

УДК 622.276.66

## АКТИВИЗАЦИЯ ОТБОРА ГАЗА ИЗ ПЛОТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ОПЫТА ГИДРОРАЗРЫВА ГОРНЫХ ПОРОД

Садовенко И. А., Инкин А. В.

(Государственное ВУЗ "НГУ", г. Днепропетровск, Украина)

*Запропоновано методикау чисельної оцінки розмірів і форми тріщини гідророзриву для прогнозування збільшення проникності вуглевміщувальних порід і дебітів газу на Новомосковському кам'яновугільному родовищі.*

*Procedure for numerical evaluation of hydraulic fracturing crack sizes and form to predict increase in permeability of coal-enclosing rocks and gas flow rates at Novomoskovsk coal deposit is proposed.*

**Введение.** Геологические оценки запасов газа слабопроницаемых коллекторов в мире и Украине зачастую намного превышают объемы традиционных запасов. Так, согласно данным управления энергетической информации (EIA), Украина занимает третье место в Европе и тринадцатое – в мире по ресурсам этого вида топлива, величина которых достигает 8 трлн куб. м, в то время как запасы традиционного газа в трех нефтегазоносных регионах страны (западном, восточном и южном) составляют не более 1 трлн куб. м [1]. Тем не менее, повышенный интерес к нетрадиционному газу как потенциальному источнику энергетической независимости возник только в последнее время. Во многом этому поспособствовал прогресс в его освоении американской компании Chesapeake Energy, благодаря которому США с 1990 по 2010 гг. увеличили количество нетрадиционного газа в общей до-

быче с 10 до 40 %, что снизило импорт сжиженного природного газа на 2,6 % [2].

Вместе с тем, разработка нетрадиционных месторождений газа в Украине по американской технологии сопряжена с определенными трудностями и негативными последствиями для окружающей среды. Для проведения гидроразрыва горных пород используется дорогостоящее буровое оборудование для вертикально-горизонтального бурения. Создание сверхвысокого давления при гидроразрыве неглубоко залегающих коллекторов может привести к повреждению скважин и фундаментов близко расположенных зданий, а для поддержания заданной пористости пласта после гидроразрыва применяются различные химикаты, соли органических кислот, отходы нефтепереработки, дизельное топливо и другие вещества, загрязняющие атмосферу, и подземные воды, используемые для водоснабжения.

**Постановка задачи исследований.** Эффективная разработка нетрадиционных ресурсов газа в Украине может быть осуществлена путем обоснования комплексной технологической инфраструктуры извлечения газа из плотных пород с применением современных технологий активизации газовыделения и адаптации этих технологий к отечественному оборудованию. В связи с этим, целью данной работы является оценка фильтрационных свойств и газоотдачи плотных коллекторов Новомосковского каменноугольного месторождения в результате проведения гидроразрыва пласта, основанного на имеющемся опыте прорывов низкопроницаемой углеводородной толщи на шахтных полях Западного Донбасса.

**Материал и результаты исследований.** В геоморфологическом отношении Новомосковское каменноугольное месторождение расположено на водораздельном плато правобережной части р. Самары и левобережной части р. Малой Терновки в пределах юго-западного крыла Днепровско-Донецкой впадины (рис. 1). Рельеф территории представляет собой слабовсхолмленную равнину, отметки которой колеблются от 127,5 м на северо-востоке до 62,0 м на юго-западе, сложенную древними и современными террасами, пологопадающими в сторону р. Днепр. В геологическом строении участвуют докембрийские кристаллические поро-

ды, осадочный комплекс девона, нижнего и среднего карбона, перми, триаса, юры, а также третичные и четвертичные образования. Тектоническое строение месторождения обусловлено наличием жесткого кристаллического фундамента, залегающего на сравнительно небольшой глубине, в связи с чем на месторождении четко вырисовывается система тектонических нарушений, обуславливающая сбросы с амплитудами до 50 м.



Рис. 1. Обзорная карта Новомосковского каменноугольного месторождения: 1, 2 – соответственно границы месторождения и шахтных полей

Важнейшими характеристиками углевмещающих пород Новомосковского месторождения как коллекторов природных газов являются их пористость и проницаемость, определяющие фильтрационную способность и емкость угленосных отложений. На рисунке 2 и в таблице 1 приведены данные, иллюстрирующие изменения этих параметров [3]. Анализ кривых показывает, что пористость аргиллитов колеблется в пределах от 6,9 до 30,7 %, при среднем значении 25,5 %; алевролитов 1,7 – 39,6 %, при среднем 20,1 %; песчаников 3,6 – 47,0 %, при среднем 20 % и уменьшается с увеличением глубины залегания пластов. Относительно небольшое количество показателей проницаемости пород, обусловленной их пористостью и трещиноватостью, не позволяет

установить каких-либо закономерностей ее изменения по площади или глубине в пределах залежи. Однако имеющейся объем опробований однозначно показывает значительное превышение проницаемости вмещающих пород в сравнении с углями, свидетельствующее о том, что основными путями миграции газа на месторождении являются песчаники, алевролиты и аргиллиты угленосной толщи.

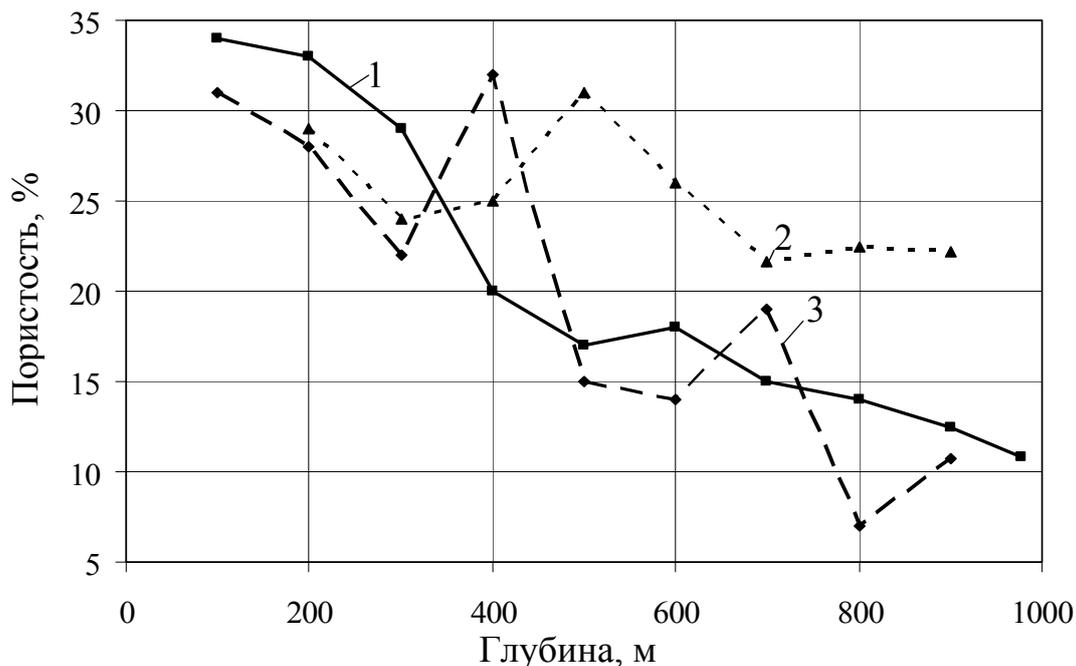


Рис. 2. Изменение пористости пород угленосной толщи Новомосковского месторождения с глубиной: 1, 2, 3 – кривые изменения пористости песчаников, аргиллитов и алевролитов соответственно

Природный газ, содержащийся в угольных пластах и породах Новомосковского месторождения, состоит из углекислого газа, метана, азота и водорода. Анализ его качественного состава (табл. 2) показывает увеличение содержания метана и уменьшение азота в смеси газов с глубиной по всей площади залежи. Количество метана возрастает до глубины 800 м (с 2,98 до 44,42 %), а далее начинает снижаться до 29,9 %. Для азота характерна обратная зависимость. Метаносность горных пород также повышается с глубиной, однако четкая закономерность ее изменения не прослеживается. Резко возрастая в интервале глубин 500 – 600 м

(почти в 10 раз), в дальнейшем она незначительно варьирует в пределах 1 – 2 м<sup>3</sup> на тонну. По имеющимся данным можно сделать вывод, что максимальное содержание метана на исследуемой площади можно встретить на глубине 700 – 800 м.

Таблица 1  
 Значения проницаемости углевмещающих пород

Интервал глубин, м	Проницаемость, 10 <sup>-15</sup> м <sup>2</sup>			
	Песчаник	Алевролит	Аргиллит	Уголь
400-500	138,70	–	–	0,038
500-600	12,63	5,55	11,0	0,050
600-700	12,32	125,00	8,7	0,063
700-800	28,70	3,50	6,2	0,058
800-900	22,02	0,26	5,9	0,031
900-1000	0,30	2,63	3,1	–

Таблица 2  
 Изменение качественного состава газа угленосной толщи с  
 глубиной

Интервал глубин, м	Состав газа, %				Метаносность м <sup>3</sup> /тонна
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	
400-500	5,98	2,98	86,28	4,76	0,092
500-600	4,27	18,80	74,00	2,93	0,88
600-700	4,09	31,21	59,81	4,89	1,75
700-800	6,88	44,42	46,19	2,51	2,00
800-900	2,58	30,82	65,30	1,30	1,50
900-1000	3,50	29,90	66,60	–	2,05

Для увеличения проницаемости и газоотдачи выделенного интервала углевмещающей толщи необходимо, с учетом специфики отечественного оборудования, произвести его гидравлический разрыв, который заключается в механическом воздействии на пласт избыточного давления, создаваемого закачиваемой через вертикальную скважину жидкостью. Поскольку на данных глубинах наименьшие напряжения в породном массиве ориентиро-

ваны горизонтально, то образующаяся в результате разрыва трещина будет иметь вертикальную направленность [4]. Для прогноза дебита газа и фильтрационных свойств пород после гидроразрыва рассмотрим круговой пласт, в центре которого находится скважина, пересеченная симметричной вертикальной трещиной, горизонтальное сечение которой имеет эллиптическую форму, а вертикальное – прямоугольную (рис. 3).

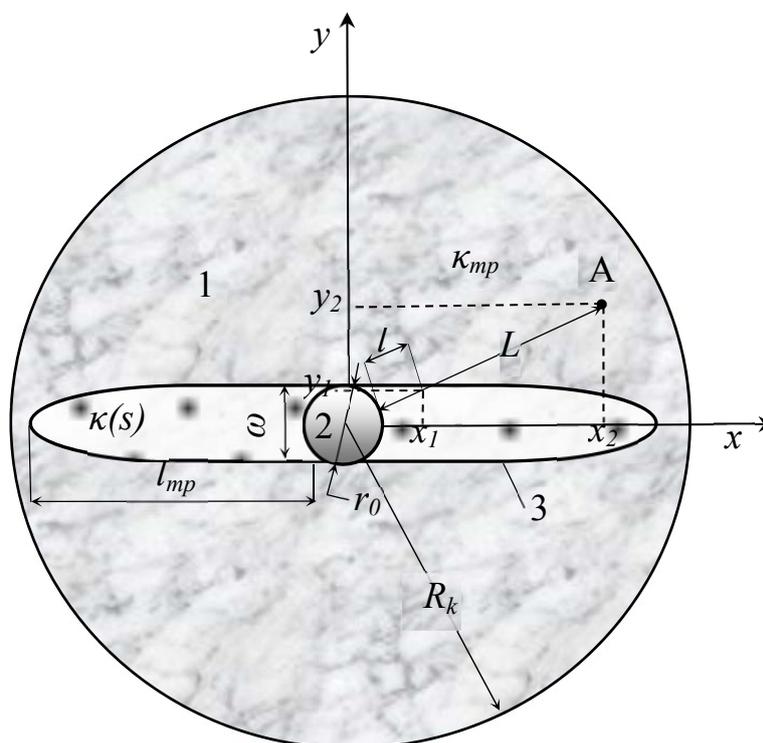


Рис. 3. Схема к расчету фильтрационных свойств слабопроницаемой углеводородной толщи, пересеченной вертикальной трещиной гидроразрыва (по нормали к горизонтальной плоскости  $x - y$ ): 1 – плотные песчаники; 2, 3 – скважина и трещина соответственно

Существенной особенностью трещины гидравлического разрыва, в значительной мере влияющей на продуктивные показатели пласта, является изменение ее геометрических размеров в пространстве. Согласно ряду проведенных исследований [5, 6] высота вертикальной трещины в среднем равна мощности эксплуатируемого пласта и в несколько раз меньше ее длины, величину которой можно определить по следующим зависимостям:

$$l_{mp} = \left( \frac{VQ\mu}{2\pi^2 h^2 n \cdot \kappa \cdot q} \right)^{0.5}, \quad (1)$$

$$l_{mp} = C \cdot \left( \sqrt{\frac{\mu \cdot t}{\kappa}} \right)^{0.5}, \quad (2)$$

где  $V$ ,  $\mu$  – соответственно объем и вязкость закачиваемой жидкости;

$h$  – толщина пласта;

$n$ ,  $\kappa$  – пористость и проницаемость пород соответственно;

$q$  – боковое горное давление;

$C$  – коэффициент, зависящий от глубины разрыва пород;

$t$  – время закачки жидкости.

С помощью формул (1) – (2) был произведен расчет полу-длины трещины образующейся в плотном коллекторе Новомосковского месторождения на глубине 750 м ( $h = 13,5$  м;  $n = 0,15$ ;  $q = 6,5$  МПа;  $C = 0,024$ ) при закачке жидкости через скважину ( $V = 5$  м<sup>3</sup>;  $\mu = 0,18$  Па·с). Анализ полученных кривых показывает (рис. 4, а), что определенные по формуле (1) значения несколько завышены в сравнении с показателями, рассчитанными по выражению (2). Отмечается улучшение сходимости результатов расчета по формулам (1) – (2) с увеличением начальной проницаемости пород. Для большей достоверности прогнозов отбора газа в дальнейших вычислениях будем использовать выражение (2).

Максимальная ширина образующейся трещины была определена в программной среде Mathcad по следующим формулам и эмпирическим зависимостям [7]

Геертсмана и Клерка –

$$\omega = \left( \frac{336}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left( \frac{\mu Q l_{mp}^2}{h} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (3)$$

Ю. П. Желтова –

$$\omega = \frac{4(1-2\nu) \cdot (1+\nu) \cdot (P_c - q)}{3E} \cdot l_{mp}^{0.5}, \quad (4)$$

Перкинса-Керна –

$$\omega = 3,57 \left( \frac{\mu Q l_{mp}}{E'} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (5)$$

Метод "РКН" –

$$\omega = 3,27 \left( \frac{\mu Q l_{mp}}{E'} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (6)$$

где  $E'$  – модуль плоской деформации,  $E' = E / (1 - \nu^2)$ ;

$E, \nu$  – соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона углевмещающей толщи ( $2 \cdot 10^{10}$  Па и 0,27);

$P_c$  – давление в скважине (45 МПа).

Анализ графиков (рис. 4, б), показывает хорошую сходимость полученных результатов. Максимальные отклонения между профилями ширины трещины, рассчитанными несколькими методами, не превышают 0,01 м и характерны только для зоны наибольшего расхода жидкости.

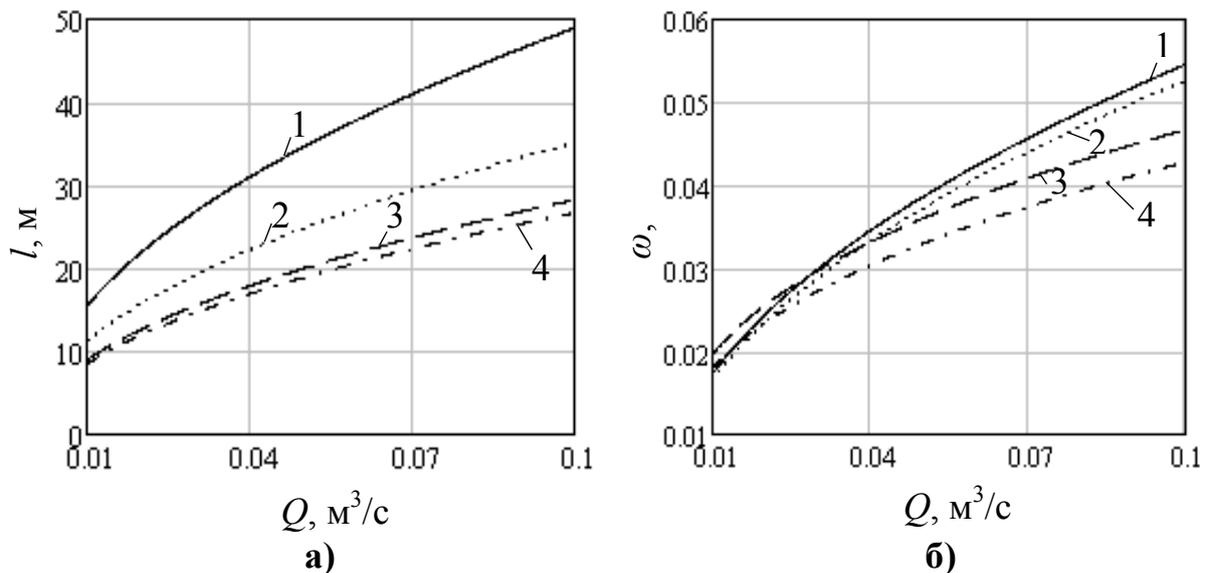


Рис. 4. Изменение размеров трещины гидроразрыва в зависимости от расхода закачиваемой жидкости ( $Q$ ): а – полудлины ( $l_{mp}$ ), 1, 2, и 3, 4, определенной по формулам (1) и (2) при проницаемости пород  $10^{-14}$  и  $3 \times 10^{-14}$  м<sup>2</sup> соответственно; б – ширины ( $\omega$ ), рассчитанной по зависимостям (3) – (6)

Кроме того, в работе [5] была выполнена идентификация моделей Желтова и Перкинса-Керна с натурным объектом путем сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными, что позволяет использовать данные зависимости для корректного решения поставленных задач.

Для оценки фильтрационных свойств угленосных пород после гидравлического разрыва необходимо также знать форму и проницаемость формирующейся трещины. Изменение ширины трещины может быть описано моделью Перкинса-Керна, адекватность которой показана выше, а проницаемости трещины с учетом ее водо- и газосодержания – уравнением Чень-Чжун-Сяна [8]

$$\omega(x) = \omega \cdot \left(1 - \frac{x}{l_{mp}}\right)^{\frac{1}{4}},$$
$$\kappa(s) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq s \leq 0,1, \\ \kappa_{mp} \cdot [(s - 0,1)/0,9]^{3,5} \cdot (4 - 3s) & \text{при } 0,1 \leq s \leq 1; \end{cases}$$
$$\kappa_{mp} = \frac{\omega^2}{12},$$

где  $\kappa_{mp}$ ,  $\kappa(s)$  – соответственно абсолютная и фазовая проницаемости трещины;

$s$  – газонасыщенность.

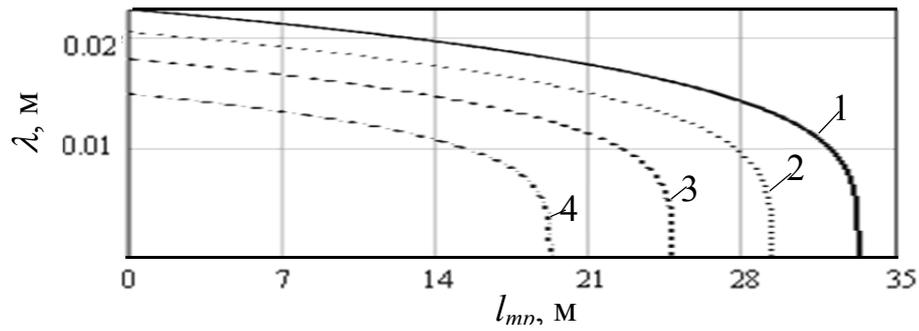
На рисунке 5 приведены изменения раскрытия и фазовой проницаемости трещины по ее длине, анализ которых подтверждает эллиптическую форму трещины в плане и показывает значительное влияние водосодержания наполняющих трещину расклинивающих агентов (пропантов) на величину ее проницаемости.

Средняя проницаемость внутри трещины может быть определена путем интегрирования профиля проницаемости по ее длине и за ее пределами – в произвольной точке углевмещающей толщ (см. рис. 3) из следующих выражений:

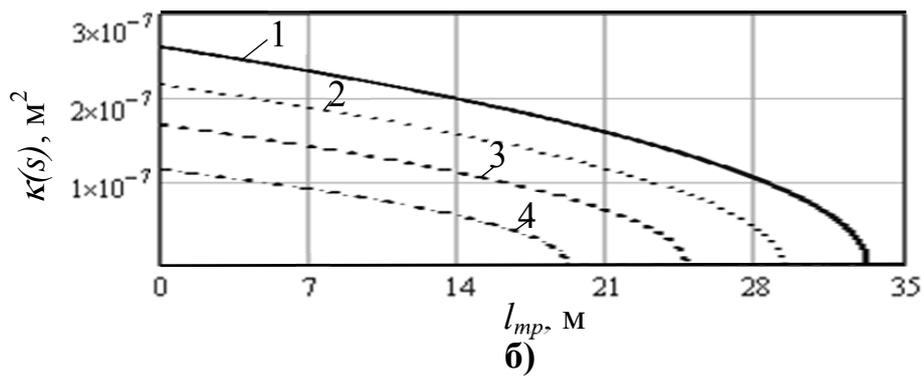
$$\kappa_{mpA} = \frac{\kappa(s) \cdot l + \kappa \cdot (L - l)}{L};$$

$$L = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}, \quad l = \sqrt{x_1^2 + y_1^2};$$

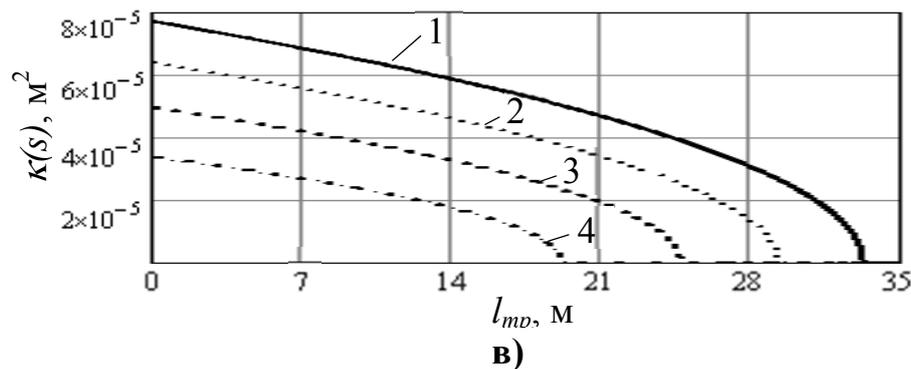
$$y_1 = \frac{y_2}{x_2} \cdot x_1, \quad y_1 = \omega \cdot \left(1 - \frac{x_1}{l_{mp}}\right)^{\frac{1}{4}}, \quad \frac{y_2}{x_2} \cdot x_1 = \omega \cdot \left(1 - \frac{x_1}{l_{mp}}\right)^{\frac{1}{4}},$$



а)



б)



в)

Рис. 5. Профіли: а – раскрытия берегов ( $\lambda$ ); б, в – фазовой проницаемости ( $\kappa(s)$ ) трещины гидроразрыва при водосодержании заполняющего ее материала 0,8 и 0,3 соответственно: 1 – 4 – при расходе закачиваемой жидкости 0,09, 0,07, 0,05 и 0,03 м<sup>3</sup>/с

где  $\kappa_{mpA}$  – средняя проницаемость в произвольной точке А плотного коллектора, пересеченного вертикальной трещиной гидроразрыва;

$L, x_2, y_2$  – расстояние до этой точки и ее координаты соответственно;

$l, x_1, y_1$  – координаты и расстояние до места пересечения профиля трещины с лучом, проведенным из скважины в точку А.

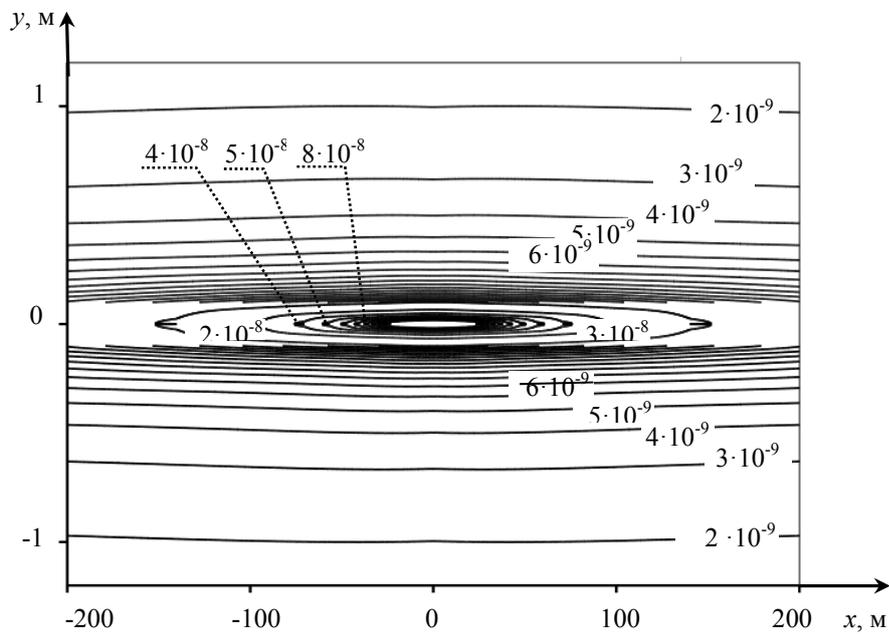
Представленные зависимости могут использоваться для оценки проницаемости коллекторов при проведении гидравлического разрыва. Детальное моделирование фильтрационных процессов вблизи трещин требует учета искривления линий тока, вызванного наличием в пласте высокопроницаемого включения. На рис. 6 в горизонтальной плоскости приведены величины проницаемости плотных песчаников Новомосковского месторождения, рассеченных трещиной гидроразрыва и определенные в программной среде Mathcad по предложенной выше методике. Их анализ показывает, что изолинии проницаемости являются эллипсами конфокальными трещине, при этом уменьшение их значений в пласте вдоль ширины трещины происходит на порядок быстрее, чем вдоль ее длины.

Прогноз дебита скважины после гидравлического разрыва может быть выполнен для условий, показанных на рис. 3 (контур питания имеет форму круга и скважина, расположенная в начале координат, пересекается симметричной трещиной, параллельной оси  $0x$  и проницаемостью  $\kappa(s)$ ) [8]

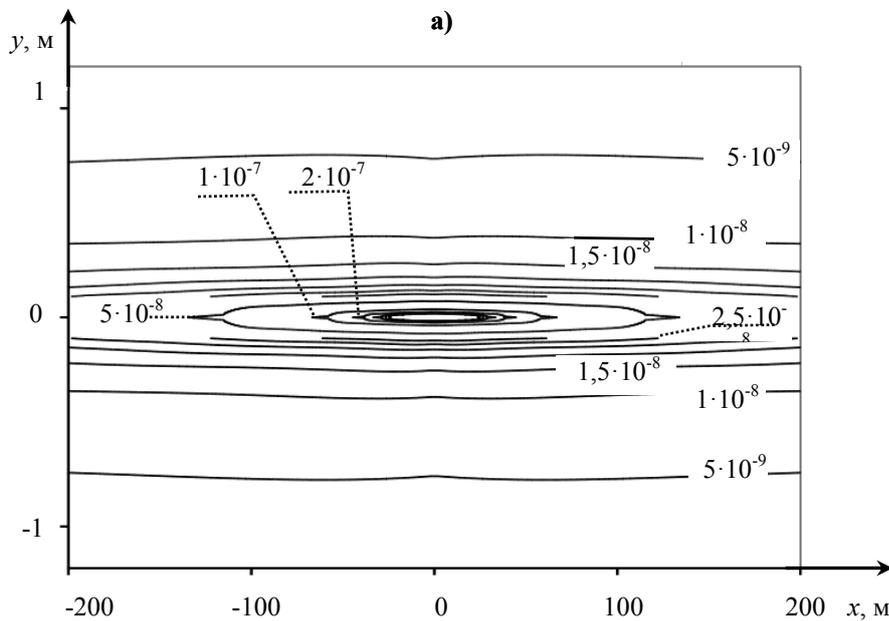
$$Q_z = Q_0 \frac{\ln R_k/r_c}{\ln R_k/r_w}, Q_0 = \frac{2\pi kh}{\mu_z} \frac{P_k - P_c}{\ln R_k/r_f},$$
$$\ln r_w = (1 - \lambda) \ln r_w + \lambda \ln \frac{f}{2} + (1 - \lambda) \cdot \lambda \ln(1 - q^4), \quad (7)$$
$$\lambda = \frac{\kappa(s) - \kappa}{\kappa(s) + \kappa}, q = \sqrt{\frac{l_{mp} - \omega}{l_{mp} + \omega}}, f = \sqrt{l_{mp}^2 - \omega^2}.$$

Для проведения сравнительных расчетов и учета перераспределения фильтрационного потока вблизи трещины, вызванного эллиптической формой изолиний проницаемости (рис. 6) и ор-

тогональними им гиперболами линий тока, контур питания скважины может быть представлен эллипсом. При этом эллиптический и круговой контуры должны ограничивать равные по площади области:  $R_k^2 = a\sqrt{a^2 - l^2}$ , тогда



а)



б)

Рис. 6. Изолинии средней проницаемости ( $m^2$ ) вокруг трещины, образовавшейся в плотных песчаниках в результате гидроразрыва: а –  $Q = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $s = 0,2$ ; б –  $Q = 0,09 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $s = 0,2$

$$Q_z = \frac{2\pi kh}{\mu_z} \frac{P_k - P_c}{\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - l^2}}{l_{mp}} + \frac{\sqrt{\kappa(s) \cdot h}}{2l_{mp}} \cdot \ln \frac{\sqrt{\kappa(s)h + 4\sqrt{\kappa(s) \cdot \delta^2/h}}}{2r_c}}, \quad (8)$$

где  $Q_0$ ,  $Q_z$  – дебит скважины до и после гидроразрыва соответственно;

$R_k$ ,  $r_c$  – радиусы контура питания и скважины;

$r_w$  – эффективный радиус скважины;

$\mu_z$  – динамическая вязкость газа;

$\delta$  – эксцентриситет;

$a$ ,  $l$  – большая полуось и фокусное расстояние эллипса;

$P_k$ ,  $P_c$  – давление на контуре питания и в скважине.

Результаты расчетов по формулам (7) и (8) для горно-геологических условий метаноносного участка угленосной толщи Новомосковского месторождения ( $R_k = 200$  м;  $r_c = 0,2$  м;  $P_k = 2$  МПа;  $P_c = 10^5$  Па;  $\delta = 0,1$ ;  $\mu_z = 1,5 \cdot 10^{-5}$  Па·с) показаны на рисунке 7. Графики безразмерных дебитов скважин демонстрируют хорошую сходимость результатов расчетов при круговом и эллиптическом контуре питания в соответствующих условиях. Эффективность гидравлического разрыва ( $Q_z/Q_0$ ) в пределах залежи увеличивается с уменьшением начальной проницаемости пород и колеблется от 1,9 до 2,8 в зависимости от расхода жидкости, подаваемой в скважину при гидроразрыве.

**Выводы.** По результатам анализа геомеханических, емкостных и газодинамических свойств Новомосковского каменноугольного месторождения определен интервал углевлмещающей толщи, характеризующийся повышенной метаносностью при низкой проницаемости горных пород. Для увеличения фильтрационных свойств и газоотдачи выделенных коллекторов рассмотрен способ гидравлического разрыва, основанный на имеющемся в Украине промышленном опыте прорывов слабопроницаемых пород Западного Донбасса и адаптированный к отечественному буровому оборудованию. Обоснованная в работе методика оценки размеров, формы и фазовой проницаемости трещин, формирующихся в пласте при гидроразрыве, позволяет прогнозировать увеличение проницаемости углевлмещающих пород и темпов отбора газа на месторождении. Сравнение результатов вычислений по

различным эмпирическим зависимостям и формулам гидрогазодинамики показало приемлемую точность для решения практических задач.

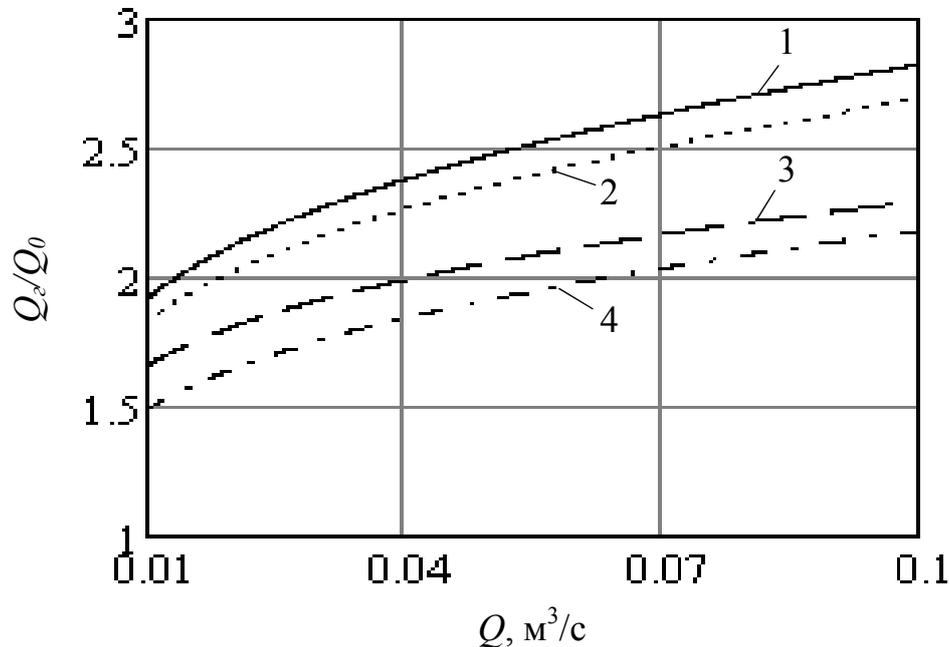


Рис. 7. Зависимость кратности увеличения дебита плотного коллектора от расхода жидкости, закачиваемой для его гидравлического разрыва: 1, 2 и 3, 4 – определенная по формулам (7) и (8) при начальной проницаемости углевмещающих пород  $10^{-14}$  и  $5 \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup> соответственно

На основе установленных закономерностей изменения конфигурации трещины гидроразрыва дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на разработке и верификации математической модели ее заполнения нетоксичными расклинивающимися материалами для экологически безопасного закрепления трещины или отдельных ее участков.

## СПИСОК ССЫЛОК

1. США увеличили прогноз запасов сланцевого газа в Украине [Электронный ресурс]: "STATUS QUO" – 2013. Режим доступа:

- [http://www.sq.com.ua/rus/news/mezhdunarodnye\\_novosti/13.06.2013/ssha\\_uvelichili\\_prognoz\\_zapasov\\_slancevogo\\_gaza\\_v\\_ukraine/](http://www.sq.com.ua/rus/news/mezhdunarodnye_novosti/13.06.2013/ssha_uvelichili_prognoz_zapasov_slancevogo_gaza_v_ukraine/). – Название с экрана.
2. Сланцевый газ [*Электронный ресурс*]: Википедия. Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/сланцевый\\_газ](http://ru.wikipedia.org/wiki/сланцевый_газ). – Название с экрана.
  3. Обобщение результатов изучения природной газоносности угольных пластов Западного Донбасса (Новомосковский район) [Отчет Новомосковской геологоразведочной экспедиции, книга 1] / А. С. Чигирин // Новомосковск — 1974. — 162 с.
  4. Герасименко С. А. Математическое моделирование горизонтальной скважины с эллиптической трещиной гидроразрыва / С. А. Герасименко, А. В. Стрекалов, А. С. Самойлов // Нефтегазовое дело. — 2012. — № 4. — С. 346—351.
  5. Филонова В. Р. Моделирование гидравлического разрыва пласта в пористой среде: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: спец. 01.02.05 "Механика жидкости, газа и плазмы"/ Филонова (Тагирова) Василина Рифовна; МГУ имени М. В. Ломоносова. — Москва, 2008. — 24 с. : ил., табл. — Библиография. : С. 22—23.
  6. Wilsey L. E. Reservoir fracturing – a method of oil recovery from extremely low permeability formations / L. E. Wilsey, W. G. Bearden // J. of Petrol. Technology. — 1954. — № 8. — С. 346—351.
  7. Вольф А. А. Определение и обоснование зависимости геометрических характеристик трещины гидроразрыва от фильтрационно-емкостных свойств продуктивного пласта / А. А. Вольф, Д. В. Новоселов // Территория Нефтегаз [*Электронный ресурс*]. — 2012. — № 4. Режим доступа : <http://neftegas.info/territoriya-neftegaz/3235-opredelenie-i-obosnovanie-zavisimosti-geometricheskih-harakteristik-treschiny-gidrorazryva-ot-filtracionno-emkostnyh-svoystv-produktivnogo-plasta.html> — Название с экрана.
  8. Подземная гидромеханика: учебник для вузов / К. С. Басниев, Н. М. Дмитриев, Р. Д. Каневская, В. М. Максимов. — М.-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2005. — 496 с.