УДК 622.276.031
DOI 10.56525/QGNH2054

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ СКВАЖИН ПОСЛЕ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

Бисембаева К.Т.*, Хадиева А.
Университет Есенова, Актау, Казахстан
e-mail: karlygash.bissembayeva@yu.edu.kz, hadieva_albina@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследований, направленных на оценку технологической эффективности горизонтальной трещины, сформированной в призабойной зоне однородного пласта, с учётом влияния упругих свойств фильтрующейся жидкости на фильтрационные процессы и продуктивность скважины. Предложен подход, позволяющий определить характер изменения коэффициента продуктивности в условиях однородного кругового пласта при линейной фильтрации однородной жидкости до момента обводнения коллектора, когда в призабойной зоне формируется горизонтальная трещина. Приведены результаты исследований, учитывающие влияние упругости фильтрующейся жидкости при наличии горизонтальной трещины в призабойной зоне скважины. Полученные зависимости позволяют более точно прогнозировать изменение дебита скважины в процессе эксплуатации месторождения. Установлено, что наличие горизонтальной трещины способствует интенсификации фильтрационных процессов и повышению коэффициента продуктивности скважины. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и оптимизации технологий разработки нефтегазовых месторождений Практическая значимость работы заключается в возможности повышения эффективности эксплуатации скважин за счёт рационального выбора параметров гидроразрыва пласта.

Ключевые слова. пласт, скважина, продуктивность, гидроразрыв пласта, вертикальная трещина, горизонтальная трещина, фильтрация, упругость.

Введение

Известно, что при проведении гидроразрыва пласта (ГРП) формируются трещины различной ориентации и геометрии, что определяется как геомеханическими свойствами пород, так и условиями нагружения и параметрами закачки. Согласно классическим представлениям, гидравлические трещины преимущественно распространяются в вертикальной плоскости, перпендикулярной минимальному главному напряжению [1].

Вместе с тем современные исследования показывают, что в реальных пластовых условиях формируется сложная система трещин, включающая отклонённые и горизонтальные элементы, особенно вблизи ствола скважины. Это связано с неоднородностью напряжённого состояния, наличием естественной трещиноватости и изменением фильтрационных характеристик в призабойной зоне [2]. Практические и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при определённых условиях возможно формирование горизонтальных трещин, существенно влияющих на структуру фильтрационных потоков и эффективность дренирования пласта.

Особое внимание в последние годы уделяется изучению роли упругих свойств системы «пласт–флюид». Показано, что сжимаемость трещин и упругость закачиваемой жидкости оказывают существенное влияние на процессы инициирования и распространения трещин, а также на динамику давления в скважине [3]. Игнорирование этих факторов может приводить к некорректной оценке параметров ГРП и прогноза продуктивности скважин.

Несмотря на значительный объём исследований, большинство работ посвящено вертикальным или комплексным сетям трещин, формируемым при многостадийном ГРП [4]. В то же время вопросы, связанные с оценкой эффективности горизонтальных трещин,

формирующихся в призабойной зоне однородного пласта, остаются недостаточно изученными.

В связи с этим в настоящей работе представлены результаты исследований, направленных на оценку технологической эффективности горизонтальной трещины, созданной в призабойной зоне однородного пласта, с учётом влияния упругости фильтрующейся жидкости на фильтрационные процессы и продуктивность скважины.

Материалы и методы.

Рассматривается однородный нефтяной пласт круглой формы радиусом $R_к$, эффективной толщиной $h_н$, абсолютной проницаемостью K, относительными фазовыми проницаемостями и вязкостями для нефти и воды соответственно $\overline{K}_н$ и $\overline{K}_в$, $\mu_н$ и $\mu_в$. В центре пласта расположена одна скважина с радиусом r_c. В пласте проведен ГРП с образованием горизонтльной трещины, радиусом R_T и толщиной h_T (рисунок 3.4) .

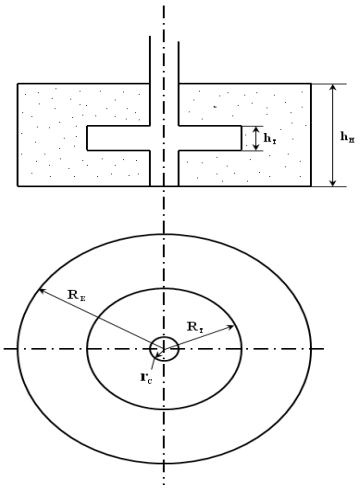


Рисунок 3.4 Схема скважины с горизонтальной трещиной

Фильтрация жидкости происходит по линейному закону. Формула Дюпюи в общем виде для определения коэффициента продуктивности имеет вид [5-9]:

$$q = \frac{2\pi \cdot K \cdot h_н \left(P_{пл} - P_c\right)}{\mu_{ж} \cdot \ln \frac{R_к}{r_c}} \tag{1}$$

где: K - проницаемость пласта, м^2; $h_н$ - толщина, м; $P_{пл}$, P_c - соответственно пластовое и забойное давления, Па; $\mu_{ж}$ - вязкость жидкости, Па·с; $R_к$ и r_c - соответственно радиусы контура питания и скважины, м.

Известно, что в практике разработки формула (1) имеет вид:

$$q = K_{прод} \cdot \left(P_{пл} - P_c\right) \tag{2}$$

Сравнивая (1) и (2), можно установить, что коэффициент продуктивности определяется из соотношения следующих гидродинамических параметров:

$$K_{прод} = \frac{2\pi \cdot K_{ср} \cdot h_{н}}{\mu_{ж} \cdot \ln \frac{R_{к}}{r_{с}}} \quad (3)$$

Формула (3) получена для общего случая. Для созданной горизонтальной трещины этот параметр имеет вид:

$$K_{прод}^{тр} = \frac{2\pi \cdot K_{Т} \cdot h_{Т}}{\mu_{ж} \cdot \ln \frac{R_{К}}{R_{Т}}} \quad (4)$$

Для остальной части пласта, т.е. для порового участка указанный параметр можно представить так:

$$K_{прод}^{пор} = \frac{2\pi \cdot K_{пор} \cdot (h_{н} - h_{Т})}{\mu_{ж} \cdot \ln \frac{R_{к}}{r_{с}}} \quad (5)$$

Тогда общее значение коэффициента продуктивности можно представить:

$$K_{прод}^{общ} = \frac{2\pi \cdot K_{Т} \cdot h_{Т}}{\mu_{ж} \cdot \ln \frac{R_{К}}{R_{Т}}} + \frac{2\pi \cdot K_{пор} \cdot (h_{н} - h_{Т})}{\mu_{ж} \cdot \ln \frac{R_{к}}{r_{с}}} =$$

$$= \frac{2\pi \cdot K_{Т} \cdot h_{Т} \cdot \ln \frac{R_{к}}{r_{с}} + 2\pi \cdot K_{пор} \cdot (h_{н} - h_{Т}) \cdot \ln \frac{R_{К}}{R_{Т}}}{\mu_{ж} \cdot \ln \frac{R_{К}}{R_{Т}} \cdot \ln \frac{R_{к}}{r_{с}}} = \quad (6)$$

$$= 6{,}28 \cdot \frac{K_{Т} \cdot h_{Т} \cdot \ln \frac{R_{к}}{r_{с}} + K_{пор} \cdot (h_{н} - h_{Т}) \cdot \ln \frac{R_{К}}{R_{Т}}}{\mu_{ж} \cdot \ln \frac{R_{К}}{R_{Т}} \cdot \ln \frac{R_{к}}{r_{с}}} =$$

$$= 6{,}28 \cdot \frac{K_{Т} \cdot h_{Т} \cdot \frac{1}{\ln R_{К} / R_{Т}} + K_{пор} \cdot (h_{н} - h_{Т}) \cdot \frac{1}{\ln R_{К} / r_{с}}}{\mu_{ж}};$$

После некоторого преобразования окончательно получили:

$$K_{прод}^{общ} = \frac{6{,}28 \cdot K_{Т} \cdot h_{Т} \left[\frac{1}{\ln R_{К} / R_{Т}} + \frac{K_{пор} \cdot (h_{н} - h_{Т})}{K_{Т} \cdot h_{Т}} \cdot \frac{1}{\ln R_{К} / r_{с}} \right]}{\mu_{ж}} \quad (7)$$

Таким образом, получена формула, с помощью которой можно определить характер изменения коэффициента продуктивности в условиях однородного кругового пласта при линейной фильтрации однородной жидкости, до обводнения эксплуатируемого коллектора, когда в призабойной зоне образовалась горизонтальная трещина.

Как видно из полученного соотношения, исследуемый параметр зависит от комплекса гидродинамических параметров, таких как проницаемость, толщина пластов и вязкость жидкости, соответственно трещина и поровое пространство.

Тогда технологическую эффективность по увеличению продуктивности пластов можно определить путем использования следующей формулы, полученной на основании разделения коэффициентов рассматриваемого параметра после и до ГРП.

$$\Delta K_{прод} = \frac{\dfrac{6{,}28 \cdot K_T \cdot h_T \left[\dfrac{1}{\ln R_K / R_T} + \dfrac{K_{пор}^{ср} \cdot (h_н - h_T)}{K_T \cdot h_T} \cdot \dfrac{1}{\ln R_K / r_c} \right]}{\mu_{ж}}}{\dfrac{6{,}28 \cdot K \cdot h_н}{\mu_{ж} \cdot \ln R_K / r_c}} = \\ = \frac{K_T \cdot h_T \cdot \left[\dfrac{\ln R_K / r_c}{\ln R_K / R_T} + \dfrac{K_{пор}^{ср} \cdot (h_н - h_T)}{K_T \cdot h_T} \right]}{K \cdot h_н} \tag{8}$$

Окончательно имеем:

$$\Delta K_{прод} = \frac{K_T \cdot h_T}{K_{ср} \cdot h_н} \cdot \left[\frac{\ln R_K / r_c}{\ln R_K / R_T} + \frac{K}{} \right] \\ \frac{\dfrac{6{,}28 \cdot K_T \cdot h_T \left[\dfrac{1}{\ln R_K / R_T} + \dfrac{K_{пор}^{ср} \cdot (h_н - h_T)}{K_T \cdot h_T} \cdot \dfrac{1}{\ln R_K / r_c} \right]}{\mu_{ж}}}{\dfrac{6{,}28 \cdot K \cdot h_н}{\mu_{ж} \cdot \ln R_K / r_c}} = \\ = \frac{K_T \cdot h_T \cdot \left[\dfrac{\ln R_K / r_c}{\ln R_K / R_T} + \dfrac{K_{пор}^{ср} \cdot (h_н - h_T)}{K_T \cdot h_T} \right]}{K \cdot h_н} \tag{9}$$

Результаты и обсуждение. Таким образом, создана математическая модель работы добывающей скважины по оценке ее работы при наличии в ее призабойной зоне горизонтальной трещины в условиях однородного строения продуктивного коллектора, без учета упругости фильтрующейся жидкости.

С другой стороны, коэффициент продуктивности в промысловых условиях определяется по известной формуле Дюпии по следующему соотношению для пористого пласта согласно формуле (1):

$$K_{\text{пор}} = q \frac{\alpha_k}{\left[1 - e^{-\alpha_k (\text{P}_{\text{пл}} - \text{P}_{\text{с}})}\right]} \tag{10}$$

для пористого пласта с учетом трещины

$$K_{\text{п+т}} = K_{\text{пор}} + K_{\text{тр}} = \frac{q}{\text{P}_{\text{пл}} - \text{P}_{\text{с}}} + \frac{q_{\text{тр}}}{\text{P}_{\text{пл}} - \text{P}_{\text{т}}}; \tag{11}$$

где q и $q_{\text{тр}}$ - соответственно дебиты скважины по жидкости для пористого и трещиноватого пласта;

$\text{P}_{\text{пл}}$, $\text{P}_{\text{с}}$, $\text{P}_{\text{т}}$- соответственно пласта на контуре, забое скважины и трещине.

Ниже предлагаются результаты исследований, учитывающие упругости фильтрующейся жидкости при наличии в призабойной зоне скважины горизонтальной трещины. Пласт однородный. Тогда коэффициент продуктивности в промысловых условиях

с учетом вышеуказанных факторов (упругости жидкости и сжимаемости трещин в пористых пластах) определяется по следующим соотношениям, с учетом формул А.Т. Горбунова полученных в работе [10]:

для пористого пласта

$$K_{\text{пор}} = q\,\frac{\alpha_k}{\left[1-e^{-\alpha_k(\text{P}_{\text{пл}}-\text{P}_{\text{с}})}\right]} \tag{12}$$

для пористого пласта с учетом трещины

$$K_{\text{п+т}} = q\,\frac{\alpha_k}{\left[1-e^{-\alpha_k(\text{P}_{\text{пл}}-\text{P}_{\text{с}})}\right]} + q_{\text{тр}}\,\frac{\beta_{\text{тр}}}{1-e^{-\beta_{\text{тр}}\cdot(\text{P}_{\text{пл}}-\text{P}_{\text{т}})}} \tag{13}$$

Как видно из полученных зависимостей, исследуемый параметр в основном зависит от изменений параметров α_k и $\beta_{\text{тр}}$ по сравнению с соотношениями (10) и (11).

Ниже приведены результаты оценочных расчетов для установления пределов и характера изменения коэффициента продуктивности с учетом упругости жидкости и сжатия трещин по сравнению, если не было бы указанных параметров, при следующих данных:

дебит скважины при работе в пористой среде q= 20м^3 /сутки; и в трещине $q_{тр}$= 30м^3 /сутки; пластовое давление $P_{пл}$ = 12,5 МПа; забойное давление $P_с$ = 7,5 МПа; давление на трещине $P_{тр}$ = 6,7 МПа; $\alpha_к$= 2·10 $^{-2}$ 1/МПа; $\beta_{тр}$=10^{-2} 1/МПа.

Тогда согласно формул (10) и (11) без учета упругости жидкости и пласта,при поровом коллекторе: кпор= 4 м^2 /сут ·МПа и при наличии в поровом коллекторе трещины: $к_{п+тр}$= 9,2 м^2 /сут ·МПа. С учетом указанных факторов согласно формул (12) и (13) исследуемый параметр имеет следующие значения:

$к_{пор}$= 4,2 м^2 /сут ·МПа; $к_{п+тр}$= 9,5 м^2 /сут ·МПа;

если параметр $\beta_{тр}$=10^{-2} 1/МПа., то тогда $к_{п+тр}$= 10,2 м^2 /сут ·МПа;

при $\beta_{тр}$=2·10^{-2} 1/МПа $к_{п+тр}$ = 25,6 м^2 /сут ·МПа.

Заключение

1.Результаты проведённого исследования показывают, что при сопоставимых значениях коэффициента упругости пористой среды и коэффициента сжимаемости трещин наблюдается наиболее интенсивный рост продуктивности скважины. Это свидетельствует о высокой чувствительности фильтрационных характеристик системы к согласованию деформационных свойств пласта и трещинного пространства.

2.Установлено, что одним из эффективных способов повышения продуктивности скважины является формирование трещин в горизонтальной плоскости в призабойной зоне пласта. При этом максимальный технологический эффект достигается в случае, когда коэффициент сжимаемости трещины соизмерим с коэффициентом упругости пористой среды, что обеспечивает оптимальные условия для фильтрации и перераспределения давления.

3. Полученные результаты подчёркивают необходимость учёта взаимосвязи геомеханических и фильтрационных параметров при моделировании и проектировании гидроразрыва пласта, что позволяет повысить достоверность прогноза продуктивности скважин и эффективность разработки месторождений.

ЛИТЕРАТУРЫ

1.Economides M. J., Nolte K. G., 2000. *Reservoir Stimulation*, 3rd ed. John Wiley & Sons, Chichester.

2.Zeng Q., Yao J., Li Y., 2015. Experimental investigation of hydraulic fracture geometry and propagation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 127, pp. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.01.019

3.Wang H., Sharma M. M., 2019. Fluid compressibility and its effect on hydraulic fracture propagation. *Energies*, 12(7), 1189. https://doi.org/10.3390/en12071189

4.Fisher M. K., Warpinski N. R., 2012. Hydraulic fracture-height growth: real data. *SPE Production & Operations*, 27(1), pp. 8–19. https://doi.org/10.2118/145949-PA

5.He, Y., Cheng, S., Li, J., 2020. Productivity evaluation of fractured wells in heterogeneous reservoirs. Journal of Petroleum Science and Engineering, 184, 106517. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106517

6.Zhang, L., Wang, X., Liu, Y., 2021. Effect of fracture geometry on well productivity in tight reservoirs. Energy Reports, 7, pp.341–352. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.12.015

7.Li, X., Zhao, Y., Feng, Y., 2022. Influence of fluid compressibility on flow behavior in fractured reservoirs. Journal of Energy Resources Technology, 144(5), 053001. https://doi.org/10.1115/1.4052413

8. Бисембаева К.Т., Джалалов Г.И., Сабырбаева Г.С. Оценка эффективности гидроразрыва пласта на нефтяном месторождении // Актау. « Yessenov Science Journal №2(43)-2022.

9. Бисембаева К.Т., Койшина А.И. Влияние фильтрационного коэффициента на образование трещин в пласте // Актау. « Yessenov Science Journal №1(44)-2023.

10. Chen, Z., Huan, G., Ma, Y., 2006. Computational Methods for Multiphase Flows in Porous Media. SIAM. https://doi.org/10.1137/1.9780898718943

CHANGES IN WELL PRODUCTIVITY AFTER HYDRAULIC FRACTURING

K. Bissembayeva*, A. Hadiyeva
Yessenov University, Aktau, Kazakhstan
e-mail: karlygash.bissembayeva@yu.edu.kz, hadieva_albina@mail.ru

Abstract. The article presents the results of studies aimed at evaluating the technological efficiency of a horizontal fracture formed in the near-wellbore zone of a homogeneous reservoir, taking into account the influence of the elastic properties of the filtering fluid on filtration processes and well productivity. An approach is proposed that makes it possible to determine the pattern of changes in the productivity index under the conditions of a homogeneous circular reservoir during the linear filtration of a homogeneous fluid prior to reservoir water breakthrough, when a horizontal fracture is formed in the near-wellbore zone. The paper presents research results that consider the influence of the elastic properties of the filtering fluid in the presence of a horizontal fracture in the near-wellbore zone of the well. The obtained relationships make it possible to more accurately predict changes in well flow rate during field operation. It has been established that the presence of a horizontal fracture contributes to the intensification of filtration processes and increases the well productivity index. The research results can be used in the design and optimization of oil and gas field development technologies. The practical significance of the work lies in the possibility of improving well operation efficiency through the rational selection of hydraulic fracturing parameters.

Keywords. reservoir, well, productivity, hydraulic fracturing, vertical fracture, horizontal fracture, filtration, elasticity.

ҚАБАТТЫ ГИДРАВЛИКАЛЫҚ ЖАРУДАН КЕЙІНГІ ҰҢҒЫМАЛАР ӨНІМДІЛІГІНІҢ ӨЗГЕРУІ

К.Т.Бисембаева*, А. Хадиева
Есенов университеті, Ақтау, Қазақстан
e-mail: karlygash.bissembayeva@yu.edu.kz, hadieva_albina@mail.ru

Аңдатпа. Мақалада біртекті қабаттың ұңғыма маңы аймағында қалыптасқан горизонталь жарықшақтың технологиялық тиімділігін бағалауға бағытталған зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеулер сүзілетін сұйықтықтың серпімді қасиеттерінің сүзілу процестері мен ұңғыма өнімділігіне әсерін ескере отырып жүргізілді. Біртекті шеңберлі қабат жағдайында, коллектордың сулану сәтіне дейін, ұңғыма маңы аймағында горизонталь жарықшақ қалыптасқан кезде, біртекті сұйықтықтың сызықтық сүзілуі барысында өнімділік коэффициентінің өзгеру сипатын анықтауға мүмкіндік беретін тәсіл ұсынылды. Ұңғыма маңы аймағында горизонталь жарықшақ болған жағдайда сүзілетін сұйықтықтың серпімділігінің әсерін ескеретін зерттеу нәтижелері келтірілген. Алынған тәуелділіктер кен орнын пайдалану процесінде ұңғыма дебитінің өзгерісін неғұрлым дәл болжауға мүмкіндік береді. Горизонталь жарықшақтың болуы сүзілу процестерін қарқындататыны және ұңғыма өнімділігі коэффициентінің артуына ықпал ететіні анықталды. Зерттеу нәтижелері мұнай-газ кен орындарын игеру технологияларын жобалау және оңтайландыру кезінде қолданылуы мүмкін. Жұмыстың практикалық маңыздылығы қабатты гидравликалық жару параметрлерін ұтымды таңдау арқылы ұңғымаларды пайдалану тиімділігін арттыру мүмкіндігімен айқындалады.

Түйін сөздер. қабат, ұңғыма, өнімділік, қабатты гидравликалық жару, тік жарық, горизонталь жарық, сүзілу, серпімділік.