

## **ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ РИСКА ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ ГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГИДРОРАЗРЫВА**

### ***Сергей Владимирович Сердюков***

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, зав. лабораторией, тел. (913)745-30-03, e-mail: ss3032@yandex.ru

### ***Татьяна Викторовна Шилова***

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (923)708-97-29, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

### ***Леонид Алексеевич Рыбалкин***

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник, тел. (983)323-33-62, e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

Рассмотрено влияние параметров гидроразрыва на фильтрационное сопротивление системы параллельных скважин при предварительной дегазации угольного пласта неразгруженного от горного давления. Приведены результаты сравнительного анализа темпов дегазации угольного пласта при использовании скважин без гидроразрыва, а также скважин с ненаправленным или множественным интервальным гидроразрывом различной ориентации. Дана оценка влияния разрывов разного типа на снижение риска подземной разработки газоносных угольных пластов. Полученные результаты позволяют оценить перспективность применения существующих модификаций технологии гидроразрыва на угольных шахтах.

**Ключевые слова:** угольный пласт, подземная разработка, предварительная дегазация, гидроразрыв, фильтрационное сопротивление, темп дегазации, индекс опасности аварий.

## **RISK REDUCTION ESTIMATION FOR UNDERGROUND MINING OF GAS-CONTAINED COAL SEAMS WHILE USING THE HYDRAULIC FRACTURING**

### ***Sergey V. Serdyukov***

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Head of Laboratory of Physical Methods of Influence on Rock Mass, phone: (913)745-30-03, e-mail: ss3032@yandex.ru

### ***Tatiana V. Shilova***

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (923)708-97-29, e-mail: shilovatanya@yandex.ru

### ***Leonid A. Rybalkin***

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, phone: (983)323-33-62, e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

In the paper, influence of hydraulic fracturing parameters on filtration resistance of system of parallel holes during preliminary degassing of coal seam loaded with strata pressure is considered. Results of comparative analysis of degassing rates of coal seam while using holes without hydraulic fracturing and holes with non-directed or plural interval hydraulic fracturing of various orientation are represented. Estimation of influence of fracturing of different types on risk reduction of underground mining of gas-contained coal seams is given. Obtained results allow to estimate perspective of application of present modifications of hydraulic fracturing technology at coal mines.

**Key words:** coal seam, underground mining, preliminary degassing, hydraulic fracturing, filtration resistance, degassing rate, accident hazard index.

### ***Введение***

Оценка влияния шахтного гидроразрыва на снижение риска подземной отработки запасов угольных месторождения выполнена с учетом действующих методических рекомендаций по анализу опасностей и оценке риска аварий на угольных шахтах [1], утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 05.06.2017 г. № 192.

Одним из основных факторов, влияющих на индекс опасности аварий (ИОА) на угледобывающих шахтах, является степень предварительной дегазации угля. Особенно важен этот параметр при разработке сверхкатегорийных по метану (ИОА=0.7) и опасных по внезапным выбросам (ИОА=1) пластов. В соответствии с [1] для снижения риска подземной отработки запасов угольных месторождения необходимо, чтобы каптаж метана до начала очистных работ составил не менее 50% от абсолютной газообильности угля.

Перспективным методом повышения эффективности предварительной дегазации пластов является шахтный гидроразрыв. Известны несколько его модификаций. Наибольшее распространение получил разрыв пласта вдоль скважины, проводимый водой без расклинивания трещины пропантом [2, 3]. Обычно его выполняют в одну стадию в специально пробуренных скважинах длиной до сотни метров. По другой технологии, гидроразрыв проводят в несколько стадий, каждую в коротком интервале дегазационной скважины, создавая вдоль или поперёк неё несколько десятков небольших трещин [4-6].

В настоящей работе приведена сравнительная оценка влияния существующих способов шахтного гидроразрыва на дренирование угольного пласта параллельными скважинами.

### ***Фильтрационное сопротивление зоны дренирования дегазационной скважины***

Структурно угольный пласт представляет блочную среду, фильтрация газа в которой идёт по трещинам кливажа. Размеры блоков, содержащих основную часть метана, составляют единицы миллиметров, реже – несколько сантиметров, а их проницаемость – пренебрежительно мала. В соответствии с моделью выхода метана, представленной в работе [7], время его диффузии из микробло-

ков в среднем меньше, чем фильтрации к скважине. Способность пласта к газоотдаче определяется его проницаемостью [8], а эффективность дегазации - фильтрационным сопротивлением зоны газового дренажа. Цель применения гидроразрыва состоит в снижении этого сопротивления, в повышении гидродинамического совершенства дегазационных скважин.

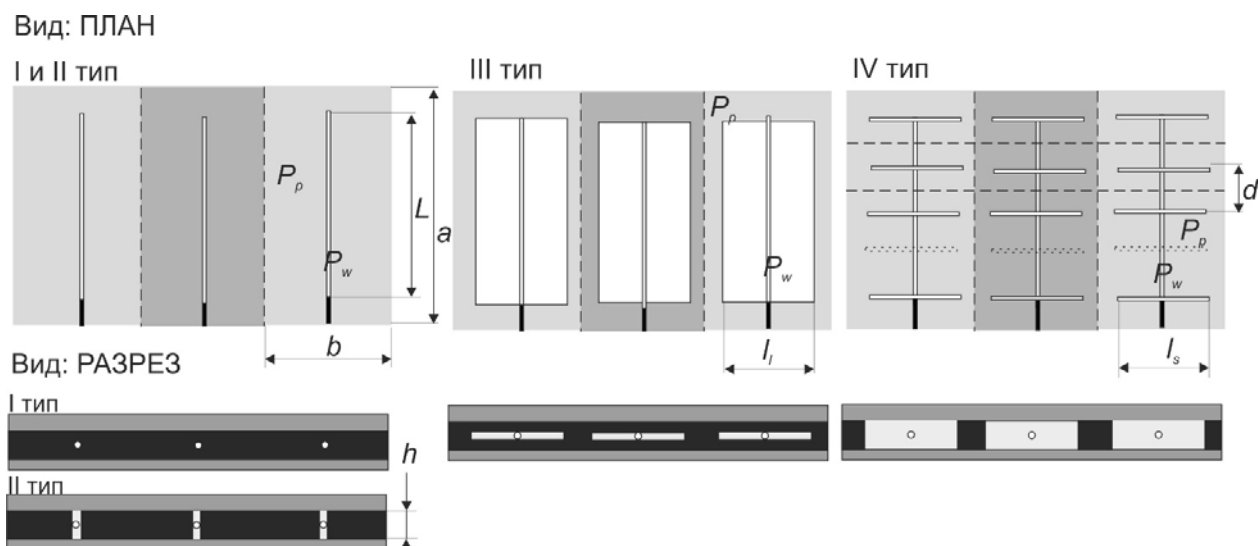
Для сравнительного анализа эффективности схем дегазации будем использовать приближенные аналитические решения, которые наглядны и, вместе с тем, достаточны точны для практического использования.

Уравнение притока идеального газа к скважине имеет вид  $P_k^2 - P_w^2 = \alpha Q + \beta Q^2$ , где  $Q$  – объемный дебит газа;  $P_k, P_p$  – его давление, соответственно, на контуре питания и в скважине;  $\alpha$  и  $\beta$  – фильтрационные сопротивления [9]. Поскольку слагаемое  $\beta Q^2$  составляет не более 5-10% от  $\alpha Q$ , а распределение значений сопротивлений  $\alpha$  и  $\beta$  по пласту, как правило, неизвестно, при анализе фильтрации газа используем линейную зависимость вида [10]

$$P_k^2 - P_w^2 = \frac{\mu P_0}{k_h h} \theta Q, \quad (1)$$

где  $\theta$  – коэффициент фильтрационного сопротивления, обусловленный гидродинамическим несовершенством скважины по степени вскрытия пласта;  $k_h$  – проницаемость угля по пласту,  $m^2$ ;  $h$  – мощность пласта, м;  $\mu$  – вязкость метана Па·с;  $P_0$  – атмосферное давление, Па.

Рассмотрим влияния гидроразрыва на коэффициент  $\theta$ , поскольку именно его значение, при прочих равных условиях определяет приток газа в скважину.



Схемы полосовых зон дренирования пласта скважинами без гидроразрыва (тип I), с продольным нормальносекущим разрывом (тип II), с магистральной пластовой трещиной (тип III) и многостадийным поперечным разрывов (IV тип):

$L$  – длина скважины;  $a, b$  – длина и ширина полосы;  $l$  – длина трещины гидроразрыва;  $d$  – расстояние между поперечными разрывами

На рисунке показаны схемы дегазации угольного пласта параллельными скважинами длиной  $L$  без гидроразрыва (I тип), с гидроразрывом пласта (ГРП) в плоскости скважины (далее, продольный разрыв), секущим пласт по нормали к его плоскости (далее, нормальное секущий ГРП) (II тип) или параллельно его плоскости (далее, послойный ГРП) (III тип), а также с многостадийным гидроразрывом пласта (МГРП) несколькими трещинами параллельными друг другу и ортогональными скважине (далее, поперечный или трансверсальный разрыв) (IV тип). Фильтрационный поток считаем установившимся, давление в скважине и разрывах  $P_w$  постоянным, кровлю и подошву пласта мощностью  $h$  - непроницаемыми.

Зону дренирования скважины разобьём, как принято в подземной гидравлике [11], на внутреннюю область радиусом  $h/2$  с плоско радиальным течением идеального газа и внешнюю область до границ контура питания с установившимся плоскопараллельным потоком. Коэффициент фильтрационного сопротивления внутренней области запишем, используя формулу Дюпюи для вертикальной скважины в однородном пласте с поправкой на анизотропию проницаемости [12]. Для оценки фильтрационного сопротивления внешней области дренирования горизонтальной скважины с прямоугольным непроницаемым контуром питания воспользуемся формулой, приведенной в работе [13]. Согласовав решения на границе раздела внутренней и внешних областей фильтрации получим итоговое выражение для  $\theta_I$ :

$$\theta_I \approx \frac{1}{\pi} \operatorname{arccch} \left( \frac{\cosh(\pi b / 2a)}{\sin(\pi L / 2a)} \right) + \frac{\chi h}{\pi L} \ln \left( \frac{\chi h}{(1 + \chi) R} \right). \quad (2)$$

где  $a, b$  – размеры дренируемого участка пласта (см. рисунок),  $\chi = \sqrt{k_h / k_v} \geq 1$  - показатель анизотропии проницаемости;  $k_v$  – проницаемость угля по нормали к напластованию;  $R$  – радиус скважины ( $R < h/2$ ).

Если секущая пласт трещина обладает бесконечной проводимостью, то фильтрационное сопротивление зоны дренирования II типа соответствует сопротивлению идеальной галереи и равно первому слагаемому в правой части (2). В случае конечной проводимости прямоугольной трещины длиной  $h$ , шириной  $L$ , раскрытием  $w$  и проницаемостью  $k_f$  ( $k_f \geq k_h$ ) фильтрационное сопротивление зоны дренирования типа можно записать, как [14]

$$\theta_{II} \approx A + F_{lf},$$

где  $A$  – первое слагаемое в правой части (2);  $F_{lf}$  – дополнительное сопротивление притоку газа в скважину из трещины при их линейном пересечении. Искомое сопротивление найдем в предположении билинейного характера фильтрации в зоне трещины, аппроксимируя скин эффект от искривления потока скважиной (второе слагаемое в правой части (2)) слоем пониженной проницаемости вокруг

дренажной галерей. Методом электрогидродинамических аналогий [11] получаем следующее искомое решение задачи при  $k_f \gg k_h$ :

$$F_{lf} \approx \frac{1}{4} \left( \frac{A}{B} + 1 \right) \frac{k_h h}{k_f w} \cdot \frac{h}{L}, \quad (3)$$

где  $B$  – второе слагаемое в правой части (2). Без учета скин-эффекта скважины  $F_{lf} = \frac{k_h h^2}{4k_f w L}$ . Аналогичным способом, учитывая расположение дренажной галереи по пласту, запишем выражение для коэффициента фильтрационного сопротивления зоны дренирования III типа, содержащей трещину длиной  $l_i (b > l_i > 2R)$  (см. рисунок)

$$\theta_{III} \approx \frac{\chi^2}{\pi} \cdot \frac{ah}{L^2} \cdot \operatorname{arcch} \left( \frac{\cosh(\pi b / 2h)}{\sin(\pi l_i / 2h)} \right) + \frac{\chi^2}{4} \cdot \frac{k_h l_i}{k_f w} \cdot \frac{h}{L}. \quad (4)$$

Коэффициент фильтрационного сопротивления скважин IV типа будем искать, разбив зону дренирования на малые прямоугольные участки со сторонами  $b$  и  $d$  вокруг каждого поперечного разрыва с прямоугольным контуром питания, где  $d = L / (N - 1)$  – расстояние между поперечными разрывами,  $N$  – число поперечных разрывов в скважине. Расстояние между разрывами выбираем так, чтобы оно не превышало длины поперечных трещин  $l_s$ . Тогда их взаимным влиянием в низкопроницаемых углях можно пренебречь. Для справки укажем, что интерференция трансверсальных разрывов, изучалась, например, в работе [15]. Считаем также, что приток в скважину непосредственно из пласта много меньше, чем из созданных трещин.

Значение  $\theta_{IV}$  получим при тех же допущениях, что и ранее, через общее сопротивление участков  $bd$ , соединенных параллельно. Отметим, что из-за пересечения трещины и скважины по окружности радиуса  $R$  и, как следствие, плоскорадиального характера течения возникает дополнительное сопротивление притоку газа из трещины, которое определяют численными методами [16]. В практике разработки нефтегазовых месторождений часто используют упрощенные подходы, основанные на замене горизонтальной скважины эквивалентной вертикальной [17], замене скважины с трещиной на скважину без трещины с эквивалентным радиусом и др. Здесь применим способ, что и при нахождении  $F_{lf}$  с заменой прямоугольной трещины дисковой с эффективным радиусом  $(l_s * h / C)^{1/2}$ ,  $C$  – коэффициент, зависящий от формы трещины и местоположения ее пересечения со скважиной [17]:

$$\theta_{IV} \approx \frac{1}{\pi N} \operatorname{arcch} \left( \frac{\cosh\left(\frac{\pi L}{2bN}\right)}{\sin\left(\frac{\pi l_s}{2b}\right)} \right) + \frac{1}{2\pi N} \cdot \frac{k_h h}{k_f w} \cdot \ln \left( \frac{h l_s}{C R^2} \right), \quad (5)$$

где  $l_s$  – длина трещины трансверсального гидроразрыва;  $h < l_s \leq b$ ;  $a - L \sim d$ . Как показывает сравнение с численными расчетами, расчетные оценки по (5) пригодны для практического использования в диапазоне значений  $L/d < 10$  [16].

### Результаты

В табл. 1 приведены значения коэффициентов  $\theta$ , рассчитанные по формулам (2)–(5) при  $a = 200$  м;  $L = 150$  м;  $k_h = 10^{-5}$  мкм<sup>2</sup>;  $\chi = 1.414$ ;  $l = 0.8b$ ;  $N = 20$ ;  $w = 0.5$  мм;  $k_f = w^2/12$  (формула Буссинеска [18]);  $C = \pi$ . Минимальные значения коэффициентов фильтрации по каждой комбинации параметров выделены штриховкой.

Таблица 1

Коэффициенты фильтрационного сопротивления

п/п	Переменные параметры		Коэффициент фильтрационного сопротивления			
	$b$ , м	$h$ , м	I	II	III	IV
1	3	1	0,0066	0,0033	0,0028	0,0211
2	5	1	0,0088	0,0056	0,0036	0,0128
3	10	1	0,0143	0,0111	0,0048	0,0066
4	15	1	0,0199	0,0167	0,0056	0,0046
5	3	3	0,0229	0,0033	0,0089	0,0211
6	5	3	0,0251	0,0056	0,0069	0,0128
7	10	3	0,0307	0,0111	0,0087	0,0066
8	15	3	0,0362	0,0167	0,0107	0,0046
9	3	5	0,0436	0,0033	0,0313	0,0211
10	5	5	0,0458	0,0056	0,0148	0,0128

Из представленных расчетных данных следует, что в угольных пластах небольшой мощности (менее 2 м) максимальное снижение фильтрационного сопротивления зоны дренирования даёт гидроразрыв вдоль напластования (III тип). В таких пластах нормальносекущий гидроразрыв конкурирует по эффективности с уплотнением сетки дегазационных скважин, что в силу большей технологичности широко применяется при подземной добыче газоносных углей.

Применение технологии множественного поперечного гидроразрыва (IV тип) дает значительный эффект только при больших плотностях разрывов вдоль скважин (через 5-7 м друг о друга, не более). Учитывая сложность проведения интервальных разрывов в необсаженных скважинах, проведенных по углю, считаем, что перспективы внедрения этой технологии на шахтах невысоки.

Остановимся на вопросе применения в шахтном гидроразрыве пропантов, что пока в России редкость. В табл. 2 приведены расчетные значения отношения фильтрационных сопротивлений зон дренирования скважин без гидроразрыва (тип I) и с нормальносекущим разрывом (II тип) при раскрытии трещин от 0.005 до 0.5 мм.

Таблица 2

Отношение коэффициентов фильтрационного сопротивления зон дренирования скважин I и II типов  $\theta_I / \theta_{II}$ .

п/п	Переменные параметры		Раскрытие трещины (w), мм			
	b, м	h, м	0.005	0.01	0.05	0.5
1	3	1	1,59	1,91	1,97	1,97
2	7	1	1,28	1,40	1,41	1,41
3	15	1	1,14	1,19	1,19	1,19
4	3	3	2,17	5,41	6,86	6,87
5	7	3	1,83	3,15	3,51	3,52
6	15	3	1,52	2,06	2,17	2,17
7	3	5	1,87	7,48	13,00	13,08
8	7	5	1,73	4,68	6,16	6,18
9	15	5	1,55	2,97	3,41	3,42

### Обсуждение

Расчеты показывают, что при  $w \leq 0.005$  мм гидроразрыв угля не эффективен. Если справедливо  $k_f = w^2/12$ , то оптимальное раскрытие локальных разрывов в низкопроницаемых углях составляет около 0.05 мм.

Шахтный разрыв без пропанта при небольшом сжатии трещин боковым давлением может увеличивать приток пластовых флюидов до 2 раз в пластах мощностью 3м и более, и до 1.5 раз – в пластах мощностью 1 м и менее.

Улучшение дренирования угольного пласта при гидроразрыве сказывается на индексе опасности аварий (ИОА) за счет увеличения степени дегазации при заданном ограничении на продолжительность предварительной дегазации. Этому способствует как более быстрое падение давления пластовых вод, блокирующих выход метана в кливажные микротрещины[19], так и повышение га-

зопроницаемости угольного пласта. Увеличение степени дегазации до 0.5 – 0.59 снижает ИОА на 0.3, до 0.6 – 0.69 – на 0.4, свыше 0.7 – на 0.5[1].

Приведенные в настоящей работе выражения для коэффициентов фильтрационного сопротивления зон дренирования дегазационных скважин позволяют прогнозировать эффективность шахтных гидроразрывов различного типа, их влияние на показатели схем дегазации угольных пластов.

### **Заключение**

Рассмотрено влияние гидроразрыва на фильтрационное сопротивление схем дегазации угольных пластов.

Полученные результаты позволяют прогнозировать эффективность шахтных гидроразрывов различного типа, их влияние на риск аварий при подземной добыче газоносных углей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект RFMEFI60417X0172).*

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Руководство по безопасности "Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах" (утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 05.06.2017 г. № 192).

2. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Выпуск 22. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2012. – 250с.

3. Сластунов С.В., Ютяев Е.П., Мазаник Е.В., Садов А.П. Разработка и совершенствование технологий пластовой дегазации для эффективной и безопасной отработки угольных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 11 (специальный выпуск 48). С. 13–21.

4. Jeffrey R.G., Boucher C. Sand Propped Hydraulic Fracture Stimulation of Horizontal In-seam Gas Drainage Holes at Dartbrook Coal Mine // In: Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy (Wollongong, February 4–6, 2004). – Wollongong: University of Wollongong, 2004. – pp. 169–179.

5. Тациенко А.Л., Клишин С.В. Возникновение поперечной трещины при поинтервальном гидроразрыве угольного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 11 (специальный выпуск 48). С. 49–56.

6. Курленя М.В., Сердюков С.В., Патутин А.В., Шилова Т.В. Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 6. – С. 3–9.

7. Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Гуменник К.В., Калугина Н.А., Фельдман Э.П. Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – вып. 4. – С. 65–74.

8. Сластунов С.В., Коликов К. С., Пучков Л. А. Извлечение метана из угольных пластов. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2002. – 383 с.

9. Груценко А.И., Алиев З.С., Ермилов О.М., Ремизов В.В., Зотов Г.А. Руководство по исследованию скважин. – М.: Наука, 1995. – 523с.

10. Брехунцов А.М., Телков А.П., Федорцев В.К. Развитие теории фильтрации жидкости и газа к горизонтальным стволам скважин. – Тюмень, ОАО «СибНАЦ», 2004. – 290с.



11. Кабиров М.М., Шамаев Г.А. Решение задач при проектировании разработки нефтяных месторождений. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. – 124с.
12. Renard, G., & Dupuy, J. M. Formation Damage Effects on Horizontal-Well Flow Efficiency // Journal of Petroleum Technology. – 1991. – 43(07). – pp.786–869.
13. Guo, G., & Evans, R. D. (1993). Inflow Performance of a Horizontal Well Intersecting Natural Fractures / SPE Production Operations Symposium. – 1993. – SPE 25501. – pp. 851–865.
14. Борисов Ю.П., Пилатовский В.П., Табаков В.П. Разработка нефтяных и газовых месторождений горизонтальными и многозабойными скважинами. – М.: Недра, 1964. – 154 с.
15. Li, H., Jia, Z., & Wei, Z. A New Method to Predict Performance of Fractured Horizontal Wells. / International Conference on Horizontal Well Technology. – 1996. – SPE 37051. – pp. 179–185.
16. Мазо А.Б., Поташев К.А., Хамидуллин М.Р. Фильтрационная модель притока жидкости к горизонтальной скважине с многостадийным гидравлическим разрывом пласта // Ученые записки Казанского университета. – 2015. – Т. 157. – кн. 4. – С. 1–16.
17. Genliang Guo and A.D. Evans. Inflow Performance and Production Forecasting of Horizontal Wells with Multiple Hydraulic Fractures in Low-Permeability Gas Reservoirs. – SPE 26169. – pp. 303–317.
18. Пирвердян А.М. Физика и гидравлика нефтяного пласта. – М.: Недра, 1982, 192 с.
19. Трофимов В.А. Основные закономерности выделения газа в скважину с трещиной гидроразрыва // ГИАБ. – 2013. – № 1. – С. 309–324.

© С. В. Сердюков, Т. В. Шилова, Л. А. Рыбалкин, 2019