

## РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК: 622.245.542.3

### **КРИТЕРИИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА В ПЛАСТЕ И ИХ ОРИЕНТАЦИИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ СКВАЖИН ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

© Калинин В.Ф.

АО «Нижне-Волжский научно-исследовательский институт геологии и геофизики», г. Саратов

DOI:10.24412/1997-8316-2023-111-38-61

**Аннотация:** представлены методика и критерии прогноза ориентации трещин гидроразрыва в пласте на основе геолого-физической характеристики пласта и физико-механических свойств породы-коллектора, результаты теоретических и промысловых исследований по оптимизации выбора геометрических размеров трещин гидроразрыва в пласте при проведении ГРП и ГКРП для реализации потенциальной продуктивности скважин на месторождениях Саратовского Поволжья. Показано, что при вскрытии продуктивных пластов в определенных условиях возможно возникновение самопроизвольного гидроразрыва пласта, сопровождающегося поглощением бурового раствора и нарушением гидродинамической связи пласта со скважиной.

**Ключевые слова:** критерии прогноза ориентации трещин гидроразрыва в пласте, геометрические размеры трещин гидроразрыва, трещиноватость и физико-механические свойства породы-коллектора, коэффициент продуктивности скважин, потенциальная продуктивность скважин.

E-mail: nedra.nvniigg@rusgeology.ru

### **CRITERIA FOR SELECTING THE OPTIMAL GEOMETRIC SIZES OF HYDRAULIC FRACTURES AND THEIR ORIENTATION FOR REALIZING POTENTIAL WELL PRODUCTIVITY BY HYDROMECHANICAL METHODS**

© Kalinin V.

Nizhne-Volzhsy Research Institute of Geology and Geophysics JSC, Saratov

**Abstract:** the methods and criteria for predicting the orientation of hydraulic fractures based on the geological and physical characteristics of the bed and the physical and mechanical properties of the reservoir rock, the results of theoretical and field studies on optimizing the choice of the geometric dimensions of hydraulic fractures in the bed during hydraulic fracturing and hydroacid fracturing for implementation of the potential productivity of wells in the fields of the Saratov Volga region are presented. It is shown that during the drilling-in, spontaneous hydraulic

fracturing of the pay beds may occur under certain conditions, accompanied by absorption of the drilling fluid and disruption of the hydrodynamic connection between the bed and the well

**Key words:** criteria for predicting the orientation of hydraulic fractures in the bed, the geometric dimensions of hydraulic fractures, fracturing and physical and mechanical properties of the reservoir rock, well productivity index, potential well productivity.

Проблема вовлечения в разработку новых месторождений нефти и газа с трудноизвлекаемыми запасами является одной из актуальных задач нашего времени. Сегодня наиболее эффективными методами разработки месторождений с низкими фильтрационно-емкостными характеристиками являются гидромеханические методы интенсификации притоков нефти и газа (гидрокислотные разрывы пласта (ГКРП), гидроразрыв пласта (ГРП) с закреплением трещин песком, гидро-пескоструйная перфорация пласта (ГПП), как точечная, так и щелевая, вибровоздействие на пласт и др.). Их применение наряду с химическими методами интенсификации притоков нефти и газа при освоении скважин, законченных бурением, обеспечивает не только реализацию потенциальной продуктивности скважин, но и значительное увеличение производительности [1-4, 6-8, 12-15, 19-23]. Отличительной особенностью поведения такого типа коллекторов в процессе вскрытия при бурении скважин является способность к интенсивной блокировке твердой фазой и фильтратом буровых растворов на водной основе при высоких репрессиях на пласт. В определенных условиях это приводит к раскрытию естественных микротрещин в пласте и образованию новых трещин гидроразрыва, что сопровождается поглощением бурового раствора и нарушением гидродинамической связи пласта со скважиной. Подобное явление, представляющее собой самопроизвольный гидроразрыв пласта, нередко наблюдалось при бурении скважин на Западно-Ровенском, Краснокутском, Белокаменном и некоторых дру-

гих нефтяных и газовых месторождениях Саратовского Поволжья. В этих условиях проведение ГКРП или ГРП с закреплением трещин песком при освоении скважин, вскрывших пласты с трудноизвлекаемыми запасами, является главным средством вовлечения их в разработку [1, 2, 12, 13, 14]. При успешном выполнении данных операций образующиеся трещины вертикальной или горизонтальной ориентации создают высокопроницаемые каналы для фильтрации нефти и газа из отдаленных участков пласта к забю скважин.

#### **ГЕОЛОГО-ФИЗИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПРОГНОЗА ОРИЕНТАЦИИ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН И ИХ ОСВОЕНИИ**

Эффективность вскрытия продуктивных пластов в процессе бурения скважин в известной мере определяется геолого-физическими и технико-технологическими условиями и факторами, исключающими возникновение самопроизвольного гидроразрыва пласта и интенсивную его кольматацию. Однако такое осложнение в той или иной степени нередко происходит и сопровождается раскрытием существующих микротрещин в пласте или образованием новых, приводящих к поглощению бурового раствора и ухудшению или полному нарушению гидродинамической связи пласта со скважиной. Вполне очевидно, что для предотвращения этого явления важно установить геолого-физические критерии, предопределяющие условия возникновения самопроизвольного гидроразрыва пласта.

Исследованиями [1] показано, что градиент давления гидроразрыва снижается по мере увеличения глубины его залегания, а в условиях возрастающих репрессий при бурении глубоких скважин это может спровоцировать самопроизвольный гидроразрыв пласта. Так, например, на месторождениях Арлан и Узень градиент давления гидроразрыва варьирует в пределах 0,016-0,020 при глубине залегания 1300-1400 м. Однако в глубокозалегających (1650-1800 м) пластах на месторождениях Татарстана и Башкортостана градиент давления составляет уже 0,014-0,017 МПа/м.

Отмеченная закономерность прослеживается и на Северном Кавказе, где градиент давления гидроразрыва – 0,0105-0,013 МПа/м при глубинах залегания пласта 3200-3500 м. Как видно, они заметно меньше (в 1,23-1,9 раза), по сравнению с их величинами на менее глубоко залегающих пластах.

При проведении ГРП во время освоения скважин важно прогнозировать ориентацию трещин гидроразрыва в пласте и их размеры, поскольку они предопределяют эффективность самого процесса. Теоретические исследования и промысловый опыт свидетельствуют о том, что вертикальные трещины гидроразрыва желательнее создавать в продуктивных пластах, имеющих много пропластков песчаника разной проницаемости, разделенных плотными глинистыми прослойками [7-8]. Вертикальная трещина в этих условиях, проходя через все высокопроницаемые зоны, соединяет их между собой, обеспечивая высокую эффективность ГРП.

В пластах, расчлененных по вертикали низкопроницаемыми пропластками, образование горизонтальных трещин гидроразрыва, простирающихся на границе между проницаемым пропластком и глинистым прослоем, ухудшает пропускную способность. Однако в однородном пласте горизонтальные трещины являются более продуктивными, чем вертикальные.

Ориентация трещин гидроразрыва определяется фильтруемостью жидкости и геолого-физической характеристикой пласта, а также следующими фильтрационно-емкостными и физико-механическими свойствами породы-коллектора: горное и пластовое давление, пористость, проницаемость, трещиноватость, сжимаемость породы, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент бокового отпора породы, прочность породы на разрыв и др.

Ориентировка трещин в пласте обуславливается градиентом давления гидроразрыва  $P_3/H$  или соотношением забойного и горного давлений  $P_3/P_2$ , где  $H$  – глубина скважины. Согласно лабораторным исследованиям [13], при величине градиента давления гидроразрыва пласта  $P_3/H > 0,023$  МПа/м и  $P_3/P_2 > 0,970$  ориентация образующихся трещин гидроразрыва в пласте – горизонтальная. При величине градиента давления гидроразрыва пласта  $P_3/H = < 0,0158$  МПа /м или  $(P_3/P_2) = < 0,632$  ориентация развивающихся трещин – вертикальная. По промысловым данным, вертикальные трещины образуются в отдельных случаях и при градиентах давления гидроразрыва  $P_3/P_2 = 0,591-0,642$ . Ориентация искусственных трещин гидроразрыва определяется ориентацией минимальных напряжений в пласте [1, 2, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 17]. Так, вертикальные трещины образуются в том случае, когда наименьшие напряжения в пласте ориентированы горизонтально. С другой стороны, горизонтальные трещины образуются при вертикальной направленности минимальных напряжений.

Согласно промысловым экспериментам [13], на малых глубинах залегания (300-600 м) в пласте образуются, как правило, горизонтальные трещины, а на глубинах более 1000 м трещины ориентированы вертикально. При промежуточных глубинах залегания пласта (600-1000 м) ориентация трещин гидроразрыва имеет неопределенную направленность.

Кроме того, их ориентация и протяжённость зависят от соотношения модуля Юнга пород в кровле, подошве пласта и в самом пласте. Если модуль Юнга пород, слагающих кровлю и подошву продуктивного пласта, выше, чем в породах самого пласта, то трещины гидроразрыва имеют большую протяжённость. В противном случае появляется тенденция их роста в вертикальном направлении, что приводит к образованию коротких трещин и к малому увеличению продуктивности скважин [7, 8].

Исследованиями Христиановича и Желтова [6, 7] показано, что при гидроразрыве пласта образуются трещины, ориентация которых зависит от фильтруемости жидкости в пласт и коэффициента бокового распора породы. Гидроразрыв пласта на нефльтрующей жидкости сопровождается образованием вертикальных трещин, что часто происходит при бурении скважин под воздействием бурового раствора. Гидроразрыв пласта на фильтрующей жидкости сопровождается образованием горизонтальных трещин при условии, что величина бокового горного давления  $\sigma_6$  больше или равна половине горного давления  $P_2$  в пласте:

$$\sigma_6 \geq 0,5 P_2 \quad [6,7, 8], \quad (1)$$

Величина бокового горного давления в пласте  $\sigma_6$  определяется из соотношения:

$$\sigma_6 = \kappa (P_2 - n P_{пл.}), \quad (2)$$

где  $\kappa$  – коэффициент бокового распора породы;  $n$  – коэффициент разгрузки породы, учитывающий, какая часть пластового давления участвует в разгрузке горного давления;  $P_2, P_{пл.}$  – горное и пластовое давление. Иначе, как отмечают исследователи [6, 7], в условиях отсутствия естественных трещин в пласте прежде образуются вертикальные, т.е. при

$$\sigma_6 < 0,5 P_2, \quad (3)$$

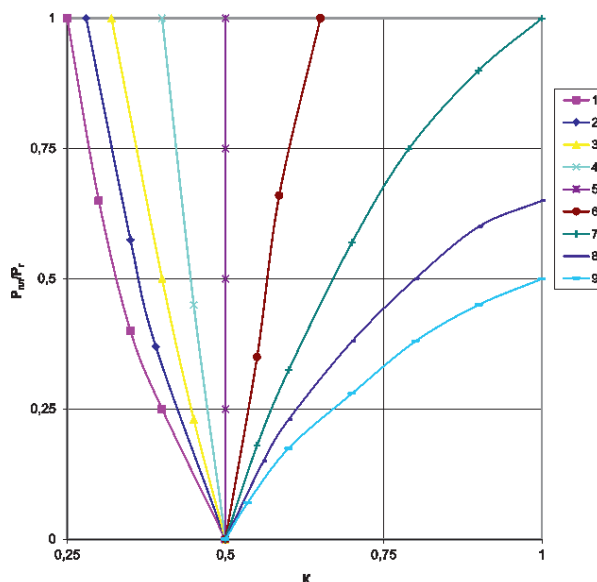
Из соотношения (2) видно, что величина бокового горного давления  $\sigma_6$ , определяющая ориентацию трещин гидроразрыва в пласте, зависит от целого ряда переменных геолого-физических и механических

параметров, сложным образом взаимосвязанных между собой, что затрудняет прогноз ориентации трещин. В связи с этим целесообразно условие развития горизонтальных трещин (1) с учётом соотношения (2) преобразовать к более удобному виду:

$$P_{пл.}/P_2 \leq (\kappa - 0,5)/\kappa n, \quad (4)$$

Вполне очевидно, что полученное соотношение (4) позволяет, с одной стороны, выявить влияние энергетической характеристики пласта на реализацию условия развития горизонтальных трещин, а с другой – влияние физико-механической характеристики породы-коллектора на выполнение данного условия. В представленном виде соотношение (4) помогает на основе данных геолого-физических критериев достаточно уверенно прогнозировать ориентацию развивающихся трещин гидроразрыва в пласте. Соответственно, условие образования вертикальных трещин можно представить в виде:

$$P_{пл.}/P_2 < (0,5 - \kappa)/\kappa n, \quad (5)$$



1-4 расчетные кривые развития вертикальных трещин гидроразрыва в пласте; 5-9 расчетные кривые развития горизонтальных трещин гидроразрыва в пласте; 1, 9 – n=1; 2, 8 – n=0,75; 3, 7 – n=0,5; 4, 6 – n=0,25; 5 – n=0

Рис. 1. График зависимости ориентации трещин гидроразрыва в пласте от коэффициентов бокового отпора K и коэффициента разгрузки породы

Таблица 1.  
Физико-механические свойства осадочных пород

NN п/п	Наименование породы	Коэффициент Пуассона $\nu$ , дол. ед.	Модуль Юнга $E$ , МПа	Коэффициент сжимаемости пор породы $\beta$ , 1/МПа	Прочность породы на разрыв, МПа	Коэффициент бокового распора $\kappa$ , дол. ед
1	Пески	0,44 - 0,49	$(0,08-0,2)10^4$	$(1,0 - 1,1)10^{-4}$	нет даанных	0,789 - 0,96
2	Песчаники	0,15 - 0,27	$(0,5 - 5,9)10^4$	$(0,3 - 10)10^{-4}$	2,0 - 20,0	0,1765 - 0,37
	" - "	0,13	$(3,47 - 3,98)10^4$	$(0,5 - 1,5)10^{-4}$	2,4 - 2,5	0,149
	" - "	0,175 - 0,234	$(4,04 - 4,85)10^4$	$(1,0 - 5,0)10^{-4}$	" - "	0,212 - 0,305
	" - "	0,12 - 0,14	$0,5 - 0,64)10^4$	$(2,0 - 4,1)10^{-4}$	" - "	0,136 - 0,162
3	Глинистые сланцы	0,2	$(1,54 - 3,16)10^4$	$(0,4 - 0,9)10^{-4}$	0,7 - 0,8	0,334 - 0,668
	" - "	0,31 - 0,4	$(3,13 - 4,25)10^4$	нет данных	нет данных	0,449-0,666
	" - "	0,19 - 0,5	$(0,18 - 0,47)10^4$	" - "	" - "	0,234-1,0
	" - "	0,22	$(1,54 - 3,16)10^4$	" - "	" - "	0,282
4	Известняки	0,28 - 0,3	$(1,2 - 8,0)10^4$	$(0,05 - 7,0)10^{-4}$	1...10	0,1765 - 0,337
	" - "	0,336-0,377	$(6,05-6,33)10^4$	$(0,32 - 2,45)10^{-4}$	нет данных	0,51 - 0,605
	" - "	0,19 - 0,32	$(2,0 - 2,5)10^4$	нет данных	" - "	0,234 - 0,47
5	Доломиты	0,2 - 0,33	$(2,4 - 8,9)10^4$	$(0,14 - 0,4)10^{-4}$	1...15	0,25 - 0,493
6	Ангидриты	0,25 - 0,4	$(2,1 - 9,5)10^4$	$(0,15 - 0,36)10^{-4}$	нет данных	0,334 - 0,667
7	Алевриты	0,17 - 0,30	$(0,4 - 3,8)10^4$	$(0,5 - 3,2)10^{-4}$	2...20	0,205 - 0,429
9	Глины	0,35 - 0,5	$(0,2 - 1,0)10^4$	нет данных	нет данных	0,54 - 1,0

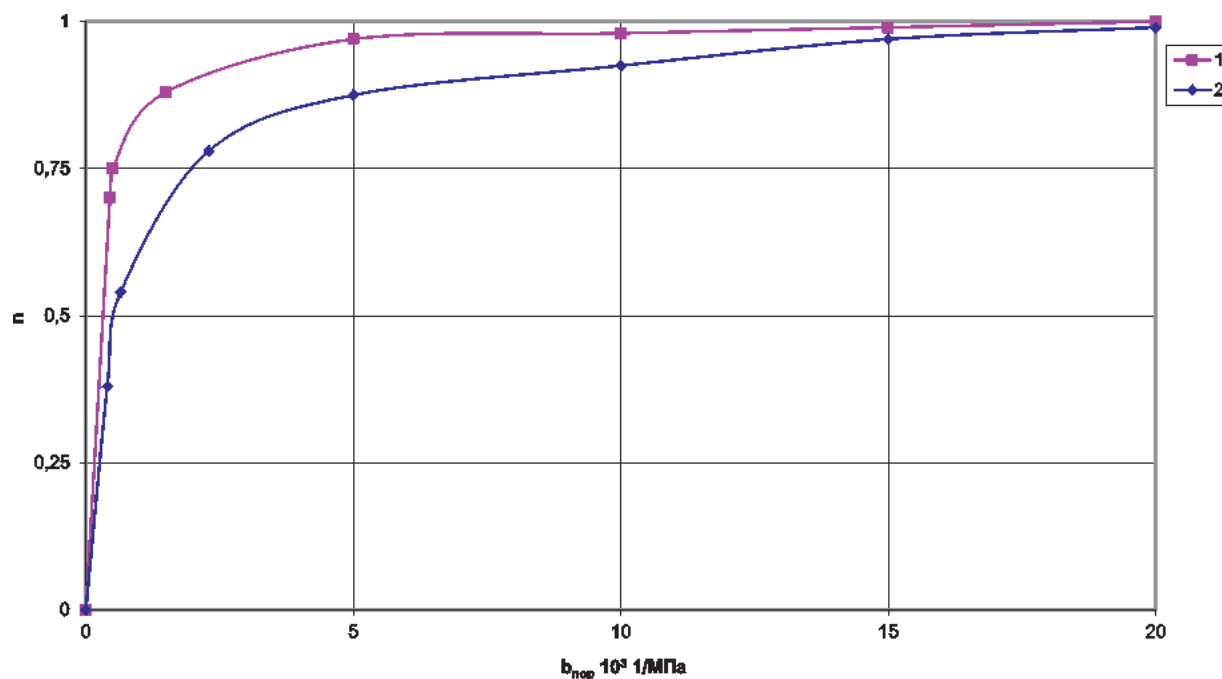


Рис.2. График зависимости коэффициента разгрузки породы  $n$  от величины коэффициента сжимаемости пор  $\beta_{пор}$  и коэффициента пористости  $m$ .  
1 -  $m=20\%$ , 2 -  $m=5\%$



где  $P_{пл.}$ ,  $P_z$  – пластовое и гор.ное давление в пласте;  $\kappa$  – коэффициент бокового распора породы пласта, величина которого определяется из формулы (6):

$$\kappa = \nu / (1 - \nu); [5, 7, 8], \quad (6)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Величина коэффициента  $n$  изменяется в пределах от 0 до 1,0 и находится из соотношения [5]:

$$n = 1 - (\beta_{тв.ф.} / \beta_{ск.}), \quad (7)$$

где  $\beta_{тв.ф.}$  – коэффициент сжимаемости твердой фазы породы-коллектора,  $\beta_{ск.}$  – коэффициент сжимаемости скелета породы, величина которого определяется следующим образом:

$$\beta_{ск.} = m\beta_{пор.} + \beta_{тв.ф.}, \quad (8)$$

где  $m$  – пористость породы пласта,  $\beta_{пор.}$  – коэффициент сжимаемости пор породы-коллектора.

На рисунке 1 представлен график прогноза ориентации трещин гидроразрыва в пласте в зависимости от коэффициента бокового распора породы, коэффициента разгрузки породы пласта  $n$ , величины горного  $P_z$  и пластового давлений  $P_{пл.}$ . На рисунке 2 показана зависимость величины коэффициента разгрузки породы ( $n$ ) пласта от его пористости  $m$  и коэффициента сжимаемости пор породы. Величина коэффициента сжимаемости твердой фазы  $\beta_{тв.ф.}$  карбонатных и терригенных пород-коллекторов составляет, соответственно,  $0,25 \cdot 10^{-4}$  1/МПа и  $0,30 \cdot 10^{-4}$  1/МПа [5].

Как видно из графика, при значительных величинах коэффициента сжимаемости пор  $\beta_{пор.} > 1,0 \cdot 10^{-3}$  1/ МПа, что характерно для сильноглинистых низкопроницаемых песчаников, коэффициент разгрузки  $n$  практически не отличается от единицы. Величина  $\beta_{пор.}$  песчаников и карбонатов зависит от эффективного напряжения в пласте и, согласно исследованиям В.М. Добрынина [5], на глубине свыше 3000,0 - 4000,0 м составляет величину порядка  $(2,0 - 6,0) \cdot 10^{-4}$  1/МПа, а величина пористости породы-коллектора редко превышает 15,0 %.

На рисунке 2 видно, что величина коэффициента разгрузки породы  $n$  при заданных значениях  $\beta_{пор.} = (2,0 - 6,0) \cdot 10^{-4}$  1/МПа и  $m = 15,0$  % составляет  $n = 0,43$  и  $n = 0,75$ .

В таблице 1 представлены ориентировочные данные о физико-механических свойствах некоторых осадочных пород [4, 5, 7].

### УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА В ПЛАСТЕ

Результаты выполненных нами исследований (рис. 1, 2) позволяют отметить следующее. Для образования вертикальных трещин гидроразрыва в пласте необходимо выполнение граничных значений отношения  $P_{пл.}/P_z$ , коэффициента бокового распора породы и коэффициента разгрузки породы  $n$ , при превышении которых развиваются горизонтальные трещины гидроразрыва.

Развитие вертикальных трещин сохраняется при сочетании коэффициента бокового распора  $\kappa < 0,25$  в диапазоне изменения величины параметра  $P_{пл.}/P_z$  и коэффициента разгрузки пород от нуля до единицы.

Образование вертикальных трещин, характеризующихся гидростатическим законом распределения пластового давления с глубиной, т.е. при величине параметра  $P_{пл.}/P_z \leq 0,44$ , возможно в породах-коллекторах, коэффициент бокового распора которых ниже 0,35 и не зависит от величины коэффициента разгрузки породы  $n$ . Однако, как видно из соотношения (5) и рис.1, по мере увеличения коэффициента бокового распора породы  $\kappa$  от 0,25 до 0,5 вероятность развития вертикальных трещин гидроразрыва в пласте возрастает по мере снижения величины параметра  $P_{пл.}/P_z$  вплоть до 0.

В пластах с аномально низким пластовым давлением, например при величине параметра  $P_{пл.}/P_z = 0,2$ , возможность развития вертикальных трещин гидроразрыва в пласте сохраняется для пород, коэффициент бокового распора которых не превышает 0,415, независимо от величины коэффициента

ента разгрузки породы  $n$ . В частности, при  $\kappa = 0,4$  и  $P_{нл.}/P_z = 0,44$  условие развития вертикальных трещин сохраняется при величине коэффициента разгрузки породы  $n < 0,525$ . В противном случае даже при создании чрезвычайно больших забойных давлений образование вертикальных трещин гидроразрыва в пласте не ожидается.

С повышением пластового давления вероятность развития вертикальных трещин возрастает по мере снижения величины коэффициента  $n$  от 1 до нуля в пределах изменения коэффициента бокового распора породы от 0,25 до 0,5. Например, при величинах  $\kappa = 0,40$  и  $n = 1,0$  условия образования вертикальных трещин гидроразрыва в пласте сохраняются при  $P_{нл.}/P_z \leq 0,26$ , т.е. в пластах с аномально низким пластовым давлением (ниже гидростатического). Однако при более высоких значениях  $P_{нл.}/P_z$  условия образования вертикальных трещин сохраняются по мере уменьшения величины коэффициента разгрузки породы, например до  $n = 0,75$  и  $n = 0,25$  при той же неизменной величине коэффициента бокового распора породы  $\kappa = 0,40$ .

При значениях параметра  $\kappa = 0,50$  условие (5) развития вертикальных трещин гидроразрыва в пласте нарушается, в этом случае возможно образование лишь горизонтальных трещин. При величинах коэффициента бокового распора породы в пределах от 0,5 до 1,0 образование вертикальных трещин реализуется при значениях  $P_{нл.}/P_z$  больших критических величин и значениях коэффициента разгрузки пород  $n$  меньших критических величин.

С уменьшением величины коэффициента разгрузки породы  $n$  при той же неизменной величине коэффициента бокового распора породы  $\kappa = 0,75$  условия развития вертикальных трещин гидроразрыва в пласте сохраняются лишь при более высоких значениях  $P_{нл.}/P_z$ .

При значениях  $\kappa = 1,0$  развитие вертикальных трещин сохраняется при  $P_{нл.}/P_z > 0,5$ , независимо от величины коэффициен-

та разгрузки породы  $n$ , в противном случае в пласте образуются горизонтальные трещины гидроразрыва.

Характерно, что для высокопористых песчаных коллекторов, величина коэффициента сжимаемости которых  $\beta_{ск}$  во много раз больше величины коэффициента сжимаемости их твёрдой фазы  $\beta_{тв.ф.}$ , коэффициент разгрузки породы составляет максимальную величину ( $n = 1,0$ ). Соответственно для низкопористых пород, у которых  $\beta_{ск}$  соизмерима с  $\beta_{тв.ф.}$ , величина коэффициента разгрузки породы  $n$  имеет минимальное значение  $n = 0$ .

В пластах с аномально низким пластовым давлением по мере снижения величины параметра  $P_{нл.}/P_z$  ниже 0,4 условие развития вертикальных трещин гидроразрыва в пласте сохраняется при коэффициенте бокового распора породы более 0,35.

### УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА В ПЛАСТЕ

При величине коэффициента бокового распора породы  $\kappa = 0,5$  условие развития вертикальных трещин гидроразрыва в пласте нарушается, что сопровождается ростом горизонтальных трещин. Так, при  $\kappa = 0,6$  и величине коэффициента разгрузки породы  $n = 1,0$  развитие горизонтальных трещин гидроразрыва в пласте сохраняется, если  $P_{нл.}/P_z = 0,166$ , а при величине коэффициента  $n = 0,75$  величина параметра  $P_{нл.}/P_z = 0,22$ . Иными словами, по мере снижения коэффициента разгрузки породы, что характерно для низкопористых пород-коллекторов, обеспечиваются условия развития горизонтальных трещин гидроразрыва в пластах не только с аномально низкими пластовыми давлениями, но и в пластах с более высокими пластовыми давлениями, характеризующихся низкими фильтрационно-емкостными и физико-механическими параметрами.

Если величина коэффициента бокового распора породы  $\kappa > 0,90$ , развитие горизонтальных трещин может произойти при

$P_{nl.} / P_z = 0,44$ , независимо от величины  $n$ . Однако при значении  $k < 0,90$  и той же величине параметра  $P_{nl.} / P_z$  образование горизонтальных трещин сохраняется для пород, коэффициент разгрузки которых меньше 1,0. Так, если коэффициент бокового распора породы = 0,60, а величина параметра  $P_{nl.} / P_z = 0,44$ , условия развития горизонтальных трещин гидроразрыва в пласте сохраняются при величине коэффициента разгрузки  $n < 0,375$ . Если же  $k$  достигает 0,7, образование горизонтальных трещин происходит при более высоких значениях коэффициента разгрузки породы, по крайней мере при  $n < 0,65$ . С увеличением параметра  $P_{nl.} / P_z$  до 1,0 условия развития горизонтальных трещин гидроразрыва сохраняются для пород, величина коэффициента бокового распора которых составляет 1,0, а величина коэффициента  $n$  не превышает 0,5.

### УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ САМОПРОИЗВОЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ВСКРЫТИЯ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН

Образование вертикальных трещин гидроразрыва при вскрытии пласта в процессе бурения скважин обусловлено нарушением напряженного состояния породы в пласте, характерного для нетронутого массива. При этом на стенке скважины и в призабойной зоне пласта под воздействием бурового раствора формируются эффективные, радиальные и тангенциальные (кольцевые) напряжения, величина которых, как видно из соотношений (9, 10, 11), изменяется в широких пределах в зависимости от величины забойного давления.

$$\sigma_z = - (P_z - nP_{nl.}), \quad (9)$$

$$\sigma_r = -\kappa((P_z - nP_{nl.})(1 - r_c^2/r_p^2) - P_3(r_c^2/r_p^2)), \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = -\kappa((P_z - nP_{nl.})(1 + r_c^2/r_p^2) + P_3(r_c^2/r_p^2)) [7], \quad (11)$$

где  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  – эффективные, радиальные и тангенциальные (кольцевые) напряжения, МПа;  $P_z$ ,  $P_{nl.}$  и  $P_3$  – горное, пластовое и забойное давление, МПа;  $r_c$ ,  $r_p$  – радиус скважины и расстояние до точки, в которой

определяется напряженное состояние породы, м.

В этих условиях процесс образования вертикальных трещин проходит две стадии, в зависимости от величины тангенциальных (кольцевых) напряжений на стенке скважины. Сначала под действием репрессии на пласт, не превышающей двойной величины бокового горного давления, происходит снятие кольцевых напряжений в призабойной зоне пласта и восстановление раскрытия естественных вертикальных трещин до их первоначального вида. Затем при величине репрессии на пласт, превышающей удвоенную величину бокового горного давления, кольцевые напряжения на стенке скважины становятся растягивающими. Под их воздействием происходит расширение вертикальных естественных трещин в пласте в пределах упругой деформации породы, а по исчерпанию её наступает гидроразрыв пласта, сопровождающийся образованием трещин гидроразрыва.

Данное явление происходит, согласно исследованиям [6, 7], при условиях, определяемых следующим соотношением:

$$\Delta P_p = P_3 - P_{nl.} = (1 - \nu)(2\sigma_\theta + \sigma_s), \quad (12)$$

где  $\Delta P_p$  – величина репрессии на пласт;  $\sigma_\theta$  – боковое горное давление в пласте;  $\sigma_s$  – предел прочности породы на разрыв.

Из соотношений (2, 12) видно, что величина репрессии  $\Delta P_p$ , при которой произойдет гидроразрыв пласта с образованием вертикальных трещин, снижается пропорционально уменьшению величины бокового распора породы  $k$  и коэффициента разгрузки породы  $n$  и возрастанию величины градиента пластового давления.

Развитие горизонтальных трещин в пласте происходит при забойных давлениях, превышающих горное давление, т.е. при  $P_3 > P_z$ , в то время как для образования вертикальных трещин необходима величина репрессии на пласт, превосходящая боковое горное давление.

Расчёты по формуле (12) показывают, что при глубине залегания пласта 4500 м,



величине  $\kappa = 0,15$  (что характерно для песчаников), коэффициенте Пуассона  $\nu = 0,13$ , прочности породы на разрыв  $\sigma_s = 5,0$  МПа, величине параметра  $P_{пл.}/P_z = 0,5$  и  $n = 0,85$  гидроразрыв пласта с образованием вертикальных трещин наступит при репрессии на пласт  $\Delta P_p = 21,2$  МПа. Учитывая, что величина пластового давления в данном примере равна  $P_{пл.} = 56,0$  МПа, то при  $P_z = 77,2$  МПа следует ожидать гидроразрыв пласта с образованием вертикальных трещин.

Общая величина репрессии на пласт  $\Sigma \Delta_p$  в процессе его вскрытия при бурении скважины складывается из величин статической репрессии  $\Delta P_{p.ст.}$  и гидродинамической репрессии  $\Delta P_{p.д.}$ . Величина статической репрессии для скважин глубиной свыше 1200 м составляет не более 5,0 – 7,0 % от величины пластового давления, в данном случае не выше 2,8 – 3,9 МПа. Величина гидродинамической составляющей репрессии на пласт, возникающей при спуске колонны бурильных труб в скважину, согласно исследованиям [17], определяется по эмпирической формуле:

$$\Delta P_{p.д.} = 33 (u\mu L / (D^2 - d^2)), \quad (13)$$

где  $\Delta P_{p.д.}$  – величина динамической репрессии на пласт, МПа;  $u$  – скорость спуска бурильной колонны в скважину при её бурении, м/сек;  $L$  – глубина залегания пласта, м;  $\mu$  – вязкость бурового раствора, МПа/сек;  $D$  и  $d$  – диаметр скважины и диаметр колонны бурильных труб, мм.

При спуске колонны бурильных труб диаметром 140 мм в скважину  $D=245$  мм со

скоростью  $u=1,5$  м/сек при вязкости бурового раствора  $\mu=36,0-41,0$  МПа/сек на глубину  $L=4500$  м, что характерно для условий бурения глубоких разведочных скважин в Саратовском Поволжье, величина  $\Delta P_{p.д.}$  составит 20,0 – 26,0 МПа. Таким образом, суммарная величина статической и динамической репрессии на пласт – 22,8 -26,5 МПа, что на 1,6- 5,3 МПа больше минимальной величины этих показателей.

Длина и ширина образующихся вертикальных трещин гидроразрыва в пласте определяется двумя соотношениями [8]:

$$1) l = (V_{ж} Q \mu / 2\pi^2 h^2 m k \sigma_0)^{1/2}, \quad (14)$$

где  $l$  – полудлина вертикальной трещины, м;  $V_{ж}$  – объём бурового раствора, поступившего в трещину, м<sup>3</sup>;  $Q$  – объёмная скорость поступления бурового раствора в трещину, см<sup>3</sup>/сек;  $\mu$  – структурная вязкость бурового раствора, МПа / сек;  $h$  – толщина пласта, м;  $m$  – коэффициент пористости пласта, дол. ед.;  $k$  – коэффициент проницаемости пласта, мкм<sup>2</sup>;  $\sigma_0$  – боковое горное давление, МПа.

$$2) \omega_0 = 4(1-2\nu) (1+\nu)(\Delta P_c - \sigma_0)l / 3E, \quad (15)$$

где  $\omega_0$  – максимальная ширина вертикальной трещины у забоя скважины, мм;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\Delta P_c$  – величина действующей репрессии на пласт, МПа;  $E$  – модуль Юнга, МПа;  $l$  – полудлина вертикальной трещины, м.

Расчёты по формулам (14,15) показывают, что при  $V_{ж}=1,0$  м<sup>3</sup>,  $Q=1,0$  л/сек,  $\mu=36,0$  МПа/сек,  $h=10$  м,  $m=0,1$ ,  $k=0,01$  мкм<sup>2</sup>,  $\sigma_0=10,0$  МПа,  $\nu=0,13$ ,  $\Delta P_c=26,5$  МПа,  $E=4,5 \cdot 10^4$  МПа полудлина и ширина вер-

Таблица 2.  
Дисперсность баритового порошка не превышает (d б.ч.) 0.044 мм.

№ п/п	Условный радиус частиц, см	Условный диаметр частиц, см	Содержание фракции, %
1	более $7 \cdot 10^{-4}$	более $14 \cdot 10^{-4}$	41,3
2	$7 \cdot 10^{-4} - 2,5 \cdot 10^{-4}$	$14 \cdot 10^{-4} - 5,0 \cdot 10^{-4}$	13,5
3	$2,5 \cdot 10^{-4} - 1,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4} - 2,0 \cdot 10^{-4}$	4,1
4	$1 \cdot 10^{-4} - 5,0 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-4} - 1,0 \cdot 10^{-4}$	4,1
5	$5 \cdot 10^{-5} - 2,5 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-5} - 5,0 \cdot 10^{-5}$	4,5
6	менее $2,5 \cdot 10^{-5}$	менее $5,0 \cdot 10^{-5}$	32,4

тикальной трещины, образующейся при гидроразрыве пласта, составляют  $l = 1,35$  м и  $\omega = 0,55$  мм.

Характеристика дисперсности твердой фазы глинистых растворов приведена в таблице 2 [17].

Поскольку ширина образующихся вертикальных трещин гидроразрыва на забое скважины в десятки раз превышает размеры дисперсной фазы бурового раствора, то при вскрытии пласта, как видно из таблицы 2, создаются условия для глубокого проникновения бурового раствора в пласт.

Подтверждением теоретических положений о возможности возникновения самопроизвольного гидроразрыва свидетельствует опыт бурения на Западно-Ровенской, Краснокутской и Белокаменной площадях Саратовского Поволжья. При вскрытии продуктивных пластов на данных площадях вследствие высоких репрессий на пласт наблюдался самопроизвольный гидроразрыв, который сопровождался раскрытием существующих трещин и образованием новых, приведших к поглощению бурового раствора и к нарушению гидродинамической связи скважины с пластом. Так, вскрытие мосоловских отложений, представленных известняками, в скважине 13 Западно-Ровенской площади (глубина залегания пластов 4864-4878, 4850-4856 м) осуществлялось на глинистом растворе, утяжеленном баритом, до плотности  $\rho = 1,24$  г/см<sup>3</sup> и вязкости  $\mu = 50,0$  МПа сек. Вследствие резкого роста динамической репрессии на пласт в процессе спуско-подъёмных операций бурильного инструмента, которая в совокупности со статической репрессией достигла критической величины, произошёл самопроизвольный гидроразрыв пласта с раскрытием в нём естественных трещин и образованием новых вертикальных трещин гидроразрыва. Операция сопровождалась интенсивной кольматацией пород на большую глубину, по крайней мере, превышающую максимальную глубину проникновения перфорационных каналов в пласт, достигающих

25-33 см при применении перфораторов типа ПКОТ-89 или ПКО-89. Поэтому при испытании скважины из-за нарушения её гидродинамической связи с пластом приток пластового флюида после перфорации отсутствовал.

Более того, в процессе проведения работ по интенсификации притока методом кислотной обработки приёмистость пласта отсутствовала при создании достаточно высокого давления на устье скважины, достигавшего 55,0 МПа, что ещё раз подтверждает факт самопроизвольного гидроразрыва пласта при вскрытии в процессе бурения скважины.

Гидродинамическая связь пласта со скважиной была восстановлена лишь после установки двухчасовой кислотной ванны (концентрация соляной кислоты в пределах 27,0 %), и пласт начал принимать кислоту при давлении на устье скважины  $P_y = 26,0$  МПа. Градиент давления приёмистости пласта составил  $P_z/H = 0,16$ , что, как ранее отмечалось, свидетельствует о гидрокислотном разрыве пласта и образовании вертикальных трещин в процессе проведения его соляно-кислотной обработки (СКО). При этом в течение 23-х минут в пласт было закачено 10,0 м<sup>3</sup> 14 % соляной кислоты при давлении на устье скважины  $P_y = 40,0$  МПа. В результате получен фонтанный приток пластовой воды.

Аналогичное явление самопроизвольного гидроразрыва пласта наблюдалось при бурении скважины 7 Краснокутской площади в процессе вскрытия тимано-пашийских песчаников (глубина залегания пласта 4380 - 4480 м).

Бурение проводилось на известково-битумном буровом растворе (ИБР), утяжеленном баритом до плотности  $\rho = 1,46$  г/см<sup>3</sup> и вязкости раствора  $\mu = 40,0-45,0$  МПа сек. Статическая репрессия на пласт составляла  $\Delta P_{c.p.} = 5,0$  МПа.

Расчёты по формуле (13) показали, что величина динамической репрессии на пласт при скорости спуска бурильной колонны в

скважину  $u = 1,6$  м/сек. составляла  $\Delta P_{o.p.} = 22,5-25,7$  МПа. Бурение проходило при следующих показателях физико-механических свойств породы-коллектора:  $\nu = 0,13$ ;  $\kappa = 0,14$ ;  $\sigma_s = 10,0$  МПа;  $P_{nl} = 58,9$  МПа;  $P_z = 109,5$  МПа. В данном случае (рис. 1) при величине коэффициента бокового распора  $0,14$  и соотношении  $P_{nl}/P_z = 0,53$  возможно образование вертикальных трещин гидроразрыва или раскрытие существующих трещин при достаточно высоких репрессиях на пласт.

По формулам (2, 12) рассчитали величину бокового горного давления в пласте –  $\sigma_6 = 8,3$  МПа, а также критическую величину репрессии, приводящей к гидроразрыву, –  $\Delta P_{кр. p.} = 23,2$  МПа. Совокупная величина статической и динамической репрессии на пласт при его вскрытии колебалась в пределах  $27,5-30,7$  МПа, что превышает значение критической репрессии, приводящей к самопроизвольному гидроразрыву пласта, на  $4,3-7,5$  МПа.

Если величина градиента давления гидроразрыва пласта составляла  $P_3/H \leq 0,0158$  МПа/м или  $(P_3/P_z) \leq 0,632$ , происходило образование вертикальных трещин. При этом  $P_3/H$  тимано-пашийских отложений в рассматриваемой скважине составлял  $0,01$  МПа/м, что ниже критической величины  $P_3/H = < 0,0158$  МПа / м, при которой

происходит гидроразрыв пласта с образованием в нём вертикальных трещин.

Геометрические размеры образовавшихся трещин, их полудлина и ширина, как показывают расчёты по формулам (14, 16), представленные в таблице 3, при величинах репрессий на пласт  $\Delta P_p = 27,5$  и  $30,7$  МПа составляют, соответственно,  $l = 4,14 - 4,39$  м и  $\omega_0 = 1,8 - 2,2$  мм.

Таким образом, в процессе вскрытия тимано-пашийских отложений при бурении скважины 7 Краснокутской площади произошёл самопроизвольный гидроразрыв пласта с образованием вертикальных трещин и поглощением значительного количества бурового раствора, что привело к нарушению его гидродинамической связи со скважиной. После вскрытия пласт находился под воздействием бурового раствора до спуска эксплуатационной колонны в течение 392 суток при репрессии  $\Delta P_{p.cm} = 5,0$  МПа, и это ещё сильнее ухудшило гидродинамическую связь пласта со скважиной.

При вызове притока методом мгновенного создания многократных высоких депрессий на пласт из призабойной зоны была извлечена битумообразная масса плотностью  $\rho = 2,2$  г/см<sup>3</sup> в количестве  $8,0$  м<sup>3</sup>. Попытка проведения гидрокислотного разрыва оказалась безуспешной. При создании давления

Таблица 3.  
Геометрические размеры вертикальных трещин гидроразрыва, образующихся в пласте, при самопроизвольном гидроразрыве пласта в процессе бурения скважины 7 Краснокутской площади

Порода	Объём жидкости, поступившей в трещину $V_{ж}$ , м <sup>3</sup>	Объёмный расход жидкости $Q_{ж}$ , л/сек	Структурная вязкость бурового раствора $\mu$ , мПа сек	Пористость породы-коллектора $m$ , дол.ед.	Проницаемость породы-коллектора $k$ , мкм <sup>2</sup>	Толщина пласта $h$ , м	Модуль Юнга $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона, дол. ед	Боковое горное давление $\sigma_6$ , МПа	Величина репрессии на пласт при его вскрытии $\Delta P_p$ , МПа	Полудлина трещины $l$ , см	Ширина трещины $\omega_0$ у забоя скважины, мм
Песчаник	10	70	40	0,1	0,01	100	5,0 104	0,13	8,3	27,5	414	1,8
" - "	" - "	" - "	45	" - "	" - "	" - "	" - "	" - "	" - "	30,7	439	2,22

на устье скважины  $P_y = 51,0$  МПа приёмистость пласта отсутствовала. Однако в скважине 5 Краснокутской площади из тиманопашийских отложений получен фонтанный приток газа дебитом  $Q=60,5$  тыс.м<sup>3</sup>/сут при работе скважины на диафрагме  $d=7,13$  мм. Вскрытие продуктивного пласта осуществлялось на линистом растворе плотностью  $\rho=1,42$  г/см<sup>3</sup>.

Характерно, что на данной площади из тех же отложений, залегающих на глубине 4104-4198 м, при освоении скважины 11-Краснокутской получен лишь небольшой приток газа с конденсатом. Получен незначительный приток газа и из тиманопашийских отложений (глубина 4508-4530 м) при освоении скважины 14 Краснокутской площади. Давление на устье скважины поднималось до 50,0 МПа, а на затрубье до 45,0 МПа.

Всё это свидетельствует о потенциальной продуктивности данных отложений, однако из-за низких коллекторских свойств пластов и несовершенной технологии вскрытия и освоения они не переходят в категорию промышленно-продуктивных объектов, как, например, на Разумовской, Тёпловской, Куликовской, Михалковской и других площадях Саратовского Поволжья, характеризующихся улучшенными коллекторскими свойствами и меньшими глубинами их залегания.

### **ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА В ПЛАСТЕ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ СКВАЖИН**

Главным фактором в оптимизации процесса ГРП как метода повышения продуктивности скважин является достижение соответствующего баланса между параметрами трещины и свойствами пласта, обуславливающими его нефтегазоотдачу. Длина и ширина трещин, а также их ориентация определяются моделью коллектора,

гидродинамическими и экономическими критериями, отражающими эффективность ГРП.

Гидродинамическим критерием эффективности ГРП является зависимость между длиной трещины и шириной её раскрытия, её ориентацией и ожидаемым увеличением продуктивности скважины. Экономическим критерием эффективности ГРП, определяющим длину трещины гидроразрыва в пласте и ширину её раскрытия, является величина дохода (экономическая эффективность), рассматриваемая как разница между затратами на создание трещины гидроразрыва определенной длины и ширины её раскрытия и доходами от дополнительной добычи нефти и газа при реализации проекта ГРП с заданными геометрическими параметрами.

Главным фактором в оптимизации процесса ГРП служит баланс между параметрами трещины и фильтрационно-емкостной характеристикой пласта, обуславливающими его нефтегазоотдачу. На рисунке 3 показано, что для коллекторов с высокой проницаемостью целесообразно создавать неглубоко проникающие в пласт трещины гидроразрыва, имеющие высокую удельную проводимость. При гидроразрыве пластов, представленных низкопроницаемыми коллекторами, желательно формировать в них глубоко проникающие трещины, в том числе с допустимой низкой проводимостью [20, 23]. Для коллекторов с проницаемостью  $k > 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> оптимальны трещины протяжённостью менее 300 м. В пластах с очень низкой проницаемостью  $k = 10^{-7}$  мкм<sup>2</sup> необходимы трещины гидроразрыва протяжённостью от 1070 м до 1370 м.

Исследование эффективности ГРП по гидродинамическому критерию показало, что по мере увеличения протяжённости трещины гидроразрыва и ширины её раскрытия эффективность метода возрастает, и в случае образования горизонтальных трещин она несколько выше, чем в случае

образования вертикальных, а при большой их протяжённости эффект от наличия в пласте горизонтальной трещины гидроразрыва будет приближаться к эффекту от увеличения радиуса скважины до величины радиуса трещин.

Так, например, дебит скважины после проведения ГРП, сопровождавшегося образованием горизонтальных трещин, повышается в 1,84 раза (при  $R_c = 0,1$  м;  $R_T = 5,0$  м и  $R_k = 500,0$  м) [12].

$$Q/Q_0 = (\lg R_k/R_c) / (\lg R_k/R_T), \quad (16)$$

где  $Q$  и  $Q_0$  – дебиты скважины после проведения ГРП и до проведения ГРП, м<sup>3</sup>;  $R_k$ ,  $R_c$  и  $R_T$  – радиус контура питания пласта, радиус скважины и радиус трещины.

Однако в случае образования вертикальных трещин гидроразрыва при ГРП дебит скважины, как показывают расчёты (17), повышается в 1,42 раза при тех же геометрических размерах образующихся трещин, что по крайней мере в 1,29 раза ниже степени прироста дебита скважин в случае образования горизонтальных трещин.

$$Q/Q_0 = (\lg R_k/R_c) / (\lg R_k/0,25R_T), \quad (17)$$

Характерно, что по мере увеличения длины образующихся трещин при ГРП разница в степени увеличения дебитов скважин, обусловленных указанным различием в их ориентации, возрастает в 1,6 и 1,86 при длине трещин гидроразрыва  $R_T = 10,0$  м и 100,0 м.

Расчёты по формуле (16) показывают, что с увеличением радиуса трещины, превышающей радиус скважины в 1000,0 раз, более чем пятикратно возрастает дебит скважины. При малой ширине раскрытия горизонтальных трещин ( $\omega \leq 0,2$  см) увеличение радиуса их распространения в пласте слабо влияет на эффективность ГРП (рис.4) [20]. Наибольший ее прирост наблюдается при длине трещин в пределах 15-20 м, что повышает продуктивность скважины почти в 1,5 раза. Увеличение протяжённости горизонтальных трещин свыше 20 м не приводит к существенному росту эффективности ГРП [6, 8,12].

С увеличением ширины раскрытия трещины от 0,2 до 0,4 см продуктивность скважины возрастает в два раза при той же ве-

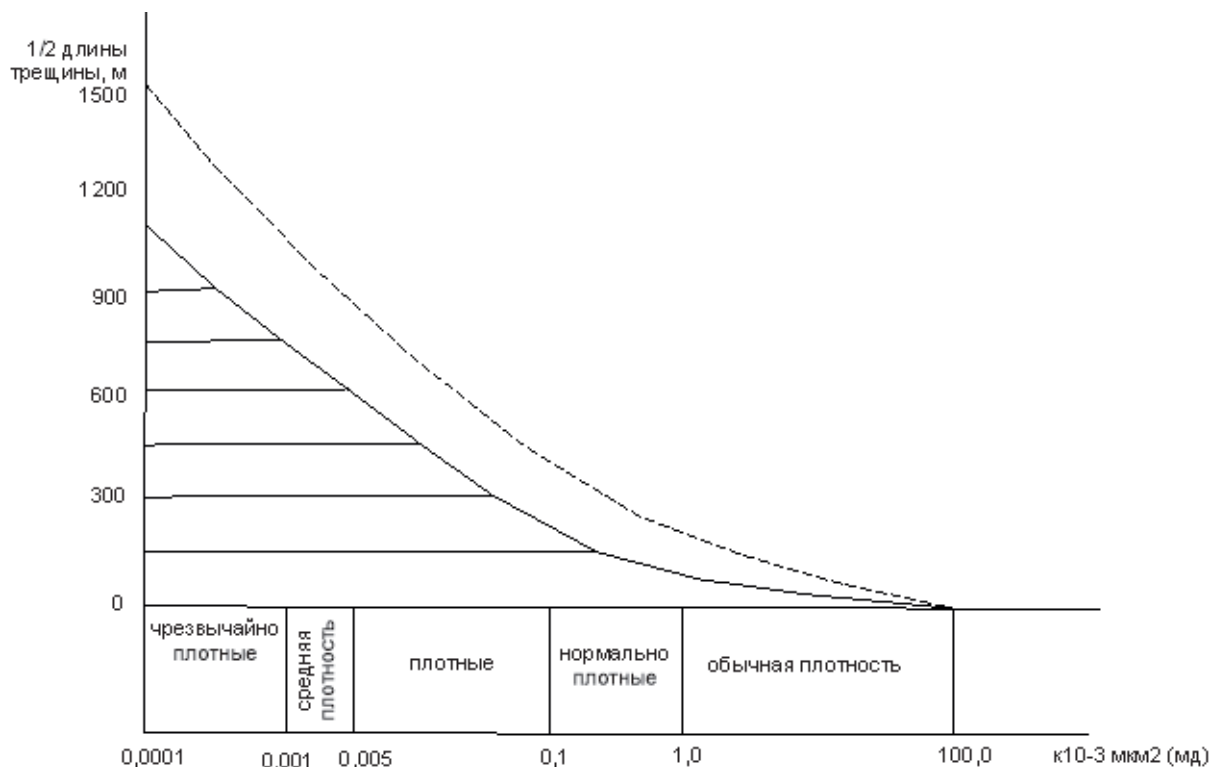


Рис. 3. График выбора полудлины трещины гидроразрыва в зависимости от проницаемости коллектора



личине радиуса горизонтальной трещины гидроразрыва в пласте, что и в предыдущем примере. Однако в этом случае протяженность трещины в диапазоне с 20 до 50 м дает четырёхкратный рост продуктивности. Дальнейшее увеличение зоны действия трещины (свыше 50 м) не приводит к заметному повышению эффективности ГРП.

При выборе оптимальных геометрических размеров трещин гидроразрыва следует отметить, что для достижения достаточно высокой пропускной способности трещины и обеспечения свободного входа расклинивающего материала ширина её раскрытия

должна превышать диаметр расклинивающего агента примерно в два раза.

Исходя из модели коллектора, влияние ширины раскрытия трещины гидроразрыва, её длины и проводимости ( $k_f/k$ ) на продуктивность скважины проявляется следующим образом:

$$k_f/k = \pi l_f C/\omega, \quad (18)$$

где  $k_f$  – проницаемость слоя расклинивающего материала в трещине, в качестве которого обычно применяется кварцевый песок, составляет  $k_f = 4,0-7,0$  мкм<sup>2</sup> на глубине залегания пласта не более 3000,0 м при эффективных напряжениях в пласте  $P_{эф} = 30,0-40,0$  МПа;  $k$  – проницаемость породы-коллектора;  $l_f$  – длина закреплённой трещины в пласте;  $\omega$  – ширина раскрытия трещины гидроразрыва в пласте (обычно 4-5 мм);  $\pi=3,14\dots$ ;  $C$  – коэффициент, величина которого равна 10, считается оптимальной (более высокая его величина за счёт качества расклинивающего материала, как правило, не приводит к росту экономической эффективности ГРП).

Для коллектора с относительно высокой проницаемостью (функция проводимости трещины  $k_f/k < 1,0$ ) при ГРП следует ожидать не более чем трёхкратное повышение продуктивности скважины, независимо от длины трещины.

При относительно низкой проницаемости породы-коллектора, когда функция проводимости трещины  $k_f/k > 1,0$ , предпочтительнее создавать трещины гидроразрыва большей протяжённости, поскольку они приводят к кратному повышению продуктивности скважины. Для более плотных пород оптимальны трещины гидроразрыва большой длины с умеренной пропускной способностью, то есть с небольшой шириной раскрытия трещины и невысокой функцией её проводимости.

В глубоких скважинах, вскрывающих продуктивные пласты с низкой проницаемостью и характеризующихся высокой стоимостью строительства скважин, необходимо создавать трещины гидроразрыва

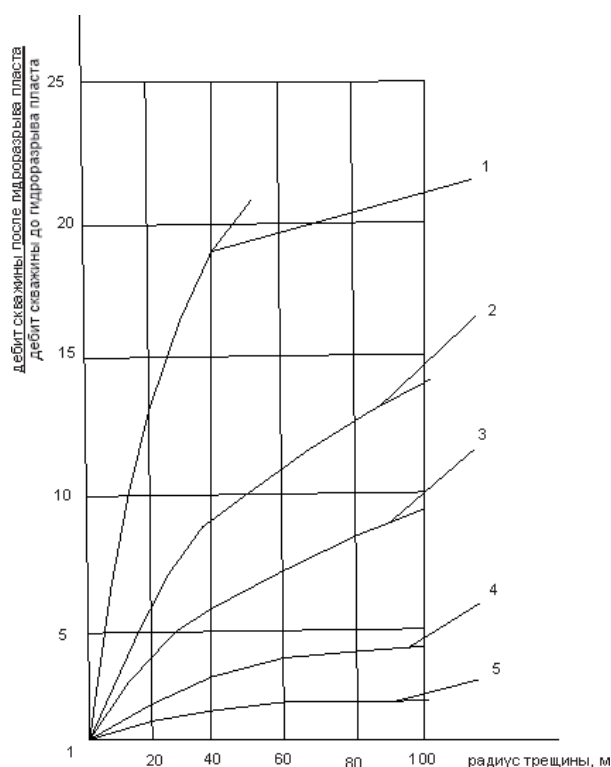


Рис. 4. Кривые эффективности гидроразрыва пласта в газовых скважинах в зависимости от радиуса и ширины раскрытия горизонтальных трещин (скважина гидродинамически совершенная).

- 1 – кривая отношения дебита условной скважины к дебиту совершенной скважины без ГРП;
- 2 – кривая эффективности ГРП при ширине раскрытия трещины - 10 см;
- 3 – кривая эффективности ГРП при ширине раскрытия трещины - 1 см;
- 4 – кривая эффективности ГРП при ширине раскрытия трещины - 0,4 см;
- 5 – кривая эффективности ГРП при ширине раскрытия трещины - 0,2 см.

большой протяжённости, чтобы добиться экономически выгодной продуктивности.

Проницаемость слоя расклинивающего материала, в качестве которого обычно применяется кварцевый песок на глубине залегания пласта не более 3000,0 м, составляет  $k_f = 4,0-7,0$  мкм<sup>2</sup> при эффективных напряжениях в пласте  $P_{эф} = 30,0-40,0$  МПа.

### ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ СКВАЖИН ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

С ростом глубин залегания продуктивных пластов до 3000,0 м и более, с которыми связаны основные перспективы открытия новых месторождений нефти и газа, снижается успешность проводимых операций по реализации потенциальной продуктивности скважин гидромеханическими методами, такими как ГРП с закреплением трещин песком или ГКРП. Это обусловлено всё возрастающими горным и пластовым давлением и температурой, большими гидравлическими потерями на трение при прокачке технологических жидкостей от устья скважины до забоя с большой объёмной скоростью до 50,0 л/сек и более по колонне насосно-компрессорных труб при

применении традиционной технологии их проведения.

В этих условиях для успешного проведения ГРП в глубоких скважинах необходимо создавать на устье и на забое скважины высокие давления, которые, однако, недостижимы из-за ограниченной гидравлической мощности существующих насосных агрегатов.

В связи с невозможностью проведения ГРП в глубоких скважинах по традиционной технологии закачки жидкости-пескононосителя по колонне НКТ из-за высоких гидравлических потерь, обусловленных большой объёмной скоростью движения потока жидкости-пескононосителя и её высокой вязкостью, нами была разработана оригинальная технология ГРП с закреплением трещин песком, которая предусматривала следующее.

- Закачку жидкости-пескононосителя осуществлять при ГРП по затрубному пространству, а при необходимости одновременно и по затрубному пространству, и по колонне НКТ, для чего при креплении скважины необходимо применять эксплуатационную колонну высокой прочности до 65,0 МПа, позволяющую без применения пакера успешно проводить ГРП по указанной технологии.

Таблица 4  
Геометрические размеры горизонтальной трещины гидроразрыва, образующейся в пласте, при гидроразрыве пласта в скважине 7 Тамбовской площади

Порода	Объём жидкости-пескононосителя $V_{ж}, м^3$	Объёмный расход жидкости $Q_{ж}, л/сек$	Вязкость жидкости-пескононосителя $\mu, мПа сек$	Продолжительность закачки жидкости-пескононосителя в пласт $t_p, мин$	Проницаемость породы-коллектора $k, мкм^2$	Толщина пласта $h, м$	Модуль Юнга $E, МПа$	Коэффициент Пуассона, дол. ед	Забойное давление $P_z, МПа$	Горное давление $P_{гор}, Мпа$	Радиус трещины $R_{тр}, м$	Ширина раскрытия трещины $\omega_0, см$	Проницаемость трещины $k_{тр}, мкм$
песчаник	55	16,0	15	61	0,001	2	5,0 104	0,13	82,3	77,8	18,55	0,325	8,8 105

- При ГРП использовать специальную жидкость-песконоситель повышенной плотности (до  $\rho=1,35$  г/см<sup>3</sup>) на водной основе. Наличие в её составе хлористого кальция, соляной кислоты в пределах 1,5-2,0%, карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) в пределах 0,7-1,0%, ПАВ (ОП-4) до 0,5%, флотореагента Т-66 до 1,0% обеспечивает улучшение целого ряда показателей [10, 11]. Достигается достаточно высокая величина гидростатического давления на забое скважины, способствующая, в сочетании с гидравлической мощностью агрегатов, достижению необходимых величин устьевых и забойных давлений. Создается высокая пескоудерживающая способность  $V=1,0$  см/сек при  $d_{\text{п}} \leq 0,5$  мм. Возникает высокая степень сохранения естественной проницаемости терригенных коллекторов в пределах  $\beta=76-80,0$  %, а также широкий диапазон изменения её вязкости  $\mu=2,0-25$  МПа\*с.
  - Для снижения устьевых давлений гидроразрыва и обеспечения условий эффективного создания трещин большого раскрытия и протяженности целесообразно предварительно произвести уплотнённую перфорацию пласта в узком интервале в пределах 1,5-2,0 м, сконцентрировав всю гидравлическую энергию потока жидкости в выбранном участке пласта.
  - В качестве пропанта для закрепления трещин гидроразрыва целесообразно использовать шлифзерно корунда, обладающего достаточно высокой прочностью для сохранения трещин гидроразрыва в раскрытом состоянии на большой глубине залегания продуктивного пласта.
- Разработанная технология ГРП с закреплением трещин песком была успешно применена нами при освоении скважины 7 Тамбовской площади с целью интенсификации притоков газа из низкопроницаемых терригенных отложений тимано-пашийского возраста. Гидроразрыв пласта данной скважины проводился в узком интервале залегания на глубине 3386-3387,5 м без применения пакера. Закачка жидкости-песконосителя в пласт осуществлялась по кольцевому пространству скважины. С этой целью в скважину была спущена высокопрочная обсадная колонна диаметром 139,7 мм, опрессованная на давление  $P_y = 55,0$  МПа. Гидроразрыв произведен при устьевом давлении 40,0 МПа с использованием при ГРП жидкости-песконосителя плотностью  $\rho=1,25$  г/см<sup>3</sup> и вязкостью  $\mu=15,0$  МПа\*с. В пласт закачено 55,0 м<sup>3</sup> жидкости-песконосителя с объемной скоростью закачки  $Q=15$  л/сек и 10 т песка фракции 0,4-0,8 мм с добавкой высокопрочного пропанта (шлифзерно корунда) той же фракции для сохранения трещин гидроразрыва в раскрытом состоянии.
- В качестве жидкости-песконосителя применялась специально разработанная нами жидкость на водной основе, утяжеленная хлористым кальцием, с добавлением в нее НС1 в пределах 1,75%, КМЦ – 0,85%, ПАВ (ОП-4) – 0,5%, флотореагента (Т-66) – 1%. В результате проведения ГРП в данной скважине получен приток газа дебитом  $Q=13-15,0$  тыс. м<sup>3</sup>/сут при работе скважины на диафрагме  $d=10$  мм. До проведения ГРП приток газа был крайне слабым. В течение двух суток стояния на притоке при депрессии на пласт  $P_d=16,0$  МПа давление на устье скважины выросло до  $P_y = 0,68$  МПа.
- Фактические величины градиента давления гидроразрыва с применением нефилтрующей жидкости-песконосителя при проведении ГРП в скважине 7 Тамбовской площади составили  $P_3/P_2 = 0,97$  и  $P_3/H = 0,0243$  МПа/м, что соответствует условиям образования горизонтальных трещин гидроразрыва в пласте, характеризующихся величинами градиентов давления гидроразрыва в пределах  $P_3/P_2 > 0,97$  и  $P_3/H > 0,023$  МПа/м [13]. В данном случае геометрические размеры образовавшейся горизонтальной трещины (протяженность и ширина раскрытия), а также проницаемость определяются по формулам (19, 20, 21) [16]:

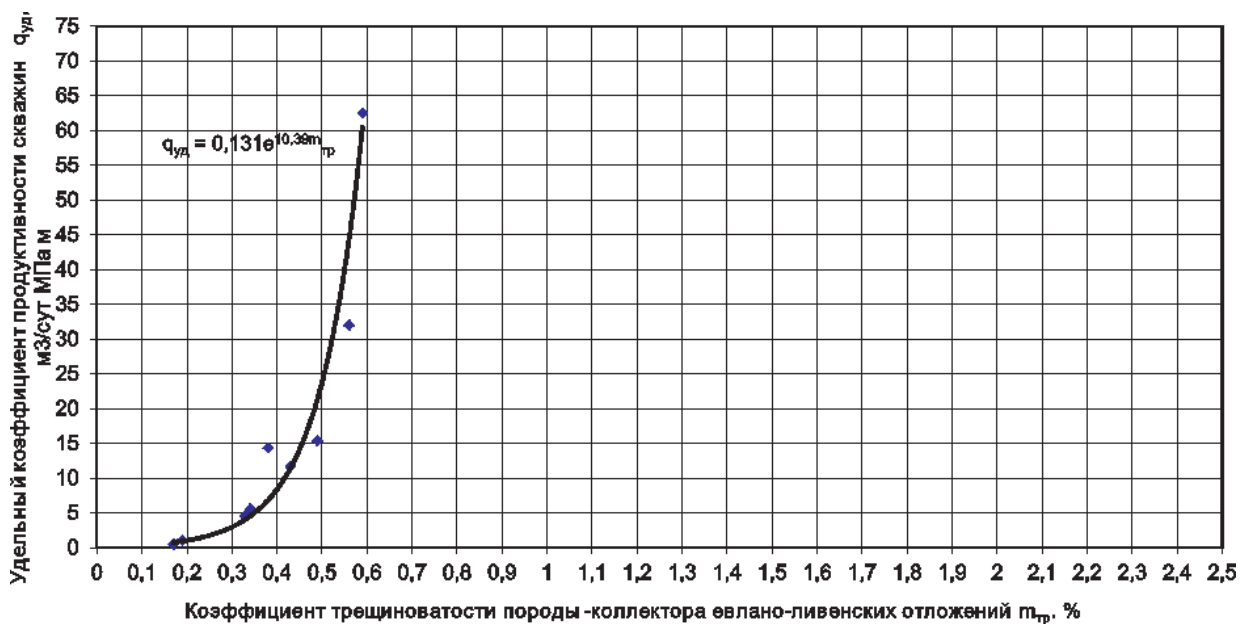


Рис. 5. Влияние трещиноватости породы-коллектора евлано-ливенских карбонатных отложений на величину удельного коэффициента продуктивности скважин Белокаменного месторождения

Таблица 5.  
Результаты работ по применению гидрокислотного разрыва пласта при освоении скважин на Белокаменном месторождении

№ п/п	№ скв.	Интервал перфорации, м	Параметры процесса СКО				Производительность скважины, м³/сут		Дата проведения СКО
			Объем закачанного кислотного раствора, м³	Устьевое давление закачки, Рн/Ркон, МПа	Приемистость пласта, л/сек	Продолжительность реагирования кислоты в пласте, час	до проведения СКО	после проведения СКО	
1	37	3587-3605	12	29/16,5	10,8	0,5	0	133,6	13.02.93
2	30	3548-3558,1	10,6	32/18	5,9	0,5	0	90,0	18.02.94
3	12	3546-3550,5	10	20/9	7,25	0,5	0	152,0	01.03.95
4	16	3562-3574	8	23/8,5	6,0	0,5	0	40-44	12.08.95
5	40	3496,6-3532,2	15,0	24/9	7,3	0,5	0	141,0	16.03.97
6	57	3553,8-3578,4	11,0	30/12,0	7,3	0,5	0	65-70	21-22.08.97
7	17	3724-3734 3738-3748	11	29,0/3-- 4,0	7,3	0,5	0	128,6	22.07.98
8	32	3554-3583	9,9	28,0/4-- 5,0	5,2	0,5	0	132,4	04.08.98
9	48	3612,4-3614,2 3616,8-3618,8 3620,4-3632	6	29/4	7,5	0,5	0	104,5	14.04.00
10	51	3601-3611 3613-3622	3,5	25/2	7,3	0,5	0	110,7	26.02.00
11	24	3724-3729	2	11/5	5,57	0,5	0	147,6	19.02.01
12	54	3484-3504	6	26/10	4,2	0,5	0	91,2	7.05.01

$$R_{тр} = C[Q(\mu t_p / \kappa)^{1/2}]^{1/2}, \quad (19)$$

где  $R_{тр}$  – радиус горизонтальной трещины гидроразрыва в пласте, м;  $C$  – эмпирический коэффициент ( $C= 0,02$ );  $Q$  – объёмная скорость закачки жидкости-пескононосителя в пласт, м<sup>3</sup>/мин;  $\mu$  – вязкость жидкости-пескононосителя, МПа сек;  $t_p$  – продолжительность закачки заданного объёма жидкости-пескононосителя в пласт, мин. Ширина раскрытия трещины гидроразрыва  $\omega_o$  у забоя скважины определяется из соотношения (20) [7, 8]:

$$\omega_o = 8 (1-\nu)^2 (P_c - P_r) R_{тр} / 3E, \quad (20)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $P_c$ ,  $P_r$  – забойное давление гидроразрыва и горное давление, МПа;  $E$  – модуль Юнга, МПа. Проницаемость образовавшейся горизонтальной трещины гидроразрыва определяется по формуле:

$$\kappa_{тр} = \omega_o / 12, \quad (21)$$

Результаты расчётов по определению геометрических размеров горизонтальной трещины гидроразрыва и её проницаемости, представленные в таблице 4, свидетельствуют о том, что в результате ГРП с закреплением трещин песком образовалась гори-

зонтальная трещина радиусом  $R_{тр} = 18,55$  м с шириной раскрытия  $\omega_o = 3,25$  мм и проницаемостью  $\kappa_{тр} = 8,8 \cdot 10^{-5}$  мкм<sup>2</sup>.

Весьма показателен успешный опыт применения гидрокислотного разрыва пласта (ГКРП) (табл.5), представленного порово-трещинными карбонатными коллекторами (известняками) с интенсивно развитой трещиноватостью (табл. 6), на Белокаменном месторождении в Саратовском Заволжье для восстановления гидродинамической связи пласта со скважиной, нарушенной в процессе его вскрытия вследствие самопроизвольного гидроразрыва.

Наиболее ярко это проявлялось при бурении скважин на этапе поздней стадии разработки месторождения, когда пластовое давление в нефтяной залежи евлано-ливенских отложений резко снизилось, примерно на 30-40 % от его первоначального значения, вследствие проявления упруго-замкнутого режима работы залежи. Что спровоцировало, как показывают расчёты по формулам (12, 13), критическое возрастание репрессий на пласт при его вскрытии до 32,0-37,0 МПа, обусловившее поглощение буро-

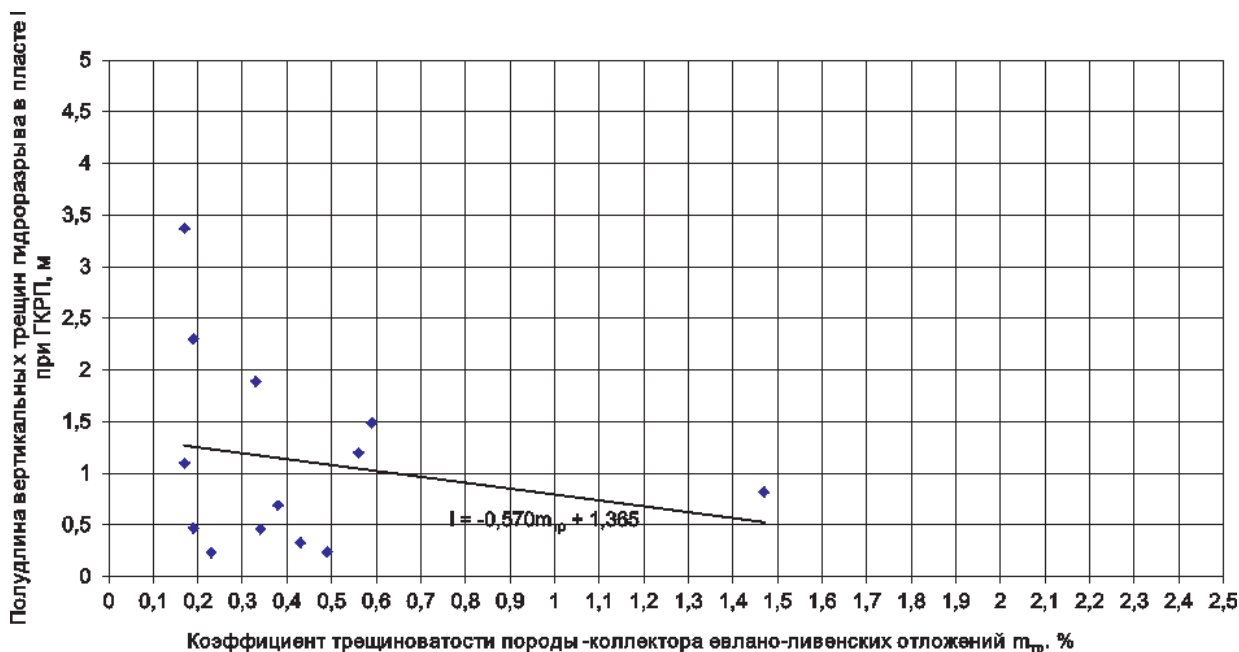


Рис. 6. Влияние трещиноватости породы-коллектора евлано-ливенских карбонатных отложений на выбор оптимальной полудлины вертикальных трещин гидроразрыва в пласте при ГКРП для реализации потенциальной продуктивности скважин Белокаменного месторождения



вого раствора, защемление его в призабойной зоне и нарушение гидродинамической связи пласта со скважиной. В результате приток отсутствовал даже при создании до-

Таблица 6.  
Значения коэффициента эффективной трещиноватости карбонатных коллекторов евлано-ливенских отложений на Белокаменном месторождении

№ п/п	№ скв.	Коэффициент эффективной трещиноватости $m$ , %
1	1	0,1424
2	37	0,166
3	2	0,34
4	36	0,179
5	6	0,44
6	22	0,443
7	27	0,402
8	7	0,153
9	34	0,28
10	16	0,189
11	35	0,244
12	24	1,47
13	12	0,419
14	53	0,412
15	57	0,564
16	100	0,139
17	54	0,1675
18	19	0,225
19	20	0,1825
20	30	0,325
21	4	0,434
22	5	0,497
23	29	0,116
24	33	0,227
25	40	0,344
26	23	0,199
27	48	0,428
28	69	0,474
29	46	0,61
30	31	0,41
31	51	0,378
32	61	0,235
33	89	0,148
34	81	0,164
35	17	0,489

статочны больших депрессий на пласт, достигавших 12,0 -15,0 МПа.

С целью восстановления гидродинамической связи пласта со скважинами на Белокаменном месторождении нами были проведены гидрокислотные разрывы, характеризовавшиеся плавным увеличением устьевых давлений при закачке кислотного раствора в пласт, вплоть до необходимых их величин, свидетельствующих о восстановлении приёмистости коллектора. При этом устьевые давления закачки кислотного раствора достигали высоких величин – до  $P_y=23,0-32,0$  МПа (табл. 4), а забойные давления составляли  $P_z=62,2-70,0$  МПа, т.е. по сути являлись давлениями разрыва пласта. Характерно их резкое снижение в течение 1-2 минут на 12,0-25,0 МПа при одновременном росте приёмистости пласта от нуля до 7,3 л/сек (от 0 до 648,0 м<sup>3</sup>/сут).

Градиент давления гидроразрыва пласта составлял  $P_z/H=0,01663-0,01875$  МПа/м, что, возможно, свидетельствовало об образовании вертикальных трещин гидроразрыва, поскольку горизонтальные трещины образуются в пласте при градиентах давления гидроразрыва  $P_z/H>0,023$  МПа/м. Вместе с тем, как показал опыт проведения ГКРП, при относительно низких устьевых давлениях закачки кислотного раствора в пласт, что наблюдалось при освоении скважины 24 Белокаменного месторождения, вероятно, раскрываются естественные трещины в пласте. Определённым подтверждением этому является аномально высокая трещиноватость породы-коллектора  $m_{т.э.}=1,47$  % (табл. 6) в зоне расположения указанной скважины, а также тот факт, что в процессе её бурения наблюдалось поглощение бурового раствора при вскрытии евлано-ливенских отложений.

В то же время при освоении целого ряда других скважин, расположенных в зонах пласта с менее выраженной трещиноватостью  $m_{т.э.}=0,116-0,489$  % (табл.6), требовалось создание высоких устьевых давлений для закачки кислотного раствора и восста-

новления гидродинамической связи пласта со скважиной (табл. 5). Данные процессы сопровождались образованием искусственных вертикальных трещин гидроразрыва в пласте.

Результаты выполненных нами расчётов по формулам (2, 14, 15), представленные в таблице 7, свидетельствуют о достаточно эффективном воздействии вновь образованных трещин на нефтеотдачу пластов,

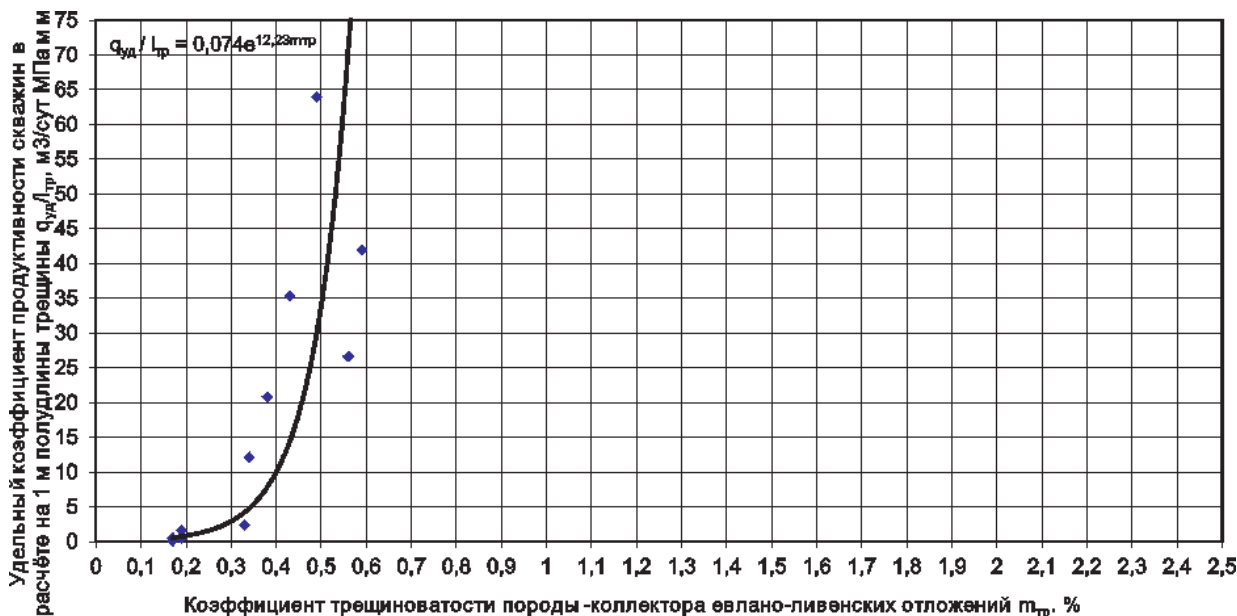


Рис. 7. Влияние трещиноватости породы-коллектора евлано-ливенских карбонатных отложений на величину удельного коэффициента продуктивности скважин Белокаменного месторождения в расчёте на 1 м полудлины вертикальной трещины гидроразрыва в пласте

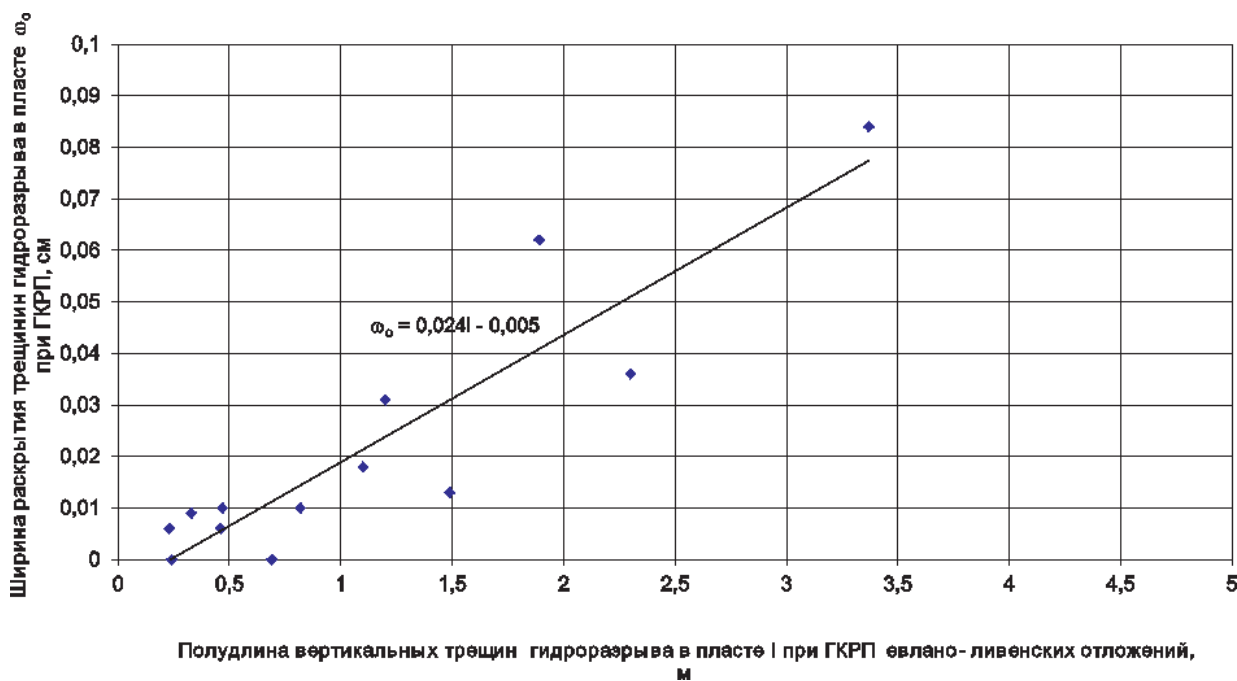


Рис. 8. Зависимость ширины раскрытия трещин гидроразрыва в пласте евлано-ливенских карбонатных отложений от полудлины вертикальных трещин гидроразрыва в пласте при ГКРП в скважинах Белокаменного месторождения

что в совокупности с довольно развитой трещиноватостью породы-коллектора обеспечивает высокую степень реализации потенциальной продуктивности скважин. Анализ полученных результатов позволяет отметить следующее.

- Геометрические размеры трещин гидроразрыва в пласте при ГКРП, обуславливающих повышение продуктивности скважин, определяются степенью интенсивности развития трещиноватости породы-коллектора (рис.5-10).
- При повышении коэффициента трещиноватости породы-коллектора  $m_{тр}$  в два раза от 0,17 % до 0,34% удельный коэффициент продуктивности скважин (КПС) увеличивается в 9 раз – от 0.557 м<sup>3</sup>/сут МПа м до 5,0 м<sup>3</sup>/сут МПа м. Величина КПС резко возрастает (более чем в 12 раз) при дальнейшем росте коэффициен-

та трещиноватости породы-коллектора в 1,7 раза – от 0,34% до 0,59 % , когда значение КПС достигает 62,5 м<sup>3</sup>/сут МПа м (табл. 7, рис. 5, 7).

- Характерно, что геометрические размеры трещин гидроразрыва, обеспечивающие реализацию потенциальной продуктивности скважин, обратно пропорциональны величине коэффициента трещиноватости породы-коллектора. Таким образом, по мере снижения трещиноватости породы-коллектора целесообразно создание трещин гидроразрыва всё большей полудлины и ширины их раскрытия для реализации процесса в максимально полном объёме (рис. 6, 8).
- По мере увеличения полудлины вертикальных трещин гидроразрыва в пласте прямо пропорционально возрастает ши-

Таблица 7.  
Геометрические размеры вертикальных трещин гидроразрыва, образующихся в пласте, при ГКРП евлано-ливенских отложений в скважинах Белокаменного месторождения

№.№ скв.	Объём кислотного раствора $V_{кр}$ , м <sup>3</sup>	Объёмный расход жидкости $Q_{ж}$ , л/сек	Вязкость кислотного раствора $\mu$ , мПа сек	Пластовое давление, МПа	Коэффициент трещиноватости $m_{тр}$ , %	Проницаемость $k$ и пористость $m$ породы-коллектора $k/m$ , мкм <sup>2</sup>	Толщина пласта $h$ , м	Модуль Юнга $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона, дол. ед	Забойное давление $P_f$ , МПа	Боковое горное давление $P_{от}$ , МПа	Полудлина трещины $l_{тр}$ , м	Ширина раскрытия трещины $\omega_0$ , см	Проницаемость трещины $k_{тр}$ , мкм <sup>2</sup>	Производительность скважины $Q$ после ГКРП, м <sup>3</sup> /сут.
12	10	7,25	2	41	0,589	0,15 / 0,1	4	5,0 104	0,2	57,98	13,8	1,485	0,01257	1,74*10 <sup>3</sup>	152,0
16	8	6	" - "	" - "	0,189	0,0046/ 0,1	12	" - "	" - "	61,2	" - "	2,299	0,036	11,1*10 <sup>3</sup>	44,0
17	11	7,3	" - "	" - "	0,489	0,254 / 0,1	20	" - "	" - "	69,1	" - "	0,24	0,0074	464,0	128,6
24	2	5,57	" - "	27	1,47	0,04/ 0,1	5	" - "	" - "	50,9	16,76	0,818	0,01	1,0*10 <sup>3</sup>	147,6
28	1,5	3	" - "	" - "	0,227	0,03 / 0,1	13	" - "	" - "	58,2	" - "	0,23	0,006	338,0	72,0
30	10,6	5,9	" - "	41	0,325	0,013 / 0,1	10	" - "	" - "	70	13,8	1,89	0,0623	32,3*10 <sup>3</sup>	90,0
32	9,9	5,2	" - "	" - "	0,189	0,02 / 0,1	29	" - "	" - "	66,3	" - "	0,469	0,01	900,0	132,4
37	12	10,8	" - "	" - "	0,166	0,004 / 0,1	14	" - "	" - "	67,5	" - "	3,37	0,094	74,5* 10 <sup>3</sup>	133,6
40	15	7,3	" - "	" - "	0,344	0,092 / 0,1	20,2	" - "	" - "	61,8	" - "	0,458	0,006	74,5* 10 <sup>3</sup>	141,0
48	6	7,5	" - "	" - "	0,428	0,16 / 0,1	13,6	" - "	" - "	67,8	" - "	0,33	0,0094	746,0	104,5
51	3,5	7,3	" - "	" - "	0,375	0,011 / 0,1	19	" - "	" - "	63,75	" - "	0,688	0,011	1,16*10 <sup>3</sup>	110,7
54	6	4,2	" - "	" - "	0,1675	0,0038/ 0,1	20	" - "	" - "	63,45	" - "	1,1	0,0184	2,82*10 <sup>3</sup>	91,2
57	11	7,3	" - "	" - "	0,564	0,0075/ 0,1	23,4	" - "	" - "	68,28	" - "	1,2	0,031	8,0*10 <sup>3</sup>	70,0

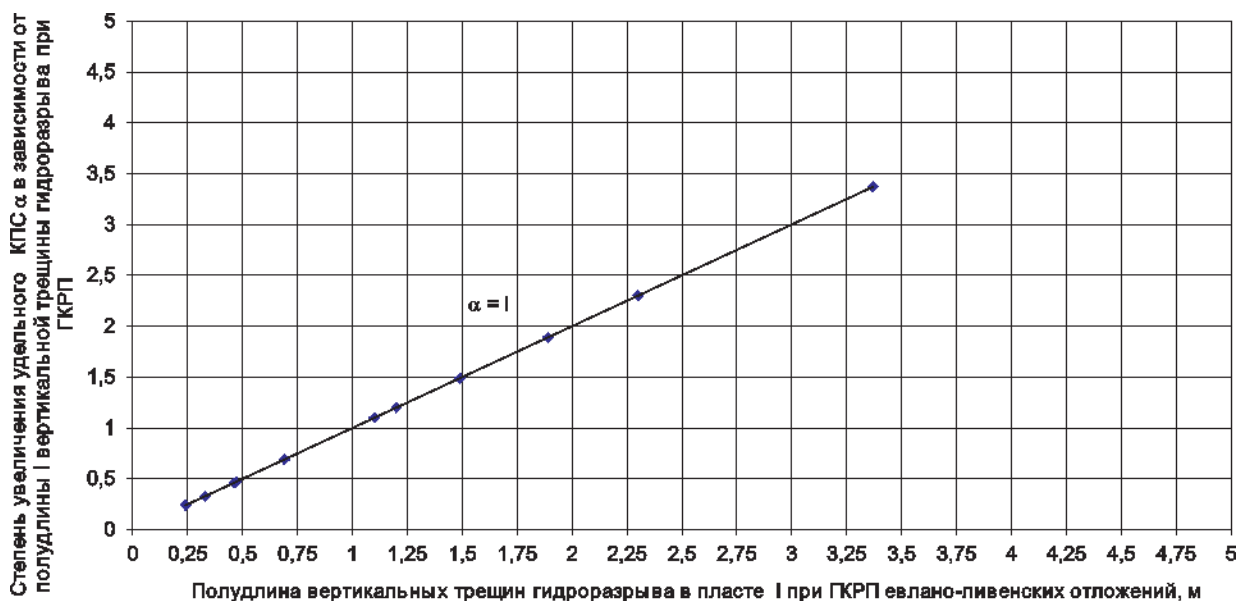


Рис. 9. Степень увеличения удельного коэффициента продуктивности скважин КПС в зависимости от полудлины I вертикальных трещин гидроразрыва в пласте при ГКРП по скважинам Белокаменного месторождения

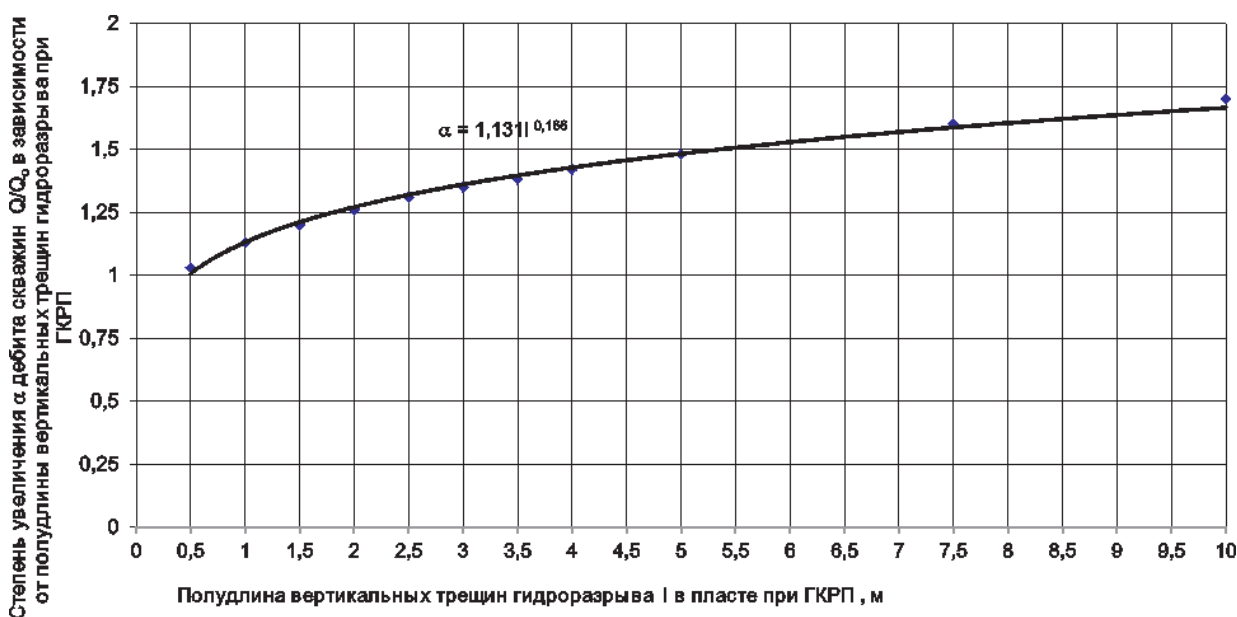


Рис. 10. Степень увеличения дебита скважин  $Q/Q_0$  в зависимости от полудлины I вертикальных трещин гидроразрыва в пласте при ГКРП

рина их раскрытия и их пропускная способность (проницаемость).

- Увеличение полудлины вертикальных трещин гидроразрыва в пласте при ГКРП от 0,24 м до 3,37 м, то есть в 14,0 раз, прямо пропорционально росту удельного КПС с  $0,25 \text{ м}^3/\text{сут МПа м}$  до  $3,6 \text{ м}^3 /$

сут МПа м – в 14,0 раз (рис.9). Прирост удельного КПС в расчёте на единицу прироста полудлины вертикальных трещин гидроразрыва в диапазоне увеличения их полудлины от 0,24 м до 3,37 м составляет  $\Delta\text{КПС}/\Delta l = 3,35/3,13 = 1,07 \text{ м}^3/\text{сут МПа м/м}$ .

Определенным химическим критерием выбора оптимальных геометрических размеров трещин гидроразрыва при ГКРП является продолжительность нейтрализации кислотного раствора в пласте, которая тесно связана с удельной поверхностью фильтрации породы-коллектора и термобарической характеристикой пласта [24]. При этом по мере увеличения геометрических размеров трещин пласта и трещиноватости породы-коллектора возрастает его удельная поверхность фильтрации, что резко ограничивает продолжительность нейтрализации кислотного раствора и его реакционную способность, препятствуя тем самым растворению породы на стенках трещины и обеспечению её высокопроводящей способности.

Исходя из гидродинамического критерия, эффективность ГРП и ГКРП возрастает по мере увеличения полудлины вертикальных трещин в затухающем режиме и, как показали расчёты по формуле (17), при создании вертикальных трещин гидроразрыва с полудлиной до 2,0 м дебит скважины увеличивается на 26,0 %. Однако при дальнейшем росте полудлины вертикальных трещин гидроразрыва в 5,0 раз дебит скважины увеличивается всего на 44,0 % (рис. 10).

## ВЫВОД

1. Разработаны критерии и методика прогноза ориентации трещин гидроразрыва в пласте при освоении скважин в зависимости от геолого-физической характеристики пласта и физико-механических свойств породы-коллектора.

2. Представлены графические зависимости, позволяющие прогнозировать ориентацию трещин гидроразрыва исходя из величины пластового и горного давления, коэффициента бокового распора породы и коэффициента разгрузки породы.

3. Показано, что в определенных условиях вскрытия продуктивных пластов при излишней плотности и вязкости бурового раствора возможно возникновение самопроизвольного гидроразрыва пласта с образованием вертикальных трещин, с поглощением бурового раствора и нарушением гидродинамической связи пласта со скважиной.

4. Основными критериями, определяющими выбор оптимальных геометрических размеров трещин гидроразрыва для реализации потенциальной продуктивности скважин, являются геолого-физические, физико-механические, гидродинамические, химические и экономические критерии.

5. Определяющим фактором в выборе оптимальных геометрических размеров трещин гидроразрыва является коэффициент трещиноватости породы пласта.

6. Опыт проведения гидрокислотного разрыва пласта (ГКРП) евлано-ливенских отложений в скважинах Белокаменного месторождения показал высокую эффективность рассмотренного метода.

7. Выбор оптимальных геометрических размеров трещин гидроразрыва при ГКРП возможен в пределах действующих ограничений, которыми являются гидродинамические, физико-механические, химические и экономические критерии и факторы.

8. Согласно гидродинамическому критерию, увеличение дебита скважины по мере увеличения радиуса трещин носит затухающий характер, а стоимость работ на реализацию процесса резко возрастает по мере увеличения полудлины вертикальной трещины гидроразрыва.

9. Согласно химическому критерию оптимизации, зона воздействия трещин гидроразрыва при ГКРП ограничивается продолжительностью нейтрализации закачанного объёма кислотного раствора в пласт.



## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Абдулин Ф.С. Добыча нефти и газа. – М.: Недра, 1983.– 256 с
2. Абдулин Ф.С. Повышение производительности скважин. –М.: Недра, 1975.–264 с.
3. Блажевич В.А. Практическое руководство по гидравлическому разрыву пласта.– М.: ГНТИНГТЛ, 1961.–135 с.
4. Гиматулинов Ш.К. Справочная книга по добыче нефти. –М.: 1974.– 704 с.
5. Добрынин В.М. Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа.– М.: Недра, 1970.– 239 с.
6. Желтов Ю.П., Христианович С.А. О гидравлическом разрыве нефтяного пласта/ Изв. АН СССР, отд. техн. Наук.– №5.– 1955.– с.200-218.
7. Желтов Ю.П. Деформации горных пород. – М.: Недра, 1966.–198 с.
8. Желтов Ю.П. Механика нефтегазоносного пласта. – М.: Недра, 216 с.
9. Калинин В.Ф. Определение коэффициента эффективной трещиноватости карбонатных коллекторов евлано-ливенских отложений на Белокаменном месторождении/ Изв. Саратовского Университета. Новая серия. Том 7.– 2007 .– вып.2 .– 3 с.
10. Калинин В.Ф. Инструкция по приготовлению и применению промывочной жидкости повышенной плотности без твёрдой фазы для заканчивания скважин .– Саратов: КБ ПО «Саратовнефтегаз». РД 39-2-1054-84
11. Калинин В.Ф. Жидкость-песконоситель для гидропескоструйной перфорации и гидроразрыва пластов при испытании и заканчивании скважин. ИЛ №37-85 НТД ЦНТИ.– Саратов, 1985.– 2 с.
12. Кривонос И.В., Чарный И.А. Расчёт дебитов скважин с трещиноватой призабойной зоной пласта//Нефтяное хозяйство.– 1955.– №9.– с.10-12.
13. Кристеан М, Сокол С., Константиnescу А. Увеличение продуктивности и приёмистости скважин.– М.: Недра, 1985.– 184 с.
14. Махмудбеков Э.А., Вольнов А.И. Интенсификация добычи нефти.– М.: Недра, 1975.– 264 с.
15. Минеев Б.П., Сидоров Н.А. Практическое руководство по испытанию скважин. – М.– Недра, 1981.– 280 с.
16. Оркин К.Г., Юрчук А.М. Расчёты в технологии и технике добычи нефти. –М.: Недра, 1967.– 380 с.
17. Роджерс В.Ф. Состав и свойства промывочных жидкостей. –М.: Недра, 1967.– 599 с.
18. Сукуненко Е.В., Бондарев В.И., Сидоров Н.А. Определение величины гидродинамического давления, возникающего при спуске колонны бурильных труб в скважину// Бурение, 1968.– №3.
19. Усачёв П.М. Гидравлический разрыв пласта. – М.: Недра, 165 с.
20. Гончаров В.П. Влияние качества жидкости на эффективность гидроразрыва газовых пластов. В сб. Промысловая геология /Труды НВНИИГГ. – 1969. – Вып. 12.
21. Paper SPE 12357, 1983.– p.10
22. Veatch R.W. Overview of current hydraulic fracturing desing and treatment technology. Part 1// Journal of Petroleum Technology, 1969.–№4. pp .– 677-687.
23. Tinsley J.M. Vertical fracture height its effect on steady state production increase// Journal of Petroleum Technology.– May 1969.– pp. 633-638.
24. Калинин В.Ф. Критерии выбора оптимальной технологии повышения продуктивности скважин физико-химическими методами в карбонатных коллекторах// Недра Поволжья и Прикаспия.– 2022.– № 105.– с. 4-43.