывающим ползучесть солей под нагрузкой.

Поэтому в исследовании используются следующие уравнения состояния каменной соли [1]

$$E\varepsilon_{ij}(t) = \sigma_{ij}(t) + \nu[\sigma_{ij}(t) - 3\delta_{ij}\sigma(t)] + \frac{DE}{2G} \int_0^t \tau^{-\alpha} \sigma_{II}^2(\tau) S_{ij}(\tau) d\tau,$$

(1)

где σ_{ij} , $\sigma = \frac{1}{3}\sigma_{ii}$; $S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma$; $\sigma_{II}^2 = \frac{3}{2}S_{ij}S_{ij}$; E , G – упругие постоянные; ν – параметр Пуассона; D, α – реологические константы.

В соотношениях (1) приняты следующие значения параметров $E = 29,9$ ГПа; $\nu = 0,3$; $\alpha = 0,73$; $D = 6 \times 10^{-16}$ (Па) $^{-2}$ ч $^{\alpha-1}$ (объемный вес каменной соли $\gamma = 2,16 \times 10^4$ н/м 3) [1].

Расчетная модель с учетом изменения внешнего горного давления по глубине и осесимметричная краевая задача для соляного массива с полостью показаны на рисунке 1.

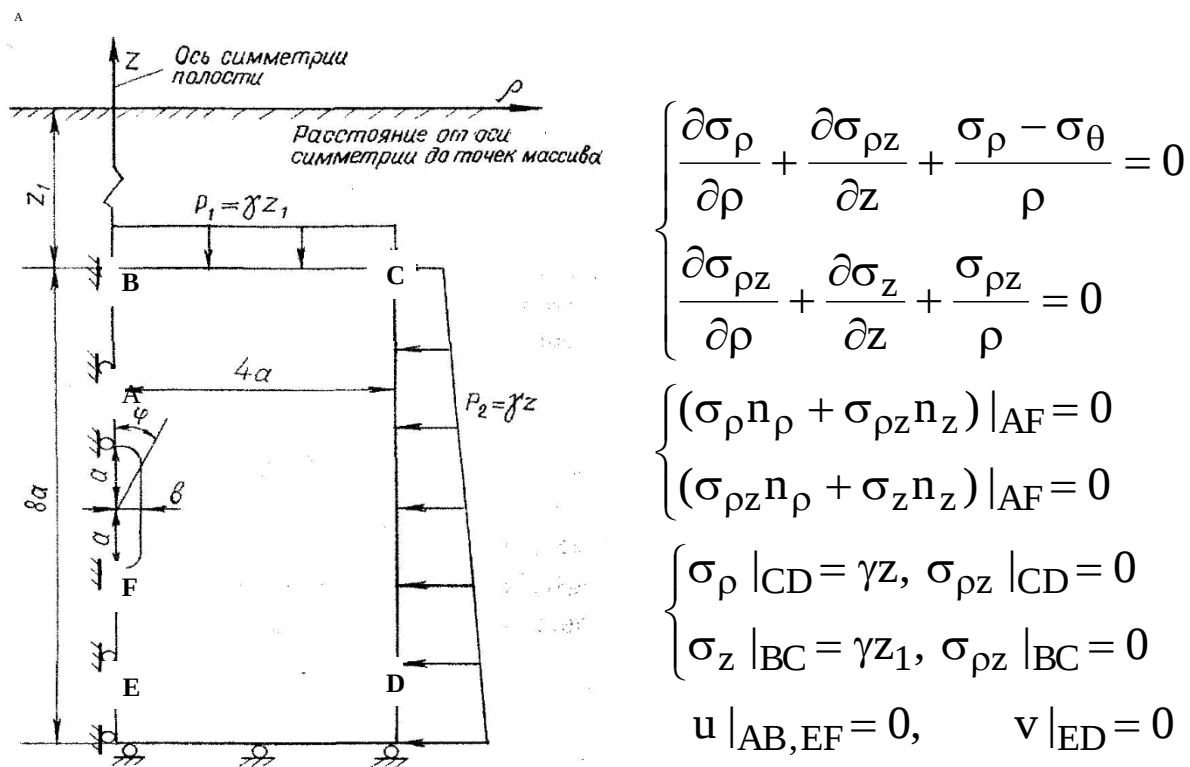


Рисунок 1 – Модель расчета с осесимметричной краевой задачей

Выделенная область каменной соли с полостью (рисунок 1), содержащая эллипсоидальное газохранилище, представляется группой кольцевых конечных элементов треугольного сечения. Поле перемещений в каждом элементе задается линейными функциями вида

$$\bar{v}(\rho, z) = \sum_{e=1}^E q_N^{(e)} (a_N + b_N \rho + c_N z),$$

где суммирование выполняется по числу треугольников E в конечно-элементном разбиении соляного объема с полостью, а узловые перемещения e -го элемента определяются матрицей

$$\mathbf{q}_N^{(e)} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_N \\ \mathbf{v}_N \end{bmatrix} \quad (N=1,2,3) .$$

Коэффициенты a_N, b_N, c_N , подлежащие определению, вычисляются по координатам узлов конечных элементов. Для вычисления компонент деформации используются соотношения Коши, а компонент напряжения в

конечном элементе – закон Гука.

Минимизируя функционал энергии

$$J(u) = 2\pi \left(\int_V \frac{1}{2} \varepsilon^l \sigma_p dp dz - \int_S u^l p ds \right),$$

где вектора объемных и поверхностных сил обозначены через p , солевой объем с полостью – V , его граница – S , приходим к системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных перемещений v узлов сетки

$$Kv = F,$$

где K – матрица жесткости аппроксимирующей соляной массив системы конечных элементов, F – вектор узловых сил. На основе решения системы v вычисляются компоненты полей деформаций и напряжений в точках массива каменной соли в окрестности полости.

Линеаризация физически нелинейной краевой задачи выполнялась с использованием метода начальных деформаций. Временной промежуток $[0, t]$ представлялся группой отрезков $[t_k, t_{k+1}]$ так, чтобы на промежутке времени

$[t_k, t_{k+1}]$ можно с достаточной точностью считать $\sigma_k = \text{const}$.

Начальные приращения компонент деформации вычислялись с использованием закона состояния (1), затем определялись приращения перемещений узлов сетки Δu_k , компонент деформаций $\Delta \varepsilon_k$ в e -м элементе сетки и упругих составляющих деформации $\Delta \varepsilon_y^k = \Delta \varepsilon_k - \Delta \varepsilon_b^k$.

Приращения напряжений $\Delta \sigma_k$ в конечных элементах сетки, вызванные приращениями деформаций ползучести $\Delta \varepsilon_b^k$, вычислялись по закону Гука. Сложение σ_k и $\Delta \sigma_k$ определяло следующее распределение напряжений и вычислялось очередное приращение деформаций в промежутке $[t_{k+1}, t_{k+2}]$. Итерационный процесс прекращался при стабилизации напряженного состояния массива каменной соли в окрестности полости.

В расчетах полагалось, что глубина заложения центра полости $H=1000$ м, конечно-элементная сетка состоит из 240 кольцевых конечных элементов с треугольным сечением.

При $t=0$ (точка А) полагалось, что газовое давление в хранилище $P_1 = 20$ кг/см². Через 0,5 года происходит повышение давления газа до 105 кг/см² и к концу года оно снижается до начального.

Релаксация напряжений в окрестности эллипсоидальной осесимметричной полости показана на рисунках 1 – 4.

Пустая полость вызывает высокую начальную концентрацию напряжений в сравнении с находящейся под равномерно распределенным давлением

20 кг/см² (точка А). Далее к концу полугодия в результате релаксации напряжений происходит стабилизация напряженного состояния соляного массива, содержащего полость (точка В).

Затем давление газа повышается до 105 кг/см² (точка С), концентрация напряжений в соляном массива снижается за счет внутреннего давления в полости.

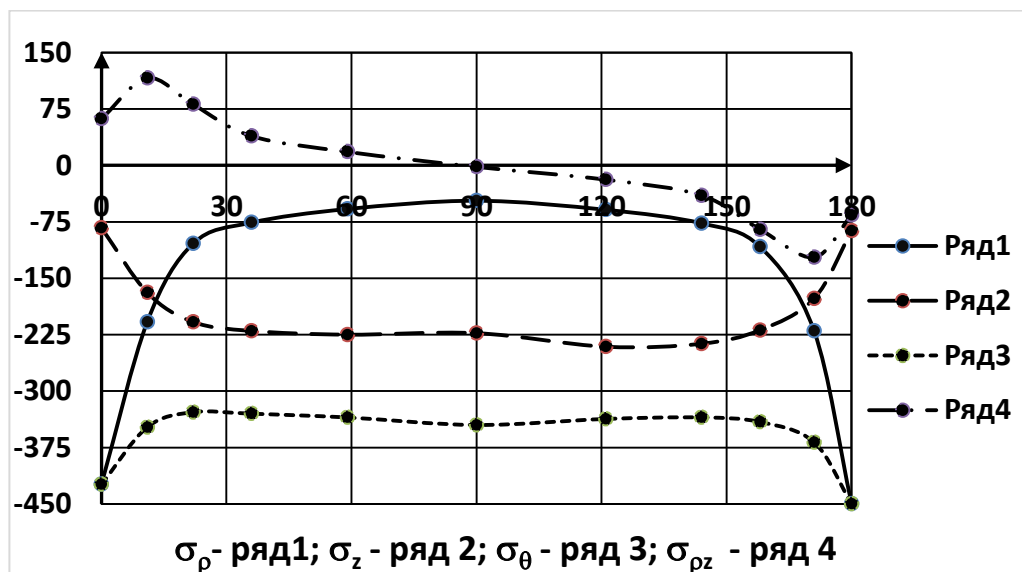


Рисунок 2. Напряжения в окрестности эллипсоидальной полости в

при $t=0$, точка А, размерность по горизонтальной оси – градусы, размерность напряжений по вертикальной оси – 10^{-1} Мпа

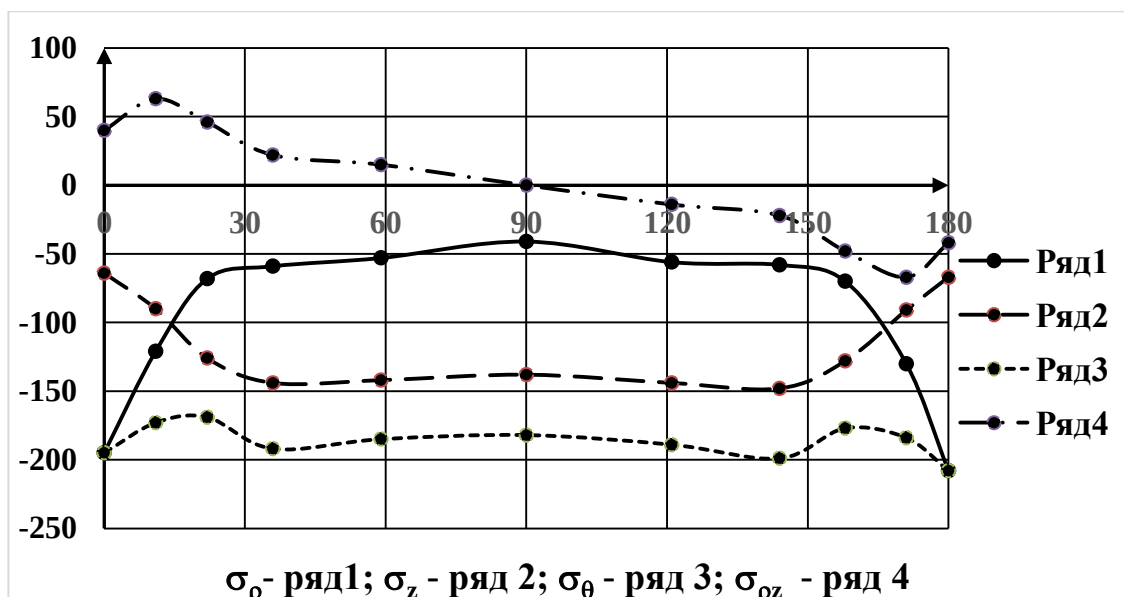


Рисунок 3. Напряжения вблизи полости в момент времени $t=0,5$ года, точка В.

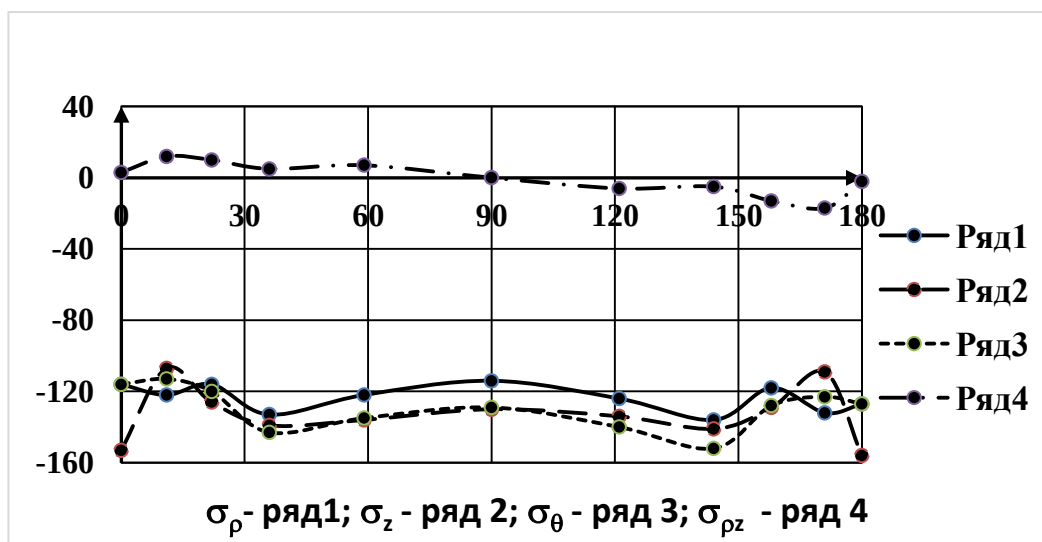


Рисунок 4. Напряжения вблизи полости в момент времени $t=0,5$ года, точка В.

Догрузка 85 кг/см^2 ВНОВЬ вызывает процесс деформирования соляной породы и к концу года (точка Д) компоненты напряжения показаны на рисунке 5.

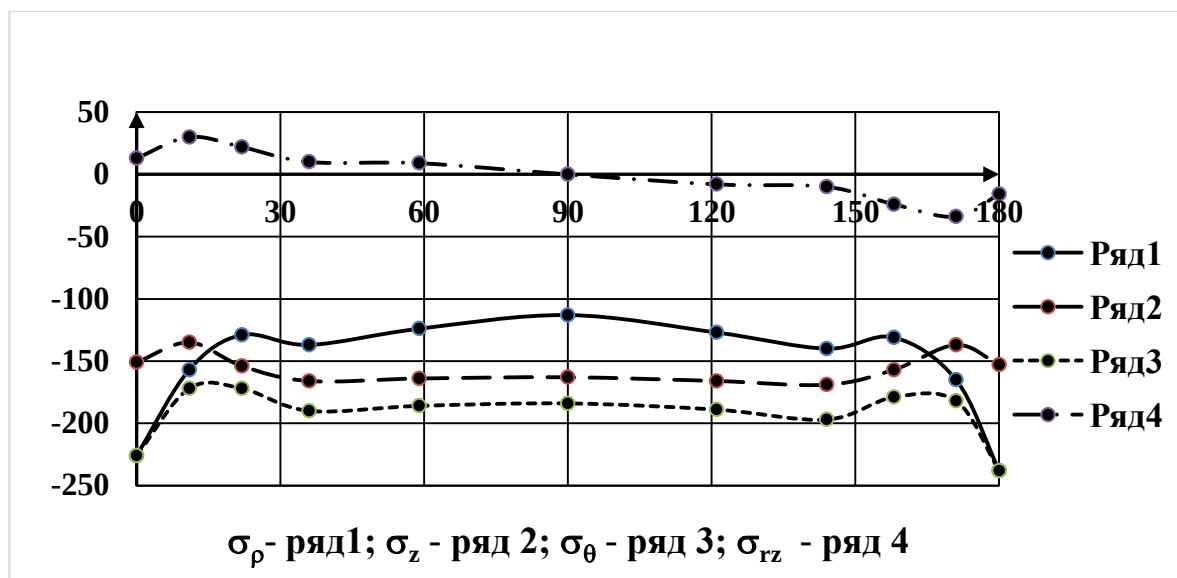


Рисунок 5. Напряжения вблизи полости в момент времени $t=1$ год, точка Д

Переход к давлению до 20 кг/см^2 формирует поле напряжений, соответствующее точке В.

Литература

1. Ержанов, Ж.С. Ползучесть соляных пород / Ж.С. Ержанов, Э.И. Бергман. – Алма-Ата: Наука, 1977. – 110 с.

References

1. Erzhanov, Zh.S. Polzuchest` solyany`x porod / Zh.S. Erzhanov, E`I. Bergman. – Alma-Ata: Nauka, 1977. – 110 s.