УДК 622.24

РАСЧЕТ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СТенок СКВАЖИН В ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

А.Г.ГУБАЙДУЛЛИН, А.И.МОГУЧЕВ

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения технико-экономических показателей строительства скважин на основе прогнозирования и предупреждения прихватов бурильного инструмента, обусловленных сужением открытого ствола скважин в интервалах трансверсально-изотропных горных пород.

Разработана математическая модель упруговязкопластического перемещения стенок наклонно направленных и горизонтальных скважин при сужении открытого ствола скважин вследствие ползучести в интервалах трансверсально-изотропных горных пород. В программе, разработанной на основе данной математической модели, выполнен расчет упруговязкопластического перемещения стенок наклонно направленной и горизонтальной скважины в пласте аргиллита месторождения Западной Сибири. В результате расчета установлено, что после вскрытия горной породы долотом поперечное сечение открытого ствола скважины вследствие ползучести горной породы со временем приобретает форму эллипса, малая ось которого расположена в плоскости верхней стенки скважины и уменьшается с течением времени.

Ключевые слова: прихват долота; неустойчивость стенок скважин; сужение открытого ствола скважины; трансверсально-изотропная горная порода; упруговязкопластическое перемещение стенок скважины

Как цитировать эту статью: Губайдуллин А.Г. Расчет упруговязкопластического перемещения стенок скважин в трансверсально-изотропных горных породах / А.Г.Губайдуллин, А.И.Могучев // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 180-184. DOI 10.31897/PMI.2019.2.180

Введение. Причинами снижения технико-экономических показателей бурения нефтяных и газовых скважин непосредственно являются осложнения, среди которых значительную долю составляют прихваты бурильного инструмента. Среди причин прихватов можно выделить нарушение устойчивости открытого ствола скважин (сужение ствола, кавернообразование, осыпи и обвалы стенок) [2, 4, 9, 11-15].

Постановка проблемы. Одной из основных причин прихватов бурильного инструмента в наклонно направленных и горизонтальных скважинах является сужение открытого ствола скважин в интервалах вязкопластичных горных пород [2, 4]. Ранее в работах авторов [3-6, 9] рассматривалось моделирование процесса упруговязкопластического перемещения стенок наклонно направленных и горизонтальных скважин вследствие ползучести горных пород, слагающих стенки скважины. Однако в тех работах не учитывалось влияние анизотропии упругих свойств горной породы. В данной работе рассмотрена задача моделирования упруговязкопластического перемещения стенки наклонно направленной и горизонтальной скважин в трансверсально-изотропной сжимаемой горной породе.

Методы исследования: использованы методы теории упругости, теории линейной вязкоупругости, механики горных пород, теории ползучести горных пород. Задача решена методами численного интегрирования и переменных модулей при допущении плоской деформации сжимаемой упруговязкопластичной горной породы. Ползучесть горной породы моделируется линейной наследственной средой, параметры которой определяются ядром Абеля. Решение задачи получено аналитически на основе промысловых данных геофизических исследований скважин и опубликованных результатов испытаний горных пород на ползучесть.

Обсуждение. Расчетная схема задачи приведена на рис.1. Горная порода является трансверсально-изотропной, и ось z расположена по нормали к плоскости изотропии. В открытый ствол скважины закачивается буровая промывочная жидкость, создающая гидростатическое давление на стенки скважины.

При бурении долото формирует круглую скважину радиусом R_n , но по мере удаления долота от зафиксированного поперечного сечения скважины происходит деформирование ствола, как показано в сечении $I-I$ (рис.1) [2, 4]. Вследствие ползучести горной породы происходит ее перемещение во времени в радиальном направлении на величину $u(t)$, что в конечном счете приводит к перемещению стенок скважины во времени. В направлении AD происходит положительное перемещение во времени точки A и соответственно боковой стенки скважины (радиус скважины увеличивается), а в направлении BE – отрицательное перемещение точки B и соответственно верхней стенки скважины к оси скважины [2, 4]. Отсюда следует, что характерными являются

Рис.1. Расчетная схема задачи

Точка A – боковая стенка скважины; точка B – верхняя стенка скважины; точки E и D на расчетном контуре в приствольной зоне; α – zenithный угол интервала скважины; p_r – геостатическое горное давление; p_b – боковое горное давление; p_a – давление на i -й элемент массива горных пород, обусловленное действием поля горного давления; h – толщина i -го элемента массива горных пород; σ_{ri} , σ_{ti} – соответственно радиальное и тангенциальное напряжение i -го элемента массива горных пород; R_{ki} – радиус контура i -го элемента массива горных пород; R_n – номинальный радиус открытого ствола скважины (равный половине диаметра долота); R_b – радиус боковой стенки скважины; R_v – радиус верхней стенки скважины; R_k – радиус контура влияния в приствольной зоне; ΔR_b и ΔR_v – упруговязкопластическое перемещение соответственно боковой и верхней стенки скважины [2, 4]

точки A на боковой стенке и B на верхней стенке, расчет перемещения которых позволяет определить большую и малую оси эллиптического сечения скважины вследствие неосесимметричной деформации [2, 4].

Численное решение задачи об упруговязкопластическом перемещении стенки наклонно направленных и горизонтальных скважин получено при допущении о плоской деформации горных пород, окружающих скважину, т.е. изменение деформации в направлении, параллельном оси скважины, равно нулю. Задача решается в цилиндрической системе координат $R\theta Z$, в которой аппликата Z вертикальна и совпадает с осью скважины, а ось R направлена в радиальном направлении и нормально к оси Z [2, 4]. Принято допущение, что плоскость изотропии $R\theta$ совпадает с аналогичной плоскостью цилиндрической системы координат, используемой для решения задачи.

Граничные условия: 1) в нетронутом массиве горных пород осевое напряжение равно геостатическому давлению ($\sigma_z = -p_r = \text{const}$), радиальное и тангенциальное напряжение $\sigma_r = \sigma_t = -p_b = \text{const}$; 2) после вскрытия породы долотом на той же глубине на стенке скважины ($r = R_c$) радиальное напряжение равно гидростатическому давлению буровой промывочной жидкости p_c ($\sigma_r = -p_c$), на расстоянии радиуса контура влияния ($r = R_k$) радиальное и тангенциальное напряжения равны боковому горному давлению ($\sigma_r = \sigma_t = -p_b = \text{const}$), а осевое напряжение равно геостатическому давлению ($\sigma_z = -p_r = \text{const}$), радиальное перемещение на радиусе контура влияния равно нулю ($u = 0$) [2, 4].

Радиус контура влияния R_k принимается из условия, что на расстоянии около десяти радиусов ствола скважины напряжения в околоскважинной зоне стремятся к напряжению в условиях естественного залегания [2, 4].

Ползучесть горной породы задана моделью линейной наследственной упругой среды [7, 10]. В качестве функции ползучести принято ядро Абеля, коэффициенты которого определяются из результатов испытания образцов горной породы на ползучесть [7].

На первом шаге получено решение радиального упругого перемещения на основе геометрических и физических уравнений теории линейной упругости [2, 4, 10]. Радиальное упругое перемещение i -го элемента массива горных пород определяется формулой [2, 4]

$$\Delta R_{y,i} = \varepsilon_r h = \left(\frac{1}{E} (\Delta \sigma_{r,i} - \mu \Delta \sigma_{\theta,i}) - \frac{\mu_1}{E_1} \Delta \sigma_{z,i} \right) h, \quad (1)$$

где ε_r – радиальная деформация i -го элемента массива горных пород; E – модуль упругости для направлений в плоскости изотропии $R\theta$; E_1 – модуль упругости для направлений, нормальных плоскости изотропии $R\theta$; μ и μ_1 – коэффициенты Пуассона для деформаций в плоскости изотропии при сжатии соответственно в плоскости изотропии $R\theta$ и в направлениях, нормальных плоскости изотропии $R\theta$; h – толщина i -го элемента массива горных пород [2, 4].

Приращение осевого напряжения в упругой горной породе определяется формулой

$$\Delta \sigma_{z,i} = \frac{D(p_6 - p_c)}{R_{0i}^4} - \frac{2(p_a - p_6)}{R_{0i}^2}, \quad (2)$$

где $\Delta \sigma_{z,i}$ – приращение осевого напряжения i -го элемента массива горных пород; $R_{0i} = R_i / R_n$; $D = (1 + \mu)^2 / [16E(1 - \mu)^2(1 - 2\mu)]$; $p_a = p_r \sin^2 a + p_6 \cos^2 a$.

Приращения радиальных и тангенциальных напряжений i -го элемента массива горных пород определяются формулами С.Г.Лехницкого [4].

На втором этапе решается задача определения вязкопластического перемещения стенки скважины. Решение задачи получено методом переменных модулей, разработанным Б.З.Амусиным и А.М.Линьковым, в соответствии с которым упругие постоянные в уравнении (1) заменяются алгебраическими выражениями, содержащими функцию ползучести (временными функциями соответствующих параметров), при условии, что граничные условия и геостатическое давление не зависят от времени [1].

При расчете вязкопластической деформации горной породы в соответствии с методом переменных модулей коэффициент D в формуле (2) заменяется временной функцией $D(t)$:

$$D(t) = \frac{(1 + \mu_t)^2}{16E_t(1 - \mu_t)^2(1 - 2\mu_t)},$$

где E_t и μ_t – временная функция соответственно модуля упругости и коэффициента Пуассона в плоскости изотропии [7, 10].

Вязкопластическое радиальное перемещение i -го элемента массива горных пород в соответствии с методом переменных модулей определяется формулой

$$\Delta R_{вп,i} = \varepsilon_r(t) h = \left(\frac{1}{E_t} (\Delta \sigma_{r,i} - \mu_t \sigma_{\theta,i}) - \frac{\mu_{1t}}{E_{1t}} \Delta \sigma_{z,i} \right) h, \quad (3)$$

где $\Delta R_{вп,i}$ – вязкопластическая составляющая перемещения i -го элемента массива горных пород; $\varepsilon_r(t)$ – радиальная вязкопластическая деформация i -го элемента массива горных пород; μ_{1t} и E_{1t} – временная функция коэффициента Пуассона и модуля упругости соответственно в направлениях, нормальных плоскости изотропии [7, 10].

Упруговязкопластическое перемещение i -го элемента горной породы определяется суммой упругой составляющей и составляющей, обусловленной вязкопластическим перемещением. Упруговязкопластическое перемещение стенки скважины определяется суммарным упруговязкопластическим перемещением всех элементов:

$$R_c(t) = R_{c,y} + R_{c,вп}(t) = \sum \Delta R_{y,i} + \sum \Delta R_{вп,i}(t), \quad (4)$$

где $R_{c,y}$ – упругая составляющая перемещения стенки скважины; $R_{c,вп}(t)$ – вязкопластическая составляющая перемещения стенки скважины.

В результате подстановки уравнений (1) и (3) в уравнение (4) и последующих математических преобразований получим уравнение упруговязкопластического перемещения стенок наклонно направленной и горизонтальной скважин:

$$R_c(t) = \sum \left(\left(\Delta \sigma_{r,i} - \mu \Delta \sigma_{\theta,i} \right) \frac{E + E_t}{EE_t} - \Delta \sigma_{z,i} \left(\frac{\mu_1 E_{1t} + E_1 \mu_{1t}}{E_1 E_{1t}} \right) \right) h.$$

Результаты. На основе полученного решения выполнены расчеты упруговязкопластического перемещения стенки наклонно направленных и горизонтальных скважин на примере одного из месторождений Западной Сибири. В качестве исходных данных приняты: горная порода – аргиллит; номинальный диаметр ствола скважины (равный диаметру долота) 215,9 мм; геостатическое давление 62 МПа, гидростатическое давление буровой промывочной жидкости 27 МПа; модули упругости горной породы $E = 4900$ МПа, $E_1 = 7600$ МПа, коэффициенты Пуассона горной породы $\mu = 0,22$ и $\mu_1 = 0,15$. Коэффициенты ядра Абеля горной породы соответственно $\delta = 0,08 \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 0,71$ [7, 8].

На основе исходных данных получена зависимость упруговязкопластического перемещения стенки горизонтальной скважины после вскрытия горной породы долотом при зенитном угле интервала 90° (рис.2). В начальный момент времени перемещение стенки скважины происходит в соответствии с уравнениями линейной упругости и не равно нулю. Далее имеет место вязкопластическое перемещение стенки скважины вследствие ползучести горной породы в околоскважинной зоне. Как видно из рис.2, упруговязкопластическое перемещение верхней стенки скважины в течение суток после вскрытия горной породы возрастает более чем в 3 раза, в то время как то же перемещение боковой стенки скважины в тот же период остается практически неизменным. Через сутки после вскрытия горной породы долотом упруговязкопластическое перемещение верхней стенки скважины более чем в 6 раз превышает упруговязкопластическое перемещение боковой стенки скважины. Соответственно, поперечное сечение открытого ствола наклонно направленной скважины со временем приобретает форму эллипса, большая ось которого лежит в плоскости боковых стенок скважины, а малая ось – в плоскости верхней стенки скважины.

Была определена зависимость упруговязкопластического перемещения стенок наклонно направленных и горизонтальных скважин от зенитного угла интервала по результатам расчета через сутки после вскрытия горной породы долотом (рис.3). Установлено, что с увеличением зе-

Рис.2. Упруговязкопластическое перемещение во времени стенки наклонно направленной скважины

Рис.3. Зависимость упруговязкопластического перемещения стенки скважины от зенитного угла интервала

нитного угла упруговязкопластическое перемещение верхней и боковой стенок увеличивается. Так, упруговязкопластическое перемещение верхней стенки горизонтальной скважины (зенитный угол 90°) более чем в 6 раз превышает упруговязкопластическое перемещение верхней стенки вертикальной скважины (зенитный угол равен нулю).

Выводы

1. Получено численное аналитическое решение задачи упруговязкопластического перемещения стенок наклонно направленных и горизонтальных скважин в пласте сжимаемой упруговязкопластичной трансверсально-изотропной горной породы.
2. В результате расчета по полученной математической модели определены зависимости упруговязкопластического перемещения стенок наклонно направленных и горизонтальных скважин от времени после вскрытия горной породы породоразрушающим инструментом и от зенитного угла интервала в пласте аргиллита месторождения Западной Сибири.
3. Показано, что с течением времени и с ростом зенитного угла значение упруговязкопластического перемещения верхней стенки скважины кратно превышает значение упруговязкопластического перемещения боковой стенки скважины, вследствие чего поперечное сечение открытого ствола скважины приобретает со временем форму эллипса с малой осью в плоскости верхней стенки скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амосин Б.З. Об использовании метода переменных модулей для решения одного класса задач линейной наследственной ползучести / Б.З.Амосин, А.М.Линьков // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1974. № 6. С. 162-166.
2. Булюкова Ф.З. Прогнозирование и предупреждение осложнений, обусловленных упругим смещением стенок скважины: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.15. Уфа: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 2011. 24 с.
3. Влияние трещиноватости горных пород на упруговязкопластическое перемещение стенок скважин / А.И.Могучев, А.Г.Губайдуллин, В.М.Лобанков, А.С.Беляева // Нефтяное хозяйство. 2016. № 5. С. 41-43.
4. Губайдуллин А.Г. Прогнозирование и предупреждение осложнений, вызванных упруговязкопластическим перемещением стенок наклонно направленных и горизонтальных скважин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.15. Уфа: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 2017. 23 с.
5. Губайдуллин А.Г. Смещение стенок наклоннонаправленных скважин при воздействии тектонических напряжений / А.Г.Губайдуллин, А.И.Могучев // Газовая промышленность. 2015. № 12. С. 88-91.
6. Губайдуллин А.Г. Упруговязкопластическое смещение стенок наклонно-направленных и горизонтальных скважин / А.Г.Губайдуллин, А.И.Могучев // Территория Нефтегаз. 2016. № 3. С. 56-61.
7. Ержанов Ж.С. Теория ползучести горных пород и ее приложения. Алма-Ата: Наука, 1964. 173 с.
8. Кашников Ю.А. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья / Ю.А.Кашников, С.Г.Ашихмин. М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. 467 с.
9. Могучев А.И. О предупреждении сужений открытого ствола наклонно направленных и горизонтальных скважин вследствие вязкопластической деформации горных пород / А.И.Могучев, А.Г.Губайдуллин, Ю.Г.Матвеев // Нефтепромысловое дело. 2016. № 9. С. 27-32.
10. Турчанинов И.А. Основы механики горных пород / И.А.Турчанинов, М.А.Иофис, Э.В.Каспарьян. М.: Недра, 1977. 503 с.
11. Aadnoy Bernt S. Analysis of stuck pipe in deviated boreholes / Bernt S. Aadnoy, Kenneth Larsen, C.Berg // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2003. Vol. 37. Iss.3-4. P. 195-212.
12. Caenn Ryen. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. 7th Edition / Ryen Caenn, HCH Darley, George R. Gray. Gulf Professional Publishing, 2016. 748 p.
13. Kanfar Majed F. Effect of material anisotropy on time-dependent wellbore stability / Majed F. Kanfar, Z.Chen, S.S.Rahman // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. Vol. 78. P. 36-45.
14. Kanfar Majed F. Risk-controlled wellbore stability analysis in anisotropic formations / Majed F. Kanfar, Z.Chen, S.S.Rahman // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2015. Vol. 134. P. 214-222.
15. Wellbore stability analysis based on a new strength criterion / Xiangchao Shi, Wuqiang Cai, Yingfeng Meng, Gao Li, Jiaxue Li // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2015. Vol. 27. Part 2. P. 1005-1015.

Авторы: А.Г.Губайдуллин, канд. техн. наук, ассистент, azat771989@mail.ru (Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия), А.И.Могучев, канд. техн. наук, доцент, ufazatdekmf@rambler.ru (Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия).

Статья поступила в редакцию 26.09.2018

Статья принята к публикации 15.11.2018.