

**Копченова Дарья Михайловна**, Студент,  
Санкт-Петербургский Горный Университет  
императрицы Екатерины II

**Шишов Сергей Алексеевич**, Студент,  
Санкт-Петербургский Горный Университет  
императрицы Екатерины II

## РАСЧЁТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИАКРИЛАМИДНОЙ ЖИДКОСТИ

**Аннотация.** В данной статье представлен технологических параметров ГРП с применением полиакриламидной жидкости. Определены геометрия трещины, проницаемость призабойной зоны и дебит скважины. Сравнение с моделированием подтвердило преимущество полиакриламида перед гуаром.

**Ключевые слова:** Гидравлический разрыв пласта, полиакриламид, технологические параметры, трещина, проницаемость, дебит скважины.

Параметры скважины №1128 указаны в таблице 1:

Таблица 1

Параметры скважины

Дебит жидкости, т/сут	8
Обводненность, %	16
Температура, °С	83
Давление пластовое, МПа	29
Толщина, м	8,8
Глубина скважины, м	2910,7
Песчанистость	0,54
Расчлененность	6,2
Проницаемость, мкм <sup>2</sup>	0,027

### Расчет технологических показателей разработки при применении ГРП

Рассчитаем технологические параметры при проведении ГРП.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 2:

Таблица 2

Исходные данные

Диаметр по долоту, м	0,3
Глубина скважины, м	2910,7
Вскрытая толщина пласта, м	8,8
Средняя проницаемость, мкм <sup>2</sup>	0,027
Модуль упругости пород, МПа	40000
Коэффициент Пуассона	0,2
Средняя плотность пород над продуктивным пластом, кг/м <sup>3</sup>	2550

В качестве жидкости разрыва и песконосителя используется низковязкий полиакриламид плотностью 930 кг/м<sup>3</sup> и вязкостью 200 мПа·с. Расклинивающий материал –



керамический проппант ForeProp 16/20 плотностью 2500 кг/м<sup>3</sup>, его содержание в смеси составляет 300 кг/м<sup>3</sup>. Закачка приготовленного состава ведётся с постоянной скоростью 12 л/с.

Гидроразрыв выполняется последовательной закачкой двух объёмов: сначала 1 м<sup>3</sup> жидкости разрыва, затем, без остановки, 9 м<sup>3</sup> жидкости-песконосителя, которая продолжает развитие трещины и транспортирует проппант.

Для расчёта вертикальной и горизонтальной составляющих горного давления используется гипотеза А. Н. Динника, описывающая напряжённое состояние пород в условиях залегания:

Вертикальная составляющая горного давления:

$$\rho_{zg} = \rho_n \cdot g \cdot L \quad (1)$$

$$\rho_{zg} = 2550 \cdot 9,81 \cdot 2910,7 = 72,81 \text{ МПа};$$

Горизонтальная составляющая горного давления:

$$\rho_z = \frac{\rho_{zg} \cdot \nu}{1 - \nu} \quad (2)$$

$$\rho_z = \frac{72,81 \cdot 0,2}{1 - 0,2} = 18,2 \text{ МПа}.$$

Параметры трещины определены по упрощённой методике Ю. П. Желтова. Для оценки ширины трещины после закачки 1 м<sup>3</sup> жидкости разрыва предварительно рассчитано забойное давление в этот момент.

Соответствующая расчётная формула имеет вид:

$$\frac{P_{заб}}{P_z} \cdot \left( \frac{P_{заб}}{P_z} - 1 \right)^3 = 5,25 \cdot E^2 \cdot \frac{Q \cdot \mu_{жср}}{(1 - \nu^2)^2 \cdot P_z^3 \cdot V_{жс}} \quad (3)$$

$$\frac{P_{заб}}{18,2 \cdot 10^6} \cdot \left( \frac{P_{заб}}{18,2 \cdot 10^6} - 1 \right)^3 = 5,25 \cdot (4 \cdot 10^{10})^2 \cdot \frac{0,012 \cdot 0,2}{(1 - 0,2^2)^2 \cdot (18,2 \cdot 10^6)^3 \cdot 1}$$

$$P_{заб} = 21,25 \text{ МПа}.$$

Найдем длину трещины после закачки 1 м<sup>3</sup> жидкости разрыва по формуле (4):

$$l = \sqrt{\frac{V_{жс} \cdot E}{5,6 \cdot (1 - \nu^2) \cdot h \cdot (P_{заб} - P_z)}} \quad (4)$$

$$l = \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{10}}{5,6 \cdot (1 - 0,2^2) \cdot 8,8 \cdot (21,25 - 18,2) \cdot 10^6}} = 16,66 \text{ м}.$$

Следующим шагом найдем раскрытость трещины по формуле (5):

$$\omega = \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot l \cdot (P_{заб} - P_z)}{E} \quad (5)$$

$$\omega = \frac{4 \cdot (1 - 0,2^2) \cdot 8,8 \cdot (21,25 - 18,2) \cdot 10^6}{4 \cdot 10^{10}} = 4,87 \text{ мм}.$$

Раскрытость трещины достаточна для поступления песка фракции 0,8-1,2 мм с последующей жидкостью-песконосителем.

Рассчитаем объемную долю проппанта в смеси по формуле:

$$n_0 = \frac{\frac{G}{\rho_{пес}}}{\frac{G}{\rho_{пес}} + 1} \quad (6)$$

где G – масса проппанта, приходящаяся на 1 м<sup>3</sup> жидкости, кг.



$$n_0 = \frac{\frac{300}{2500}}{\frac{300}{2500} + 1} = 0,107$$

Далее определим вязкость жидкости-песконосителя по формуле (7):

$$\begin{aligned} \mu_{жс} &= \mu \cdot e^{3,18 \cdot n_0} \\ \mu_{жс} &= 0,2 \cdot e^{3,18 \cdot 0,107} = 281 \text{ мПа} \cdot \text{с} \end{aligned} \quad (7)$$

Теперь определим давление на забое скважины в конце гидроразрыва (после закачки  $10 \text{ м}^3$  жидкости в трещину):

$$\frac{P_{заб}}{18,2 \cdot 10^6} \cdot \left( \frac{P_{заб}}{18,2 \cdot 10^6} - 1 \right)^3 = 5,25 \cdot (4 \cdot 10^{10})^2 \cdot \frac{0,012 \cdot 0,281}{(1 - 0,2^2)^2 \cdot (18,2 \cdot 10^6)^3 \cdot 10}$$

$$P_{заб} = 19,82 \text{ МПа.}$$

Определим длину и ширину трещины по формулам (4) и (5):

$$l = \sqrt{\frac{10 \cdot 4 \cdot 10^{10}}{5,6 \cdot (1 - 0,2^2) \cdot 8,8 \cdot (19,82 - 18,2) \cdot 10^6}} = 72,31 \text{ м.}$$

$$\omega = \frac{4 \cdot (1 - 0,2^2) \cdot 72,31 \cdot (19,82 - 18,2) \cdot 10^6}{4 \cdot 10^{10}} = 11,22 \text{ мм.}$$

Жидкость-песконоситель распространилась в трещине на расстоянии от скважины примерно равном 90% её длины:

$$\begin{aligned} l_1 &= 0,9 \cdot l \\ l_1 &= 0,9 \cdot 72,31 = 65,08 \text{ м} \end{aligned} \quad (8)$$

После снятия давления трещина закрывается неполностью на интервале, в котором находилась жидкость-песконоситель.

Принимая пористость попанта в трещине после ее закрытия  $m=0,3$ , определим остаточную ширину трещины:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{\omega \cdot n_0}{1 - m} \\ \omega_1 &= \frac{0,01122 \cdot 0,107}{1 - 0,3} = 0,0017 \text{ м} \end{aligned} \quad (9)$$

Проницаемость такой трещины составляет:

$$\begin{aligned} k_m &= \frac{\omega_1^2}{12} \\ k_m &= \frac{0,0017^2}{12} = 2,45 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Найдем среднюю проницаемость в ПЗП по формуле (11):

$$k_1 = \frac{(\pi \cdot D \cdot \omega_1) \cdot k + \omega_1 \cdot k_T}{\pi \cdot D} \quad (11)$$

$$k_{пзн} = \frac{(3,14 \cdot 0,3 \cdot 0,0017) \cdot 0,027 \cdot 10^{-12} + 0,0017 \cdot 2,45 \cdot 10^{-7}}{3,14 \cdot 0,3} = 4,48 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$$

Средняя проницаемость трещины уменьшается с удалением от скважины. При оценке принимаем ширину и проницаемость постоянными.

Тогда средняя проницаемость на расстоянии 1 м от скважины будет:



$$k_l = \frac{(3,14 \cdot 2,3 \cdot 0,0017) \cdot 0,027 \cdot 10^{-12} + 0,0017 \cdot 2,45 \cdot 10^{-7}}{3,14 \cdot 2,3} = 5,85 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$$

Средняя проницаемость на расстоянии полудлины раскрытой трещины (32,54 м) от скважины будет:

$$D = 2 \cdot 32,54 + 0,3 = 65,38 \text{ м.}$$

$$k_{l_1} = \frac{(3,14 \cdot 65,38 \cdot 0,0017) \cdot 0,027 \cdot 10^{-12} + 0,0017 \cdot 2,45 \cdot 10^{-7}}{3,14 \cdot 65,38} = 2,05 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2.$$

Гидроразрыв проводится через НКТ с внутренним диаметром 0,062 м, продуктивный пласт изолируется пакером с гидравлическим якорем.

Определим параметры ГРП. Начнем с нахождения потерь давления на трение при движении жидкости-песконосителя по НКТ.

Плотность жидкости-песконосителя:

$$\rho_{жс} = \rho_n \cdot (1 - n_0) + \rho_{пес} \cdot n_0 \quad (12)$$

$$\rho_{жс} = 930 \cdot (1 - 0,107) + 2500 \cdot 0,107 = 1098 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho_{жс}}{\pi \cdot d \cdot \mu_{жс}} \quad (13)$$

$$Re = \frac{4 \cdot 0,012 \cdot 1098}{3,14 \cdot 0,062 \cdot 0,281} = 962$$

Коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (14)$$

$$\lambda = \frac{64}{962} = 0,066$$

По Ю. В. Желтову, при наличии песка в жидкости при  $Re > 200$  происходит ранняя турбулизация потока, и потери трения при  $Re = 967$  и  $n_0 = 0,107$  возрастают в 1,52 раза.

Определим потери давления на трение:

$$P_{тр} = \frac{1,52 \cdot \lambda \cdot 16 \cdot Q^2 \cdot L \cdot \rho_{жс}}{2 \cdot \pi^2 \cdot d^2} \quad (15)$$

$$P_{тр} = \frac{1,52 \cdot 0,066 \cdot 16 \cdot 0,012^2 \cdot 2910,7 \cdot 1098}{2 \cdot 3,14^2 \cdot 0,062^2} = 41,18 \text{ МПа.}$$

Следующим шагом будет нахождение давления, которое нужно создать на устье при гидроразрыве:

$$P_y = P_{заб} - \rho_{жс} \cdot g \cdot L + P_{тр} \quad (16)$$

$$P_y = 19,82 \cdot 10^6 - 1098 \cdot 9,81 \cdot 2910,7 + 41,18 \cdot 10^6 = 29,65 \text{ МПа.}$$

Ожидаемый эффект ГРП оценён по формуле Максимовича (17), в которой радиус скважины после разрыва принимается равным радиусу трещины.

$$\mathcal{E} = \frac{\ln\left(\frac{R_k}{r_c}\right)}{\ln\left(\frac{R_k}{r_m}\right)} \quad (17)$$

$$\mathcal{E} = \frac{\ln\left(\frac{250}{0,30/2}\right)}{\ln\left(\frac{250}{65,08}\right)} = 5,5$$

Найдём значение дебита:

$$Q_2 = \mathcal{E} \cdot Q_1 \quad (18)$$



$$Q_2 = 5,5 \cdot 8 = 44 \frac{m}{сут}$$

Далее рассчитываем значение скин-фактора с помощью свойств призабойной зоны пласта:

$$S_d = \left( \frac{k_r}{k_d} - 1 \right) \cdot \ln \left( \frac{r_d}{r_c} \right) \quad (19)$$

где  $k_r$  и  $k_d$  – проницаемость коллектора и изменённой зоны соответственно, мкм<sup>2</sup>;  $r_d$  и  $r_c$  – радиус измененной зоны и радиус скважины по долоту соответственно, м.

$$S_d = \left( \frac{0,027}{2,05} - 1 \right) \cdot \ln \left( \frac{65,08}{0,15} \right) = -5,36$$

Для закачки жидкости гидроразрыва в скважину используют насосный агрегат 4АН-700, см. таблицу 3.

Таблица 3

Характеристика 4АН-700

Скорость	Подача, л/с	Давление, МПа
I	6,0	70
II	8,3	51
III	11,6	36
IV	14,6	29

Определим необходимое число насосных агрегатов:

$$N = \frac{P_y \cdot Q}{P_a \cdot Q_a \cdot k_{ТС}} + 1 \quad (20)$$

где  $P_a$  – давление, развиваемое агрегатом в рабочем режиме;

$Q_a$  – объёмная подача агрегата при указанном давлении;

$k_{ТС}$  – поправочный коэффициент на техническое состояние оборудования (учитывает срок службы), измеряется в диапазоне 0,5-0,8.

$$N = \frac{29,65 \cdot 12}{36 \cdot 11,6 \cdot 0,8} + 1 = 2,06$$

Примем, что необходимое число агрегатов равно трем.

Далее вычислим объем жидкости для продавливания жидкости-песконосителя:

$$V_n = 0,785 \cdot d^2 \cdot L \quad (21)$$

$$V_n = 0,785 \cdot 0,062^2 \cdot 2910,7 = 8,78 \text{ м}^3.$$

Продолжительность гидроразрыва одним агрегатом при его работе на III скорости:

$$t = \frac{V_{жс} + V_n}{Q_a} \quad (22)$$

$$t = \frac{10 + 8,78}{11,6} = 26,99 \text{ мин.}$$

Далее сравним полученным аналитическим расчетом дебит после применения ГРП на полиакриламиде с смоделированным в программном обеспечении tNavigator стандартным ГРП на гуаре.

На первом этапе была создана секторная геолого-гидродинамическая модель участка пласта ЮС2 (рис. 1), включающая скважину-кандидат №1128.

Проницаемость в модели рассчитана по петрофизической зависимости, полученной на керне и использованной при подсчёте запасов.



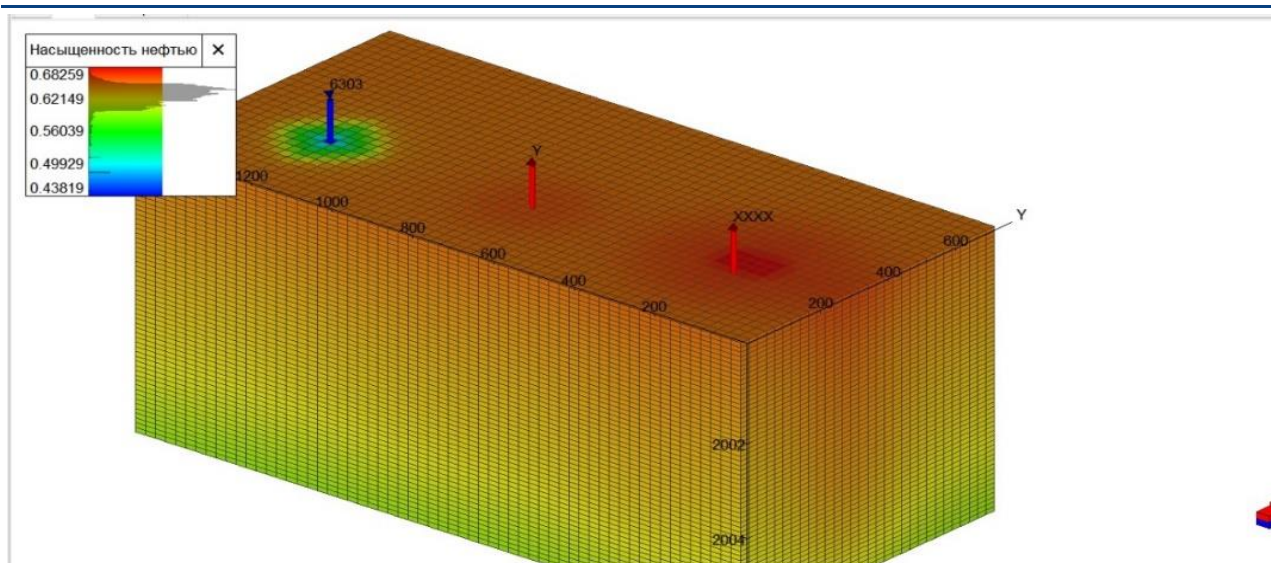


Рисунок 1. Куб проницаемости секторной модели участка

Для гидродинамической модели использованы физико-химические свойства пластовых флюидов по лабораторным данным.

На следующем этапе в адаптированную модель были внесены параметры для моделирования гидравлического разрыва пласта.

Распределение насыщенности после ГРП (рис. 2) показывает: трещина не выходит за пределы нефтенасыщенной зоны, прорыв к воде или газу отсутствует – выбор скважины и дизайн верны.

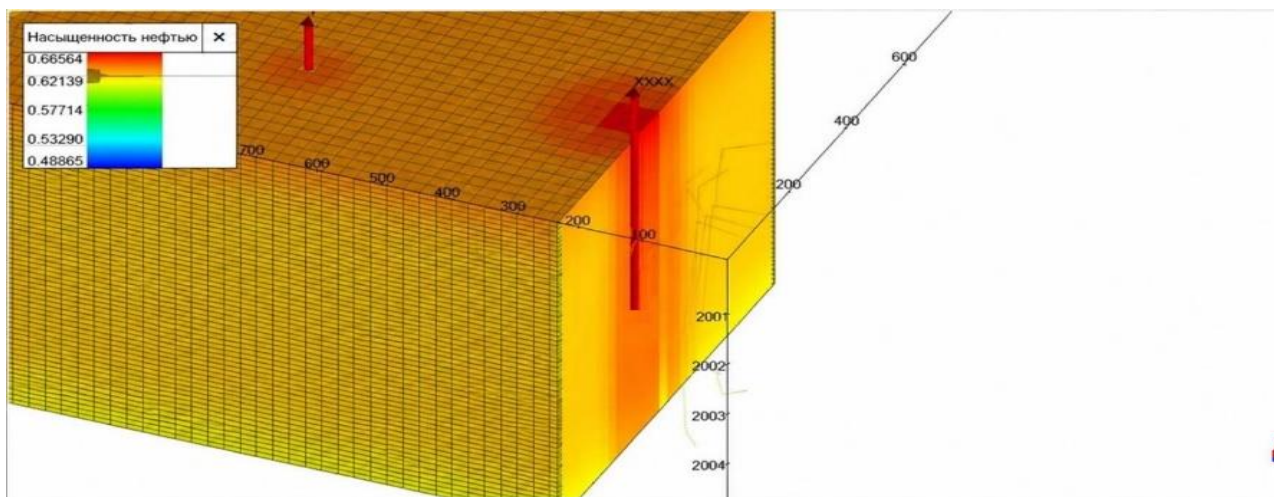


Рисунок 2. Распределение текущей нефтенасыщенности после проведения ГРП



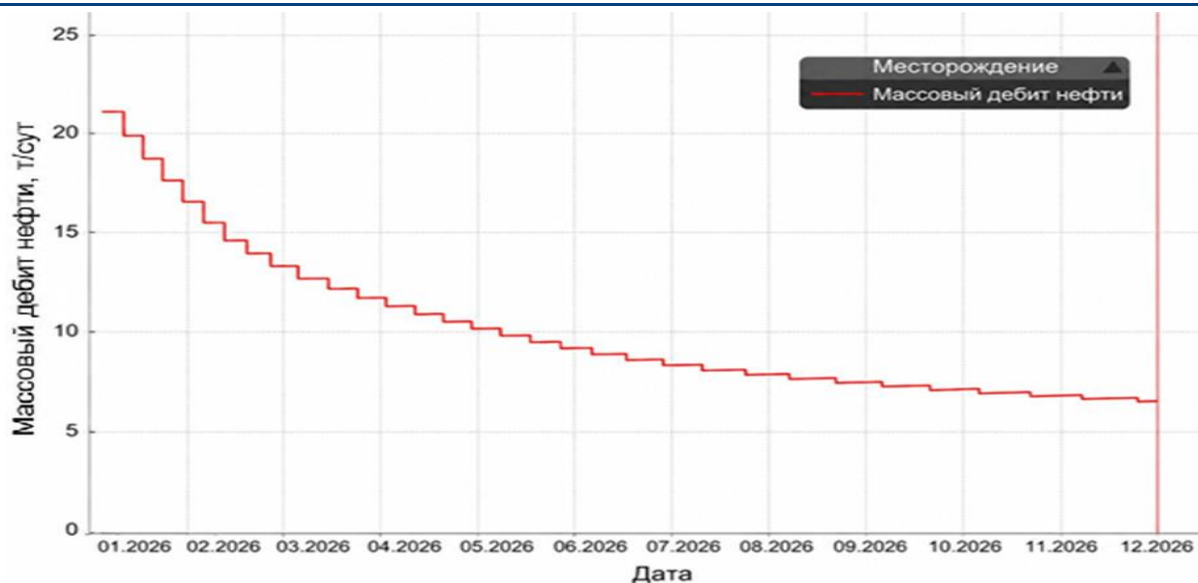


Рисунок 3. Динамика дебита нефти скважины №1128 по результатам моделирования в tNavigator

Результаты моделирования (рис. 3) показывают резкий рост дебита после ГРП с 01.01.2026: начальный дебит – 21,5 т/сут, накопленная добыча за первый год – 3 937,5 т. На рисунке 4 представлен график, сопоставляющий динамику добычи нефти.

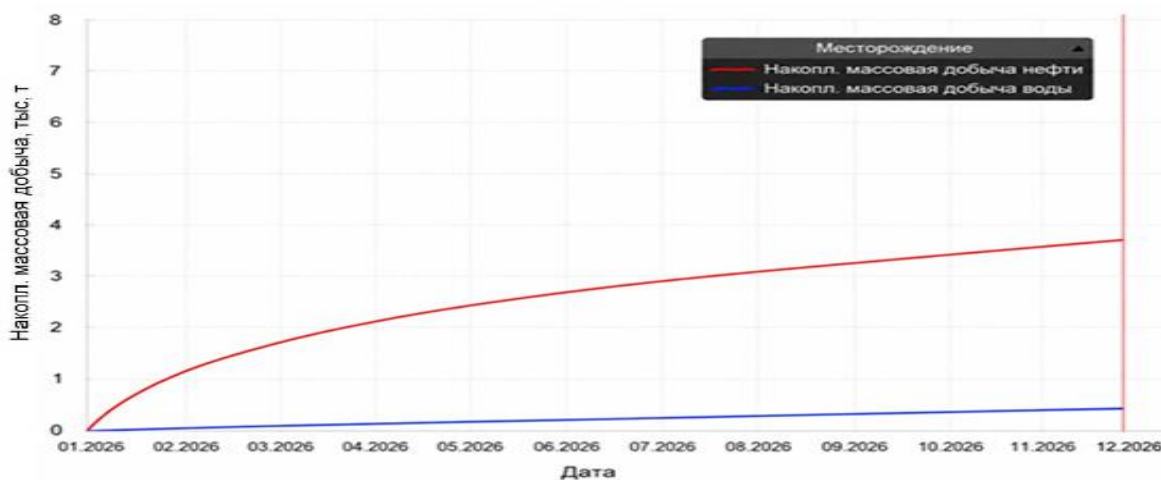


Рисунок 4. Накопленная добыча

Сравнение аналитического расчёта и гидродинамического моделирования подтверждает высокую эффективность ГРП на полиакриламиде по сравнению с гуаровым. Технологический эффект полиакриламидной жидкости выше.

**Вывод:** Результаты расчёта и моделирования подтвердили высокую эффективность ГРП на полиакриламиде для скв. № 1128. Аналитика показала рост дебита жидкости с 8 до 44 т/сут, увеличение проницаемости ПЗП с 0,027 до 2,05 мкм<sup>2</sup> и скин-фактор –5,36. Сравнение с гуаровым ГРП (дебит 21,5 т/сут против 36,96 т/сут) демонстрирует преимущество полиакриламидной жидкости по проводимости трещины и продуктивности.



*Список литературы:*

1. Оркин К. Г., Юрчук А. М. Расчеты в технологии и технике добычи нефти. – М.: Недра, 1967. – 380 с.
2. Желтов Ю. П. Разработка нефтяных месторождений. – М.: Недра, 1986.
3. Гилаев Г. Г., Ольховская В. А., Хафизов В. М. Гидроразрыв пласта в вертикальных и горизонтальных скважинах: учебное пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2023. – 304 с.
4. Колесник С. В., Ефимов М. Э. Интенсификация добычи нефти посредством применения жидкости гидроразрыва пласта на основе полиакриламида // Нефтепромышленное дело. – 2023. – № 9 (657). – С. 43–47.

