

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-4-90-98

УДК 622.324.5

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ЗАКРЕПЛЕНИЯ ТРЕЩИН  
ГИДРОРАЗРЫВА****HYDRODYNAMIC CALCULATION OF THE PROCESS OF PROPPING OF HY-  
DRAULIC FRACTURES****Хямяляйнен Вениамин Анатольевич**

доктор техн. наук, профессор, e-mail: vah@kuzstu.ru

**Veniamin A. Khyamyalyaynen**, Dr. Sc. in Engineering, Professor**Баёв Михаил Алексеевич**

старший преподаватель, e-mail: bma.gdk@gmail.com

**Mikhail A. Baev**, Senior Lecturer

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian  
Federation

**Аннотация:**

*Работа посвящена вопросам технологии проведения гидравлического разрыва угольных пластов. Приведены общие сведения о развитии данной технологии и об используемых закрепляющих материалах. Отмечена целесообразность применения местных песков для закрепления трещин гидроразрыва при добыче метана из угольных пластов. Дано обоснование наиболее подходящей модели течения гидросмеси (жидкости-песконосителя с пропантом) в трещине гидроразрыва. В качестве одного из параметров процесса закрепления принята критическая (минимальная безосадочная) скорость движения гидросмеси в трещине. Подробно рассмотрен метод определения критической скорости, основанный на понятиях теории подобия и анализа размерностей. Другим важным параметром, влияющим на закрепление трещин гидроразрыва, является степень отфильтровывания жидкой фазы гидросмеси в проницаемый угольный пласт. Явление отфильтровывания транспортирующей жидкости приводит к уменьшению скорости потока гидросмеси в трещине, что, соответственно, ведет к повышению интенсивности осаждения закрепляющего материала. Это может стать причиной невозможности дальнейшего полноценного качественного закрепления (заполнения пропантом) трещины гидроразрыва. Поэтому для оценки расхода транспортирующей жидкости построена модель течения гидросмеси в горизонтальной и вертикальной трещине. В результате получены выражения для определения интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости в проницаемый угольный пласт. Результаты позволяют обоснованно определять режимы подачи гидросмеси и концентрацию пропанта в ее составе.*

**Ключевые слова:** метан угольных пластов, гидравлический разрыв пласта, пропант, песок, проницаемость, гидравлическая крупность, критическая скорость, фильтрация.

**Abstract:**

*The article is devoted to the issues of hydraulic coal seam fracturing technology. General information about the development of this technology and the used propping agents is given. The expediency of using local naturally occurring sands for propping fractures, when extracting methane from coal seams, is noted. The most suitable model of the proppant-laden slurry flow in hydraulic fracture is proved. The critical (minimum non-settling) velocity of the slurry flow in fracture is taken as one of the parameters of the process of propping fractures. The method of determining the critical velocity based on concepts of the theory of similarity and the dimensional analysis is considered in detail. Another important parameter affecting hydraulic fracture propping is the filtration of the liquid phase of slurry into the permeable coal seam. The phenomenon of fracturing fluid filtration leads to a decrease in the rate of slurry flow in fracture that increases the intensity of proppant settling. It may cause the impossibility of further full high-quality propping (filling with proppant) of hydraulic fracture. Therefore, the model of the slurry flow in horizontal and vertical fracture is developed to estimate the fracturing fluid flow rate.*

*As a result, expressions for determining the intensity of the fracturing fluid filtration into the permeable coal seam are obtained. The results allow determining reasonably the slurry feed rate and the proppant concentration in its composition.*

**Key words:** *coalbed methane, hydraulic fracturing, proppant, sand, permeability, static settling velocity, critical velocity, filtration.*

Гидроразрыв 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 гидроразрыва достаточно подробно изложена в фундаментальных трудах Христиановича С.А., Желтова Ю.П., Баренблатта Г.И. [1-4] и других отечественных и зарубежных исследователей [5-12]. В дальнейшем получила развитие теория направленного гидроразрыва путем создания в окрестности скважины (на ее поверхности) направленных искусственных надрезов (концентраторов напряжений) перпендикулярно оси скважины или вдоль ее образующей [13, 14]. При этом идея гидроразрыва и его направленность получила свое развитие и приложение применительно к добыче природного газа, метано-добывающим и дегазационным скважинам, водо-понижающим скважинам, управлению труднообрушаемыми кровель угольных пластов, подземному выщелачиванию твердых полезных ископаемых, тампонажу горных пород и ряду других направлений, связанных с освоением минеральных ресурсов [15-19].

Эффективность гидроразрыва определяется не только расширением существующих трещин и созданием новых, но и, очевидно, сохранением их раскрытия после снятия давления разрывающей жидкости. Для сохранения раскрытия трещин и обеспечения тем самым высокой проницаемости флюидосодержащего массива горных пород производят их закрепление твердым материалом (пропантом). В качестве закрепляющего материала на первых этапах применения гидроразрыва на нефтяных месторождениях Башкирии и Татарии повсеместно использовали речной кварцевый песок с берегов Волги. Были попытки использования гранул из металла, стекла, молотой скорлупы грецких орехов, пластиков [20]. В дальнейшем с увеличением глубин нефтедобывающих скважин и увеличением горного давления получило развитие закрепление трещин более прочным искусственным (синтетическим) керамическим материалом [21].

Закрепление трещин гидроразрыва осуществляется непрерывно вслед за гидроразрывом путем закачки пропанта вместе с жидкостью разрыва. Основные требования, предъявляемые к закрепляющему материалу, заключаются в необходимой прочности для исключения разрушения и как можно меньшей плотности (удельного веса) для улучшения условий его транспортировки в трещинах. Особенностью метаноугольных скважин является значительно меньшая глубина по сравнению с

нефтяными. Отсюда следует возможность применения в качестве пропанта менее прочных материалов. Максимальные глубины метано-добывающих скважин на Талдинской и Нарыкско-Осташкинской площадях Кузбасса составляют 1500 м [22], причем отбор метана из угольных пластов осуществляется с глубин начиная со 100 м и больше. Представляет интерес рассмотрение возможности применения легкого, но малопрочного пропанта в виде дробленого керамзита на небольших до 300 м глубинах [23], а на больших глубинах (более 300 м) – применение более дешевых пропантов в виде песков местных месторождений. Однако для оценки возможности использования этих рекомендаций необходимы специальные исследования предлагаемых материалов по гранулометрическому составу на их сопротивление разрушению, плотность и удельный вес, возможность сохранения высокой проницаемости при различной плотности и конструкции упаковки в трещинах разрыва [22]. При этом основу гидродинамического расчета процесса закрепления трещин гидроразрыва составляет определение критической (минимальной безосадочной) скорости потока гидросмеси в трещине разрыва как основной характеристики условия транспортирования пропанта в трещине разрыва. Рассматривая движение потока гидросмеси в трещине разрыва от скважины, необходимо учитывать падение скорости за счет фильтрации транспортирующей жидкости в проницаемый трещинообразуемый массив угля и осесимметричности (радиальности) течения. При значительном расходе фильтрации транспортирующей жидкости в проницаемый угольный пласт скорость потока может резко уменьшиться, что приведет к кольматации трещины разрыва (преждевременному осаждению пропанта) и невозможности ее дальнейшего закрепления [24-26].

Анализ структур существующих формул для определения параметров движения гидросмеси показывает, что они получены, в основном, на основе моделей плоского течения без учета фильтрации жидкой фазы в проницаемые стенки. В действительности при рассмотрении течения от скважины с позиции классической механики двухфазных сред (твердая фаза + транспортирующая жидкость) следует рассматривать фильтрацию в среде с двойной проницаемостью: трещинная проницаемость + поровая проницаемость. При этом следует рассмотреть отдельно движение твердой и жидкой фазы в трещинах с введением понятия фазовой проницаемости для каждой из фаз и дополнительной фильтрации транспортирующей жидкости в

проницаемой среде. Для каждого из перечисленных случаев при построении математической модели следует записать закон фильтрации (связь скорости с давлением, реологическими характеристиками и проницаемостью), уравнение неразрывности (характеризует сплошность среды) и путем их совместного рассмотрения получить соответствующее уравнение математической физики для определения поля давления рассматриваемой движущейся фазы. В результате получим постановку соответствующих краевых задач с определенными краевыми условиями для давления соответствующих фаз и градиентов давления (скорости течения) на границах областей течения.

В настоящее время таких сложных моделей механики многофазных сред в средах с двойной проницаемостью не построено. Их построение и численная реализация является предметом особого самостоятельного физико-математического исследования. Поэтому в дальнейшем для решения поставленной задачи нами используется инженерный эмпирический метод, основанный на классических понятиях теории подобия и анализа размерностей [27].

В свете изложенного наиболее подходящей моделью, учитывающей двухфазность гидросмеси, радиальность течения, фильтрацию транспортирующей жидкости в проницаемый угольный пласт, является фильтрационная модель течения тампонажного раствора как двухфазной водотвердой суспензии в трещиновато-пористой среде Хямяляйнена В.А. [23].

На основании вышеизложенного ниже приводится гидродинамический расчет основных параметров процесса закрепления трещины разрыва: критической скорости движения гидросмеси и интенсивности (расхода) фильтрации транспортирующей жидкости в проницаемый угольный пласт.

Понятие критической (минимальной безосадочной) скорости  $v_{кр}$  широко используется при гидравлических расчетах гидротранспорта твердых материалов по трубам, при расчетах систем канализации [28-33]. При этом физическая суть понятия  $v_{кр}$  остается одной и той же: это средняя скорость потока, при которой на дне горизонтальной трубы не накапливается слой неподвижных или проскальзывающих частиц. Существует некоторая минимальная скорость потока  $v_{кр}$ , меньше которой начинается осаждение твердых частиц. Рост осадка по высоте происходит до тех пор, пока скорость потока гидросмеси опять не возрастет до  $v_{кр}$ . При дальнейшем увеличении скорости потока осевшая твердая фаза остается на месте, так как скорость эрозии значительно превышает величину  $v_{кр}$ .

Гидродинамические сопротивления движению гидросмеси в трещине разрыва от скважины представим в виде суммы сопротивлений движению транспортирующей жидкости и дополнительных сопротивлений, возникающих при транспортировании пропанта

$$I = I_{ж} + \Delta I, (1)$$

где  $I$  – полные гидродинамические сопротивления трещины разрыва течению гидросмеси, Па/м;  $I_{ж}$  – гидродинамические сопротивления трещины разрыва течению транспортирующей жидкости, Па/м;  $\Delta I$  – дополнительные гидродинамические сопротивления перемещению пропанта в трещине разрыва, Па/м.

Учитывая физику процесса перемещения гидросмеси в трещине разрыва, в качестве определяющих примем следующие общепринятые гидродинамические критерии подобия:

$$Re = \frac{v\delta}{2\nu} - \text{число Рейнольдса};$$

$$Eu = \frac{\Delta I}{\rho_{ж}g} - \text{число Эйлера};$$

$Fr = \frac{g\delta}{v^2}$  – число Фруда для транспортирующей жидкости;

$$Fr^* = \frac{gd_{ср}}{u^2} - \text{число Фруда для пропанта};$$

$$\lambda = \frac{I_{ж}g\delta}{v^2\gamma_{ж}} - \text{коэффициент гидродинамического}$$

сопротивления трещины разрыва течению транспортирующей жидкости;

$$a = \frac{\rho_m - \rho_{ж}}{\rho_m} - \text{относительная плотность};$$

$$S_m = \frac{\rho_{ж}m}{m_m + m_{ж}} = \frac{\rho_m \rho_{гс} - \rho_{ж}}{\rho_{гс} \rho_m - \rho_{гс}} - \text{массовая концентрация пропанта в гидросмеси};$$

где  $v$  – скорость движения в трещине разрыва транспортирующей жидкости, м/с;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости транспортирующей жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\delta$  – раскрытие трещины разрыва, м;  $d_{ср}$  – характерный размер (крупность) частицы пропанта, м;  $\rho_{гс}$ ,  $\rho_{ж}$ ,  $\rho_m$  – соответственно плотности гидросмеси, транспортирующей жидкости и твердого материала (пропанта);  $\gamma_{ж} = g\rho_{ж}$  – удельный вес транспортирующей жидкости, Н/м<sup>3</sup>;  $u$  – гидравлическая крупность пропанта, м/с.

Согласно общепринятым представлениям о движении истинных однородных жидкостей в щелях, например, по Г.М. Ломизе [34], гидродинамические сопротивления течению транспортирующей жидкости можно представить в виде

$$I_{ж} = \frac{\lambda v^2 \gamma_{ж}}{g\delta}. (2)$$

Общую структуру формулы для определения дополнительных сопротивлений перемещению пропанта  $\Delta I$  с учетом вышеприведенных особенностей транспортирования пропанта в трещине с использованием  $\pi$ -теоремы теории анализа размерностей представим в виде следующего критериального уравнения

$$Eu = f(Fr, Fr^*, a, S_m) = (Fr)^{1/6} \cdot (Fr^*)^{-1} \cdot a \cdot S_m,$$

или

$$\frac{\Delta I}{\rho_{ж}g} = \frac{(g\delta)^{1/6} u^2}{v^{1/3} g d_{ср}} a S_m.$$

Тогда окончательно для определения полного гидродинамического сопротивления трещины разрыва, представленного в виде формулы (1), с

учетом (2) получим следующее выражение

$$I = \frac{\lambda v^2 \gamma_{жс}}{g\delta} + \frac{(g\delta)^{1/6} u^2 \rho_{жс}}{v^{1/3} d_{ср}} a_{sm}. \quad (3)$$

Критическую скорость  $v_{кр}$  определим как скорость, соответствующую минимуму зависимости гидродинамических сопротивлений от скорости гидросмеси  $v$ , определяемой как отношение расхода гидросмеси к площади поперечного сечения потока. Существование предполагаемого минимума можно объяснить тем, что при уменьшении скорости потока до  $v_{кр}$  и меньше начинается осаждение (седиментация) твердых частиц. Вследствие образовавшегося на нижней стенке трещины осевшего слоя твердой фазы в трещине в районе осаждения устанавливается течение гидросмеси с постоянной скоростью  $v_{кр}$ , уменьшается живое сечение потока и, как следствие, увеличивается гидродинамическое сопротивление.

В соответствии с вышеизложенным, исследуя предложенную зависимость  $I = f(v)$  (3) на минимум, получим следующее выражение для определения  $v_{кр}$

$$v_{кр} = k \sqrt{g\delta} \left( \frac{u^2}{6\lambda g d_{ср}} a_{sm} \right)^{3/7}, \quad (4)$$

где  $k$  – безразмерный поправочный эмпирический коэффициент.

По аналогии с результатами исследования движения угля по трубам И.А. Силина и Ю.К. Витошкина, исследования течения водотвердых тампонажных суспензий в трещинах горных пород ВА. Хямяляйнена [23], ориентировочно значение поправочного коэффициента  $k$  можно взять равным  $k = 1,25$ .

Как отмечалось выше, на процесс транспортирования пропанта в трещине разрыва кроме осаждения твердой фазы оказывает влияние и фильтрация (уход) транспортирующей жидкости в угольный пласт. Это приводит к уменьшению скорости потока гидросмеси, повышению интенсивности осаждения твердой фазы и возможной кольматации трещины разрыва. Поэтому для оценки расхода транспортирующей жидкости в угольный пласт построена приближенно-аналитическая модель течения транспортирующей жидкости в трещине разрыва с проницаемыми стенками и ее фазовой проницаемостью. За основу взяты общие методические подходы исследования интенсивности отфильтровывания жидкой фазы водотвердых тампонажных суспензий при тампонаже трещиноватопористых горных пород [23].

Для упрощения получения аналитического решения рассмотрено течение транспортирующей жидкости в трещине разрыва, удовлетворяющее линейному закону движения Дарси

$$\bar{v} = -\frac{k_{жс}}{\mu} \text{grad}P, \quad (5)$$

где  $v$  – скорость течения транспортирующей жидкости, м/с;  $k_{жс}$  – коэффициент фазовой проницаемости трещины, м<sup>2</sup>;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости транспортирующей жидкости, Па·с;

$P$  – давление потока в трещине разрыва, Па.

Коэффициент фазовой проницаемости трещины можно представить в виде монотонно убывающей функции длины потока  $r$ , м

$$k_{жс} = \frac{\delta^2}{12} \sigma C_S \frac{R_{ср}}{r}, \quad (6)$$

где  $\sigma$  – объемная концентрация транспортирующей жидкости в потоке гидросмеси;  $C_S$  – коэффициент учета плотности упаковки пропанта в трещине;  $R_{ср}$  – радиус скважины, м.

Монотонность уменьшения фазовой проницаемости трещины разрыва обусловлена уменьшением скорости потока от скважины и, как следствие, повышением интенсивности осаждения твердой вазы.

Учитывая, что течение транспортирующей жидкости в трещине разрыва осуществляется в небольших объемах, сжимаемость ее не учитываем. Тогда уравнение неразрывности потока, характеризующее сплошность среды, запишется в виде

$$\text{div} \bar{v} = 0. \quad (7)$$

Совместное рассмотрение уравнений (5) и (7) с учетом (6) в двумерной осесимметричной постановке приводит к необходимости решения соответствующей краевой задачи математической физики. Конкретно задача сводится к решению следующего уравнения для функции давления в трещине  $P(r, z)$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k_{жс} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + k_{жс} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (8)$$

где  $r, z$  – цилиндрические координаты,

при следующих граничных условиях:

$$P = P_{ср}, r = R_{ср}, z \in [0, \delta];$$

$$P = P_{к}, r = R_{к}, z \in [0, \delta];$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0, r \in [R_{ср}, R_{к}], z = 0;$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \alpha(P - P_o) = 0, r \in [R_{ср}, R_{к}], z = \delta, \quad (9)$$

где  $R_{к}$  – радиус трещины разрыва (радиус пространства транспортирующей жидкости), м;  $P_{к}$  – давление транспортирующей жидкости на контуре  $R_{к}$ , Па;  $P_o$  – давление в полости отфильтровывания транспортирующей жидкости из трещины разрыва, Па;  $\alpha = k_y / (k_{жс} h)$  – коэффициент, учитывающий особенности фильтрации транспортирующей жидкости в проницаемый угольный пласт;  $k_y$  – коэффициент проницаемости угольного пласта до разрыва, м<sup>2</sup>;  $h$  – толщина фильтрующего слоя угольного пласта, м.

Определив распределение давления  $P(r, z)$  в трещине, можно найти расходы транспортирующей жидкости на скважине  $Q_{ср}$  и контуре  $Q_{к}$ , соответственно

$$\begin{aligned} Q_{ср} &= 2\pi R_{ср} \int_0^\delta v_r dz |_{r=R_{ср}} \\ &= -\frac{2\pi R_{ср}^2 k_{жс}^o \sigma C_S}{\mu} \int_0^\delta \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} dz |_{r=R_{ср}} \\ &= R_{ср}; \\ Q_{к} &= 2\pi R_{к} \int_0^\delta v_r dz |_{r=R_{к}} = R_{к} \\ &= -\frac{2\pi R_{к} R_{ср} k_{жс}^o \sigma C_S}{\mu} \int_0^\delta \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} dz |_{r=R_{к}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Относительный расход фильтрующей в угольный пласт транспортирующей жидкости определяем по формуле

$$\eta = \frac{Q_{\text{ск}} - Q_{\text{к}}}{Q_{\text{ск}}}. \quad (11)$$

Решение уравнения (8) при граничных условиях (9) получено классическим методом разделения переменных Фурье в виде ряда

$$P(r, z) = A + B \int_{R_{\text{ск}}}^r \frac{dr}{r k_{\text{ж}}(r)} + \sum_n A_n \operatorname{ch} \lambda_n z \cdot \sin \lambda_n (r - R_{\text{ск}}). \quad (12)$$

Постоянные  $A, B, A_n$  определены из граничных условий (9);  $\lambda_n = n\pi/R_{\text{к}}$ . Для определения относительного расхода фильтрующей из трещины разрыва транспортирующей жидкости выражение (11) в окончательной форме приобрело следующий вид

$$\eta = \frac{\sum_n A_n \operatorname{sh} \lambda_n \delta [1 - (-1)^n]}{\frac{P_{\text{к}} - P_{\text{ск}}}{R_{\text{к}} - R_{\text{ск}}} \delta + \sum_n A_n \operatorname{sh} \lambda_n \delta}. \quad (13)$$

Поскольку для практических расчетов параметров гидроразрыва использование решения (13) в виде рядов достаточно проблематично, рассмотренная задача реализована также в одномерной постановке в виде плоской радиальной осесимметричной задачи. При этом получено выражение (11) в конечной форме

$$\eta = \frac{6k_y R_{\text{к}}^3 [(P_{\text{к}} + P_{\text{ск}})/2 - P_o]}{\delta^3 \sigma C_S h (P_{\text{ск}} - P_{\text{к}}) + k_y R_{\text{к}}^3 (3P_{\text{ск}} + 2P_{\text{к}} - 5P_o)}. \quad (14)$$

Сопоставление результатов численного счета по формулам (13) и (14) позволяет сделать вывод об их достаточно хорошей сходимости. Это позволяет сделать вывод о возможности практического использования формулы (14) для оценки интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости в проницаемый угольный пласт. В качестве коэффициента влияния упаковки пропанта (коэффициент  $C_S$ ) может быть принят, например, коэффициент поверхностной концентрации, рассмотренный ранее в работах ИГД СО РАН и Кузниишахтоостроя [23]. При этом приведена оценка изменения проницаемости трещины с его изменением.

В аналогичной постановке ставится и решается задача по оценке интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости в вертикальной трещине разрыва. При этом, учитывая значительную величину давления транспортирующей жидкости, гидростатической составляющей ее давления для упрощения математической постановки задачи пренебрегаем. Тогда задача сводится к определению функции давления  $P(x, y)$  при плоскопараллельном течении транспортирующей жидкости в

результате решения общеизвестного уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (15)$$

где  $x, y$  – прямоугольные координаты, соответствующие направлению развития трещины разрыва от скважины и направлению, перпендикулярному плоскости трещины.

Для упрощения решения одну из вертикальных стенок считаем непроницаемой, а другую – проницаемой в виде угольного пласта с коэффициентом проницаемости  $k_y$ . Полагаем фильтрацию через проницаемый фильтрующий слой толщиной  $h$  в некоторую полость с давлением  $P_o$ . Тогда получаем следующую краевую задачу по решению уравнения (15) в прямоугольнике при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} P &= P_{\text{ск}}, x = 0, y \in [0, \delta]; \\ P &= P_{\text{к}}, x = R_{\text{к}}, y \in [0, \delta]; \\ \frac{\partial P}{\partial y} &= 0, x \in [0, R_{\text{к}}], y = 0; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} + \alpha(P - P_o) = 0, x \in [0, R_{\text{к}}], y = \delta. \quad (16)$$

Решение уравнения (15) получено методом разделения переменных Фурье в виде ряда

$$P = A + Bx + \sum_n A_n \operatorname{ch} \lambda_n y \cdot \sin \lambda_n x, \quad (17)$$

где  $A, B, A_n$  – константы, подлежащие определению.

По аналогии с осесимметричным течением для горизонтальной трещины в одномерной постановке получено выражение для оценки интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости в проницаемый угольный пласт из вертикальной трещины разрыва

$$\eta = \frac{12k_y R_{\text{к}}^2 [(P_{\text{к}} + P_{\text{ск}})/2 - P_o]}{\delta^3 \sigma C_S h (P_{\text{ск}} - P_{\text{к}}) + 2k_y R_{\text{к}}^2 (3P_{\text{ск}} + 2P_{\text{к}} - 5P_o)}. \quad (18)$$

В целом разработанная методика определения критической (минимальной безосадочной) скорости  $v_{\text{кр}}$  гидросмеси в трещине разрыва и определения интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости в проницаемый угольный пласт позволяет более обоснованно определять режимы подачи гидросмеси (расход и давление) и концентрацию пропанта в ее составе, а кроме того, при изменении свойств пропанта, например, путем применения в качестве его местных песков, оценить их технические преимущества путем анализа влияния их физических характеристик, входящих в методу определения  $v_{\text{кр}}$  и  $\eta$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Желтов, Ю.П. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта / Ю.П. Желтов, С.А. Христианович // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. – 1955. – № 5. – С. 3-41.
2. Христианович, С.А. Образование вертикальных трещин при помощи очень вязкой жидкости / С.А. Христианович, Ю.П. Желтов // IV международный нефтяной конгресс (Рим, 6-15 июня 1955 г.): сб. докл.: в 9 т. – Т. 3: Бурение скважин и добыча нефти и газа. – М.: Гостоптехиздат, 1956. – С. 272-281.

3. Баренблатт, Г.И. Об образовании горизонтальных трещин при гидроразрыве нефтеносного пласта // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. – 1956. – № 9. – С. 101-105.
4. 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.
5. Sneddon, I.N. The Distribution of Stress in the Neighborhood of a Crack in an Elastic Solid // Proceedings of The Royal Society of London. – 1946. – Vol. 187. – Issue 1009. – P. 229-260. DOI: 10.1098/rspa.1946.0077
6. Perkins, T.K. Widths of Hydraulic Fractures / T. K. Perkins, L. R. Kern // Journal of Petroleum Technology. – 1961. – Vol. 13. – Issue 9. – P. 937-949. DOI: 10.2118/89-PA
7. Geertsma, J. A Rapid Method of Predicting Width and Extent of Hydraulic Induced Fractures / J. Geertsma, F. de Klerk // Journal of Petroleum Technology. – 1969. – Vol. 21. – Issue 12. – P. 1571-1581. DOI: 10.2118/2458-PA
8. Nordgren, R.P. Propagation of a Vertical Hydraulic Fracture // Society of Petroleum Engineers Journal. – 1972. – Vol. 12. – Issue 4. – P. 306-314. DOI: 10.2118/3009-PA
9. Daneshy, A.A. On the Design of Vertical Hydraulic Fractures // Journal of Petroleum Technology. – 1973. – Vol. 25. – Issue 1. – P. 83-97. DOI: 10.2118/3654-PA
10. 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
11. Clifton, R.J. Three-Dimensional Fracture-Propagation Models // Recent Advances in Hydraulic Fracturing / SPE Monograph Series; Edited by: J. L. Gidley, S. A. Holditch, D.E. Nierode [et al.]. – Richardson, Texas, 1990. – Vol. 12, Chap. 5. – P. 95-108.
12. Three-Dimensional Fracture Propagation Model and Simulation Study of CBM Wells / Z. Yunxiang, D. Guo, D. Chen, X. Pu // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 186. – 012041. DOI: 10.1088/1755-1315/186/4/012041
13. Чернов, О.И. Гидродинамическая стратификация монолитных пород в качестве способа управления труднообрушающейся кровлей // ФТПРПИ. – 1982. – № 2. – С. 18-23.
14. Чернов, О.И. О флюидоразрыве породных массивов / О. И. Чернов, Н. Г. Кю // ФТПРПИ. – 1988. – № 6. – С. 81-92.
15. Хямяляйнен, В.А. Тампонирование горного массива через ориентированные трещины флюидоразрыва / В.А. Хямяляйнен, Б. В. Дьяков, О. И. Чернов // ФТПРПИ. – 1989. – № 5. – С. 110-114.
16. Чернов, О.И. Экспериментальное изучение ориентированного разрыва твердых тел высоковязким флюидом / О.И. Чернов, Н.Г. Кю // ФТПРПИ. – 1996. – № 5. – С. 2835.
17. Чернов, О.И. Параметры гидроразрыва и гидрорасчленения малопроницаемой руды при подготовке блока к выщелачиванию / О.И. Чернов, И. И. Барсуков, Б. В. Дьяков // ФТПРПИ. – 1996. – № 5. – С. 100-105.
18. Чернов, О.И. Скважинно щелевой способ дегазации не разгруженных от горного давления угольных пластов / О.И. Чернов, Н.Г. Кю // ФТПРПИ. – 1997. – № 3. – С. 98-04.
19. Чернов, О.И. Изучение ориентированного гидроразрыва массива горных пород, вмещающих алмазосную трубку «Интернациональная» / О.И. Чернов, И.И. Барсуков, Г.Е. Посохов // ФТПРПИ. – 1997. – № 6. – С. 105-109.
20. Mader, D. Hydraulic Proppant Fracturing and Gravel Packing. – 1st ed. – Elsevier Science, 1989. – 1238 p.
21. Economides, M.J. Modern Fracturing: Enhancing Natural Gas Production / M. J. Economides, T. Martin [editors]. – Energy Tribune Publishing Inc., 2007. – 509 p.
22. Баёв, М.А. Исследование закрепляющего материала трещин гидроразрыва при извлечении метана из угольных пластов / М.А. Баёв, В.А. Хямяляйнен // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 6. – С. 68-72.
23. Хямяляйнен, В.А. Формирование цементационных завес вокруг капитальных горных выработок / В.А. Хямяляйнен, Ю.В. Бурков, П.С. Сыркин. – М.: Недра, 1994. – 400 с.

24. Kern, L.R. The Mechanics of Sand Movement in Fracturing / L. R. Kern, T. K. Perkins, R. E. Wyant // *Journal of Petroleum Technology*. – 1959. – Vol. 11. – Issue 7. – P. 55–57. Paper SPE 1108-G. DOI: 10.2118/1108-G
25. Daneshy, A.A. Numerical Solution of Sand Transport in Hydraulic Fracturing // *Society of Petroleum Engineers Journal*. – 1978. – Vol. 30. – Issue 1. – P. 132–140. Paper SPE 5636-PA. DOI: 10.2118/5636-PA
26. 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
27. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – 8-е изд., перераб. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
28. Кнороз, В.С. Движение гидросмесей в напорных трубопроводах и метод расчета. – М.: Известия ВНИИГ, 1941. – Т. 30. – 256 с.
29. Смолдырев, А.Е. Гидравлический и пневматический транспорт на угольных предприятиях. – М.: Углетехиздат, 1956. – 291 с.
30. Юфин, А.П. Гидромеханизация. Учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1965. – 496 с.
31. Трайнис, В.В. Параметры и режимы гидравлического транспортирования угля по трубопроводам. – М.: Наука, 1970. – 192 с.
32. Яковлев, С.В., Карелин Я.А., Масленников Н.А. Вспомогательные устройства очистных канализационных станций. – М.: Госстройиздат, 1955. – 180 с.
33. Федоров, Н.Ф. Канализация / Н.Ф. Федоров, С.М. Шифрин. – М.: Высшая школа, 1968. – 592 с.
34. Ломизе, Г.М. Фильтрация в трещиноватых породах. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951. – 127 с.

## REFERENCES

1. Zheltov Yu.P. and Khristianovich S.A. O gidravlicheskom razryve neftenosnogo plasta [The Hydraulic Fracturing of an Oil-Producing Formation]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Otdelenie tekhnicheskikh nauk*. 1955. No. 5. P. 3-41.
2. Khristianovich S.A. and Zheltov Yu.P. Obrazovanie vertikal'nykh treshchin pri pomoshchi ochen' vyazkoy zhidkosti [Formation of Vertical Fractures by Means of Highly Viscous Fluid]. IV mezhdunarodnyy neftyanoy kongress (Rim, 6-15 iyunya 1955 g.): sb. dokl.: v 9 t. – T. 3: Burenie skvazhin i dobycha nefti i gaza. [Proceedings of the Fourth World Petroleum Congress (Rome, June, 6-15, 1955). Well drilling and oil and gas production]. Moscow. Gostoptekhizdat, 1956. Vol. 3. P. 272-281.
3. Barenblatt G.I. Ob obrazovanii gorizontal'nykh treshchin pri gidrorazryve neftenosnogo plasta [About the Formation of Horizontal Cracks during Hydraulic Fracturing of an Oil-Producing Formation]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Otdelenie tekhnicheskikh nauk*. 1956. No. 9. P. 101-105.
4. Khristianovich S.A., Zheltov Yu.P., Barenblatt G. I. and Maksimovich G. K. Teoreticheskie osnovy gidravlicheskogo razryva neftyanых plastov [Theoretical Principles of Hydraulic Fracturing of Oil Strata]. V mezhdunarodnyy neftyanoy kongress (N'yu-York, SShA, may 1959 g.): materialy v 4 t. – T. 2: Burenie skvazhin i dobycha nefti i gaza [Proceedings of the Fifth World Petroleum Congress (N. Y., May, 1959). Well drilling and oil and gas production]. Moscow. Gostoptekhizdat, 1961. Vol. 2. P. 86-92.
5. Sneddon I.N. The Distribution of Stress in the Neighborhood of a Crack in an Elastic Solid. *Proceedings of The Royal Society of London*. 1946. Vol. 187. Issue 1009. P. 229-260. DOI: 10.1098/rspa.1946.0077
6. Perkins T.K. and Kern L.R. Widths of Hydraulic Fractures. *Journal of Petroleum Technology*. 1961. Vol. 13. Issue 9. P. 937-949. DOI: 10.2118/89-PA
7. Geertsma J. A and de Klerk F. Rapid Method of Predicting Width and Extent of Hydraulic Induced Fractures. *Journal of Petroleum Technology*. 1969. Vol. 21. Issue 12. P. 1571-1581. DOI: 10.2118/2458-PA
8. Nordgren R.P. Propagation of a Vertical Hydraulic Fracture. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1972. Vol. 12. Issue 4. P. 306-314. DOI: 10.2118/3009-PA
9. Daneshy A.A. On the Design of Vertical Hydraulic Fractures. *Journal of Petroleum Technology*. 1973. Vol. 25. Issue 1. P. 83-97. DOI: 10.2118/3654-PA
10. Advani S.H., Khattab H. and Lee J.K. Hydraulic Fracture Geometry Modeling, Prediction, and

Comparisons. Proceedings of SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium (19-22 March, Denver, Colorado). – 1985. – P. 135-144. DOI: 10.2118/13863-MS

11.Clifton R.J. Three-Dimensional Fracture-Propagation Models. Recent Advances in Hydraulic Fracturing. SPE Monograph Series; Edited by J. L. Gidley, S. A. Holditch, D. E. Nierode [et al.]. Richardson, Texas, 1990. Vol. 12, Chap. 5. P. 95-108.

12.Yunxiang Z., Guo D., Chen D. and Pu X. Three-Dimensional Fracture Propagation Model and Simulation Study of CBM Wells. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 186. 012041. DOI: 10.1088/1755-1315/186/4/012041

13.Chernov O.I. Gidrodinamicheskaya stratifikatsiya monolitnykh porod v kachestve sposoba upravleniya trudnoobrushayushchey krovley [Hydrodynamic Stratification of Monolithic Rocks as a Method for Controlling a Hard-Breaking Roof]. Journal of Mining Science. 1982. No. 2. P. 18-23.

14.Chernov O.I. and Kyu N.G. O flyuidorazryve porodnykh massivov [About Fluid Fracturing of Rock Masses]. Journal of Mining Science. 1988. No. 6. P. 81-92.

15.Khyamyalyaynen V.A., D'yakov B.V. and Chernov O.I. Tamponirovanie gornogo massiva cherez orientirovannyye treshchiny flyuidorazryva [Plugging of a Rock Mass through oriented fractures of fluid fracturing]. Journal of Mining Science. 1989. No. 5. P. 110-114.

16.Chernov O.I. and Kyu N.G. Eksperimental'noe izuchenie orientirovannogo razryva tverdykh tel vysokovyazkim flyuidom [Experimental Study of Oriented Fracturing of Solids by Highly Viscous Fluid]. Journal of Mining Science. 1996. No. 5. P. 28-35.

17.Chernov O.I., Barsukov I.I. and D'yakov B.V. Parametry gidrorazryva i gidroraschleneniya malopronitsaemoy rudy pri podgotovke bloka k vyshchelachivaniyu [Parameters of Hydraulic Fracturing and Hydraulic Dissection of Low-Permeable Ore in Preparation of the Block for Leaching]. Journal of Mining Science. 1996. No. 5. P. 100-105.

18.Chernov O.I. and Kyu N.G. Skvazhinno shchelevoy sposob degazatsii ne razgruzhennykh ot gorno-go davleniya ugol'nykh plastov [Borehole-Slotted Degassing Method of Coal Seams Unloaded from Rock Stress]. Journal of Mining Science. 1997. No. 3. P. 98-104.

19.Chernov O.I., Barsukov I.I. and Posokhov G.E. Izuchenie orientirovannogo gidrorazryva massiva gornyykh porod, vmeshchayushchikh almazonosnuyu trubku "Internatsional'naya" [Study of Oriented Hydraulic Fracturing of a Rock Mass Enclosing the "International" Diamondiferous Tube]. Journal of Mining Science. 1997. No. 6. P. 105-109.

20.Mader D. Hydraulic Proppant Fracturing and Gravel Packing. 1st ed. Elsevier Science, 1989. 1238 p.

21.Economides M.J. and Martin T. [editors] Modern Fracturing: Enhancing Natural Gas Production. Energy Tribune Publishing Inc., 2007. 509 p.

22.Baev M.A. and Khyamyalyaynen V.A. Issledovanie zakreplyayushchego materiala treshchin gidrorazryva pri izvlechenii metana iz ugol'nykh plastov [Research in the Propping Agent for the Hydraulic Fracturing Cracks for the Methane Extraction from the Massive Coal Seams]. Vestnik of Kuzbass State Technical University. 2016. No 6. P. 68-72.

23.Khyamyalyaynen V.A., Burkov Yu.V. and Syrkin P.S. Formirovanie tsementatsionnykh zaves vokrug kapital'nykh gornyykh vyrabotok [Formation of Cementing Curtains around the Capital Mine Workings]. Moscow. Nedra Publishers, 1994. 400 p.

24.Kern L.R., Perkins T.K. and Wyant R.E. The Mechanics of Sand Movement in Fracturing. Journal of Petroleum Technology. 1959. Vol. 11. Issue 7. P. 55-57. DOI: 10.2118/1108-G

25.Daneshy A.A. Numerical Solution of Sand Transport in Hydraulic Fracturing. Society of Petroleum Engineers Journal. 1978. Vol. 30. Issue 1. P. 132-140. DOI: 10.2118/5636-PA

26.Shiozawa S. and McClure M. Simulation of Proppant Transport with Gravitational Settling and Fracture Closure in a Three-Dimensional Hydraulic Fracturing Simulator. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2016. Vol. 138. P. 298-314. DOI: 10.1016/j.petrol.2016.01.002

27.Sedov L.I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike [Similarity and Dimensional Methods in Mechanics]. 8-th ed. Moscow. Nauka Publishers, 1977. 440 p.

28.Knoroz V.S. Dvizhenie gidrosmesey v napornykh truboprovodakh i metod rascheta [Movement of Slurries in Pressure Pipelines and Calculation Method]. Moscow. Izvestiya VNIIG, 1941. Vol. 30. 256 p.

29.Smoldyrev A.E. Gidravlicheskiy i pnevmaticheskii transport na ugol'nykh predpriyatiyakh [Hydraulic

and Pneumatic Transport in Coal Facilities]. Moscow. Ugletekhizdat, 1956. 291 p.

30. Yufin A.P. Gidromekhanizatsiya [Hydromechanization]. Moscow. Stroyizdat, 1965. 496 p.

31. Traynis V.V. Parametry i rezhimy gidravlichesкого transportirovaniya uglya po truboprovodam [Parameters and Modes of Hydraulic Transportation of Coal through Pipelines]. Moscow. Nauka Publishers, 1970. 192 p.

32. Yakovlev S.V., Karelin Ya.A. and Maslennikov N.A. Vspomogatel'nye ustroystva ochestnykh kanalizatsionnykh stantsiy [Auxiliary Devices of Sewage Treatment Plants]. Moscow. Gosstroyizdat, 1955. 180 p.

33. Fedorov N.F. and Shifrin S.M. Kanalizatsiya [Sewerage]. Moscow. OJSC "Vysshaya Shkola Publishers", 1968. 592 p.

34. Lomize G.M. Fil'tratsiya v treshchinovatykh porodakh [Filtration in Fractured Rocks]. Moscow-Leningrad. Gosenergoizdat, 1951. 127 p.

Поступило в редакцию 02.04.2019

Received 02 April 2019