

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СВЕРХГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПЛАСТОВЫХ ДАВЛЕНИЙ

А.А. Орлов, В.Г. Омельченко, А.Н. Трубенко, Е.А. Орлова  
Ивано-Франковский национальный технический университет  
нефти и газа (Украина)

Математическую модель процесса формирования сверхгидростатических пластовых давлений (СГПД) с учетом действия наиболее известных факторов можно представить в виде уравнения:

$$P_{\text{СГПД}} = P_{\text{гидр}} + \Delta P_{\text{обл.п}} + \Delta P_{\text{упл}} + \Delta P_{\sigma_{x,y}} + \Delta P_{\text{т}} + \Delta P_{\text{кат}} + \Delta P_{\text{под}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{гидр}}$  – гидростатическое давление. Оно равно условному гидростатическому давлению при плотности пластовой воды  $\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$  в толще, перекрывающей коллектор.  $P_{\text{гидр}} = 10^{-6} g H \rho_v$ , МПа, где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $H$  – глубина, м;  $\Delta P_{\text{обл.п}}$  – избыточное давление в природном резервуаре, возникающее за счет гипсометрического превышения области питания над залежью.

$$\Delta P_{\text{обл.п}} = 10^{-5} h \rho_v, \text{ МПа.} \quad (2)$$

Фактором, обуславливающим возникновение избыточного давления в залежи нефти или газа, является напор, численно равный давлению столба жидкости от поверхности рельефа местности до пьезометрической поверхности.

$\Delta P_{\text{упл}}$  – избыточное давление, возникающее в коллекторе за счет действия гравитационного уплотнения. Эта величина тождественна  $\sigma_{\text{эф}}$  в уравнении К. Терцаги, выведенном им по результатам исследования рыхлых грунтов.  $\sigma_{\text{эф}} = \sigma - P$ , где  $\sigma_{\text{эф}}$  – эффективное напряжение, которое действует непосредственно на скелет породы при ее уплотнении;  $\sigma$  – напряжение, возникающее в результате действия массы вышележающих пород. Оно численно равно геостатическому давлению  $P_{\text{геос}} = 10^{-5} H' \rho_p$ , где  $H'$  – глубина уплотняющегося коллектора в стадию диагенеза, м;  $\rho_p$  – средняя плотность пород, перекрывающих этот коллектор,  $\text{кг/м}^3$ ;  $P$  – пластовое давление внутрипоровой жидкости в породе, Па. В стадию диагенеза осадков  $P = P'_{\text{гидр}} = 10^{-5} H' \rho'_v$ , где  $\rho'_v$  – плотность пластовой воды,  $\text{кг/м}^3$ . Тогда  $\Delta P_{\text{упл}} = \sigma_{\text{эф}} = P_{\text{геос}} - P'_{\text{гидр}}$ . Для того чтобы учесть долю противодействия  $P'_{\text{гидр}}$  сжимаемости скелета коллектора  $\beta_{\text{ск}}$  и долю

воздействия  $P'_{\text{гидр}}$  на сжимаемость составляющих породу зерен  $\beta_3$ , вводится коэффициент разгрузки  $n = 1 - \beta_3/\beta_{\text{СК}}$ , поэтому  $\Delta P_{\text{упл}} = \sigma_{\text{эф}} = P_{\text{геос}} - (1 - \beta_3/\beta_{\text{СК}})P'_{\text{гидр}}$ . Если учитывать уплотнение рыхлых грунтов (или осадочного материала в стадию диагенеза), то  $\beta_{\text{СК}}$  значительно больше  $\beta_3$ . В данном случае  $n = 1$ . В уплотнившихся отложениях, то есть в породах, прошедших стадию диагенеза,  $\beta_{\text{СК}}$  значительно уменьшается и на больших глубинах по величине приближается к  $\beta_3$ . Отношение  $\beta_3/\beta_{\text{СК}}$  стремится к единице, и значение  $n$  для учета деформации ощутимо снижается (стремясь к нулю).  $\sigma_{\text{эф}} = P_{\text{геос}} - 10^{-5}H'\rho'_B$  или  $\Delta P_{\text{упл}} = P_{\text{геос}} - 10^{-6}H'g\rho'_B$ . Откуда

$$\Delta P_{\text{упл}} = 10^{-6}Hg(\rho'_n - \rho'_B), \text{ МПа.} \quad (3)$$

$\Delta P_{\sigma_{x,y}}$  – избыточное давление в природном резервуаре, возникающее при действии на него тектонических напряжений  $\sigma_{x,y}$ .  $\Delta P_{\sigma_{x,y}} = P_{\text{СГПД}} - P_{\text{гидр}}$  можно считать функцией  $\sigma_{x,y}$ . При отмеченных условиях  $\Delta P_{\sigma_{x,y}}$  будет отличаться от величины  $\sigma_{x,y}$ , которая его обусловила, на величины сжимаемости флюида  $\beta_{\text{ж}}$ , насыщающего породу, а также сжимаемости скелета этой породы  $\beta_{\text{СК}}$ . Сжимаемостью зерен, составляющих породу, в данном случае можно пренебречь. Тогда  $\Delta P_{\sigma_{x,y}} = \sigma_{x,y}(m\beta_{\text{ж}} + \beta_{\text{СК}})$ , где  $(m\beta_{\text{ж}} + \beta_{\text{СК}}) = \beta$ . Здесь  $\beta$  – коэффициент упругоэластичности пласта В.Н. Щелкачева;  $m$  – коэффициент пористости. Отсюда  $\sigma_{x,y} = \Delta P_{\sigma_{x,y}}/\beta$ . Подбор математической модели явления требует соблюдения размерностей величин, стоящих в левой и правой частях уравнения. Это можно достичь путем введения корня в правую часть выражения:  $\text{Па} = \sqrt{\text{Па}/\text{Па}^{-1}} = \sqrt{\text{Па}^2} = \text{Па}$ . Исходя из этого уравнения размерностей формулу для определения значений тектонических напряжений в горных породах по избыточным давлениям в пласте можно записать в виде  $\sigma_{x,y} = \sqrt{\Delta P_{\sigma_{x,y}}/\beta}$ , следовательно,  $\Delta P_{\sigma_{x,y}} = \sigma_{x,y}^2(m\beta_{\text{ж}} + \beta_{\text{СК}})$  или  $\Delta P_{\sigma_{x,y}} = \sigma_{x,y}^2\beta$ . (4)

Проверим правильность выведенного соотношения путем сравнения левой и правой его частей:  $\text{Па} = \text{Па}^2 \cdot \text{Па}^{-1} = \text{Па}$ .

$\Delta P_{\text{т}}$  – избыточное давление за счет увеличения объемов легких фракций в углеводородной смеси при повышении температуры. Увеличение объема газов в

температурных условиях, приводящее к возникновению в природном резервуаре  $\Delta P_T$ , можно учесть по формуле

$$\Delta P_T = P_{\text{гидр}} \beta_T - P_{\text{гидр}} \quad \text{или} \quad \Delta P_T = 10^{-5} \rho_v (\beta_T - 1). \quad (5)$$

Правильность соотношения проверяется соответствием размерностей левой и правой частей уравнения: Па = Па, так как  $\beta_T$  – это отношение температур (размерности сокращаются).

$\Delta P_{\text{кат}}$  – избыточное давление за счет действия катагенетического фактора в температурных условиях.  $\Delta P_{\text{кат}} = P_{\text{гидр}} K_{\text{кат}} - P_{\text{гидр}}$ , где  $K_{\text{кат}}$  – коэффициент, показывающий, во сколько раз происходит повышение пластового давления в природном резервуаре вследствие катагенетического преобразования органического вещества. Этот коэффициент определяется экспериментально или эмпирически по статистическим данным для конкретного района (области). В общем случае

$$\Delta P_{\text{кат}} = 10^{-5} H \rho_v (K_{\text{кат}} - 1), \text{ МПа}. \quad (6)$$

$\Delta P_{\text{подм}}$  – избыточное давление в коллекторе за счет подтоков в него напорных флюидов из нижезалегающих образований. Определение величины этого слагаемого в уравнении (1) сопряжено с большими трудностями.  $\Delta P_{\text{подм}}$  зависит от фильтрационных свойств подстилающих коллектор пород, величины давления в резервуаре, из которого происходит движение флюидов, их запасов. Поэтому

$$\Delta P_{\text{подм}} = 10^{-5} (H_n \rho_{\text{в.н.}} - H_v \rho_{\text{в.в.}}), \quad (7)$$

где  $H_n$  и  $H_v$ ,  $\rho_{\text{в.н.}}$  и  $\rho_{\text{в.в.}}$  – соответственно глубины нижнего и верхнего резервуаров и плотности в них пластовых вод.

Данная математическая модель представлена к рассмотрению в рамках выполнения совместного украинско-российского проекта “Механизмы взаимосвязи тектонического и геофлюидодинамического режимов нефтегазоносных осадочных бассейнов”.