



**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА
СКВАЖИНАМИ И ТРЕЩИНАМИ ГИДРОРАЗРЫВА**

С. В. Сердюков, М. В. Курленя

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ss3032@yandex.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Рассмотрено влияние гидроразрыва на фильтрационное сопротивление зоны дренирования угольного пласта параллельными скважинами. Выполнен анализ сопротивлений притоку газа в зависимости от ориентации разрывов, мощности пласта и расстояния между скважинами. Дано сравнение эффективности одно и многостадийных гидроразрывов при формировании множественных поперечных и магистральных продольных трещин.

Угольный пласт, подземная разработка, предварительная дегазация, гидроразрыв, газовый дренаж, фильтрационное сопротивление

**ANALYSIS OF COAL SEAM DEGASING EFFICIENCY USING
BOREHOLES AND HYDRAULIC FRACTURING**

S. V. Serdyukov and M. V. Kurlenya

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: ss3032@yandex.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The effect produced by hydraulic fracturing on the filtration resistance of coal seam zone subject to drainage by parallel boreholes is considered. The resistances to the gas inflow depending on the orientation of fractures, thickness of seam, and distance between the boreholes are analyzed. The efficiency of single and multistage hydraulic fracturing in forming multiple transverse and main longitudinal cracks is compared.

Coal seam, underground mining, preliminary degassing, hydraulic fracturing, gas drainage, filtration resistance

Безопасность и эффективность подземной разработки сверхкатегорийных по метану и опасных по выбросам угольных пластов зависит от степени их дегазации перед очистными работами. Перспективным методом интенсификации дренирования углепородного массива является гидроразрыв. Известны несколько его модификаций, среди которых наибольшее распространение в России получил ненаправленный разрыв водой без расклинивания трещин проппантом [1, 2]. Такие работы выполняют либо в одну стадию в специально пробуренных скважинах длиной в сотни метров, либо в несколько стадий, каждую из которых осуществляют в коротком интервале дегазационной скважины, создавая вдоль или поперек нее несколько десятков трещин радиусом до 10 м [3–5].

В настоящей работе приводится сравнительная оценка влияния известных способов гидроразрыва на эффективность дренирование угольного пласта параллельными скважинами.

Фильтрационное сопротивление зоны дренирования угольного пласта. Структурно угольный пласт представляет собой блочную среду, в которой газ фильтруется по кливажным трещинам. При этом основная часть метана находится в микроблоках, размеры которых состав-

ляют от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, а проницаемость по отношению к межблочным трещинам пренебрежительно мала. В соответствии с моделью выхода метана, представленной в работе [6], время его диффузии из микроблоков меньше, чем фильтрации из пласта. Поэтому способность угольного пласта к газоотдаче определяется его проницаемостью [7], а эффективность дегазации — фильтрационным сопротивлением зоны дренирования. Гидроразрыв предназначен для уменьшения этого сопротивления и повышения гидродинамического совершенства дегазационных скважин.

Для анализа эффективности схем дегазации воспользуемся приближенными аналитическими решениями, которые наглядны и, вместе с тем, достаточны точны для практических расчетов. 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_w — его давления, соответственно, на контуре питания и в скважине; α и β — коэффициенты фильтрационного сопротивления [8]. Поскольку слагаемое βQ^2 составляет не более 5–10% от αQ , а пространственное распределение сопротивлений α и β по пласту, как правило, неизвестно, применим упрощенную линейную зависимость вида [9]

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

где θ — эффективный (приведенный) коэффициент фильтрационного сопротивления, обусловленный гидродинамическим несовершенством скважины по вскрытию пласта; k_h — проницаемость угля вдоль пласта, м^2 ; h — мощность пласта, м ; μ — вязкость метана $\text{Па}\cdot\text{с}$; P_0 — атмосферное давление, Па .

На рис. 1 показаны схемы дегазации угольного пласта параллельными скважинами длиной L в том числе: I тип — без гидроразрыва пласта (ГРП); II тип — с гидроразрывом вдоль оси скважины (продольный разрыв), секущим пласт по нормали (далее, секущий ГРП); III тип — с продольным гидроразрывом параллельным плоскости пласта (далее, послойный ГРП); IV тип — с гидроразрывом пласта несколькими параллельными друг другу трещинами поперек оси скважины (далее, поперечный или трансверсальный многостадийный гидроразрыв (МГРП)).

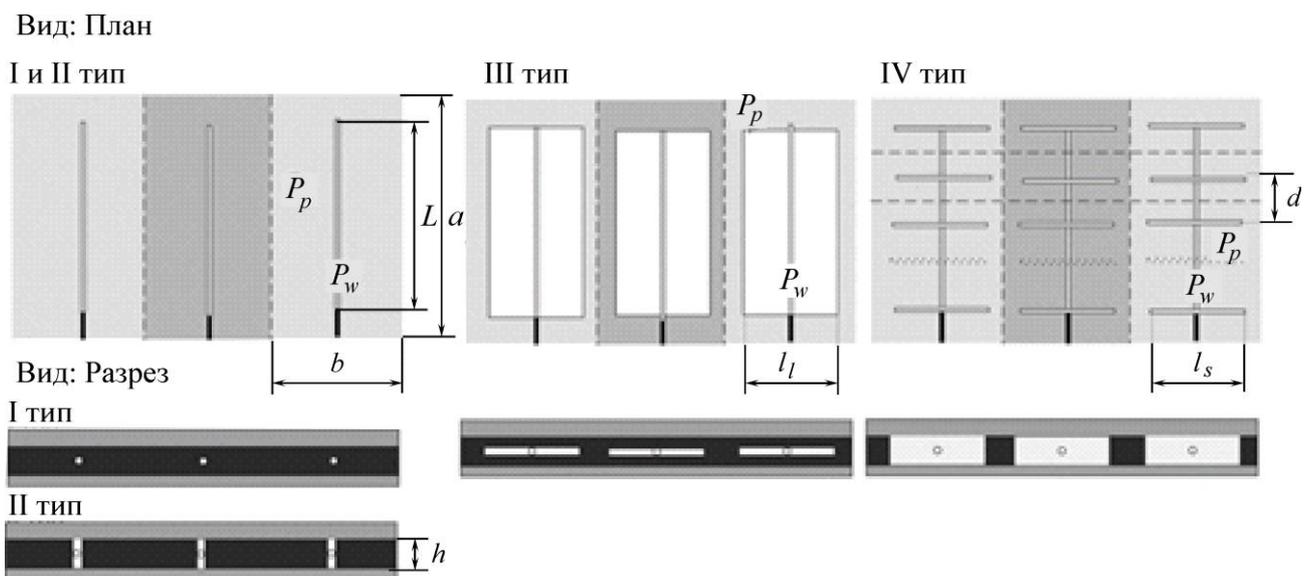


Рис 1. Схемы дренирования пласта параллельными скважинами: I тип — без гидроразрыва; II тип — с продольным секущим разрывом; III тип — с продольным послойным разрывом; IV тип — с многостадийным поперечным разрывом; a, b — длина и ширина дренируемого участка; l — длина трещин гидроразрыва; d — расстояние между поперечными разрывами

Рассмотрим влияния гидроразрыва на величину коэффициента θ . Фильтрационный поток считаем установившимся, давление флюида в скважине и разрывах постоянным, кровлю и подошву пласта непроницаемыми. Зону дренирования пласта скважиной разделим, как принято в подземной гидравлике [10], на внутреннюю область радиусом $h/2$ с плоско радиальным течением идеального газа и внешнюю область с плоскопараллельным потоком — до границ контура питания. Коэффициент фильтрационного сопротивления внутренней области найдем по формуле Дюпюи для вертикальной скважины в однородном пласте с поправкой на анизотропию проницаемости [11]. Для оценки фильтрационного сопротивления внешней области дренирования горизонтальной скважины с прямоугольным непроницаемым контуром питания воспользуемся формулой, приведенной в работе [12]. Согласовав оба решения на границе раздела внутренней и внешних областей фильтрации, получим итоговое выражение коэффициента θ для единичной скважины схемы дренирования I типа (рис. 1):

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

где $\chi = \sqrt{k_h/k_v} \geq 1$ — показатель анизотропии проницаемости; k_v — проницаемость угля по нормали к напластованию; R — радиус скважины ($R < h/2$).

Если трещина, секущая пласт, 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 $l = h$, шириной L , раскрытием w и проницаемостью k_f ($k_f \geq k_h$) фильтрационное сопротивление зоны дренирования II типа можно записать, как $\theta_{II} \approx A + F_{lf}$ [13], где A — первое слагаемое в правой части (2); F_{lf} — дополнительное сопротивление притоку газа в скважину из трещины при их пересечении по образующей линии поверхности скважины. Искомое сопротивление определим в предположении билинейного характера фильтрации в трещине и ее окрестности. Эффект искривления потока скважиной (второе слагаемое в правой части (2)) будем моделировать слоем пониженной проницаемости вокруг дренажной галереи. Методом электрогидродинамических аналогий [10] получили 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 эффекта искривления потока скважиной скважины: $F_{lf} = k_h h^2 / 4k_f w L$. Аналогичным способом, учитывая геометрию задачи, получим выражение для коэффициента фильтрационного сопротивления зоны дренирования III типа с послойным разрывом длиной l_1 ($b > l_1 > 2R$) (рис. 1)

$$\theta_{III} \approx \frac{\chi^2}{\pi} \cdot \frac{ah}{L^2} \operatorname{arcch} \left(\frac{\cosh(\pi b/2h)}{\sin(\pi l_1/2h)} \right) + \frac{\chi^2}{4} \cdot \frac{k_h l_1}{k_f w} \cdot \frac{h}{L}. \quad (4)$$

Коэффициент фильтрационного сопротивления зоны дренирования IV типа найдем, разделив ее вокруг каждого поперечного разрыва на прямоугольные участки со сторонами b и d и прямоугольным контуром питания, где $d = L/(N-1)$ — расстояние между поперечными разрывами; N — число разрывов вдоль скважины. Расстояние d выбираем таким образом, чтобы оно не превышало длины поперечных трещин l_s . Тогда их взаимным влиянием в низкопрони-

цаемых углях можно пренебречь [14]. Считаем также, что приток в скважину непосредственно из пласта много меньше, чем из трещин гидроразрыва. Значение θ_{IV} определим при тех же допущениях, что и ранее через общее сопротивление участков bd , соединенных параллельно. Отметим, что вследствие пересечения трансверсальной трещины со скважиной по окружности и плоскорадиального характера течения газа дополнительное сопротивление притоку газа из трещины отличается от (3). Оценка этого сопротивления численным методом приведена в работе [15]. Здесь воспользуемся упрощенным подходом, применяемым при разработке нефтегазовых месторождений, основанном на замене горизонтальной скважины и прямоугольной трещины эквивалентной системой из вертикальной скважины [16] и дисковой трещины радиуса $(l_s \cdot h / C)^{1/2}$, где C — коэффициент, зависящий от формы трещины и ее пересечения со скважиной [17]:

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

где l_s — длина трещины трансверсального гидроразрыва; $h < l_s < b$; $a - L \sim d$. Как показывает сравнение с численными расчетами, оценки по формуле (5) пригодны для практического использования при $L/d < 10$ [15].

Результаты численных исследований и их обсуждение. На рис. 2 приведены фильтрационные сопротивления дренирования угольного пласта единичной скважиной по схемам I–IV, рассчитанные по формулам (2)–(5) при $a = 200$ м, $L = 150$ м, $2R = 100$ мм, $L_f = b/2$ в зависимости от расстояния между скважинами b при $h = 2$ м, $\chi = 1.83$, $d = 5$ м (рис. 2а) и $h = 2$ м, $\chi = 1$, $d = 10$ м (рис. 2б) и от мощности пласта h при $b = 10$ м, $\chi = 1.83$, $d = 5$ м, (рис. 2в) и $b = 5$ м, $\chi = 1$, $d = 10$ м (рис. 2г).

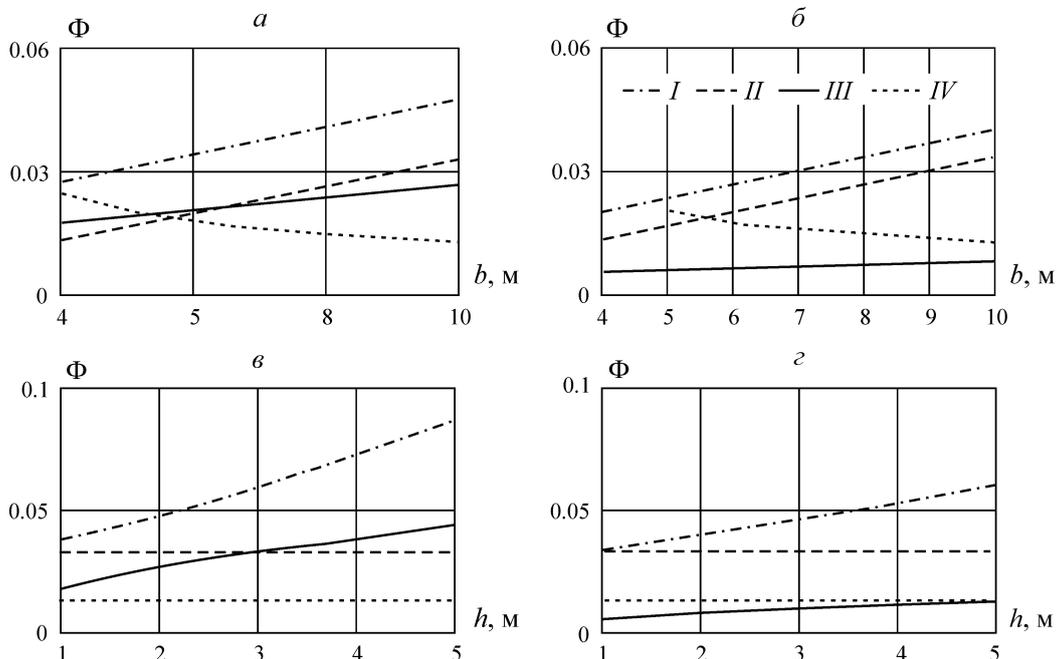


Рис. 2. Фильтрационные сопротивления зоны дренирования пласта единичной скважиной по схемам I–IV типов в зависимости от расстояния между скважинами b и мощности пласта h

Из представленных на рис. 2 графиков следует, что в угольных пластах небольшой мощности (до 2 м) послойный продольный гидроразрыв уменьшает фильтрационное сопротивление зоны дренирования угольного пласта больше, чем секущий разрыв.

В таких пластах нормальносекущий продольный гидроразрыв по эффективности конкурирует со способом интенсификации дегазации посредством уплотнения сетки дегазационных скважин, который в силу своей большей технологичности широко используется при подземной добыче газоносных углей. Применение технологии множественного поперечного гидроразрыва (IV тип) дает значительный эффект только при большой плотности трещин вдоль скважины (через 5–7 м друг о друга). Выполнение таких разрывов осложнено низкой прочностью угля и обрушением необсаженных дегазационных скважин, изменчивостью их профиля по глубине, что затрудняет герметизацию интервала проведения работ.

Кратко остановимся на вопросе применения в шахтном гидроразрыве проппантов, что пока в России редкость. В таблице приведены расчетные значения отношения фильтрационных сопротивлений зон дренирования пласта скважинами без гидроразрыва (тип I) и с нормальносекущим разрывом (II тип) и раскрытием трещин от 0.005 до 0.5 мм.

Отношение коэффициентов фильтрационного сопротивления зон дренирования пласта единичными скважинами по схемам I и II типов θ_I / θ_{II}

Номер	Переменные параметры, м		Раскрытие трещины w , мм			
	b	h	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

Расчеты показывают, что при $w \leq 0.01$ мм гидроразрыв угля мало эффективен. Если предположить, что справедливо $k_f = w^2 / 12$ (формула Буссинеска), то оптимальное раскрытие локальных разрывов в низкопроницаемых углях составляет около 0.05 мм. В условиях сжатия трещин более 4 МПа такое значение раскрытия может быть получено только при расклинивании трещин проппантами. При небольшом сжатии горным давлением (до 3–4 МПа) трещина без проппанта может увеличивать приток пластовых флюидов до 2 раз в пластах мощностью 3 м и более, и до 1.5 раз — в пластах мощностью 1 м и менее.

Отметим, что улучшение дренирования угольного пласта методом гидроразрыва снижает опасность аварий за счет увеличения степени дегазации при заданной ее продолжительности. Этому способствует как более быстрое падение давления пластовых вод, блокирующих выход метана в микротрещины кливажа [17], так и повышение газопроницаемости угольного пласта.

ВЫВОДЫ

В анизотропных угольных пластах наибольший эффект по снижению фильтрационного сопротивления зоны дренирования угольного пласта дает многостадийный поперечный гидроразрыв с высокой плотностью трещин на скважину. В относительно изотропных и анизотропных пластах мощностью до 3 м достаточной эффективностью обладает послойный гидроразрыв. Техническая простота этой технологии и приемлемая эффективность по сравнению с многостадийным гидроразрывом позволяют сделать вывод о его большей перспективности. Ограничивающим фактором является преимущественное формирование в угольных пластах секущих разрывов, что связано с развитым кливажем углей.

В изотропных пластах небольшой мощности для повышения эффективности дегазации проще снизить расстояние между скважинами на 30 %, чем создавать в них нормальносекущие пласт продольные магистральные разрывы. Для интенсификации дегазации угольных пластов достаточно создавать трещины гидроразрыва раскрытием 0.05 мм. Увеличение раскрытия сверх этого значения приводит к незначительному снижению фильтрационного сопротивления зоны дренирования. Гидроразрыв газоносных углей без проппанта работоспособен при небольших сжатиях трещин (не более 3–4 МПа), но в условиях высокого горного давления его эффективность невысока. Перспективным направлением повышения эффективности гидроразрыва угольных пластов в шахтных условиях является разработка технологии послойного продольного разрывов и их расклинивания проппантом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Instructions** for the degassing of coal mines, Series 05, Issue 22, Moscow, ZAO NTTS PB, 2012, 250 pp. (in Russian). [Инструкция по дегазации угольных шахт. Сер. 05. Вып. 22. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2012. — 250 с.]
2. **Slastunov S. V., Yutyaev E. P., Mazanik E. V., and Sadov A. P.** Development and improvement of reservoir degassing technologies for efficient and safe mining of coal seams, *Mining Information Analytical Bulletin*, 2018, no. 11 (special edition 48), pp. 13–21. [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 // ГИАБ. — 2018. — № 11 (спец. вып. 48). — С. 13–21.]
3. **Jeffrey R. G. and Boucher C.** Sand Propped Hydraulic Fracture Stimulation of Horizontal In-seam Gas Drainage Holes at Dartbrook Coal Mine, 2004, In: *Coal Operators' Conference*, University of Wollongong and the Australasian Institute of Mining and Metallurgy (Wollongong, February 4–6, 2004), Wollongong: University of Wollongong, 2004, pp. 169–179.
4. **Tatsienko A. L. and Klishin S. V.** The occurrence of transverse cracks in the interval of hydraulic fracturing of the coal seam, *Mining Information Analytical Bulletin*, 2018, no. 11 (special edition 48), pp. 49–56. [Тациенко А. Л., Клишин С. В. Возникновение поперечной трещины при поинтервальном гидроразрыве угольного пласта // ГИАБ. — 2018. — № 11 (спец. вып. 48). — С. 49–56.]
5. **Kurlenya M. V., Serdyukov S. V., Patutin A. V., and Shilova T. V.** Stimulation of underground degassing in coal seams by hydraulic fracturing method, *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 975–980. [Курленя М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В., Шилова Т. В. Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 3–9.]
6. **Alekseev A. D., Vasilenko T. A., Gumennik K. V., Kalugina N. A., and Fel'dman E. P.** Diffusion-filtration model of methane release from a coal seam, *Technical Physics*, 2007, vol. 77, no. 4, pp. 65–74. [Алексеев А. Д., Василенко Т. А., Гуменник К. В., Калугина Н. А., Фельдман Э. П. Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта // ЖТФ. — 2007. — Т. 77. — Вып. 4. — С. 65–74.]
7. **Slastunov S. V., Kolikov K. S., and Puchkov L. A.** Extraction of methane from coal beds, Moscow, Izd. MGGU, 2002, 383 pp. (in Russian) [Сластунов С. В., Коликов К. С., Пучков Л. А. Извлечение метана из угольных пластов. — М.: Изд-во МГГУ, 2002. — 383 с.]
8. **Grutsenko A. I., Aliev Z. S., Ermilov O. M., Remizov V. V., and Zotov G. A.** Well Study Guide, Moscow, Nauka, 1995, 523 pp. (in Russian) [Груценко А. И., Алиев З. С., Ермилов О. М., Ремизов В. В., Зотов Г. А. Руководство по исследованию скважин. — М.: Наука, 1995. — 523 с.]
9. **Brekhuntsov A. M., Telkov A. P., and Fedortsev V. K.** Development of the theory of liquid and gas filtration to horizontal boreholes, ОАО SibNATS, Tyumen, 2004, 290 pp. (in Russian) [Брехунцов А. М., Телков А. П., Федорцев В. К. Развитие теории фильтрации жидкости и газа к горизонтальным стволам скважин. — Тюмень, ОАО “СибНАЦ”, 2004. — 290 с.]

10. **Kabirov M. M. and Shamaev G. A.** Solving problems in the design of oil field development, Izd. UGNTU, Ufa, 2003, 124 pp. (in Russian) [**Кабиров М. М., Шамаев Г. А.** Решение задач при проектировании разработки нефтяных месторождений. — Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. — 124с.]
11. **Renard G. and Dupuy J. M.** Formation Damage Effects on Horizontal-Well Flow Efficiency, Journal of Petroleum Technology, 1991, vol. 43(07), pp.786–869.
12. **Guo G. and Evans R. D.** Inflow Performance of a Horizontal Well Intersecting Natural Fractures, SPE Production Operations Symposium, 1993, SPE 25501, pp. 851–865.
13. **Borisov Yu. P., Pilatovsky V. P., and Tabakov V. P.** Development of oil and gas fields by horizontal and multilateral wells, Moscow, Nedra, 1964, 154 pp. (in Russian) [**Борисов Ю. П., Пилатовский В. П., Табаков В. П.** Разработка нефтяных и газовых месторождений горизонтальными и многозабойными скважинами. — М.: Недра, 1964. — 154 с.]
14. **Li H., Jia Z., and Wei Z.** A New Method to Predict Performance of Fractured Horizontal Wells, International Conference on Horizontal Well Technology, 1996, SPE 37051, pp. 179–185.
15. **Mazo A. B., Potashev K. A., and Khamidullin M. R.** Filtration model of fluid inflow to a horizontal well with a multistage hydraulic fracturing, Scientific notes of Kazan University, 2015, vol. 157, no. 4, pp. 1–16. (in Russian) [**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. — № 4. — С.1–16.]
16. **Guo G. and Evans R. D.** Inflow Performance and Production Forecasting of Horizontal Wells with Multiple Hydraulic Fractures in Low-Permeability Gas Reservoirs, SPE 26169, pp. 303–317.
17. **Trofimov V. A.** The main laws of gas release into a well with a hydraulic fracture, Mining Information Analytical Bulletin, 2013, no. 1, pp. 309–324. (in Russian) [**Трофимов В. А.** Основные закономерности выделения газа в скважину с трещиной гидроразрыва // ГИАБ. — 2013. — № 1. — С. 309–324.]