

**Ю. И. Войтенко**, д-р техн. наук, заведующий отделом геофизической техники  
(Украинский государственный геологоразведочный институт (УкрГГРИ))

## **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НОВЫХ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ГАЗОДОБЫЧИ ИЗ ПЛОТНЫХ ПЕСЧАНИКОВ**

*Рассмотрены физико-химические механизмы создания трещин ненулевого раскрытия в плотных газоносных песчаниках.*

**Ключевые слова:** газодобыча, трещина, гидроразрыв пласта, взрыв, горение, импульсный гидроразрыв пласта.

В настоящее время основной технологией, которая применяется для интенсификации газодобычи из плотных песчаников, глинистых сланцев, а в некоторых странах из угольных пластов является гидроразрыв пласта (ГРП). Анализ применения ГРП в традиционных коллекторах показал, что с ГРП успешно конкурируют взрывные и импульсные методы, в которых используется энергия медленного или быстрого горения жидких горюче-окислительных смесей (ГОС) и зарядов твердых топлив, а также детонации взрывчатых веществ (ВВ) [1, 2]. Причем они конкурируют не только по критерию эффективности, но и по эколого-экономическим показателям. Одним из решающих факторов, обеспечивающих эффективность импульсного разрыва в традиционных коллекторах, является высокая пластовая энергия, благодаря которой образующиеся трещины поддерживаются в раскрытом состоянии.

Цель настоящей работы: количественное обоснование возможности применения в плотных песчаниках и карбонатах взрывных и импульсных методов для решения тех же задач, которые решает ГРП.

При ГРП поверхностями сбора газа являются стенки трещины, которые поддер-

живаются в раскрытом состоянии расклинивающим материалом. При взрывной обработке такой поверхностью является граница зоны дилатансионного разуплотнения рис. 1 [14, 15].

При импульсных видах разрыва пласта такими поверхностями являются стенки трещины разрыва, карбонатная или силикатная часть материала которых удалена химическими продуктами реакции горения твердых топлив или ГОС (парами кислот и щелочей), а в стенках трещин разрыва образуются дополнительные микро- и макротрещины под действием горячего водорода [7, 19], а трещина поддерживается целиками породы, не прореагировавшей с продуктами химических реакций (парами кислот, щелочей и т. п.). Кроме того, горячий водород (атомарный и молекулярный), проникая через мельчайшие поры и трещины, насыщая горную породу, производит ее охрупчивание, а внешние напряжения (горное давление) – объемное разупрочнение и разуплотнение геоматериала, особенно в условиях неравных компонент горного давления. Тем самым увеличивается проницаемость пород [7, 18], потому поверхностью сбора газа (эффективным радиусом скважины) является граница проникновения водорода.

Не исключается и такой механизм образования остаточного раскрытия трещины разрыва: часть обломочного материала остается местами в трещине и частично ее поддерживает. Возможны также технологические решения, обеспечивающие подачу в трещину небольших порций расклинивающего материала в процессе горения ГОС.

Какими же должны быть остаточные раскрытия микро- и макротрещин, чтобы газ двигался в них по закону Дарси (идеальный газ или жидкость), и какая критическая величина этого раскрытия, при меньших значениях которой существенной становится вязкость газа?

Напомним, что расход вязкой жидкости через узкую плоскую щель прямо пропорционален кубу ширины щели и обратно пропорционален длине щели. Как только раскрытие трещины  $w_0$  становится сравнимым с длиной свободного пробега молекул окружающего газа, механизм движения газа в полости трещины резко изменяется (вместо гидродинамического механизма по закону Дарси – кнудсеновская диффузия разреженного газа) [18].

Когда ширина канала меньше длины свободного пробега молекул, число молекул, проходящих через канал в единицу времени, убывает с увеличением длины канала обратно пропорционально длине канала и прямо пропорционально квадрату его ширины. Молекулы газа движутся независимо друг от друга, причем компоненты смеси протекают так, как если бы они были взяты в отдельности, и других компонентов не было. Течение определяется парциальным давлением компонента и не зависит от общего давления газовой смеси.

Для водорода воспользуемся данными, полученными в монографии [18].

При нормальных условиях величина свободного пробега  $\lambda$  молекул водорода (диаметр молекулы  $d = 1^{-10}$  м)

$$\lambda = 7 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 700 \text{ нм.}$$

Для пластовых термобарических условий  $p_0 = 10^7 \dots 10^8$  Па,  $T = 3730$  К.

Согласно работе [9]

$$\lambda = \frac{kT}{\pi\sqrt{2}d^2p}, \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;

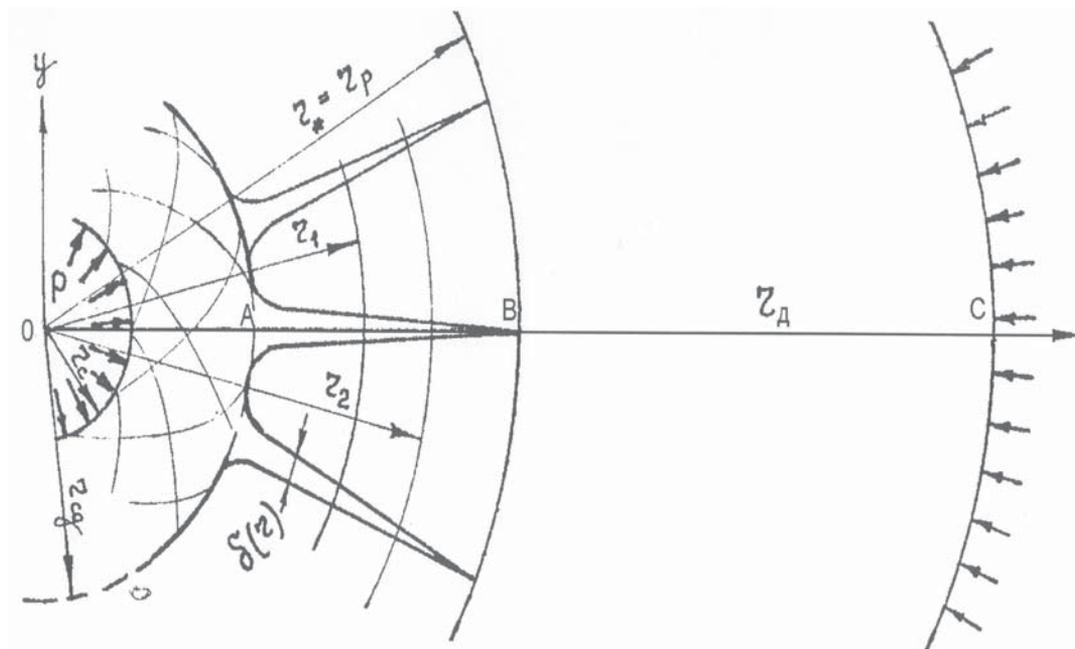


Рис. 1. Схема разуплотнения породы вокруг скважины при взрывной обработке

$p$ ,  $T$  – среднее давление газа и температура в трещине (пластовое давление и температура).

Учитывая, что  $k/\sqrt{2\pi} = 3,11 \cdot 10^{-24}$  Дж/К, получим для водорода в пластовых условиях  $\lambda = 13,67 \dots 1,367$  нм.

Для оксида углерода и близкого к нему по свойствам метана оценочные значения длины свободного пробега молекул составят соответственно 356 нм для нормальных условий и 34,8–3,48 нм для пластовых.

То есть движение природных газов  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  в пластовых условиях по закону Дарси возможно в мельчайших трещинах. В еще более мелких трещинах (меньше указанного диапазона) механизм движения газа будет более сложным: проскальзывание свободных молекул газа и прыжковый механизм перемещения адсорбированных молекул [21].

Эти оценки важны для понимания механизмов движения газа в образцах плотных горных пород и общей оценки притока газа к скважине. Кроме того, такие оценки могут быть полезны для геологического анализа кернового материала, полученного при бурении скважин на газ в нетрадиционных объектах с развитой или рассеянной микротрещиноватостью.

Таким образом, создание в призабойной зоне скважины трещин в макро-, микро- и нанодиапазоне с остаточным раскрытием от нескольких нанометров до нескольких десятков нанометров и выше обеспечивает приток газа к скважине. Его величина зависит от количества трещин в призабойной зоне скважины и их протяженности. Такие системы трещин можно получать как взрывными методами, так и термобарохимическим воздействием, особенно при наличии в продуктах реакции паров кислот, щелочей и горячего водорода [7, 19].

Покажем, что с использованием современных взрывных и термобарохимических методов и, возможно, их комплексирования, можно получать эффекты, соизмеримые с ГРП, что собственно подтверждает практика нефтегазопромыс-

ловых работ в различных геологических условиях, в том числе в плотных низкопористых коллекторах [1, 2].

Естественно, что расчеты носят оценочный характер.

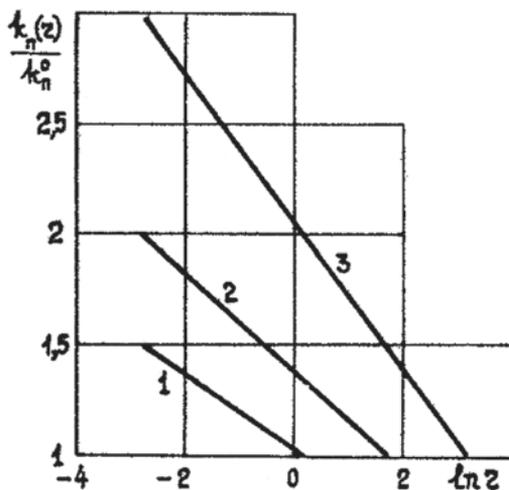
В работах [14, 15] показано, что радиус зоны дилатансионного разуплотнения хрупкого разрушающегося коллектора составляет  $r_3 = (30-50)r_3$  ( $r_3$  – радиус отдельного заряда в торпеде на глубинах до 3–4,5 км).

Требуемое изменение проницаемости пород в области  $r_c \leq r \leq r_3$  ( $r_3$  – эффективный радиус,  $r_c$  – радиус скважины,  $r_b$  – контур питания скважины)  $k_{\Pi}(r)$  при увеличении дебита скважины в соответствующее количество раз рассчитывалось по формуле [14]

$$k_{\Pi}(r) = \beta k_{\Pi}^0 \frac{\ln r_b / r}{\ln r_b / r_c}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – кратность увеличения дебита скважины.

В работах [14, 15] показано, что распределение проницаемости в зоне воздействия взрыва, показанное на рис. 2, возможно лишь при дилатансионном разуплотнении прочных упруго-хрупких пород.



**Рис. 2.** Требуемое изменение проницаемости пород в области  $r_c \leq r \leq r_3$  при увеличении дебита скважин в 1,5 (кривая 1), 2 (кривая 2) и 3 (кривая 3) раза ( $r$  в м)

Расчет проводился для условий торпедирования нефтяных скважин Мамонтовского месторождения. Радиус скважины  $r_c = 0,073$  м, радиус влияния  $r_b = 500$  м.

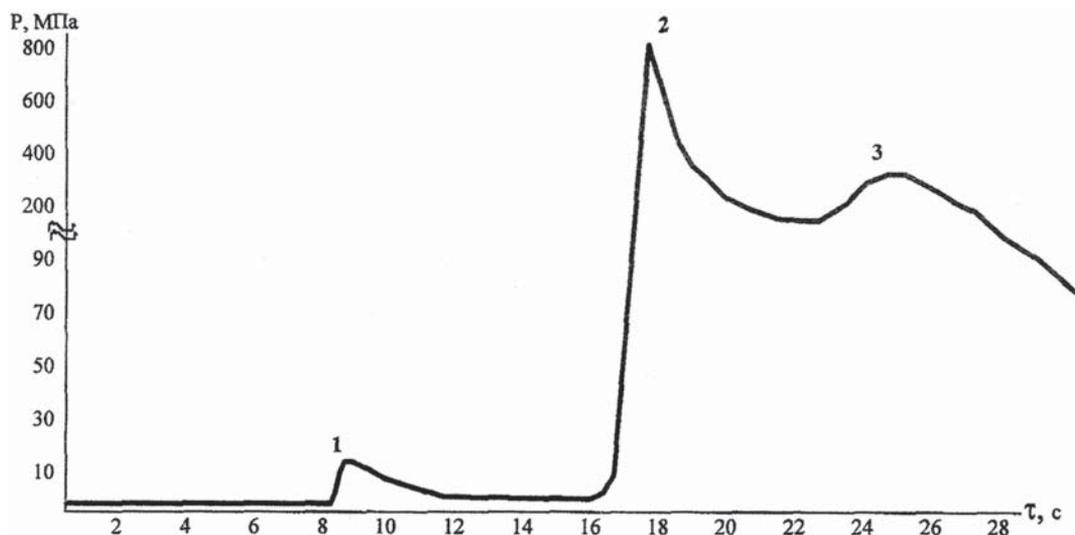
Как видно на рис. 2, в прискважинной зоне изменение минимальной необходимой проницаемости коллектора должно удовлетворять линейно затухающей функции логарифма расстояния от скважины. Причем на стенке скважины относительное изменение проницаемости должно соответствовать увеличению дебита скважины. При этом на границе зоны разуплотнения  $r_s - k_{п}(t_s) = k_{п}^0$ .

Обеспечить закон распределения проницаемости, показанный на рис. 2, в плотном коллекторе, особенно с карбонатной составляющей, можно двойной (а возможно многократной) обработкой: взрывом с последующей термобарохимической обработкой (ТБХО) либо импульсным гидроразрывом с последующей ТБХО.

Проиллюстрируем возможности импульсного гидроразрыва с одновременной ТБХО на примере скв. 9 Восточно-Полтавского газоконденсатного месторождения [19]. В этой скважине в зону перфорации через насосно-компрессорные трубы (НКТ) доставили 310 кг ГОС,

которую поджигали 2,5 кг гидрореагирующим составом (ГРС). Интервал перфорации: ~ 4 800–4 850 м. Порода-коллектор: песчаники разномерные, плотные. Карбонатность – 2–5 %. Пористость не превышает 8–9 %. Кривая изменения давления в скважине  $p(t)$  показана на рис. 3. Зона 1 на кривой соответствует началу химической реакции, точка 2 – моменту разрыва пласта, второй пик 3 на кривой  $p(t)$ , возможно, связан с торможением трещины и последующим ее развитием. Скорость нагружения в скважине до момента разрыва пласта составляла 0,533 ГПа/с. В соответствии с выводами работы [16] при такой скорости нагружения в пласте должны были образоваться одна-две трещины. Дебит скважины после обработки составил 130 тыс. м<sup>3</sup>/сутки. Несколько лет она работала со средним дебитом 90 тыс. м<sup>3</sup>/сутки, что примерно в два раза превышало дебиты соседних скважин.

Предположим, что одна из трещин дискообразная и образовалась по напластованиям. Произведем расчет этой дискообразной трещины в приближении автомодельной асимптотики [10]. Импульс аппроксимировался прямоугольником из условия равенства площадей реального



**Рис. 3.** Изменение давления во времени при горении системы ГРС-ГОС в скв. № 9 Восточно-Полтавского ГКМ. 1, 2, 3 – этапы процесса

импульса и прямоугольного. Расчетная формула проста

$$R(t) = R(\tilde{t}) \exp\{\beta^*(t - \tilde{t})\}, \quad (3)$$

где  $\tilde{t}$  – время начала автомоделного развития трещины;  $\beta^*$  – параметр, зависящий от отношения амплитуды импульса  $p_m$  к величине горного давления  $q_\infty$  ( $N = p_m/q_\infty$ ). Значения параметра  $\beta^*$  для продольных и поперечных трещин и разных значений  $N$  приведены в работе [4].

При горении ГОС образуются окислы углерода  $CO$  и  $CO_2$ , окислы азота  $NO_2$ ,  $N_2O$ , водяной пар, атомарный и молекулярный водород, легкие углеводороды, пары кислот, щелочей [7, 19]. Наличие водорода приводит к снижению вязкости смеси и ее расслоению. Водород как наиболее подвижный газ движется впереди в вершине трещины и пористой породе в режиме фильтрации. Для оценки вязкости газа под давлением воспользуемся данными работы [20], где показано, что зависимость вязкости газа Саратовского месторождения от давления близка к линейной до давления 40 МПа. Состав газа Саратовского месторождения (в %): метан ( $CH_4$ ) – 91,5; этан ( $C_2H_6$ ) – 1,8; пропан ( $C_3H_8$ ) – 0,8; бутан ( $C_4H_{10}$ ) – 0,6; пентан ( $C_5H_{12}$ ) – 0,3; азот ( $N_2$ ) – 5. Предположим, что эта зависимость сохраняется и для больших давлений.

Тогда вязкость продуктов горения ГОС в пластовых условиях под давлением  $\sim 3 \cdot 10^8$  МПа и температуре 100–150 °C можно оценить величиной 1–10 мПа·с, поскольку вязкость остальных продуктов горения при нормальных условиях близка к вязкости метана [9].

Расчет по формуле (3) проведен для следующих исходных параметров: радиус и ширина начальной трещины  $R_0 = 1$  м;  $w_0 = 10^{-3}$  м;  $\mu = 10$  мПа·с;  $p_0 = q_\infty = 120$  МПа;  $P = 3 \cdot 10^8$  Па. Значение параметра  $\beta^*$  в формуле (3) согласно [4] составило  $\beta^* = 0,034$ . Расчет показывает следующие значения радиуса трещины:  $R = 2,32 R_0$  ( $t = 1$  с);  $R = 5,4 R_0$  ( $t = 2$  с);  $R = 29,0 R_0$  ( $t = 4$  с);  $R = 158 R_0$  ( $t = 6$  с) и  $R = 858 R_0$  ( $t = 8$  с). При  $R_0 = 1$  м на шестой секунде радиус

составляет 158 м (1580  $r_c$ ,  $r_c$  – радиус скважины по долоту). Скорость трещины при таком режиме движения постоянно увеличивается (2,32; 3,08; 11,8; 64,5 м/с).

Увеличивающаяся скорость трещины, большие значения радиуса радиально-кольцевой трещины и еще большие значения длины радиальной трещины  $l(t)$ , которые значительно превышают приведенные выше, вызывают сомнения в адекватности описания реального процесса трещинообразования экспоненциальным законом. Возможно, такой закон развития трещины справедлив только на каком-то участке ее развития (неполная автомоделность по параметру подобия). Второй причиной погрешности расчета может быть грубая аппроксимация импульса давления.

Известны и другие модели развития трещин при импульсном нагнетании в них газа, например, в работе [13]. К сожалению, в этой работе не приведены зависимости  $l(T)$  ( $T$  – время действия импульса давления для создания трещин размером  $\approx 20 r_c$ ). Не приведено значение длительности импульса давления  $T$ , неизвестно значение предельной скорости трещин  $V_{max}$  для разных песчаников, поэтому воспользоваться ее результатами не удалось.

Интересно, что при насосном гидро-разрыве маловязкой жидкостью (вода) плотного песчаника на кварцевом цементе время развития дискообразной трещины радиусом 20–25 м (440...555  $r_c$  по долоту) составляет 70–90 с [8], а ее скорость на стадии установившегося движения близка к постоянной и составляет 0,2–0,25 м/с. Горное давление в этих экспериментах составляло 9,0–10,8 МПа. Статическая трещиностойкость для крепких песчаников согласно справочных данных составляет  $K_{1C} = 0,59$  МПа·м<sup>1/2</sup>[14]. В отсутствие других упругих и прочностных характеристик породы удовлетворительные результаты расчета дает формула А. Ф. Зазовского, полученная также Н. Abe и соавторами [6, 20], для таких значений модуля Юнга  $E$ , коэффициента Пуассона  $\nu$ :  $E = 27,4$  ГПа;  $\nu = 0,17$ . Расчет дает значение радиуса трещины 15,56 м при  $t = 80$  с.

При импульсном ГРП, не нагруженного внешним давлением искусственного песчаника и полиметилметакрилата, скорости трещин в экспериментах составляли  $\approx 5 \dots 60$  м/с (размер трещин –  $5 \dots 20 r_c$  по долоту) [16].

Количественные обоснования импульсных методов интенсификации газодобычи, сравнимых с ГРП, приведем для случаев взрывного разуплотнения и импульсного ГРП. Согласно работе [3] дебит скважины в результате торпедирования  $q$  увеличивается в  $\beta$  раз. Отношение его к начальному дебиту составит

$$q/q_0 = \frac{\ln r_B / r_c}{\ln r_B / r_3} = \beta, \quad (4)$$

откуда

$$r_3 = r_B / \left( \frac{r_B}{r_c} \right)^{-1/\beta}.$$

В соответствии с принципом геометрического подобия  $r_3 = \chi r_3$  ( $r_3$  – радиус заряда в тротиловом эквиваленте,  $\chi$  – коэффициент пропорциональности), поэтому из соотношения легко установить требуемую массу заряда.

Принято считать положительной такую операцию по интенсификации добычи подземных флюидов, в результате которой дебит скважины увеличивается не менее, чем на 70 %. Обычно при расчетах элементов дилатансионных технологий торпедирования скважин по добыче жидких флюидов мы исходили из требования двукратного увеличения дебита. В этом случае формула упрощается

$$r_3 = \sqrt{r_c r_B}.$$

Имеется одна важная особенность подобных расчетов. Законами сохранения подразумевается, что приток флюида к скважине численно равен его расходу через поверхность фильтрации на любом расстоянии от нее. После торпедирования это условие соблюдается лишь при  $r \geq r_3$ , а следовательно в области  $r_c \leq r \leq r_3$  должны быть созданы условия для такого увеличения скорости фильтрации, которое обеспечит поступление флюида к скважине в объеме, проходящем через границу  $r_3$ . Как видно,

единственной возможностью обеспечить требуемую “пропускную способность” призабойной зоны в области  $r \leq r_3$ , является увеличение ее проницаемости. Рассмотрим, каким должно быть распределение проницаемости пород в этой области, чтобы пропустить к скважине весь поток флюида, проходящий через границу  $r_3$ . Не нарушая общности рассуждений, анализ, как и раньше, проведем для простейшего случая плоскорадиального потока. Согласно формуле (4) для произвольного расстояния  $r_c < r < r_3$  должно соблюдаться условие

$$\frac{k_n(r)}{\ln r_B / r} = \frac{k_n^0}{\ln r_B / r_3},$$

откуда с учетом формулы (4) проницаемость пород на произвольном расстоянии  $r_c < r < r_3$  должна быть не ниже, чем

$$k_n(r) = \beta k_n^0 \frac{\ln r_B / r}{\ln r_B / r_c}.$$

После ГРП (импульсного ГРП – ИГРП) приток в скважину определяется раскрытием трещины  $w$ . Отношение притока через трещину ГРП  $q_1$  к притоку через пористый пласт  $q_0$  составит  $q_1/q_0 = w^3/12k_n h$ , где  $h$  – мощность пласта.

Для равенства притоков из трещины ГРП  $q_1$  и зоны взрывной обработки с последующей ТБХО  $q$  нужно, чтобы величина  $r_{31}$  была такой, чтобы выполнялось равенство  $q = q_1$ . Сравнить эти две величины можно из геометрических соображений: скважина после взрывной обработки + ТБХО питается через цилиндрическую поверхность радиусом  $r_3$ , площадью  $2\pi r_3 h$  ( $h$  – мощность обработанной зоны), а после ГРП (ИГРП) через стенки трещины глубиной  $L$  (или  $R$ ) и длиной вдоль скважины  $h$  (в случае продольной трещины). Площадь питания такой трещины  $\sim 2hL$ . Приравняв эти выражения  $2\pi r_3 h = 2hL$ , откуда величина эффективного радиуса скважины после взрыва или ИГРП и ТБХО  $r_{31} = \frac{L}{\pi}$ .

Для импульсного ГРП (ИГРП, ТБХО) оценка может быть проведена путем оценки размеров трещин ГРП и ИГРП

– ТБХО в предположении, что остаточное раскрытие трещины ИГРП будет несколько меньшее, чем трещины ГРП, однако достаточно большое, чтобы обеспечить гидродинамическое движение газа в них по закону Дарси, а не диффузию разреженного газа по закону Кнудсена. Тогда отличие притоков газа из трещины ИГРП и ГРП будет определяться при прочих равных условиях соотношением их раскрытий  $w_1/w_{\text{ГРП}}$  ( $w_1$  – раскрытие трещины ИГРП после ТБХО,  $w_{\text{ГРП}}$  – раскрытие трещины ГРП).

В зависимости от типа песчаника эффективными могут быть как щелочные обработки берегов трещин ИГРП, так и кислотные [10]. Состав продуктов горения может регулироваться рецептурой ГОС [7, 19]. На больших глубинах в условиях не равных компонент горного давления не исключается механизм развития дилатансионной трещины, когда берега трещины смещаются по отношению друг к другу и трещина частично заполняется обломочным материалом [17].

Предложенная двустадийная схема разуплотнения будет наиболее эффективна в плотных хрупко разрушающихся коллекторах с достаточно высокой пластовой энергией. Некоторые из таких объектов определены в работе [11].

### Выводы

1. Для плотных коллекторов в качестве альтернативы ГРП может быть рекомендована двустадийная схема: разуплотнение взрывом или быстрым горением с последующей термобарохимической обработкой (ТБХО).

2. В зависимости от типа песчаников с карбонатной составляющей их рекомендуется обрабатывать составами ГОС с выделением в продуктах реакции паров щелочи, соляной, плавиковой кислот и горячего водорода, а низкокарбонатные породы – с выделением паров щелочи или их компонентов:  $H_2$ ,  $F_2$ ,  $Cl_2$  ( $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $F^-$ ). Не исключается введение в трещину ИГРП небольших порций расклинивающего материала.

3. Для оценки перспектив на газ при разведочном бурении достаточно провести минигидро разрыв пласта с последующей ТБХО, в случае эксплуатационного бурения необходимо проводить массивный импульсный гидроразрыв или дилатансионное торпедирование с последующей ТБХО.

*В заключение автор благодарит д-ра техн. наук С. В. Гошовского за обсуждение возможных механизмов образования трещин ненулевого раскрытия при импульсном разрыве плотных пород в условиях действия горного давления.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Войтенко Ю. И., Кравченко О. В., Великоцкий Д. А. О возможности изменений фильтрационных и прочностных свойств плотных пород-коллекторов на мезо- и наноразмере при взрывном и термобарохимическом воздействии//Международная научно-практическая конференция “Перспективы использования альтернативных и возобновляемых источников энергии в Украине (REU 2013)”. 9–13 сентября 2013 года, г. Судак (АР Крым, Украина).*
2. *Войтенко Ю. И., Прожогина О. И. Перспективы використання потужних методів інтенсифікації нафтогазовидобутку для розробки нетрадиційних ресурсів//Международная научно-практическая конференция “Перспективы использования альтернативных и возобновляемых источников энергии в Украине (REU 2013)”. 9–13 сентября 2013 года, г. Судак (АР Крым, Украина).*
3. *Глумов Д. Н., Стрекалов А. В. Аналитический расчет коэффициентов динамической вязкости природных газов//Территория Нефтегаз. 2010. № 10. С. 23–27.*
4. *Гордеев Ю. Н., Кудряшов Н. А. Развитие магистральной трещины под действием движущегося в ней газа//Прикл. мех. и техн. физика. 1986. № 4. С. 116–121.*
5. *Гороновский И. Т. Краткий справочник по химии/И. Т. Гороновский, Ю. П. Назаренко, Е. Ф. Некряч. Киев: Наукова думка, 1987. 829 с.*
6. *Зазовский А. Ф. Распространение плоской круговой трещины гидроразрыва в непроницаемой горной породе//Механика твердого тела. 1979. № 2. С. 102–109.*
7. *Кравченко О. В. Водородная активация в процессах повышения проницаемости нефтегазоносных пород//Восточно-Европей-*

ский журнал передовых технологий. Харьков: НПП “Технологический центр”. 2013. № 1/6 (61). С. 21–25.

8. Красников С. Я. Анализ результатов испытаний метода гидродинамической стратификации основной труднообрушающейся кровли в шахтных условиях//Взаимодействие механизированных крепей с боковыми породами. Новосибирск, 1987. Вып. 45. С. 53–61.

9. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1985. 519 с.

10. Ланчаков Г. А. Разработка и опыт применения комплексных щелочно-кислотных обработок призабойных зон эксплуатационных скважин с целью интенсификации притока. М.: ИРЦ Газпром, 1995. 64 с.

11. Лукин А. Е. О природе и перспективах газоносности низкопроницаемых пород осадочной толщи Земли//Доповіді Національної академії наук України. 2011. № 3. С. 114–123.

12. Мартынюк П. А., Панов А. В. Развитие системы трещин гидроразрыва в нефтегазовом пласте при импульсном нагружении// Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2012. № 3. С. 55–62.

13. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие в четырех томах. Т. 3. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 435 с.

14. Михалюк А. В. Дилатансионные технологии торпедирования скважин для ин-

тенсификации добычи подземных флюидов/ А. В. Михалюк, Е. А. Мухин, С. А. Михалюк, В. В. Захаров. Киев: ВПОЛ, 1999. 66 с.

15. Михалюк А. В. Дилатансионные методы взрывных работ/А. В. Михалюк, В. А. Поплавский, В. В. Захаров, Е. А. Мухин. Киев: ВПОЛ, 2002. 120 с.

16. Михалюк А. В., Войтенко Ю. И. Импульсный гидроразрыв пород. Киев: Наукова думка, 1991. 204 с.

17. Николаевский В. Н. Трещиноватость земной коры как ее генетический признак//Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 5. С. 646–656.

18. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.

19. Щербина К. Г. Хіміко-фізичні основи високотемпературного впливу на привибійну зону свердловини гідрореагуючими складами: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. ВАТ “Український нафтогазовий інститут”. К., 1999. 34 с.

20. Abe H., Mura T., Keer L. M. Growth rate of penny-shaped crack in hydraulic fracturing of rocks//J. Geophys. Res. 1976. Vol. 81. № 29. P. 5335–5340.

21. Fathi E. Mass Transport of Adsorbed-phase in Stochastic Porous Medium with Fluctuating Porosity Field and Nonlinear Gas Adsorption Kinetics/E. Fathi, I. У. Akkutlu//Journal of Transport in Porous Media. 2012. Vol. 91 (1). P. 5–33.

Рукопис отримано 18.02.2014.

**Ю. І. Войтенко**, *д-р техн. наук, завідувач відділу геофізичної техніки (Український державний геологорозвідувальний інститут (УкрДГРІ))*

### **ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ НОВИХ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ГАЗОВИДОБУТКУ ЗІ ЩІЛЬНИХ ПІСКОВИКІВ**

*Розглянуто фізико-хімічні механізми створення тріщин ненульового розкриття в цільних газоносних пісковиках.*

**Ключові слова:** газовидобуток, тріщина, гідророзрив пласта, вибух, горіння, імпульсний гідророзрив пласта.

**Yu. I. Voytenko**, *Dr. of technical sciences, head of department of geophysical equipment (Ukrainian State Geological Research Institute (USGRI))*

### **PHYSICAL AND CHEMICAL PRINCIPLES OF NEW METHODS FOR IMPROVED GAS PRODUCTION FROM TIGHT SANDSTONE**

*Physico-chemical mechanisms for creating cracks nonzero width in tight-gas reservoirs are considered.*

**Keywords:** gas production, crack, hydraulic fracturing, explosion, burning, pulse hydraulic fracturing.