

Wide application of anchors for maintenance of mine tunnel requires searching of optimum indexes of the anchor fastening in various external environments. By carrying out a computing experiment it is necessary to design an anchor and terms of its interface. Test calculations were executed in order to estimate influence of model of anchor parameters on the result. The result of calculations has made it possible to get a number of regularities

of influencing of different parameters of model of anchor on the general picture of stress distribution.

Keywords: anchor, stress-strain state, calculation scheme, supraliminal condition, total displacement

Рекомендовано до публікації д.т.н. О.М. Кузьменком 25.01.10

УДК 622.276

© Садовенко И.А., Инкин А.В., 2010

И.А. Садовенко, А.В. Инкин

ДИНАМИКА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛАСТА КОЛЛЕКТОРА ВОДОНОСНОГО ГАЗОХРАНИЛИЩА*

I.A. Sadovenko, A.V. Inkin

HYDROMECHANICAL CHANGES OF THE RESERVOIR WATER-BEARING GAS STORAGE COEFFICIENTS

Обоснован методический подход к численной оценке напряженно-деформированного состояния горного массива в процессе закачки газа в водоносные пласты. На его основе для условий Приднепровского гидрогеологического района оценены объемная деформация, изменения физико-механических и диффузионно-адсорбционных свойств пласта-коллектора. Полученные результаты позволят более точно учитывать фильтрационные свойства и эффективную емкость водоносных газохранилищ.

Ключевые слова: водоносное газохранилище, пласт-коллектор, объемная деформация

Введение. Одним из перспективных направлений развития газовой промышленности Украины является освоение новых и оптимизация использования действующих подземных хранилищ газа. В работе [1] уже была рассмотрена возможность их создания в водоносных пластах Приднепровского гидрогеологического района, однако влияние аккумуляции газа на напряженно-деформированное состояние (НДС) горных пород не изучалось. Наряду с этим, физические предпосылки и промышленный опыт работы газохранилищ в схожих условиях [2] требуют обоснования параметров деформации пласта-коллектора, а также оценки изменений его фильтрационных и диффузионно-адсорбционных свойств в результате закачки и отбора газа. Неадекватный учет этих процессов может привести к большим погрешностям при расчете гидродинамических параметров, от которых зависит стабильная эксплуатация газохранилища, поэтому их количественная оценка является важной научно-практической задачей.

Физические основы модели. До начала закачки газа водоносный пласт находится в статическом равновесии с окружающим его горным массивом (очевидно, что ламинарная природная фильтрация не существенна). При этом в водовмещающих породах постоянно действует нормальное напряжение σ , а вода в порах находится под давлением P (рис. 1). В результате нагнетания газа в пласт, из него будет вытесняться вода, а давление в порах – повышаться с P_1 до P_2 . Это приведет

к увеличению емкости пласта вследствие превышения давления газа над действующим нормальным напряжением, что сокращает объем частиц, составляющих скелет породы и увеличивает его поры. Вода, также, сжимается, поэтому емкость для закачки газа повышается. Определение результирующих объемных деформаций dV в данном случае возможно путем расчета действующих напряжений, равных разности $\sigma - P$.

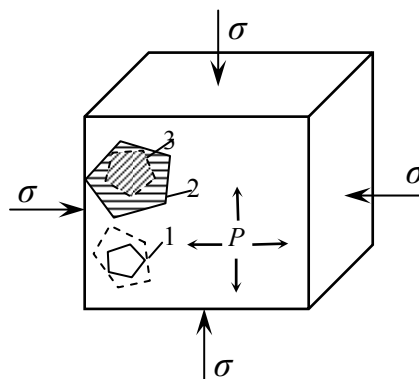


Рис. 1. Схема объемной деформации пласта-коллектора: 1 – поровое пространство; 2,3 – контур твердой фазы пласта соответственно до закачки газа и в процессе увеличения давления P

*Приведенные исследования выполнены при поддержке фонда гражданских исследований и развития CRDF США (грант № USB1-021-DP-07 Научно-образовательного центра НГУ).

При составлении математической модели для оценки НДС водоносного газохранилища были приняты следующие допущения: 1) эксплуатация водоносного газохранилища происходит в изотермическом режиме при одинаковой температуре закачиваемого газа и вытесняемой им жидкости; 2) гравитационные силы являются доминирующими в исследуемом процессе; 3) деформация пласта-коллектора происходит в упругом режиме и цикличном изменении давления, при котором создаваемые в пласте напряжения не превышают предела прочности скелета породы; 4) коэффициент сжимаемости твердой фазы коллектора является постоянной величиной, так как изменение давления в водоносном пласте не превышает 60 МПа [3] при шаровом тензоре напряжений.

Методика моделирования. При указанных допущениях, объемная деформация порового пространства и скелета пласта-коллектора определяется уравнениями [4]:

$$\frac{dV_n}{V_n} = \eta_{жс} \frac{d}{\omega} \frac{P}{2} \eta_{мс} dP; \quad (1)$$

$$\frac{dV_{мс}}{V_{мс}} = \frac{1}{14n} \eta_{мс} \frac{d}{\omega} \frac{P}{2} \eta_{мс} dP, \quad (2)$$

где $V_n, V_{мс}$ – объем порового пространства и твердой фазы пласта; $\eta_{жс}, \eta_{мс}$ – соответственно коэффициент сжимаемости жидкости в порах и скелета породы; n – пористость коллектора.

Для определения нормального напряжения можно принять распределения напряжений в виде:

$$\omega = k \psi_n g h, \quad (3)$$

где

$$k = \frac{\tau}{14\tau}, \quad (4)$$

τ – коэффициент Пуассона; ψ_n – средняя плотность пород кровли; g – ускорение свободного падения; h – глубина залегания пласта-коллектора.

Коэффициент Пуассона и модуль упругости обычно хорошо коррелируют в формуле К.Л. Тер-Микаэляна [5]

$$E = 10^4 f_{жс} \tau^2 \omega^2, \quad (5)$$

где $f_{жс}$ – коэффициент крепости пород по Протодьяконову.

Для коэффициентов сжимаемости заполненного порового пространства предложены зависимости:

В.Н. Щелкачева:

$$\eta_n = \frac{2}{3} \frac{1}{n} \left(\frac{3}{14} \frac{\tau^2 \omega^2}{E} \right)^{\frac{2}{3}} \omega^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

Г. Брандта:

$$\eta_n = 6,53 \frac{\tau^2}{E} \omega^{\frac{2}{3}}, \quad (7)$$

И. Фетта:

$$\eta_n = \frac{2}{n} \left(f_1^2 \frac{\tau_1^2}{E_1} \right)^{\frac{1}{2}} \left(f_2^2 \frac{\tau_2^2}{E_2} \right)^{\frac{1}{2}} \omega^{\frac{1}{3}}, \quad (8)$$

где E_1, E_2 – модуль упругости для зёрен пласта-коллектора с максимальной и минимальной упругостью; τ_1, τ_2 – соответственно коэффициент Пуассона для них; f_1, f_2 – процентное содержание тех и других зёрен в скелете водосодержащих горных пород.

Изменение коэффициента пористости коллектора при изменении напряжений определяется из соотношения [6]

$$\frac{n}{n_0} = e^{-\frac{\omega}{\omega_0} \frac{d}{\omega} \frac{P}{2} \eta_{мс} dP}, \quad (9)$$

При этом, зависимость между пористостью и проницаемостью пласта выражается следующим образом:

$$\frac{n}{n_0} = \left(\frac{\kappa}{\kappa_0} \right)^{\frac{32 \zeta_0}{22 \zeta}}, \quad (10)$$

где κ, κ_0 – проницаемость и структурный показатель коллектора.

Плотность пород при всестороннем сжатии изменяется соответственно следующему уравнению:

$$\frac{\psi}{\psi_0} = A \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{B} \frac{1}{C}, \quad (11)$$

где

$$A = \frac{\psi_{мс} \psi_{жс}}{n};$$

$$B = \frac{n}{\psi_{жс} \frac{\psi_{мс}}{\tau^2 \psi_{жс}}};$$

$$C = \frac{14n}{14 \frac{\tau^2}{E} \frac{\psi_{жс}}{\psi_{мс}}},$$

$\psi_{мс}, \psi_{жс}$ – соответственно плотность твердой и жидкой фаз пласта-коллектора; $\eta_{жс}$ – коэффициент сжимаемости жидкости.

Диффузионно-адсорбционная активность коллектора зависит от приведенной емкости поглощения и напряжения [7]

$$\frac{q}{q_0} = \frac{1}{q} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\tau^2}{E} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

где q , $q^{\omega 4 P^0}$ – приведенная емкость поглощения породы в атмосферных условиях и при соответствующей разности действующих напряжений в пласте и при нагнетании или отборе газа.

Решение приведенных уравнений было произведено в программной среде MathCad. По формулам (3) – (5) определялось значение нормального напряжения. Затем, задавшись шагом изменения порового давления, по выражениям (6) – (8) вычислялись значения коэффициентов сжимаемости поровой жидкости и породы. Объемная деформация пласта-коллектора dV при заданном давлении находилась как сумма деформаций жидкости в его поровом пространстве и твердой фазы. При этом изменения фильтрационных и диффузионных свойств пласта рассчитывались по уравнениям (9) – (12). Аналогично выполнялся расчет для последующих приращений пластового давления.

Апробация методики. На рис. 2 приведены результаты расчета объемной деформации водоносного пласта при закачке в него газа для условий Приднепровского гидрогеологического района [1]:

$$P_1 = 0,3 \text{ МПа}, P_2 = 2 \text{ МПа}; n = 0,35; h = 100 \text{ м};$$

$$\psi_n = 1900 \text{ кг/м}^3; \eta_{ms} = 0,03 \text{ ГПа}^{-1}; \tau = 0,2;$$

$$f^{\mathfrak{R}} = 0,5; \eta_{sc} = 0,4 \text{ ГПа}^{-1}; \psi_{sc} = 1010 \text{ кг/м}^3; \alpha = -1;$$

$$f_1 = 40\%; f_2 = 60\%; E_1 = 2 \text{ ГПа}; E_2 = 0,5 \text{ ГПа}.$$

Кривые (1) – (3) получены при различных коэффициентах сжимаемости заполненного порового пространства (6) – (8). Анализ показывает, что объемная деформация пласта имеет наибольшее значение при использовании коэффициента сжимаемости, определенного по зависимости Г. Брандта (4%).

С целью оценки этих результатов и определения расчетного значения коэффициента сжимаемости заполненного порового пространства, были проведены экспериментальные исследования объемной деформации образца песчаных пород прибором трехосного сжатия TriSCAN фирмы VJTech (Великобритания). При этом подбор гранулометрического состава и физических свойств образца производился ситовым методом, а его размеры удовлетворяли условию, согласно которому длина образца должна быть не менее, чем в семь раз больше его диаметра. Равностороннее обжатие образца обеспечивалось при помощи нагнетания в камеру жидкости через контроллер, а покрытие образца эластичной оболочкой способствовало однородности возникающих деформаций. Изменение порового давления производилось с помощью другого контроллера. Регистрация объемов закачиваемой и вытесняемой во время эксперимента жидкости позволяла фиксировать изменение объема пор в образце. Обработка полученных данных и построение экспериментальной кривой объемной деформации (рис. 2–4) были выполнены с помощью кубической сплайн-интерполяции.

Анализ показывает, что наиболее точно (коэффициент корреляции 0,9) с экспериментальной кривой совпадает кривая, построенная при использовании

коэффициента сжимаемости по зависимости В.Н. Щелкачева. Значение этого коэффициента сжимаемости использовалось в последующих расчетах.

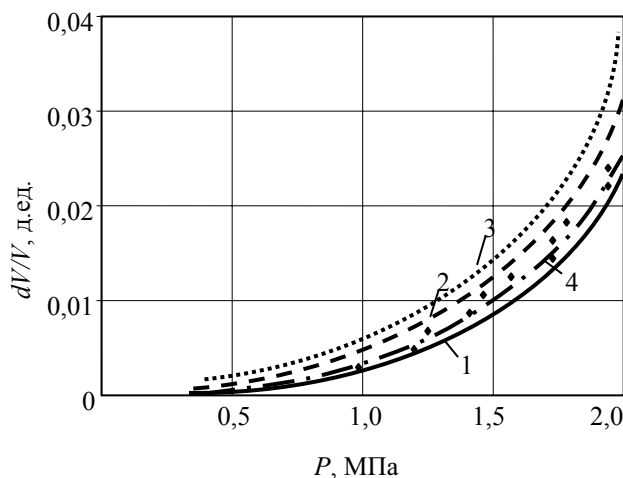


Рис. 2. Объемная деформация пласта-коллектора при изменении порового давления в результате закачки газа: 1, 2, 3 – кривые, полученные с использованием зависимостей В.Н. Щелкачева, И. Фетта и Г. Брандта соответственно; 4 – экспериментальная кривая

На рис. 3 приведены кривые изменения коэффициента пористости и проницаемости водоносного пласта в процессе эксплуатации газохранилища.

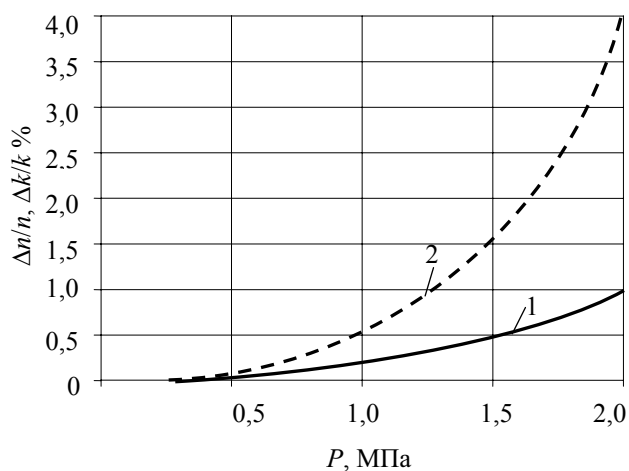


Рис. 3. Относительное изменение коэффициентов пористости ($\Delta n/n$) и проницаемости ($\Delta k/k$) пласта-коллектора в зависимости от порового давления в нем (P): 1, 2 – соответственно относительное изменение пористости и проницаемости

Анализ приведенных графиков показывает, что в процессе эксплуатации газохранилища пористость пласта-коллектора увеличивается менее интенсивно, чем его проницаемость. Это будет способствовать интенсификации закачки газа во времени и его дальнейшему отбору из пласта, а также, уменьшению его плотности (рис. 4).

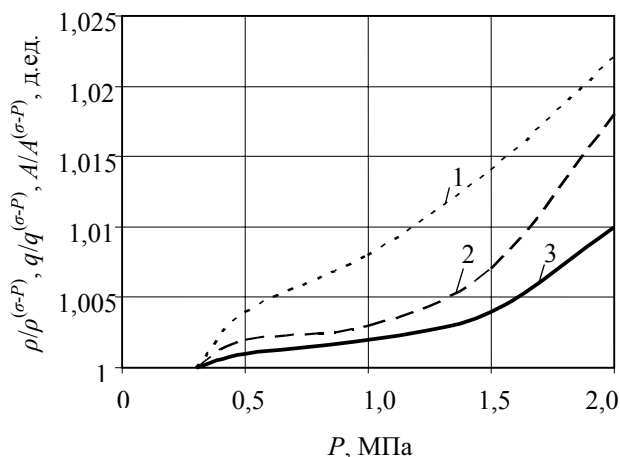


Рис. 4. Изменение плотности (ρ), приведенной емкости поглощения (q) и адсорбционной активности пород (A) от пластового давления: соответственно кривые 1, 2, 3

Согласно формуле (12), увеличение пористости пласта-коллектора приводит к снижению его приведенной емкости поглощения. Эта зависимость представлена кривой 2 на рис. 4. С помощью соотношения между приведенной емкостью поглощения и адсорбционной активностью пород, получена кривая 3, отражающая изменение адсорбционной активности пласта в зависимости от порового давления. Видно, что адсорбция пород пласта претерпевает меньшие изменения по сравнению с приведенной емкостью поглощения при эксплуатации газохранилища.

Выводы. По результатам проведенных экспериментов и математического моделирования напряженно-деформированного состояния пластов-коллекторов определено, что в процессе закачки и отбора газа из них, возникающие напряжения приводят к изменению их физико-механических свойств. В диапазоне давлений от 0,3 до 2 МПа для условий Приднэпровского гидрогеологического района установлено увеличение объема водоносного пласта на 4%, его пористости на 1% и проницаемости на 4%, что при геологических масштабах адекватно ёмкости газохранилища, измеряемой 100–400 млн м³. При этом плотность пласта может уменьшиться на 2%, а приведенная емкость поглощения и адсорбционная активность пород снизится на 1,5 и 1% соответственно.

Полученные результаты позволяют более точно учитывать фильтрационные свойства пластов-коллекторов и их эффективную емкость при расчетах параметров работы водоносных газохранилищ.

Список литературы

1. Инкин А.В. Гидродинамическая модель газохранилища в водоносных пластах Кривбасса // Сб. науч. тр. НГУ. – 2010. – № 34, Т. 2, – С. 216–221.
2. Энциклопедия газовой промышленности: [пер. с франц. / ред. пер. К.С. Басниев]. – М.: акционерное общество „ТВАНТ“, 1994. – 884 с.
3. Желтов Ю.П. Механика нефтегазоносного пласта – М.: Недра, 1975. – 216 с.
4. Добрынин В.М. Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа – М.: Недра, 1970. – 239 с.
5. Вендельштейн Б.Ю. Исследование разрезов нефтяных и газовых скважин методом собственных потенциалов – М.: Недра, 1966. – 235 с.

Обґрунтовано методичний підхід до чисельної оцінки напружено-деформованого стану гірського масиву в процесі закачування газу у водоносні пласти. На його основі для умов Придніпровського гідрогеологічного району оцінені об'ємна деформація, зміна фізико-механічних та дифузійно-адсорбційних властивостей пласта-коллектора. Отримані результати дозволять більш точно врахувати фільтраційні властивості та ефективну ємність водоносних газосховищ.

Ключові слова: водоносне газосховище, пласт-коллектор, об'ємна деформація

Technical approach to the numerical evaluation of the deflected mode of massif over the period of gas drive to aquifers has been proved. On its basis the volume deformation, physical-mechanical and diffusive-adsorption changes of reservoir properties have been estimated. Received results will allow taking into consideration filtering properties and effective capacity of aquiferous gas-holders.

Keywords: aquiferous gas-holder, layer-collector, by volume deformation

Рекомендовано к публикации д.т.н. В.І. Бузило 31.03.10.

УДК 622.242/.243

© Кожевников А.А., Филимонок Н.Т., 2010

А.А. Кожевников, Н.Т. Филимонок

СПОСОБЫ ИМПУЛЬСНОЙ ПРОМЫВКИ СКВАЖИН

A.A. Kozhevnikov, N.T. Filimonenko

WAYS OF IMPULSE WASHING OF WELLS

Впервые приводится классификация способов импульсной промывки скважин применительно к симметричным импульсам подачи жидкости, а также дифференциация ее частот на базе соизмеримости времени двух процессов: процесса вращения породоразрушающего инструмента и процесса промывки. Приведены возмож-