

УДК 622.324.5

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЗАКРЕПЛЕНИЯ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Баёв М.А., старший преподаватель

Рохвадзе К. К., студентка группы ФПс-151, V курс

Научный руководитель: Хямяляйнен В. А., д.т.н., профессор

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева  
г. Кемерово

Значительные запасы метана угольных пластов (МУП) и необходимость снижения объема его выделения в горные выработки определяют потребность в разработке новых и совершенствовании существующих методов дегазации на угольных шахтах и промышленной добычи метана из нетронутых угольных пластов. Ресурсы МУП в России оцениваются в 84 трлн. м<sup>3</sup>, из которых 13,1 трлн. м<sup>3</sup> сосредоточены в Кузнецком бассейне (до глубины 1800 м) [1]. В настоящее время в Кемеровской области реализуется проект промышленного освоения метанугольных месторождений.

Особенности нахождения и перемещения метана в веществе угля определяют необходимость применения специальных методов интенсификации газоотдачи для его промышленного извлечения из угольных пластов. Для этого наиболее часто используется гидравлический разрыв пласта (ГРП), при этом практика разработки Кузбасских метанугольных промыслов показала необходимость адаптации метода к условиям конкретных месторождений и снижения экономических затрат на его реализацию. Гидро разрыв массива горных пород для повышения его общей проницаемости впервые получил широкое развитие в нефтяной промышленности в связи с необходимостью повышения дебита нефтяных скважин. Общая теория гидро разрыва достаточно подробно изложена в трудах Христиановича С. А., Желтова Ю. П., Баренблатта Г. И. и других отечественных и зарубежных исследователей [2, 3].

Геометрия трещин гидро разрыва и их проницаемость при прочих равных условиях являются главными факторами, которые определяют продуктивность скважин. Для сохранения высокой проницаемости трещин гидро разрыва после снятия давления разрывающей жидкости производят их закрепление твердым материалом (пропантом). Закрепление трещин осуществляется непрерывно вслед за гидро разрывом путем закачки пропанта вместе с жидкостью разрыва. Следовательно, при проектировании ГРП вопросы выбора подходящего пропанта и его транспортировки имеют большое значение.

Эффективность транспортировки и размещения пропанта в трещине разрыва определяется в основном его плотностью, видом рабочей жидкости, скоростью потока гидросмеси в трещине разрыва. На рынке представлены две

группы закрепляющих материалов – кварцевые пески и искусственные пропанты (керамические и полимерно-покрытые). Особенностью метаноугольных скважин является значительно меньшая глубина по сравнению с нефтяными. Максимальные глубины метанодобывающих скважин на Талдинской и Нарыкско-Осташкинской площадях Кузбасса составляют 1500 м [1]. Отсюда следует возможность применения менее прочных и более дешевых закрепляющих материалов в виде песков местных месторождений [4].

При операциях по гидроразрыву угольных пластов используются обычно такие жидкости, как вода, линейные гели, структурированные (сшитые) гели и пенные системы на водной основе. Опасность повреждения продуктивного пласта гелем обуславливает использование воды в качестве рабочей жидкости. При этом гидроразрыв с применением воды значительно дешевле, чем с применением геля или пены [5]. Учитывая низкую вязкость воды, в качестве расклинивающего агента используется кварцевый песок.

Рассматривая движение потока гидросмеси в трещине разрыва от скважины необходимо учитывать падение скорости за счет фильтрации транспортирующей жидкости в проницаемый угольный пласт и осесимметричности (радиальности) течения. При значительном расходе фильтрации транспортирующей жидкости в проницаемый угольный пласт скорость потока может резко уменьшиться, что приведет к преждевременному осаждению пропанта и невозможности ее дальнейшего закрепления [6].

Ниже рассмотрены гидродинамические параметры процесса закрепления трещин гидроразрыва угольных пластов, методика расчета которых была представлена в работе [7]. Основу расчета составляет определение критической (минимальной безосадочной) скорости потока гидросмеси в трещине разрыва  $v_{кр}$ , м/с, из следующего выражения

$$v_{кр} = k \sqrt{g \delta} \left( \frac{u^2}{6 \lambda g d_{ср}} a s_m \right)^{3/7}, \quad (1)$$

где  $k$  – безразмерный поправочный эмпирический коэффициент,  $k = 1,25$ ;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\delta$  – раскрытие трещины разрыва, м;  $u$  – гидравлическая крупность пропанта, м/с;  $\lambda = 7,2/Re$  – коэффициент гидродинамического сопротивления трещины разрыва течению транспортирующей жидкости;  $Re$  – число Рейнольдса;  $d_{ср}$  – средневзвешенный диаметр частицы пропанта, м;  $a = (\rho_{т} - \rho_{ж})/\rho_{ж}$  – относительная плотность;  $\rho_{т}$  – плотность пропанта, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ж}$  – плотность транспортирующей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $s_m = m_{т}/(m_{т} + m_{ж})$  – массовая концентрация пропанта в гидросмеси;  $m_{т}$  – масса сухого пропанта в единице объема гидросмеси, кг;  $m_{ж}$  – масса жидкости в этом же объеме гидросмеси, кг.

В таблице 1 представлены некоторые результаты численных расчетов критической скорости движения гидросмеси в трещине разрыва при следующих исходных данных:  $\rho_{ж} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{т} = 2650$  кг/м<sup>3</sup>;  $Re = 500$ ;  $d_{ср} = 0,0008$  м;  $u = 0,086$  м/с.

Таблица 1 – Результаты вычислений критической скорости движения гидросмеси

| $\delta \cdot 10^3$ ,<br>м | Критическая скорость движения гидросмеси в трещине разрыва $v_{кр}$ , м/с,<br>при различной концентрации песка в транспортирующей жидкости, кг/м <sup>3</sup> |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                            | 50  | 100  | 150  | 200  | 250  | 300  | 400  | 600  | 800  | 1000 |
| 3                          | 0,20  | 0,27 | 0,31 | 0,34 | 0,37 | 0,40 | 0,43 | 0,49 | 0,52 | 0,55 |
| 4                          | 0,23  | 0,31 | 0,36 | 0,40 | 0,43 | 0,46 | 0,50 | 0,56 | 0,60 | 0,64 |
| 5                          | 0,26  | 0,34 | 0,40 | 0,44 | 0,48 | 0,51 | 0,56 | 0,63 | 0,68 | 0,71 |
| 6                          | 0,28  | 0,37 | 0,44 | 0,49 | 0,53 | 0,56 | 0,61 | 0,69 | 0,74 | 0,78 |
| 7                          | 0,31  | 0,40 | 0,47 | 0,53 | 0,57 | 0,60 | 0,66 | 0,74 | 0,80 | 0,84 |
| 8                          | 0,33  | 0,43 | 0,51 | 0,56 | 0,61 | 0,65 | 0,71 | 0,79 | 0,85 | 0,90 |
| 9                          | 0,35  | 0,46 | 0,54 | 0,60 | 0,64 | 0,68 | 0,75 | 0,84 | 0,91 | 0,95 |
| 10                         | 0,37  | 0,48 | 0,56 | 0,63 | 0,68 | 0,72 | 0,79 | 0,89 | 0,96 | 1,00 |

Данные таблицы 1 показывают, что концентрация песка в транспортирующей жидкости и его размер (фракция) являются теми свойствами закрепляющего материала, которые существенно влияют на величину критической скорости движения гидросмеси в трещине разрыва. Например, при закреплении трещины гидроразрыва с раскрытием  $\delta = 0,01$  м кварцевым песком фракции (0,8 – 0,4) мм значение критической скорости движения гидросмеси составляет  $v_{кр} = 0,7$  м/с для концентрации песка в транспортирующей жидкости 250 кг/м<sup>3</sup> и 1,0 м/с для концентрации 1000 кг/м<sup>3</sup>. Для песка фракции (0,4 – 0,2) мм  $v_{кр}$  в 2 раза ниже.

Условия установившегося движения гидросмесей можно охарактеризовать отличием или соответствием фактической скорости потока  $v$  критическому значению скорости  $v_{кр}$ . Необходимо, чтобы скорость гидросмеси  $v$  была равна или несколько выше критической скорости. Наиболее эффективными считаются [8] скорости не превышающие  $(1,15 \div 1,20) v_{кр}$ .

Как отмечалось выше, фильтрация (утечка) транспортирующей жидкости в угольный пласт приводит к уменьшению скорости потока гидросмеси, а достаточно высокая скорость является ключевым условием транспортировки песка вдоль трещины и, следовательно, заполнения требуемого интервала трещины расклинивающим агентом. Для оценки фильтрационной утечки построена приближенно-аналитическая модель течения гидросмеси в горизонтальной и вертикальной трещине разрыва и получены выражения для определения интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости в угольный пласт [7]. При инженерных расчетах относительный расход фильтрующейся в угольный пласт транспортирующей жидкости в горизонтальной трещине (случай осесимметричного течения) определяют по формуле

$$\eta_r = \frac{6k_y R_k^3 [(P_k + P_{ck})/2 - P_o]}{\delta^3 C_s \sigma h R_{ck} (P_{ck} - P_k) + k_y R_k^3 (3P_{ck} + 2P_k - 5P_o)}, \quad (2)$$

и в вертикальной трещине разрыва (случай плоскопараллельного течения)

$$\eta_b = \frac{12k_y R_k^2 [(P_k + P_{ck})/2 - P_o]}{\delta^3 C_s \sigma h (P_{ck} - P_k) + 2k_y R_k^2 (3P_{ck} + 2P_k - 5P_o)}, \quad (3)$$

где  $k_y$  – коэффициент проницаемости угольного пласта до разрыва,  $\text{м}^2$ ;  $R_k$  – радиус (полудлина) трещины разрыва (радиус распространения транспортирующей жидкости),  $\text{м}$ ;  $P_k$  – давление транспортирующей жидкости на контуре  $R_k$ ,  $\text{Па}$ ;  $P_{ск}$  – давление транспортирующей жидкости в скважине (на входе в трещину),  $\text{Па}$ ;  $P_o$  – постоянное давление в соседней трещине или полости,  $\text{Па}$ ;  $\delta$  – раскрытие (ширина) трещины разрыва,  $\text{м}$ ;  $C_s$  – коэффициент учета плотности упаковки пропанта в трещине;  $\sigma$  – объемная концентрация транспортирующей жидкости в потоке гидросмеси;  $h$  – толщина фильтрующего слоя угольного пласта,  $\text{м}$ ;  $R_{ск}$  – радиус скважины,  $\text{м}$ .

На рисунке 1 в виде графиков представлены некоторые результаты расчетов интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости в угольный пласт при следующих исходных данных:  $P_{ск} = 25 \text{ МПа}$ ;  $P_k = P_o = 5,5 \text{ МПа}$ ;  $R_{ск} = 0,076 \text{ м}$ ;  $\sigma = 0,9$ .

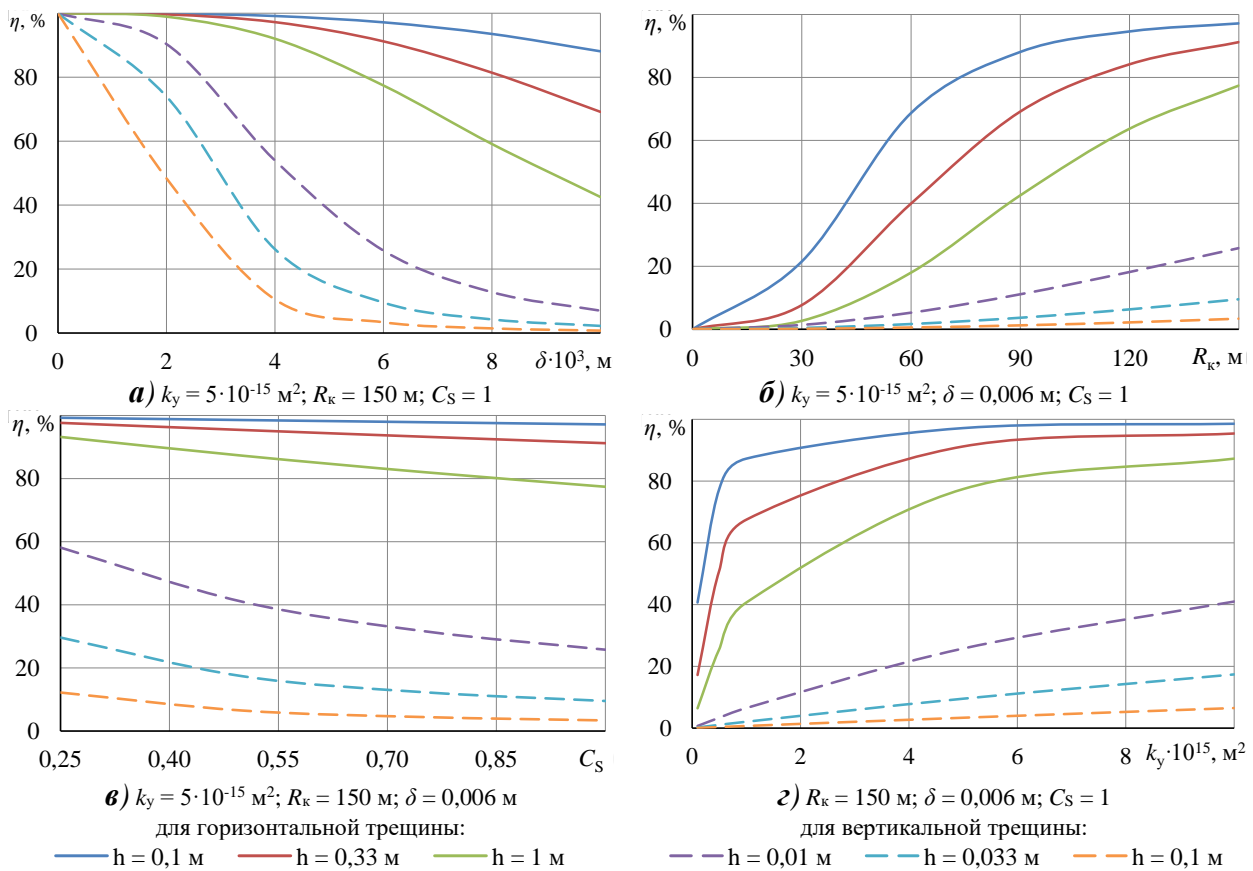


Рисунок 1 – Зависимости интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости от раскрытия трещины разрыва (а), радиуса трещины (б), плотности упаковки пропанта в трещине (в) и проницаемости угольного пласта (г)

Анализ результатов показывает, что в горизонтальной трещине разрыва на интенсивность фильтрации транспортирующей жидкости основное влияние оказывает раскрытие трещины  $\delta$ . Существенные значения величины фильтрации транспортирующей жидкости ( $\eta = 20 \div 99 \%$ ) соответствуют  $\delta \leq (6-8) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . В этом случае при радиусе трещины разрыва  $R_k < 60 \text{ м}$  интенсивность фильтрации зависит также от проницаемости угольного пласта  $k_y$  и толщины фильтрующего слоя  $h$ . При  $k_y < 1 \text{ мД}$  значительное влияние на  $\eta$

оказывают  $R_k$  и  $h$ , причем с увеличением  $h$  влияние  $R_k$  усиливается. При низких значениях  $k_y$  и  $R_k$  на  $\eta$  заметно влияет плотность упаковки пропанта в трещине  $C_S$ . В случае  $\delta > 8 \cdot 10^{-3}$  м величина фильтрационной утечки достигает существенных значений только при высоких значениях  $k_y$  ( $> 1$  мД) и  $R_k$  ( $> 90$  м) и низком значении  $h$  ( $< 0,5$  м). В вертикальной трещине разрыва в отличие от горизонтальной, интенсивность фильтрации транспортирующей жидкости в значительной степени зависит как от раскрытия трещины  $\delta$ , так и от остальных параметров –  $k_y$ ,  $R_k$ ,  $h$  и  $C_S$ . При этом утечка существенна ( $\eta > 20\%$ ) для следующих условий:  $\delta \leq (2-3) \cdot 10^{-3}$  м,  $k_y > 1$  мД,  $R_k > 30$  м,  $h < 0,5$  м и  $C_S < 0,75$ , а также для  $\delta = (6-8) \cdot 10^{-3}$  м и менее при  $h \leq 0,01$  м.

Можно заключить, что величина интенсивности фильтрации  $\eta$  возрастает с увеличением значений  $k_y$ ,  $R_k$  и с уменьшением значений  $\delta$ ,  $h$  и  $C_S$ ; зависимость от величины перепада давления по длине трещины незначительна. Интенсивность фильтрации при течении гидросмеси в горизонтальной трещине в зависимости от конкретных условий больше по сравнению с течением в вертикальной трещине и может составлять 90 % и более.

Информация о величине критической скорости гидросмеси в трещине разрыва и об интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости в проницаемый угольный пласт позволяет более обоснованно определять концентрацию пропанта в составе гидросмеси и необходимый расход гидросмеси на скважине (производительность насосных агрегатов), при котором фактическая скорость гидросмеси в трещине разрыва  $v$  должна быть несколько выше критической скорости.

### Список литературы

1. Из недр кузбасских кладовых – горючий газ метан / Сост.: С. С. Золотых, В. С. Арнаутов, Е. В. Сурин; автор проекта С. С. Золотых. – Кемерово: АИ «Кузбассвуиздат», 2015. – 247 с.
2. Теоретические основы гидравлического разрыва нефтяных пластов / С. А. Христианович, Ю. П. Желтов, Г. И. Баренблатт, Г. К. Максимович // V международный нефтяной конгресс (Нью-Йорк, США, май 1959 г.): материалы в 4 т. – Т. 2: Бурение скважин и добыча нефти и газа. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – С. 86–92.
3. Advani, S. H. Hydraulic Fracture Geometry Modeling, Prediction, and Comparisons / S. H. Advani, H. Khattab, J. K. Lee // Proceedings of SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium. – 1985. – P. 135–144. DOI: [10.2118/13863-MS](https://doi.org/10.2118/13863-MS).
4. Баёв, М. А. Критерий оценки применимости материала для закрепления трещин гидроразрыва угольных пластов Кузбасса / М. А. Баёв // Наука и техника в газовой промышленности. – 2017. – № 4. – С. 41–46.
5. Патент № 2576424 Российская Федерация, МПК E21B 43/267 (2006.01). Способ гидравлического разрыва угольного пласта: № 2015102784/03: заявл. 31.12.2014: опубл. 10.03.2016, Бюл. № 7 / Золотых

С. С., Гергерт В. В., Коровицын А. П.; заявитель и патентообладатель ООО «Газпром добыча Кузнецк» – 5 с.

6. Shiozawa, S. Simulation of Proppant Transport with Gravitational Settling and Fracture Closure in a Three-Dimensional Hydraulic Fracturing Simulator / S. Shiozawa, M. McClure // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2016. – Vol. 138. – P. 298–314. – DOI [10.1016/j.petrol.2016.01.002](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.01.002).

7. Хямяляйнен, В. А. Гидродинамический расчет процесса закрепления трещин гидроразрыва / В. А. Хямяляйнен, М. А. Баёв // Вестник КузГТУ. – 2019. – № 4. – С. 90–98.

8. Смолдырев, А. Е. Гидравлический и пневматический транспорт в металлургии и горном деле. – М.: Изд-во Металлургия, 1967. – 367 с.