Записки Ленинградского горного института им.Г.В.Плеханова
Т. 123. Л., 1990

УДК 622.011.43

В.П.СКРИПКА, В.Л.ФЕДУЛИН, С.М.МИХАЙЛОВ

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОЛОСТЕЙ НЕФТЕ- И ГАЗОХРАНИЛИЩ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В СОЛЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Скорости конвергенции полостей нефте- и газохранилищ, образованных на больших глубинах в каменной соли путем выщелачивания или проведения мощных взрывов, изменяются в широком диапазоне от десятых долей до 2–3 % объема в год [2]. Этот процесс приводит к сокращению плановых объемов хранилищ, проседанию земной поверхности над полостями, снижению их устойчивости из-за разрушения материала стен. Для прогнозирования этих явлений необходимо знать режимы эксплуатации полостей, деформационные и реологические свойства вмещающего массива. Особенно актуально это при высоких скоростях конвергенции полостей.

Рассмотрим в качестве примера одну из незаполненных сферических полостей диаметром 50 м, образованную в Сеитовском куполе на глубине 1000 м, объем которой за 4 года сократился на 50 %. Анализ причин ее деформаций и прогноз дальнейшего состояния относится к классу физически и геометрически нелинейных задач, которые решаются путем проведения комплексных исследований. Численными методами исследовалась физически нелинейная модель, а геометрическая нелинейность, обусловленная разрушением материала приконтурных зон – по данным испытания моделей из эквивалентных материалов.

Для охвата широкого диапазона реальных условий, рассматривались полости в однородном, слоистом со слабыми и жесткими прослойками массивах. Лабораторные исследования деформационных процессов производились в камере высокого давления на парафиновых моделях, изготовленных в масштабе 1:1000. Временной масштаб был определен, исходя из значений коэффициентов вязкости парафина и каменной соли, и равнялся $1:10^5$. В общей сложности было изготовлено 11 моделей: 2 однородные, 4 слоистые с толщиной слоев 5 мм, 3 слоистых с твердыми и 2 слоистых с мягкими прослойками в средней части полости. Модели имели диаметр 300 мм и высоту 400 мм. В середине моделей формировалась сферическая полость радиусом 3 см, так что отношение радиуса модели к радиусу полости равнялось 5, что обеспечивало соблюдение граничных условий. В качестве материала для слабых пластичных прослойков использовался пластилин, для твердых – песчано-парафиновая смесь. Измерение изменения объема вследствие конвергенции осуществлялось дифференциальным манометром, непосредственно связанным с полостью.

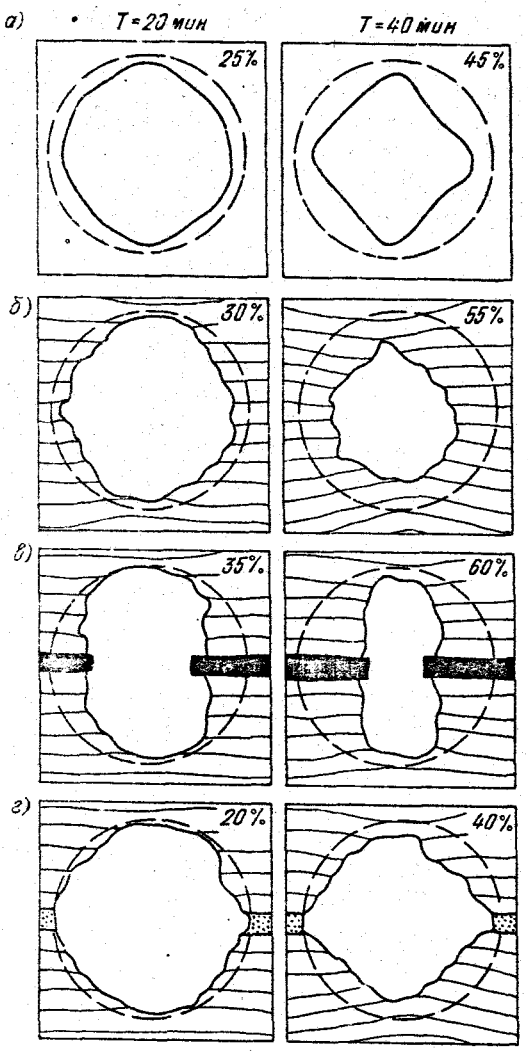


Рис.1. Вид полости через 20 и 40 мин после начала испытаний: а – однородная модель; б – слоистая; в – слоистая с мягким прослойком; г – слоистая с жестким прослойком

Рассмотрим результаты, полученные на однородных моделях. В первые минуты после нагружения скорость относительного изменения объема равнялась (0,6–0,8) х х 10^{-4} $с^{-1}$, а затем она снизилась до (0,26–0,32)·10^{-4} $с^{-1}$ в состоянии установившейся ползучести. Через 20 мин после начала испытаний изменение первоначального объема полости достигло 25 %, а через 40 мин 45 %. В первом случае полость не изменила форму (рис.I, а), т.е. "затекала" равномерно во всех направлениях. На ее внутренней поверхности не было следов разрушения. Во втором случае форма полости изменилась, причем наибольшие деформации имели место в осях, ориентированных под углом 45° в обе стороны от декартовых осей (начало координат в центре полости). Наблюдалось повсеместное разрушение внутренней поверхности полостей в виде отделения чешуек толщиной 0,3–0,6 мм и размером в плане от 2–3 мм до I см. Объем отделившегося разрушенного материала на дне полости достигал I % от ее объема.

Таким образом, в однородном массиве состояние полости при одном и том же внешнем давлении определяется величиной относительного изменения ее объема.

Отличительной особенностью деформирования слоистых моделей является значительный разброс скоростей конвергенции полостей в разных временных интервалах. Так, в начальный момент скорости конвергенции изменялись от 0,33·10^{-4} до 0,86 х х 10^{-4} $с^{-1}$, т.е. более чем в два раза, а в стадии установившейся ползучести от 0,38·10^{-4} до 0,47·10^{-4} $с^{-1}$, т.е. в I,2 раза. Столь значительный разброс связан с особенностями деформирования слоистых сред вследствие

появления у массива дополнительных степеней свободы в виде относительной подвижности отдельных слоев. На рис.I, б приведено очертание контура полостей при изменении их объема на 30 и 55 % от первоначального. Уже в первом случае форма контура отличалась от круговой. Внутренняя поверхность была покрыта сеткой трещин со следами шелушения материала, а вывалившиеся чешуйки на дне полости занимали 2-3 % ее объема. Во втором случае вся приконтурная зона на глубину 0,5-I,0 см была пронизана трещинами, разбившими материал на отдельные куски размером до I см, а объем вывалившегося материала достигал I0 % объема полости. Конвергенция полостей в слоистом массиве сопровождается разрушением материала в приконтурных зонах касательными напряжениями, скалывающими вдоль ориентации слоев, а при образовании сколов на достаточную глубину происходит отделение частиц от массива вследствие его разрушения тангенциальной компонентой. Деформационный процесс при этом характеризуется разбросом скоростей на соседних временных интервалах в 2-2,5 раза.

Рассмотрим результаты, полученные при испытании слоистых моделей с пластичным прослойком ($\eta_м / \eta_п \leq 10^{-2}$, где $\eta_м$, $\eta_п$ – коэффициенты вязкости модели и прослойка). В первые минуты после приложения давления скорость относительного изменения объема составила $(0,63-0,84)\cdot10^{-4}$ $с^{-1}$, а затем разброс скоростей увеличился от $0,25\cdot10^{-4}$ до $1,15\cdot10^{-4}$ $с^{-1}$ и лишь через I6 мин после начала испытания процесс вошел в установившуюся фазу со средней скоростью $0,76\cdot10^{-4}$ $с^{-1}$. Форма полостей в процессе конвергенции все более соответствовала цилиндрической (рис.I, в) вследствие высоких скоростей деформирования в горизонтальном направлении. Этот процесс сопровождался сильным разрушением материала приконтурной зоны, причем вблизи пластичного прослойка – в виде вывалов кусков материала размером до I см, а на некотором отдалении – в виде отделения чешуек. Объем разрушенного материала составил 5–I0 % объема полости. При изменении объема полостей до 60 % от первоначального характер процесса качественно не менялся (рис.I, в). Вывалившиеся куски занимали в этом случае до 20 % объема.

Процесс деформирования полостей с жесткими прослойками ($\eta_м/\eta_п \geq 100$) характеризовался скоростями, изменяющимися в диапазоне $(0,32-0,47)\cdot10^{-4}$ $с^{-1}$ в начальный момент времени, а в установившейся фазе $(0,18-0,29)\cdot10^{-4}$ $с^{-1}$. На рис.I, г приведен вид полости, деформированной на 20 % от первоначального объема. Ее размер в горизонтальном направлении практически не изменился, а в вертикальном – уменьшился на одну треть. Этот процесс сопровождался шелушением материала приконтурной зоны, причем объем разрушенного материала составил I–3 % объема полости. При деформировании на 40 % объема полость сжалась в вертикальном направлении на 50 % диаметра, а в горизонтальном – на 5 % диаметра. Наблюдалось разрушение материала в приконтурной зоне в виде трещин и откола кусков размером до 0,5 см. Разрушенная масса занимала 3–5 % от объема полости.

Таким образом, полости с жестким прослойком деформируются преимущественно в вертикальном направлении, принимая форму все более сплюснутого гео-

ида, а с мягким прослойком – в горизонтальном направлении, принимая форму цилиндра.

Результаты моделирования на эквивалентном материале свидетельствуют о том, что конвергенция полостей сопровождается разрушением вмещающего массива в приконтурной зоне. Применительно к соли это может проявляться в виде дилатансии, приводящей к увеличению ее объемных деформаций на 20–30 % (по данным одноосных испытаний) [4]. Остановимся на оценке этого эффекта и его вклада в величину конвергенции. Если на экспериментальных кривых зависимостей объемных деформаций от напряжений, полученных в камере Кармана при разных боковых давлениях, отметить пределы пропорциональности, то совокупность этих точек в координатах главных напряжений образует поверхность – параболоид, а в случае осевой симметрии – параболу с вершиной на оси в точке σ_T. Эта кривая аналитически описывается зависимостью

$$\sigma_3 = -\sigma_T + 3{,}75\sqrt{\sigma_1},$$

где σ_T – пределы текучести, которая может быть использована в качестве критерия дилатансионного разрушения.

Процесс деформирования, сопровождающийся дилатансией, может быть описан уравнениями механики тел с большим числом трещин [3] с явным введением в качестве основного структурного параметра, характеризующего степень разрушения материала, плотности трещин Ω как функции интенсивности напряжений и времени. Если в процессе деформирования объемные деформации не возрастают, то в качестве разрешающих уравнений можно использовать уравнения вязкого течения на основе ассоциированного закона.

Для оценки дилатансии вмещающего массива была составлена расчетная схема в соответствии с требованиями метода конечных элементов (МКЭ) [1], содержащая 242 узла (420 элементов) и охватывающая вмещающий массив на расстояние, равное пяти радиусам от поверхности полости. Программа МКЭ была дополнена процедурой вычисления эффективных деформационных характеристик как функции плотности микротрещин и дилатансионным критерием, связывающим главные напряжения и предел текучести. Полость рассчитывалась в условиях гидростатического давления. Результаты расчетов показали, что величина относительного изменения объема полости составляет в начальный момент 0,24 %, а через 3 года – 0,6 %. Столь малое изменение объема вследствие разрыхления связано с тем, что в процессе деформирования происходит поперечное сжатие радиальных трещин по мере роста тангенциальной компоненты напряжений, которое значительно увеличивает сопротивление сдвигу.

Для расчета скоростей квазивязкого течения вмещающей соли использовалась описанная ранее расчетная схема. Определение приращений компонент скоростей деформации производилось МКЭ с применением упругопластичной матрицы [5], полученной на основе уравнения Прандтля – Рейсса и условия текучести Мизеса. В качестве расчетной кривой, характеризующей изменение интенсивности скоростей пластических деформаций $\dot{\sigma}_i^{\Pi}$ от интенсивности напряжений σ_i, использовалась экспериментальная реологическая кривая, описанная зависимостью вида

$$\varepsilon_i^{\text{п}} = C\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_T}\right)^n,$$

где C, n – константы, $C = 1{,}6 \cdot 10^{-5}$ сут$^{-1}$; $n = 3$.

Расчеты показали, что с возрастанием горного давления до 10 МПа и более вокруг полости появляется зона вязкопластических деформаций. При этом меняется не только величина напряжений, но и характер распределения. Так, у радиальной компоненты появляется максимум на расстоянии $(0{,}5\text{–}0{,}6)\,R_0$ от контура, а у тангенциальной – на расстоянии $(0{,}2\text{–}0{,}3)\,R_0$ от контура, где R_0 – радиус полости.

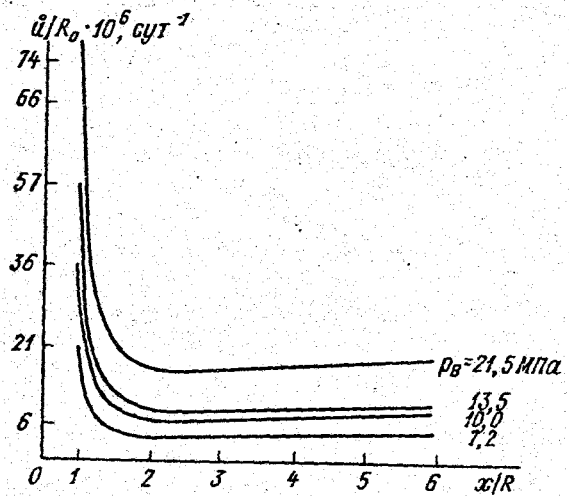


Рис.2. Зависимость скоростей смещений от величины горного давления

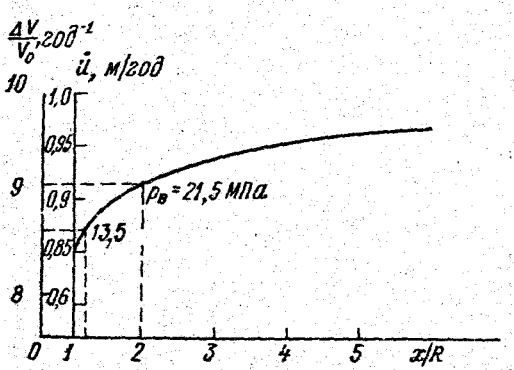


Рис.3. Зависимость скоростей смещений и изменения объема полостей от размеров пластичной зоны

Из рис.2 видно, что при изменении давления от 7,2 до 21,5 МПа скорость смещения контура возрастает в 3,6 раза: с $21 \cdot 10^{-6}$ до $7{,}6 \cdot 10^{-6}$ сут$^{-1}$. При p_B = 13,5 МПа размер зоны вязкопластичного течения составит $0{,}2\,R_0$ (рис.3), а при увеличении давления до 21,5 МПа она возрастает до $(0{,}9\text{–}1{,}0)R_0$. Для рассматриваемых условий скорость затекания полости составит 0,91 м в год или 11 % от первоначального объема, а за 4 года – 38 %.

Сравним полученные результаты с данными испытания моделей из эквивалентного материала. При отработке однородных моделей за 20 мин, что в соответствии с временным масштабом составляет 4 года, изменение объема полости достигло 25 %, тогда за год – 7–8 %. Таким образом, между расчетными с учетом дилатансии (около 11 %) и экспериментальными данными (7–8 %) существует достаточно хорошее совпадение.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

При давлении, превышающем предел текучести (σ_T = 10–12 МПа), в каменной соли будет наблюдать-

ся конвергенция полостей, которая через 1–5 суток выйдет в установившуюся фазу. Скорость затекания нелинейно зависит от величины давления и изменяется в пределах от 0,05 до 0,17 % ее объема в сутки при изменении давления в диапазоне от 25 до 50 MIa.

Величина относительного изменения объема вследствие дилатансии вмещающего массива составляет в начальный момент 0,24 %, а через 3 года – 0,6 %. Столь малое влияние дилатансионного эффекта объясняется сферической формой полости, когда рост тангенциальной и радиальной компонент во времени увеличивает жесткость трещин на сдвиг и отрыв. Скорость относительного изменения объема в результате квазивязкого течения вмещающей соли составляет 11 % в год. Этот результат достаточно хорошо совпадает с данными испытания моделей, изготовленных из эквивалентного материала.

При превышении критической величины конвергенции, определенной структурой и свойствами вмещающего массива, процесс деформирования полостей сопровождается разрушением их поверхностей, при этом скорости деформирования останутся практически неизменными вплоть до их полного затекания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1982.

2. Рёр Х.У. Проявление горного давления в хранилище, созданном размывом соляных пород. Перевод с нем. ГПНТБ СССР, № 1274. Л., 1975.

3. Салганик Р.Л. Механика тел с большим числом трещин // Изв. АН СССР. МТТ. 1973, № 4.

4. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М., Недра, 1985.

5. Сиратори М., Миёси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения. М.: Мир, 1986.