



УДК 622.245.54
ГРНТИ 52.47.27
DOI 10.56525//HJEK4060

ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО КОЭФИЦИЕНТА НА ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН В ПЛАСТЕ

БИСЕМБАЕВА К.Т.

Каспийский университет технологий и
инжиниринга имени Ш.Есенова
Актау, Казахстан

E-mail: karlygash.bissembayeva@yu.edu.kz

***КОЙШИНА А.И.**

Каспийский университет технологий и
инжиниринга имени Ш.Есенова
Актау, Казахстан

E-mail: akmaral.koishina@yu.edu.kz

***Автор-корреспондент:** akmaral.koishina@yu.edu.kz

Аннотация. Как показала практика разработки месторождений углеводородов, при добыче нефти из многослойных залежей в результате многочисленных гидродинамических и геолого-геофизических исследований выявляются отдельные участки пластов с более однородной структурой. В большинстве случаев такие пласты, как показывают результаты анализа состояния разработки залежей, оказываются обладающими достаточно низкими фильтрационными и емкостными свойствами (пористостью и проницаемостью), при одновременном увеличении объема трудноизвлекаемых запасов нефти. Это обстоятельство залежей ухудшает состояние степени эффективности добычи запасов углеводородов из многослойных залежей. В связи с этим, с целью повышения эффективности процесса разработки нефтяных месторождений, на практике очень часто используются различные мероприятия, направленные на интенсификацию процесса добычи из малопродуктивных интервалов-пластов. Одним из активных методов, позволяющих наиболее полно вытеснить нефть из продуктивного пласта, является гидроразрыв пласта.

В настоящее время на многих нефтяных месторождениях, с целью увеличения дебита скважины, в последнее время активно проводятся гидравлические разрывы пласта (ГРП) в различных сочетаниях путем использования как фильтрующих, так и нефилттрирующихся жидкостей.

В связи с этим наибольший практический интерес представляет решение задачи, связанной с установлением влияния фильтрации жидкости на величину раскрытия трещин, образуемых при ГРП.

В статье рассмотрен один из наиболее распространенных методов повышения продуктивности скважин, вскрывающих низкопроницаемые коллекторы – гидроразрыв пласта (ГРП).

В работе исследовано влияние коэффициента фильтрации жидкости на ширину трещин, которые образуются при осуществлении ГРП. Получены формулы для определения ширины трещин при фильтрующей жидкости. Полученные результаты показывают, что фильтрация жидкости оказывает существенное влияние на ширину раскрытия горизонтальной трещины.

Ключевые слова. Скважина, фильтрация, градиент давления, проницаемость, трещина, гидроразрыв пласта, ширина трещины, длина трещины, коллектор.

Введение. Практика добычи углеводородов показала, что при фильтрации флюидов по поровым и порово-трещиноватым коллекторам во время разработки т.е. управлении процессами движения жидкостей в продуктивных многослойных пластах нефтяных месторождений возникают различные трудности, которые препятствуют эффективному вытеснению нефти из коллектора горной породы. К таким осложняющим как геологическим, так и технологическим факторам можно отнести такие как: многослойные, с различными фильтрационными параметрами пласты, макро и микронеоднородные, продуктивные пласты и пропластки со сложнопостроенными структурами, слоисто-неоднородные разрезы продуктивных толщ, сложная структура флюидов, многофазность фильтрационных потоков в много интервальных зонах как по толщине, так и по площади залежи, высокая вязкость нефти, расчлененность разрезов по толщине и площади и т.д.

Указанные факторы в основном приводят к уменьшению продуктивности пласта и нарушению технологического режима работы в основном подземных и наземных оборудований соответственно скважин и промысла. В связи с этим для улучшения состояния фильтрации флюидов в пластовых условиях для увеличения объемов добыче продукции применяются различные методы, а именно: дополнительные перфорации продуктивных пластов, множества физико-химических обработок призабойной зоны скважины, гидроразрыв пласта, вибро-волновые воздействия, увеличение или оптимальное управление пластовыми и забойными давлениями как в нагнетательных, так и в добывающих скважинах, обработка забоя скважины жидкостями с повышенными температурами, создание горизонтального ствола для скважины вскрывающая низкопродуктивные и микро и макро неоднородные пласты и т. д. Указанные технологические методы позволили несколько улучшить процесс вытеснения нефти водой и различными жидкостями из пластов-коллекторов.

Поисково-геолого-геофизических работы по созданию энергетического потенциала страны позволили обнаружить продуктивные отложения углеводородов из незначительных глубин недр. Результаты этих работ показали о том, что продуктивные пласты из небольших глубин имеют высоковязкие нефти. Коллектора из указанных глубин в основном обладают неустойчивыми рыхлыми горными породами. Как показала практика эксплуатации этих продуктивных пластов и залежей, во время добычи продукции из их коллекторов, призабойная зона скважины подвергается значительным нагрузкам и напряжениям, которые способствуют отрываться частиц горной породы от основного массива в районе забоя скважины. При этом этот процесс начинается с самого начало вступления скважины в эксплуатацию.

Материалы и методы исследования. В настоящее время на нефтяных месторождениях Содружества независимых государств (СНГ), с целью увеличения дебита скважины, в последнее время активно проводятся гидравлические разрывы пласта (ГРП) в различных сочетаниях путем использования как фильтрующихся, так и нефилттрирующихся жидкостей.

В связи с этим наибольший практический интерес представляет решение задачи, связанной с установлением влияния фильтрации жидкости на величину раскрытия трещин, образуемых при ГРП.

Следует отметить, что процесс движения жидкости по продуктивным пластам при проведении гидродинамических мероприятий в виде ГРП в основном зависит не только от проницаемости (k) коллектора и вязкости (μ), используемой для метода, т.е. от соотношения параметров $\frac{k}{\mu}$. Известно, что при проведении указанного метода используются жидкости, которые обладают незначительной вязкостью, но в то же время чрезвычайно плохо фильтруются через пористую среду из-за содержания в них специальных физико-химических добавок. Таким образом, для характеристики нагнетаемых жидкостей, как отмечается в работе [1]

$$v = -\frac{k}{\mu} \alpha \frac{\partial P}{\partial L},$$

где k , μ - соответственно коэффициенты проницаемости пласта, вязкости жидкости; $(\Delta p / \Delta L)$ - градиент давления.

Проведем исследование вопроса, как влияет коэффициент фильтрации жидкости на ширину трещин, которые образуются при осуществлении ГРП.

Рассматриваются следующие частные случаи, а именно, когда $\alpha = 0$ и $\alpha = 1$. При этом допускается, что в подошве продуктивного пласта образовалась горизонтальная трещина (рис.1). Предполагается, что не имеет значения, что трещина образовалась в результате развития природной естественной трещины или она возникла при начальном нагнетании в пласт фильтрующейся жидкости.

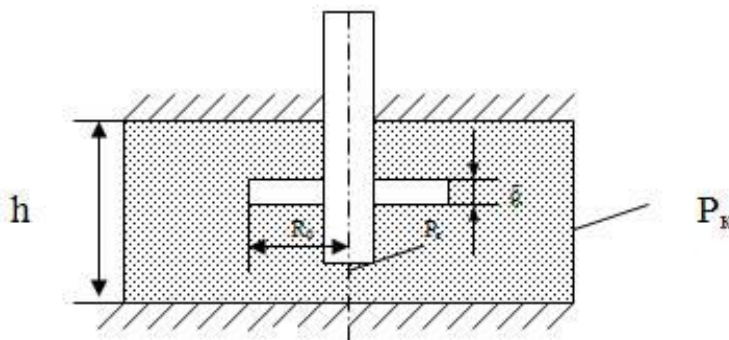


Рисунок 1 - Схема расположения горизонтальной трещины

Далее считается, что вертикальное горное давление $P_{гор}$ постоянно для рассматриваемой глубины.

Рассматривается первый случай, когда в пласт закачивается жидкость, которая имеет способность мало или совсем не фильтроваться по продуктивным пластам, т.е. $\alpha = 0$. Чтобы рассматриваемая трещина находилась в открытом состоянии, давление жидкости в трещине $P_{ж}$ должно быть выше вертикального горного давления $P_{гор}$, т.е.

$$P_{ж} > P_{гор} = H \rho_{г.пор} g \quad (1)$$

Тогда разница между давлениями жидкости $P_{ж}$ и горным давлением $P_{гор} = H \rho_{г.пор} g$, т.е.

$\Delta P = P_{ж} - P_{гор}$ и будет обеспечивать раздвижение стенок трещин на некоторую ширину величину l . Предполагаем, что ΔP постоянна на всем радиусе внедрения жидкости в пласт по трещине (см.рис.1).

Определим ширину раздвижения стенок трещины на различном удалении от ствола скважины. К решению этой задачи подойдем следующим образом. Известно, что глубина

залегания продуктивных пластов многократно превышает радиусы трещин, которые создаются путем гидроразрыва.

В связи с этим давлений жидкости $P_{ж}^1$ и $P_{ж}^2$ соответственно на верхнюю и нижнюю стенки трещин (см.рис.1) можно рассматривать как действия распределенных нагрузок на два полупространства.

Наличием ствола скважины ввиду малости его диаметра можно пренебречь. Тогда ширина трещины на расстоянии от скважины будет равна

$$\ell_r = \ell'_r + \ell''_r, \quad (2)$$

где ℓ'_r - перемещение поверхности верхнего полупространства;

ℓ''_r - перемещение поверхности нижнего полупространства.

Если механические свойства пород, учитываемые модулем упругости E и коэффициентом Пуассона ν для верхнего и нижнего полупространства равны, то в этом случае формула (2) имеет вид:

$$\ell_r = 2\bar{\ell}_r, \quad (3)$$

Используя известные уравнения [2], которые имеют следующий вид, показывающий

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}; \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z}; \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z}; \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y}; \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z}; \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x \partial z}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

зависимости между компонентами деформации и смещения, а также, находя решения этих уравнений, удовлетворяющая условиям на контуре данной задачи, можно записать зависимости между компонентами тензоров напряжений и деформаций. Они имеют следующий вид [3]:

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= \lambda \varepsilon + 2\mu' \frac{\partial v}{\partial x}; \delta_y = \lambda \varepsilon + 2\mu' \frac{\partial v}{\partial y}; \delta_z = \lambda \varepsilon + 2\mu' \frac{\partial v}{\partial z}; \\ \tau_{yz} &= \mu' \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right); \tau_{xz} = \mu' \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial x} \right); \tau_{xy} = \mu' \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right); \\ \varepsilon &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z}; \lambda = \frac{E \nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \mu' = \frac{E}{2(1+\nu)}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где E и ν - соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона;

\bar{u} , \bar{v} и v - компоненты смещения соответственно в направлениях x, y и z , $\delta_x, \delta_y, \delta_z, \tau_{yz}$,

τ_{xz}, τ_{xy} - соответственно компоненты нормальных и касательных напряжений.

Воспользовавшись уравнением (4) и (5), определяем перемещение стенок продуктивных пластов, а именно находим вертикально перемещение в направлении оси z .

Тогда ширина горизонтальной трещины, т.е. перемещение поверхности стенки горизонтальной трещины в пределах радиальной загрузки, а именно в зоне действия давления жидкости разрыва ΔP можно определить по следующей формуле, полученной путем решения вышеприведенных формул:

$$l_r = \frac{3.74(1-\nu^2) \Delta P R}{\pi E} (1.27 - 0.25 \frac{r^2}{R^2}), \quad (6)$$

где R -радиус внедрения в пласт жидкости (см.рис.1), оказывающей давление ΔP на стенки трещины; $(1.27 - 0.25 \frac{r^2}{R^2})$ - значение этого соотношения находится из приведенного графика (рис. 2), где величина указанной разности (F) представлена в виде функции от отношения параметров $(\frac{r}{R})$ т.е. $F = f(\frac{r}{R})$.

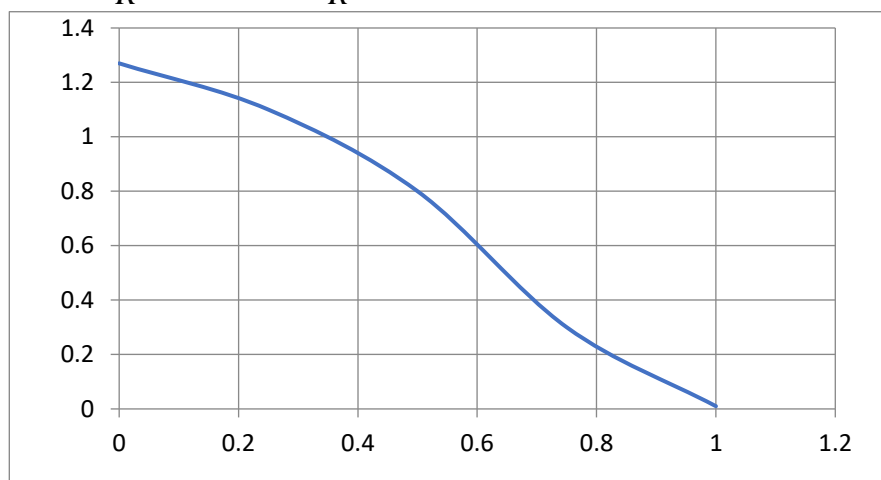


Рисунок 2 - Изменение параметра Фот соотношение $\frac{r}{R}$.

Для рассматриваемого случая, в процессе образования трещины развитие последней опережает внедрение нефилтующейся вязкой жидкости, как это, например, отмечается при внедрении клина. Или, по крайней мере, имеется зона, где жидкости в силу проявления гидравлического сопротивления уже не оказывает существенного давления на стенки трещины.

Теперь рассмотрим случай, когда гидроразрыв осуществляется путем маловязкой, хорошо фильтрующейся жидкости, т.е. в условиях, когда $\alpha = 1$.

В этом случае, для того чтобы трещина удержалась в открытом состоянии, жидкость должна оказывать достаточно высокое давление ΔP , которое будет превышать вертикальное горное, на подошву и пласт.

Из-за того, что для такого случая, жидкость считается маловязкой и достаточно хорошо фильтрующаяся, то можно предположить о равномерном перераспределении давления в трещине и на кровлю пласта. При этом сам пласт в данной зоне, т.е. в зоне, где образовалась трещина, будет разгружен от сжимающего вертикального давления вышележащих горных пород, передаваемого на пласт через кровлю.

Поэтому в данном случае ширину раскрытия трещины на расстоянии r от скважины можно выразить в виде

$$\ell_r = \ell'_r + \ell''_r + \ell'''_r \quad (7)$$

где ℓ_r''' - деформация расширения пласта в зоне радиусом $\approx R$. (Объемной деформацией зерен песчаника от действия всестороннего гидростатического давления жидкости ввиду ее незначительности пренебрегаем).

Деформацию ℓ_r''' можно рассматривать как перемещение от снятия ранее распределенной нагрузки от слоя, лежащего на достаточно жестком основании.

Для вычисления данной деформации используем следующее уравнение [1], которое позволяет с достаточной точностью определять перемещения стенки трещины на расстоянии r от центра скважины:

$$\ell_r''' = \frac{2(1-\nu^2)\Delta PR}{E} \int_0^\infty J_0\left(\frac{r}{h}t\right) J_1\left(\frac{R}{h}t\right) \frac{sh^2td}{(shcht + t)} \quad (8)$$

где J_0 - функция Бесселя первого рода нулевого порядка;

J_1 - функция Бесселя первого рода первого порядка;

sh, ch - соответственно гиперболические синус и косинус произвольного переменного t ;

h - толщина пласта.

Результаты исследования. Используя методические приемы, предложенные в работе [1], а также, обрабатывая методом математической статистики полученную кривую, создана усовершенствованная формула для расчета ширины трещины в условиях использования фильтрующихся жидкости, которая имеет следующий вид:

$$l_r = \frac{1,3(1-\nu^2) \Delta PR}{3,14E} (1,87 - 0,13\sqrt{\frac{r}{R}}) \quad (9)$$

где выражения в скобке $(1,87 - 0,13\sqrt{\frac{r}{R}}) = \tau$ определяется из графика, приведенного на рисунке 3.

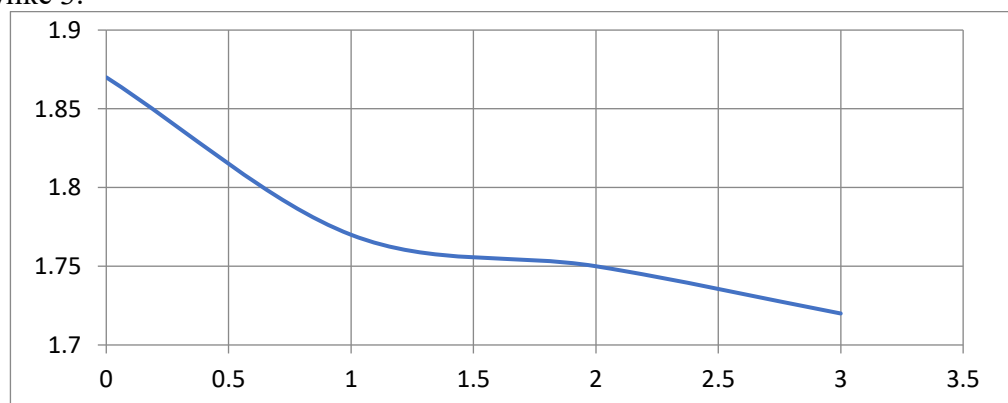


Рисунок 3 - Зависимость изменения значений соотношений $(1,87 - 0,13\sqrt{\frac{r}{R}}) = \tau$ от

отношения параметров $\frac{r}{R}$

Путем использования уравнений (6) и (9) было подсчитано несколько значений параметра ℓ_r . При этом величины модуля упругости и коэффициента Пуассона принимались равными соответственно $23 \cdot 10^9$ Па 2,25 согласно результатам исследования работы [4], Полученные результаты приведены в таблице. 1.

Из приведенных результатов видно, что для ряда соотношений $\frac{r}{R}$ (см. табл.1) фильтрация жидкости оказывает существенного влияние на ширину раскрытия горизонтальной трещины. Так, по сравнению с применением нефiltrующейся жидкости ширина трещины при фильтрующей функции в среднем уже на 10-30% больше, что соответствующим образом будет сказываться на ее эффективности при последующей эксплуатации скважин, после приведения ГРП [5].

Таблица 1 - Результаты расчетов по определению ширины горизонтальной трещины при различных условиях применения ГРП

№ п/п	Нагнетаемая жидкость	R, м.	Ширина трещины ℓ в мм при различных гот скважины $\Delta P=50 \cdot 10^6 \text{ Па}$		
			Значение r		
			15 см	10 м	20 м
1	а) Нефильтрующаяся, $a=0$.	10	14,7	11,9	-
	б) Фильтрующаяся, $a=1$.	10	15,0	14,9	-
	Увеличение ширины трещины, в условиях фильтрующейся жидкости, %.	-	2,0	25,2	-
2	а) Нефильтрующаяся, $a=0$.	20	28,7	25,0	23,1
	б) Нефильтрующаяся, $a=1$.	20	31,8	30,4	30,0
	Увеличение ширины трещины, в условиях фильтрующейся жидкости, %.	-	10,8	21,6	29,8

Заключение. Фильтрация жидкости оказывает существенного влияние на ширину раскрытия горизонтальной трещины. Так, по сравнению с применением нефiltrующейся жидкости ширина трещины при фильтрующей функции в среднем уже на 10-30% больше, что соответствующим образом будет сказываться на ее эффективности при последующей эксплуатации скважин, после приведения ГРП.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Теслюк Е.В. Влияние коэффициента фильтрации жидкости на процесс образования трещин при гидравлическом разрыве пласта Тр.ВНИИ, вып. Гостоптехиздат. 1959, с 15-23.
- [2]. Пыхачев Г.Б. Подземная гидравлика М.: Гостоптехиздат. 1961. 387с.
- [3]. Желтов Ю.П. Механика нефтегазоносного пласта. М., Недра, 1975.-207с.
- [4]. Ширгозин Р.Г. Залевский О.А. Результаты экспериментального определения упругих геомеханических характеристик коллекторов Шаимского нефтегазоносного района. Нефтяное хозяйство, 2007, №12, с.87-89.

[5]. Bissembayeva K., Dzhalalov G., Sabyrbayeva G. Efficiency estimation of hydraulic at oil deposit. YESSENOV SCIENCE JOURNAL №2 (43)-2022 /// YESSENOV SCIENCE JOURNAL 2022, Vol.43 (2).

Бисембаева Карлыгаш, Койшина Акмарал

*Ш.Есеннов атындағы Каспий технологиялар және инженеринг университеті
Ақтау, Қазақстан*

КАБАТТА ЖАРЫҚШАҚТЫҢ ТҮЗІЛУІНЕ СҮЗІЛУ КОЭФФИЦИЕНТІНІҢ ӘСЕРІ

Аңдатпа. Біртекті құрылымды болып келетін қабаттың жеке бөлімшелерінде көптеген геолого-геофизикалық және гидродинамикалық зерттеулер нәтижесінде анықталып, көпқабатты кеніштен мұнай өндіру кезінде, көмірсутекті кенорындарды игеру тәжірибесі көрсетілген. Көп жағдайда кен орындарын игеру жағдайын талдау нәтижелері көрсеткендей, мұндай қабаттар өте төмен сүзу және сыйымдылық қасиеттеріне ие (кеуектілігі мен өткізгіштігі), сонымен бірге алынуы қиын мұнай қорларының көлемін арттырады. Көп қабатты кеніштерден көмірсутекті қорды өндірудің тиімділік дәрежесі кеніштің бұл жағдайын нашарлатады. Осыған байланысты мұнай кен орындарын игеру процесінің тиімділігін арттыру мақсатында іс жүзінде өнімділігі төмен интервалдардан-қабаттардан өндіру процесін қарқындатуға бағытталған түрлі іс-шаралар жиі қолданылады. Мұнайды өнімді қабаттан толығымен вытесрудің белсенді әдістерінің бірі-фрекинг.

Қазіргі уақытта көптеген мұнай кен орындарында ұңғыманың дебитін ұлғайту мақсатында соңғы уақытта сүзгіден өткізілетін және сүзгіден өтпейтін сұйықтықтарды пайдалану арқылы әртүрлі қосылыстарда гидравликалық қабаттың жарылуы (ГРП) белсенді жүргізілуде.

Осыған байланысты сұйықтықтың сүзілуінің ҚСЖ кезінде пайда болатын жарықтардың ашылу мөлшеріне әсерін анықтауға байланысты мәселені шешу үлкен практикалық қызығушылық тудырады.

Мақалада төмен өткізгіш коллекторларды ашатын ұңғымалардың өнімділігін арттырудың кең таралған әдістерінің бірі – гидравликалық сыну (ГРП) қарастырылады.

Бұл мақалада сұйықтықты сүзу коэффициентінің ҚСЖ жүзеге асырылған кезде пайда болатын жарықшалардың еніне әсері зерттелді. Сүзгі сұйықтығындағы жарықтардың енін анықтауға арналған формулалар алынды. Нәтижелер сұйықтықты сүзу көлденең жарықшақтың ашылу еніне айтарлықтай әсер ететінін көрсетеді.

Түйінді сөздер: Ұңғыма, сүзу, қысым градиенті, өткізгіштік, жарықшақ, гидрожару, жарықшақ ені, жарықшақ ұзындығы, коллектор.

Bissembayeva Karlygash, Koishina Akmaral

Sh. Yessenov Caspian state university of technology and engineering, Aktau, Kazakhstan

THE INFLUENCE OF THE FILTRATION COEFFICIENT ON THE FORMATION OF CRACKS IN THE BED

Annotation. As the practice of developing hydrocarbon deposits has shown, when extracting oil from multilayer deposits, as a result of numerous hydrodynamic and geological-geophysical studies, separate sections of formations with a more homogeneous structure are identified. In most cases, such formations, as the results of the analysis of the state of development of deposits show, turn out to have sufficiently low filtration and capacitance properties (porosity and permeability), while increasing the volume of hard-to-recover oil reserves. This circumstance of deposits worsens the state of the degree of efficiency of extraction of hydrocarbon reserves from multilayer deposits. In this regard, in order to increase the efficiency of the oil field development process, various measures aimed at intensifying the extraction process from unproductive intervals-formations are very often used in practice. One of the active methods that allow the most complete displacement of oil from the productive reservoir is hydraulic fracturing.

Currently, in many oil fields, in order to increase the flow rate of the well, hydraulic fracturing (FRACKING) in various combinations has been actively carried out recently by using both filtered and unfiltered liquids.

In this regard, the greatest practical interest is the solution of the problem associated with the establishment of the effect of liquid filtration on the size of the crack opening formed during hydraulic fracturing.

The article discusses one of the most common methods of increasing the productivity of wells that open low-permeability reservoirs - hydraulic fracturing (FRACKING).

The paper investigates the effect of the liquid filtration coefficient on the width of cracks that are formed during hydraulic fracturing. Formulas for determining the width of cracks in the filter fluid are obtained. The results obtained show that liquid filtration has a significant effect on the width of the horizontal crack opening.

Keywords. Borehole, filtration, pressure gradient, permeability, crack, hydraulic fracturing, crack width, crack length, collector.