Stagnant Zone Features on Well Operations

X.I. Dadash-zada, S.H. Novruzova, E.V. Gadashova

Azerbaijan State University of Oil and Industry (Azadlig ave., 16/21, Baku, AZ 1010, Azerbaijan)

For correspondence:
Novruzova Sudaba / e-mail: sudaba.novruzova@mail.ru

Abstract

Performance of numerous lab and field researches have demonstrated that the basic laws described in fluid filtration theory are relevant for gas filtration as well. Analysis shows that as gasses possess higher permeability coefficients in comparison to fluids, sliding effect occurs, i.e. gas velocity near formation top and bottom (near boundaries) isn't, unlike fluid velocity, zero. Hence gas filtration is higher than described by linear filtration law. It is determined that development of skin zone at the bottom hole of the well, that increases resistivity of said zone via decrease in permeability, porosity, etc., greatly affects well productivity. Besides that development of that zone during radial gas filtration decreases volume of the depression funnel, that affects well productivity.

Keywords: stagnant zone, formation, bottom hole zone, skin zone, density, permeability, filtration velocity, volumetric filtration.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_01_60_69

For citation:
Dadash-zada X.I., Novruzova S.H., Gadashova E.V.
[Stagnant zone features on well operations]
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 60-69 *(in Russian)*

Hərəkətsiz zonanın xassələrinin istismar prosesində quyulara təsiri

X.İ. Dadaşzadə, S.H. Novruzova, E.V. Qədəşova

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 16/21, Bakı, AZ1010, Azərbaycan)

Yazışma üçün:
Novruzova Sudaba / e-mail: sudaba.novruzova@mail.ru

Xülasə

Çox faktorlu laboratoriya və mədən tədqiqatları göstərir ki, mayelər üçün verilmiş süzülmə nəzəriyyəsi, qazlar üçün də öz doğruluğunu saxlamış olur. Analiz göstərir ki, qaza görə keçiricilik əmsalının böyük olması, mayedən fərqli olaraq, süzülmə zamanı daha böyük sürətlər yaradır. Belə ki, tavan və dabana yaxın yerdə mayedən fərqli olaraq, sürət sıfıra bərabər olur, yəni divarda süzülmənin sürüşməsi baş verir. Ona görə də qazlarda xətti qanunun sürətinin artması müşahidə olunur. Məlumdur ki, quyunun məhsuldarlığına quyudibi ətrafı zonasında əmələ gəlmiş skin-zona əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərir, buda keçiriciliyin, məsaməliyin və s. azalması səbəbindən bu zonanın müqavimətini artırır. Əmələ gəlmiş zona qazın radial filtrasiyası zamanı quyunun məhsuldarlığına təsir edən depressiya qıfının həcminin azalması ilə nəticələnir.

Açar sözlər: hərəkətsiz zona, lay, quyudibi zona, Skin-zona, sıxlıq, keçiricilik, süzülmə sürəti, həcmi sərfi.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_01_60_69

УДК: 622.246

Особенности влияния застойной зоны на процесс эксплуатации скважин

Х.И. Дадаш-заде, С.Г. Новрузова, Э.В. Гадашова

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
(пр. Азадлыг, 16/21, Баку, AZ1010, Азербайджан)

Для переписки:
Новрузова Судаба / e-mail: sudaba.novruzova@mail.ru

Аннотация

Проведенные многочисленные лабораторные и промысловые исследования показали, что основные законы, изложенные в теории фильтрации жидкостей, справедливы и для фильтрации газов. Анализ показывает, что при более высоких значениях коэффициента проницаемости для газов по сравнению с жидкостями, возникает эффект скольжения, заключающийся в том, что скорость слоя газа, находящийся ближе к кровле и подошве пласта, т.е. у стенки, в отличие от жидкости не равна нулю. Поэтому расход газа оказывается большим, чем при линейном законе фильтрации. Установлено, что на производительность скважины существенное влияние оказывает возникновение Скин-зоны ПЗС, которая увеличивает сопротивление этой зоны за счет снижения проницаемости, пористости и др. Кроме этого, возникновение этой зоны при радиальной фильтрации газа уменьшает объем депрессионной воронки, которая влияет на производительность скважины.

Ключевые слова: застойная зона, пласт, призабойная зона, Скин-зона, плотность, проницаемость, скорость фильтрации, объемный расход.

Введение

В процессе разработки низкопроницаемых коллекторов нефтяные и газовые компании вынуждены прикладывать большие усилия и нести большие капиталовложения, связанные с применением новых технологий во всех стадиях вовлечения запасов в разведку и разработку.

Отметим, что особое значение для низкопроницаемых пластов имеет технология заканчивания скважины и вскрытия продуктивного пласта, физикохимические свойства бурового раствора и углеводорода при добыче.

Цель работы

В данной статье для оценки негативного влияния на призабойную зону пласта в расчетную схему вводится понятие «Скин-зона». Предлагается методика для обеспечения надежности выводов о степени воздействия конкретных технологий на комплексные свойства данной зоны, обязательное и неукоснительное соблюдение условий полной идентичности сравниваемых скважин.

Постановка задачи

Технология целевых термогидродинамических исследований скважин на изучение изменения Скин-фактора в процессе бурения, освоения и эксплуатации скважины, позволяет определить тенденцию очищения призабойной зоны и степени необратимого влияния на фильтрационные свойства пласта.

Исследования показывают, что проницаемость пористой среды для газа является функцией средней длины свободного пробега молекул, т.е. следовательно, проницаемость будет зависеть от давления, температуры и от состава газа, влияющих на значение свободного пробега молекулы.

Известно, что при фильтрации газа за счет изменения температуры и давления возникает зона, в которой увеличивается сопротивление пористой среды. Такую зону называют Скин-зоной. Возникновение данной зоны зависит от наличия жидкости в продукции скважины, выпадением конденсата, вызванного термодинамическими условиями в процессе движения газоконденсатной смеси в пласте, конденсацией водяного пара, обводненности скважин, закачкой антигидратов или антикоррозионных ингибиторов в скважину, загрязнением забоя скважины глинистым раствором, механическими частицами и т.д.

Решение задачи

Примем, что газ в пласте фильтруется при радиальном установившемся движении по линейному закону. В случае радиального движения массовая скорость фильтрации определяется как

$$\upsilon\rho F = -\frac{k\rho}{\mu} F \frac{dp}{dr} \tag{1}$$

где $\upsilon -$ скорость фильтрации газа; $F -$ площадь поперечного сечения пласта; $\rho -$ плотность газа в условиях пласта; $\mu -$ динамическая вязкость газа; $k -$ проницаемость пласта по газу; $\frac{dp}{dr} -$ градиент давления.

Левая часть данного уравнения представляет массовый расход газа

$$M = -\frac{k\rho}{\mu} F \frac{dp}{dr} \tag{2}$$

Из курса подземной гидравлики знаем, что площадь сечения при одномерном радиальном установившемся движении газа можно определить как $F = 2\pi rh$. Подставляем и решаем относительно (dp) и (dr) с учетом изотермического процесса, в качестве уравнения состояния газа можно принять

$$\rho = \rho_0 \frac{P}{P_0} \tag{3}$$

где P_0 – атмосферное давление; ρ_0 – плотность газа при атмосферном давлении; P – заданное давление

$$M = -\frac{k}{\mu} \cdot \rho_0 \cdot \frac{P}{P_0} \cdot 2\pi rh \frac{dp}{dr} \tag{4}$$

откуда имеем

$$\frac{M\mu P_0}{2\pi hk\rho_0} - \frac{dr}{r} = -Pdp \tag{5}$$

Граничные условия в рассматриваемом случае радиальной фильтрации газа следующие:

$$r = R_c; \qquad P = P_c$$
$$r = R_k; \qquad P = P_k \tag{6}$$
$$r = R_s; \qquad P = P_s$$

R_c – радиус скважины; R_k – радиус контура питания; R_s – радиус контура Скин-зоны; P_c – давление на забое скважины; P_s – давление на контуре Скин-зоны; P_k – давление на контуре питания.

Примем, что в зоне Скина проницаемость отличается от проницаемости пласта, связанной с загрязнением данной зоны. Подставляем граничные условия, имеем

$$\frac{M\mu P_0}{2\pi h\rho_0}\left[\int_{R_c}^{R_s} \frac{1}{k_s}\frac{dr}{r} + \int_{R_z}^{R_k} \frac{1}{k_s}\frac{dr}{r}\right] = \int_{P_c}^{P_z} Pdp + \int_{P_z}^{P_k} Pdp, \tag{7}$$

откуда после интегрирования имеем

$$\frac{M\mu P_0}{2\pi h\rho_0}\left[\frac{1}{k_s}\ln\frac{R_s}{R_c} + \frac{1}{k}\ln\frac{R_k}{R_s}\right] = \frac{P_s^2 - P_c^2}{2} + \frac{P_k^2 - P_s^2}{2}$$

Проведем упрощение, введем и отнимем параметр $\left(\ln\frac{R_s}{R_c}\right)$. Тогда в конечном виде имеем:

$$\frac{M\mu P_0}{2\pi h\rho_0 k}\left[\frac{k}{k_s}\ln\frac{R_s}{R_c} + \ln\frac{R_k}{R_s}\ln\frac{R_s}{R_c} - \ln\frac{R_s}{R_c}\right] = \frac{P_k^2 - P_c^2}{2}$$

Делаем группировку:

$$\frac{M\mu P_0}{2\pi h\rho_0 k}\left[\ln\frac{R_s}{R_c}\left(\frac{k}{k_s} - 1\right) + \ln\left(\frac{R_k}{R_s}\cdot\frac{R_s}{R_c}\right)\right] = \frac{P_k^2 - P_c^2}{2} \tag{8}$$

Теперь в данное уравнение введем понятие Скин-фактор.

$$S = \ln\frac{R_s}{R_c}\left(\frac{k}{k_s} - 1\right)$$

Тогда имеем

$$\frac{M\mu P_0}{2\pi h\rho_0 k}\left(S + \ln\frac{R_k}{R_c}\right) = \frac{P_k^2 - P_c^2}{2} \tag{9}$$

Данное уравнение относительно массового расхода можно записать:

$$M = \frac{\pi hk}{\mu P_0} \cdot \rho_0 \cdot \frac{P_k^2 - P_c^2}{\left(\ln\frac{R_k}{R_c} + S\right)}$$

Разделяя левую, правую часть на плотность газа при атмосферных условиях имеем

$$Q = \frac{\pi hk}{\mu P_0} \cdot \frac{P_k^2 - P_c^2}{\left(\ln\frac{R_k}{R_c} + S\right)} \tag{10}$$

В случае, когда $S=0$ имеем известную формулу из курса подземной гидравлики [1, 2].

Как видно, чем больше Скин-фактор, тем меньше объемный расход газа. Различными способами воздействия на призабойную зону, можно уменьшить значение Скин-фактора. Согласно промысловым наблюдениям, значение данного параметра определяется на основе исследования газовых скважин. Зная Скин-фактор, можно определить и давление, перепад давления, или депрессию:

$$Q\mu P_0\left(\ln\frac{R_k}{R_c}+S\right)=\pi hk\left(P_k^2-P_c^2\right).$$

В данной формуле

$$\left(P_k^2-P_c^2\right)=\left(P_k-P_c\right)\left(P_k+P_c\right)..$$

Тогда имеем

$$Q\mu P_0\left(\ln\frac{R_k}{R_c}+S\right)=\pi hk\left(P_k-P_c\right)\cdot\left(P_k+P_c\right)$$

Определим перепад

$$Q\mu\left(\ln\frac{R_k}{R_c}+S\right)=2\pi hk\frac{P_k+P_c}{2P_0}\left(P_k+P\right) \qquad (11)$$

Введем обозначение безразмерного давления $\overline{P}=\dfrac{P_k+P_c}{2P_0}$,

тогда имеем

$$\Delta P_s=\frac{Q\mu\left(\ln\dfrac{R_k}{R_c}+S\right)}{2\pi hk\overline{P}}.$$

если $S=0$, то имеем формулу для газа без учета Скин-фактора.

$$\Delta P=\frac{Q\mu\ln\dfrac{R_k}{R_c}}{2\pi hk\overline{P}}$$

Разница между этими депрессиями дает нам дополнительное давление

$$\Delta P_s'=\Delta P_s-\Delta P=\frac{Q\mu\left(\ln\dfrac{R_k}{R_c}+S\right)}{2\pi hk\overline{P}}-\frac{Q\mu\ln\dfrac{R_k}{R_c}}{2\pi hk\overline{P}}$$

После упрощений имеем

$$\Delta P_s'=\frac{Q\mu}{2\pi hk\overline{P}}\cdot S \qquad (12)$$

Отношение перепадов можно определить как

$$\frac{\Delta P_s}{\Delta P}=\frac{\dfrac{Q\mu\left(\ln\dfrac{R_k}{R_c}+S\right)}{2\pi hk\overline{P}}}{\dfrac{Q\mu\ln\dfrac{R_k}{R_c}}{2\pi hk\overline{P}}}=1+\frac{S}{\ln\dfrac{R_k}{R_c}} \qquad (13)$$

или

$$\Delta P_s=\Delta P\cdot\left(1+\frac{S}{\ln\dfrac{R_k}{R_c}}\right) \qquad (14)$$

Как видно, с увеличением значения Скин-фактора увеличивается сопротивление всей системы.

Теперь определим скорость фильтрации газа

$$\upsilon=\frac{QP_0}{2\pi hr_p}=\frac{1}{2\pi hr}\cdot\frac{\pi hk\left(P_k^2-P_c^2\right)}{\mu P_0\left(\ln\dfrac{R_k}{R_c}+S\right)}=$$
$$=\frac{k\left(P_k^2-P_c^2\right)\cdot P_0}{2\mu rP\left(\ln\dfrac{R_k}{R_c}+S\right)} \qquad (15)$$

Анализ данной формулы показывает, что поскольку дебит газа обратно пропорционален $\left(\ln\dfrac{R_k}{R_c}\right)$, изменение величины радиуса скважины или расстояния до контура питания.

Сопоставление данного выражения с формулой для дебита скважины при радиальной фильтрации несжимаемой жидкости показывает, что дебит газовой скважины пропорционален не разности давлений, называемой депрессией, а разности квадратов давлений [3, 4]. Тогда в результате этого, как и в случае одномерного движения газа, индикаторной линией при этом является парабола.

Введем новый параметр:

$$\overline{Q} = \frac{Q}{\frac{P_k + P_c}{2P_0}} \tag{16}$$

Тогда объемный расход газа можно определить как

$$\overline{Q} = \frac{2\pi kh}{\mu} \cdot \frac{P_k - P_c}{\left(\ln\frac{R_k}{R_c} + S\right)} \tag{17}$$

Данная формула полностью совпадает с формулой для дебита скважины при радиальной фильтрации несжимаемой жидкости.

Решим данное уравнение относительно проницаемости. Тогда находим формулу для определения коэффициента проницаемости в условиях радиальной фильтрации газа

$$Q\mu P_0 \cdot \left(\ln\frac{R_k}{R_c} + S\right) = \pi kh \cdot \left(P_k^2 - P_c^2\right)$$

оттуда

$$k = \frac{Q\mu P_0\left(\ln\frac{R_k}{R_c} + S\right)}{\pi kh \cdot \left(P_k^2 - P_c^2\right)} \tag{18}$$

или

$$k = \frac{\overline{Q}\mu\left(\ln\frac{R_k}{R_c} + S\right)}{2\pi h \cdot \left(P_k^2 - P_c^2\right)} \tag{19}$$

Теперь определим распределение давления в пласте. Для этого проинтегрируем уравнение в пределах от давления на забое скважины до требуемой точки

$$\frac{M\mu P_0}{2\pi h\rho_0}\left[\int_{R_c}^{R_s}\frac{1}{k_s}\cdot\frac{dr}{r} + \int_{R_c}^{R}\frac{1}{k}\cdot\frac{dr}{r}\right] = \int_{P_c}^{P_s} PdP + \int_{P_s}^{P} PdP \tag{20}$$

что дает

$$\frac{M\mu P_0}{2\pi h\rho_0}\left[\frac{1}{k_s}\ln\frac{R_s}{R_c} + \frac{1}{k}\ln\frac{R}{R_s}\right] = \frac{P_s^2 - P_c^2}{2} + \frac{P_s^2 - P^2}{2} \tag{21}$$

После упрощений имеем

$$\frac{M\mu P_0}{2\pi h\rho_0}\left[\frac{1}{k_s}\ln\frac{R_s}{R_c} + \frac{1}{k}\ln\frac{R}{R_s}\right] = P^2 - P_c^2$$

Введем и отнимем выражение $\frac{1}{k_s}\left(\ln\frac{R_s}{R_c}\right)$ в скобку

$$\frac{M\mu P_0}{2\pi h\rho_0}\left[\frac{1}{k_s}\ln\frac{R_s}{R_c} + \frac{1}{k}\ln\frac{R}{R_s} + \frac{1}{k}\ln\frac{R_s}{R_c} - \frac{1}{k}\ln\frac{R_s}{R_c}\right] = P^2 - P_c^2$$

Проведем группировку

$$\frac{M\mu P_0}{2\pi h\rho_0 k}\left[\frac{1}{k_s}\ln\frac{R_s}{R_c} + \frac{1}{k}\ln\frac{R}{R_s} + \frac{1}{k}\ln\frac{R_s}{R_c} - \frac{1}{k}\ln\frac{R_s}{R_c}\right] = P^2 - P_c^2$$

$$\frac{M\mu P_0}{2\pi h\rho_0 k}\left[\ln\frac{R_s}{R_c}\left(\frac{k}{k_s} - 1\right) + \ln\left(\frac{R}{R_s}\cdot\frac{R_s}{R_c}\right)\right] = P^2 - P_c^2 \tag{22}$$

Введем понятие Скин-фактора

$$S = \ln\frac{R_s}{R_c}\left(\frac{k}{k_s} - 1\right) \tag{23}$$

В конечном виде имеем

$$\frac{M\mu P_0}{2\pi h\rho_0 k}\left(S + \ln\frac{R}{R_c}\right) = P^2 - P_c^2 \tag{24}$$

Теперь определим давление в заданной точке

$$P = \sqrt{P_c^2 + \frac{M\mu P_0}{\pi h\rho_0 k}\left(S + \ln\frac{R}{R_c}\right)} \tag{25}$$

Подставляем значения массового расхода, имеем:

$$P=\sqrt{P_c^2+\frac{\pi hk}{\mu P_0}\rho_0\frac{\mathrm{P_k^2}-P_c^2}{\left(\ln\frac{\mathrm{R_k}}{\mathrm{R_c}}+S\right)}\cdot\frac{\mu P_0}{\pi h\rho k}\left(S+\ln\frac{R}{R_c}\right)}$$

После упрощений имеем

$$P=\sqrt{P_c^2+\frac{\mathrm{P_k^2}-P_c^2}{\left(\ln\frac{\mathrm{R_k}}{\mathrm{R_c}}+S\right)}\cdot\left(\ln\frac{R}{R_c}+S\right)} \tag{26}$$

Данная формула является искомым уравнением для определения распределения давления в пласте при радиальной установившейся фильтрации газа с учетом Скин-фактора.

Для решения многочисленных задач промысловой практики необходимо определить величину средневзвешенного по объему пласта давления

$$\bar{P}=\frac{1}{\Omega}\int_{\Omega}Pd\Omega \tag{27}$$

где $\Omega-$объем порового пространства всего пласта; $d\Omega-$элементарный объем порового пространства.

Для нахождения величины средневзвешенного по объему пласта давления на расстоянии (r) от скважины выделим кольцевой элемент пласта широкого (dr).

Объем порового пространства этого элемента равен

$$d\Omega=2\pi\cdot h\cdot m\cdot r\cdot dr \tag{28}$$

Объем порового пространства с учетом Скин-зоны будет

$$\Omega=\pi\left[\left(R_k^2-R_s^2\right)+\left(R_s^2-R_c^2\right)\right]\cdot h\cdot m \tag{29}$$

Решая совместно данные уравнение, имеем

$$\bar{P}=\frac{1}{\pi\left[\left(R_k^2-R_s^2\right)+\left(R_k^2-R_c^2\right)\right]\cdot h\cdot m}\cdot\int_{\Omega}P\cdot\pi\cdot h\cdot m\cdot r\cdot dr \tag{30}$$

Под интегральным значением давления можно определить по формуле (26). Тогда после подстановки имеем

$$\bar{P}=\frac{2\pi hm}{\pi\left[\left(R_k^2-R_s^2\right)+\left(R_s^2-R_c^2\right)\right]\cdot h\cdot m}\int_{R_c}^{R_k}\sqrt{P_c^2+\frac{P_k^2-P_c^2}{\left(\ln\frac{R_k}{R_c}+S\right)}\ln\left(\frac{R}{R_c}+S\right)}\cdot rdr$$

Разделим данное уравнение на контурное давление и введем безразмерные величины

$$\zeta=\frac{\bar{P}}{P_k};\ R^*=\frac{r}{R};\ R^*=\frac{R_k}{R_c};\ \zeta=\frac{P_c}{P_l};R^*=\frac{R_s}{R_k}\ .$$

Учитывая выше сказанное, имеем

$$\frac{\bar{P}}{P_k}=\frac{2\pi hm}{\pi\left[\left(\frac{R_k^2}{R_c^2}-\frac{R_c^2}{R_c^2}\right)+\left(\frac{R_s^2}{R_c^2}-\frac{R_c^2}{R_c^2}\right)\right]\cdot h\cdot m}\int_{R_c}^{R_k}\sqrt{\frac{P_c^2}{P_k^2}+\frac{\frac{P_k^2}{P_k^2}-\frac{P_c^2}{P_k^2}}{\left(\ln\frac{R_k}{R_c}+S\right)}\cdot\left(\ln\frac{R_k}{R_c}+S\right)}$$

После сокращений с учетом безразмерных параметров, имеем

$$\zeta=\frac{2}{\left(R_k^{*2}-1\right)+\left(R_s^{*2}-1\right)}\cdot\int_{R_c}^{R_k}\sqrt{\xi^2+\frac{1-\xi^2}{\ln R_k^*+S}\cdot\left(\ln R^*+S\right)}\cdot R^*\cdot dR$$

Данное уравнение можно записать и как

$$\bar{P}=\frac{2}{\left(R_k^2-R_s^2\right)+\left(R_s^2-R_c^2\right)}\int_{R_c}^{R_k}\sqrt{P_k^2-\frac{P_k^2-P_c^2}{\left(\ln\frac{R_k}{R_c}+S\right)}\left(\ln\frac{R_k}{r}+S\right)}\cdot rdr$$

Учитывая безразмерные параметры, имеем

$$\bar{P}=\frac{2}{\left(R_k^2-R_s^2\right)+\left(R_s^2-R_c^2\right)}\int_{R_c}^{R_k}\sqrt{P_k^2\left[1-\frac{P_k^2-P_c^2}{P_k^2\left(\ln\frac{R_k}{R_c}+S\right)}\left(\ln\frac{R_k}{r}+S\right)\right]}\cdot rdr$$

После упрощений имеем

$$\bar{P}=\frac{2P_k}{\left(R_k^2-R_s^2\right)+\left(R_s^2-R_c^2\right)}\int_{R_c}^{R_k}\sqrt{1-\frac{P_k^2-P_c^2}{P_k^2\left(\ln\frac{R_k}{R_c}+S\right)}\left(\ln\frac{R_k}{r}+S\right)}\cdot rdr$$

Разделяя левую и правую части данного уравнения на контурное давление, имеем

$$\zeta=\frac{\bar{P}}{P_k}=\frac{2}{\left(R_k^2-R_s^2\right)+\left(R_s^2-R_c^2\right)}\int_{P_c}^{P_k}\sqrt{1-\frac{P_k^2-P_c^2}{P_k^2\left(\ln\frac{R_k}{R_c}+S\right)}\left(\ln\frac{R_k}{r}+S\right)}\cdot rdr$$

Вводим в данное уравнение безразмерные параметры

$$\zeta = \frac{2}{\left(R_k^2 - R_c^2\right)} \int_{R_c}^{R_k} \sqrt{1 - \frac{P_k^2 - P_c^2}{P_k^2 \left(\ln \frac{R_k}{R_c} + S\right)} \left(\ln \frac{R_k}{r} + S\right)} \cdot r dr$$

или

$$\zeta = \frac{2}{\left(R_k^2 - R_c^2\right)} \int_{R_c}^{R_k} \sqrt{1 - \frac{P_k^2 - P_c^2}{P_k^2 \left(\ln \frac{R_k}{R_c} + S\right)} \left(\ln \frac{R_k}{R_c} - \ln \frac{r}{R_c} + S'\right)} \cdot r dr$$

оттуда имеем

$$\zeta = \frac{2}{\left(R_k^2 - R_c^2\right)} \int_{R_c}^{R_k} \sqrt{1 - \frac{1-\zeta^2}{\left(\ln R_k^* + S\right)} \left(\ln \frac{R_k^*}{R^*} + S\right)} \cdot R^* dR^*$$

Введем новое обозначение

$$x = \frac{1-\zeta^2}{\left(\ln R_k^* + S\right)} \left(\ln \frac{R_k^*}{R^*} + S\right)$$

тогда имеем

$$\sqrt{1 - \frac{1-\xi^2}{\left(\ln R_k^* + S\right)} \left(\ln \frac{R_k^*}{R^*} + S\right)} = \sqrt{1-x}$$

Из курса высшей математики знаем, что значение $\sqrt{1-x}$ можно разложить в ряд $\sqrt{1-x} = 1 - \frac{1}{2} \cdot x - \frac{1}{8} x^2 ....$ согласно ранним работам, учитывая первые два члены ряда и заменив действительными значениями (x), имеем

$$\zeta = \frac{2}{R_k^{*2} - 1} \int_1^{R^*} 1 - \frac{1-\zeta^2}{2 \cdot \left(\ln R_k^* + S\right)} \cdot \left(\ln \frac{R_k^*}{R^*} + S\right) \cdot R^* dR^*$$

Вторую скобку напишем как

$$\left(\ln \frac{R_k^*}{R^*} + S\right) = \ln R_k^* - \ln R^* + S = -\left(\ln R^* - \ln R_k^* - S\right) = -\left(\ln \frac{R^*}{R_k^*} - S\right)$$

Подставляя значение данного выражения в общее уравнение, имеем

$$\zeta = \frac{2}{R_k^{*2} - 1} \int_1^{R^*} \left[1 + \frac{1-\zeta^2}{2 \cdot \left(\ln R_k^* + S\right)} \cdot \left(\ln \frac{R^*}{R_k^*} - S\right)\right] \cdot R^* dR^*$$

Выполнив интегрирование, имеем

$$\zeta = \frac{2}{R_k^{*2} - 1} \cdot \left[\int_1^{R_k^*} R^* dR^* + N \int_1^{R^*} \left(\ln R^* - \ln R_k^* - S\right) \cdot R^* dR^*\right]$$

где $N = \frac{1-\zeta^2}{2 \cdot \left(\ln R_k^* + S\right)}$; оттуда имеем

$$\zeta = \frac{2}{R_k^{*2} - 1} \left[\frac{R^{*2}}{2} - \frac{1}{2} + N\left(\int_1^{R_k^*} \ln R^* \cdot R^* dR^* - \int_1^{R_k^*} \ln R^* \cdot R^* dR^* - S \int_1^{R_k^*} R^* dR^*\right)\right]$$

Проведем группировку

$$\zeta = \frac{2}{R_k^{*2} - 1} \cdot \left\{\frac{R_k^{*2}}{2} - \frac{1}{2} + \frac{1-\varepsilon^2}{2\left(\ln R_k^* + S\right)} \times \right.$$
$$\left. \times \left[\left(\frac{R_k^{*2}}{2} \ln R_k^* - \frac{R^{*2}}{4}\right) - \left(\frac{R_k^{*2}}{2} \ln 1 - \frac{1}{4}\right) - \ln R_k^* \left(\frac{R_k^{*2}}{2} - \frac{1}{2}\right) - S\left(\frac{R_k^{*2}}{2} - \frac{1}{2}\right)\right]\right\}$$

Вскрывая скобки, имеем

$$\zeta = \frac{2}{R_k^{*2} - 1} \cdot \left\{\frac{R_k^{*2}}{2} - \frac{1}{2} + \frac{1-\varepsilon^2}{2(\ln R_k^* + S)} \cdot \left[\frac{R_k^{*2}}{2} \ln R_k^* - \frac{R_k^{*2}}{4} + \frac{1}{4} - \frac{R_k^{*2}}{2} \ln R_k^* + \frac{1}{2} \ln R_k^* - \frac{R_k^{*2}}{2} S + \frac{1}{2} S\right]\right\}$$

Проведем группировки

$$\zeta = \frac{2}{R_k^{*2} - 1} \cdot \left\{\frac{1}{2}(R_k^{*2} - 1) + \frac{1-\xi^2}{2(\ln R_k^* + S)} \left[\frac{1}{4}(1 - R_k^{*2}) + \frac{1}{2}(\ln R_k^{*2} - R_k^{*2} S + S\right]\right\}$$

Если $S = 0$, тогда имеем формулу профессора В.Н. Щелкачева:

$$\zeta = \frac{2}{R_k^{*2} - 1} \cdot \left\{\frac{1}{2}\left(R_k^{*2} - 1\right) = \frac{1-\zeta^2}{2 \ln R_k^*} \left[\frac{1}{4}\left(R_k^{*2} - 1\right) - \frac{1}{2} \ln R_k^*\right]\right\}$$

После сокращений

$$\zeta = \frac{2}{R_k^{*2} - 1} \cdot \left\{\frac{1}{2}\left(R_k^{*2} - 1\right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{1-\xi^2}{2 \ln R_k^*} \left[\frac{1}{2}\left(R_k^{*2} - 1\right) - \ln R_k^*\right]\right\}$$

Сокращая, имеем

$$\zeta = 1 - \left[\frac{1-\zeta^2}{2 \ln R_k^*} \left(\frac{1}{2} - \frac{\ln R_k^*}{R_k^{*2} - 1}\right)\right] = 1 - \frac{1-\zeta^2}{2} \left(\frac{1}{2 \ln R_k^*} - \frac{1}{R_k^{*2} - 1}\right)$$

Теперь вернемся к первой формуле

$$\zeta = \frac{2}{\left(R_k^{*2} - 1\right)} \cdot \left\{\frac{1}{2}\left(R_k^{*2} - 1\right) + \frac{1-\xi^2}{2 \ln\left(R_k^* + S\right)} \left[-\frac{1}{4}\left(R_k^{*2} - 1\right) + \frac{1}{2}\left(\ln R_k^* - R_k^{*2} S + S\right)\right]\right\}$$

Вскроем скобку:

$$\zeta = \frac{2}{\left(R_k^{*2} - 1\right)} \left\{\frac{1}{2}\left(R_k^{*2} - 1\right) - \frac{1-\zeta^2}{2\left(\ln R_k^* + S\right)} \left[\frac{1}{4}\left(R_k^{*2} - 1\right) - \frac{1}{2}\left(\ln R_k^* - R_k^{*2} S + S\right)\right]\right\}$$

После упрощений имеем

$$\zeta = 1 - \frac{2}{\left(R_k^{*2} - 1\right)} \cdot \frac{1-\zeta^2}{2\left(\ln R_k^* + S\right)} \cdot \frac{1}{2}\left[\frac{1}{2}\left(R_k^{*2} - 1\right) - \left(\ln R_k^* - R_k^{*2} S + S\right)\right]$$

или

$$\zeta = 1 - \frac{1-\zeta^2}{2\left(\ln R_k^* + S'\right)}\left[\frac{2}{\left(R_k^{*2}-1\right)}\cdot\frac{1}{2}\left(R_k^{*2}-1\right) - \frac{2}{\left(R_k^{*2}-1\right)}\ln\left(R_k^* - S'\right)\cdot\left(R_k^{*2}-1\right)\right]$$

более упрощено:

$$\zeta = 1 - \frac{1-\zeta^2}{2\left(\ln R_k^* + S\right)}\left\{\frac{1}{2} - \frac{1}{2\cdot\left(R_k^{*2}-1\right)}\left[\ln R_k^* - S\left(R_k^{*2}-1\right)\right]\right\}$$

или

$$\zeta = 1 - \frac{1-\zeta^2}{2}\left\{\frac{1}{2\left(\ln R_k^* + S\right)} - \frac{\ln R_k^*}{\left(\ln R_k^* + S\right)\cdot\left(R_k^{*2}-1\right)} + \frac{S\left(R_k^{*2}-1\right)}{\left(\ln R_k^* + S\right)\cdot\left(R_k^{*2}-1\right)}\right\}$$

Тогда имеем

$$\zeta = 1 - \frac{1-\zeta^2}{2}\left\{\frac{1}{2\left(\ln R_k^* + S\right)} - \frac{1}{\left(\ln R_k^* + S\right)\cdot\left(R_k^{*2}-1\right)}\cdot\left(\ln R_k^* - S\right)\right\}$$

или более обобщенно

$$\zeta = 1 - \frac{1-\zeta^2}{2\left(\ln R_k^* + S\right)}\cdot\left[\frac{1}{2} - \frac{\left(\ln R_k^* - S\right)}{\left(R_k^{*2}-1\right)}\right] \quad \text{если} \quad S = 0$$

имеем

$$\zeta = 1 - \frac{1-\zeta^2}{2\ln R_k^*}\left[\frac{1}{2} - \frac{\ln R_k^*}{\left(R_k^{*2}-1\right)}\right] = 1 - \frac{1-\zeta^2}{2}\left[\frac{1}{2\ln R_k^*} - \frac{1}{R_k^{*2}-1}\right].$$

Данная формула выведена В.Н. Щелкачевым. Ее можно записать:

$$1-\zeta = \frac{1-\zeta^2}{2\left(\ln R_k^* + S\right)}\left[\frac{1}{2} - \frac{\ln R_k^* - S'}{R_k^{*2}-1}\right]$$

Известно, что вращение пьезометрической кривой вокруг оси скважины дает нам так называемую воронку депрессии. Обозначим условно объемом воронки депрессии (Ω), что характеризует приведенный к атмосферному давлению объем газа, который необходимо получить из пласта. При этом в пласте установилось распределение давления, соответствующее установившемуся радиальному давлению газа [5-8].

Отметим, что если во всем пласте давление было одинаково и равно контурному давлению, то при подсчете запасов газа в нем составляло бы величину $\left(\Omega P_k\right)$. Следовательно, объем депрессионной воронки равен:

$$\Omega_B = \Omega P_k - \Omega\overline{P} = \Omega\left(P_k - \overline{P}\right) = \Omega P_k\left(1-\zeta\right)$$

Решая совместно данные уравнения, с учетом Скин-зоны, имеем

$$\Omega_B = \Omega P_k \frac{1-\zeta^2}{2\left(\ln R_k^* + S\right)}\left[\frac{1}{2} - \frac{\ln R_k^* - S}{R_k^{*2}-1}\right]$$

Проведенные расчеты показывают, что величина $\zeta \approx 1$, в условиях радиальной фильтрации объем депрессионной воронки мал и при подсчете запасов газа в большинстве случаев этим параметром можно, пренебречь.

При случае, когда $S = 0$, имеем:

$$\Omega_B = \Omega P_k \frac{1-\zeta^2}{2}\left[\frac{1}{2\cdot\ln R_k^*} - \frac{1'}{R_k^{*2}-1}\right]$$

Как видно из уравнения, с увеличением Скин-фактора или Скин-зоны уменьшается объем депрессионной воронки. Также отметим, что аналогии между установившимся движением газа в пористой среде и фильтрации жидкости полностью справедливы и при радиальной фильтрации газа.

Заключение

Характерной особенностью установившейся радиальной фильтрации газа с учетом Скин-фактора, является весьма малое падение давления вдали от скважины и чрезвычайно резкое падение давления в Скин-зоне в непосредственной близости от скважины.

Высокие значения коэффициента проницаемости для газов, по сравнению с жидкостями, объясняется эффектом скольжения, заключающийся в том, что скорости слоя газа, находящиеся в непосредственной близости от неподвижной твердой стенки пласта, в отличие от жидкости, не равны нулю.

Появление Скин-зоны призабойной зоне скважины увеличивает сопротивление данной зоны за счет снижения показателей пласта, (проницаемость, пористость и др.), что будет влиять на производительность скважины.

С возникновением Скин-зоны в условиях радиальной фильтрации газа объем депрессионной воронки уменьшается, что будет влиять на производительность скважины.

REFERENCES

1. **Salavatov T.Ş**. Neft yataqlarının işlənməsində üfüqi quyuların istismarının elementləri. Dərs vəsaiti. Bakı. *Maarif*. 2002, 92 s. *(in Azerbaijani)*
2. **Salavatov T.Ş., İsmayılov F.S., Osmanov B.A.** Neftin quyu ilə çıxarılma texnologiyası, 2012, 536 s. *(in Azerbaijani)*
3. **Mishchenko I.T.** Skvazhinnaya dobycha nefti. RGU nefti i gaza im. I. Gubkina. M. 2003, 816 s. *(in Russian)*
4. **Economides M., Oligner R., Valko P.** Unified Fracture Design Orsa Press, Alvin, Texas, 2004, 193 p. *(in English)*
5. **Dadashzade H.I., Novruzova S.G.** Harakter dvizheniya uprugoj vyazkoplastichnoj zhidkosti v trubah**.** *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*, 2020. Cild 12, № 4. S. 47-52 (*in Russian)*
6. **Səmədov T.Ə., Novruzova S.H.** Dəniz qaz və qazkondensat yataqlarında quyular üzrə hasilat proqnozunun təyini. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*, 2020. Cild 12, № 4. S. 114-117 (*in Azerbaijani*)
7. **Masket M.** Techenie odnorodnyh zhidkostej v poristoj srede. Moskva-Izhevsk. 2004. 327 s. *(in Russian)*
8. **Shchelkachev V.N., Lapuk B.B.** Podzemnaya gidravlika. Moskva-Izhevsk. 2001. 763 s. *(in Russian)*

Поступило: *22.07.2021*
Доработано: *07.03.2022*
Принято: *15.03.2022*