

УДК 622.276.66

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ПРОПАНТА В ИЗМЕНЯЮЩЕЙ КОНФИГУРАЦИЮ ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА

И. А. Садовенко, А. В. Инкин

Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет"
просп. К. Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49600, Украина. E-mail: inkin@ua.fm

На основе проведенной горно-геологической оценки запасов горючего газа в Украине установлено, что его большая часть сосредоточена в слабопроницаемых горных породах не пригодных для разработки традиционным способом. Для увеличения проницаемости и газоотдачи таких коллекторов обоснован метод гидравлического разрыва, базирующийся на отечественном опыте прорывов плотных пород на шахтных полях Западного Донбасса. Показана необходимость закрепления формирующихся трещин разрыва для предотвращения их смыкания вследствие воздействия горного давления и не экологичность применяемых на практике зарубежных пропантов и эмульсии. С целью решения этой проблемы разработана математическая модель, описывающая перенос нетоксичных расклинивающих материалов в изменяющей размеры вертикальной трещине гидравлического разрыва. По результатам расчетов установлена зависимость критической скорости поступающих в трещину частиц от их гранулометрического и плотностного состава, а также физико-химических свойств транспортирующей жидкости. Полученные результаты позволят осуществлять направленный перенос пропантов в необходимые области трещины, что обеспечит ее повышенную проницаемость и устойчивость.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта, трещина, пропант.

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕНОСУ ПРОПАНТА У ТРІЩИНІ ГІДРОРОЗРИВУ З УРАХУВАННЯМ ЗМІНИ ЇЇ КОНФІГУРАЦІЇ

І. О. Садовенко, О. В. Інкін

Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет"
просп. К. Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, 49600, Україна. E-mail: inkin@ua.fm

На основі проведеної гірничо-геологічної оцінки запасів горючого газу в Україні встановлено, що його велика частина зосереджена в слабопроникних гірських породах, що не придатні для розробки традиційним способом. Для збільшення проникності і газовіддачі таких колекторів обґрунтовано метод гідравлічного розриву, який базується на вітчизняному досвіді проривів щільних порід на шахтних полях Західного Донбасу. Показана необхідність закріплення тріщин розриву для відвертання їх зімкнення внаслідок дії гірського тиску і не екологічність вживаних на практиці зарубіжних пропантів і емульсії. З метою вирішення цієї проблеми розроблена математична модель перенесення нетоксичних розклинюючих матеріалів у вертикальній тріщині гідравлічного розриву з урахуванням зміни її розмірів. За результатами розрахунків встановлена залежність критичної швидкості частин в тріщині від їх гранулометричного і щільнісного складу, а також фізико-хімічних властивостей транспортуючої рідини. Отримані результати дозволять здійснювати спрямоване перенесення пропанту в необхідні області тріщини, що забезпечить її підвищену проникність і стійкість.

Ключові слова: гідравлічний розрив пласта, тріщина, пропант.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Согласно оценке ряда энергетических компаний Украина входит в тройку наиболее перспективных европейских стран по добыче горючего газа, сосредоточенного в низкопроницаемых горных породах (глинистые сланцы и плотные песчаники), запасы которого по данным Государственной службы геологии и недр составляют не менее 8 трлн м³ [1]. Мировой научно-практический опыт газодобычи показывает, что одним из эффективных методов интенсификации разработки таких коллекторов является проведение гидравлических разрывов на месторождениях. Формирующиеся под действием нагнетаемой под большим давлением жидкости высокопроводящие трещины активизируют дебиты скважин в 2–3 раза, а создание системы скважин с трещинами гидроразрыва позволяет вводить в разработку слабодренлируемые зоны и пропластки [2].

С целью удержания трещин после прекращения закачки в раскрытом состоянии вместе с жидкостью в образующуюся полость подается твёрдый материал (пропант), увеличение размера которого с одной стороны приводит к росту проницаемости трещины, с другой – к снижению ее прочностных характеристик. Использование крупного пропанта повышен-

ной плотности, способного одновременно обеспечить высокие фильтрационные свойства и предотвратить смыкание трещин на больших глубинах, характеризующихся значительными напряжениями сжатия (более 40 МПа), сопряжено с проблемами его переноса во взвешенном состоянии к концу трещины без преждевременного оседания при транспортировании. Для решения этого вопроса в США и ряде других стран используют различные синтетические пропанты, вязкие эмульсии и активаторы гелеобразования, которые, несмотря на свою высокую стоимость (66–1000 долларов за 1 м³ жидкости разрыва и 400–850 долларов за тонну пропанта) [3], отрицательно воздействуют на породный массив и водоносные горизонты [4]. Наряду с этим в Украине имеется промышленный опыт прорывов плотных углевмещающих пород Западного Донбасса, позволяющий производить экологически безопасное закрепление трещин путем использования естественных расклинивающих материалов (песок, древесная щепа и окатанная скорлупа ореха). Однако ввиду недостаточной изученности особенностей их передвижения и накопления применение данных веществ нередко приводит к смыканию отдельных участков трещин и уменьшению их газопроводности [5].

Таким образом, в зарубежных и отечественных моделях заполнения трещин гидроразрыва перемещение пропанта рассматривается как неуправляемый процесс, зависящий только от плотности фильтрующей жидкости и размера гранул. В то же время, перспективным является направленный перенос частиц в необходимые области трещины, который позволил бы обеспечить повышенную проводимость и устойчивость трещины путем рационального распределения пропанта по ее длине. Одним из инструментов такого переноса может стать закачка смеси расклинивающих агентов с различным расходом и фракционным составом. Изучение составляющих вектора скорости, действующего на нагнетаемые частицы, закономерностей их осаждения в трещинах гидроразрыва, а также изменение физико-механического состояния пропанта при взаимодействии с жидкостью позволит прогнозировать создание трещин заданных фильтрационных и упругих свойств.

В связи с этим целью данной работы является разработка математической модели течения частиц различного гранулометрического и плотностного состава в трещине гидроразрыва с учетом изменения ее конфигурации и физико-химических свойств транспортирующей жидкости.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В работе [6] была разработана модель, описывающая изменения формы и размеров вертикальной трещины, создаваемой под действием гидравлического давления, в зависимости от расхода закачиваемой жидкости. Согласно расчетам в горизонтальном сечении (xy) трещина развивается в виде двух идентичных крыльев и имеет эллиптическую форму, а в вертикальном сечении (xz) – прямоугольную. При этом ширина трещины намного меньше ее высоты, а высота меньше длины трещины: $w \ll h < l_{mp}$ (рис. 1).

На нагнетаемые в трещину гидроразрыва частицы действуют как вертикальная, так и горизонтальная составляющие векторов скорости. Горизонтальная составляющая, как правило, больше вертикальной, благодаря чему пропант перемещается вместе с жидкостью. Однако при снижении скорости гидро-смеси до некоторого (критического) значения, вначале крупные и плотные, а при дальнейшем уменьшении скорости и более легкие частицы, находившиеся во взвешенном состоянии, начнут постепенно оседать и накапливаться на стенке трещины. При этом если расход жидкости не увеличится, толщина слоя осевших частиц будет возрастать, а живое сечение трещины уменьшаться. В зависимости от количества подаваемой суспензии и размеров трещины это приведет либо к повышению скорости потока и переносу вновь поступаемых частиц на другие участки, либо к полной закупорке трещины гидроразрыва в этом месте. Таким образом, адекватное описание процесса заполнения трещины может быть достигнуто путем нахождения критических скоростей для перемещающихся частиц с учетом их размеров, плотности и площади сечения трещины.

Определение критической скорости пропанта, переносимого потоком жидкости, в произвольном

поперечном сечении вертикальной трещины производится путем решения уравнения гидротранспортирования [7]:

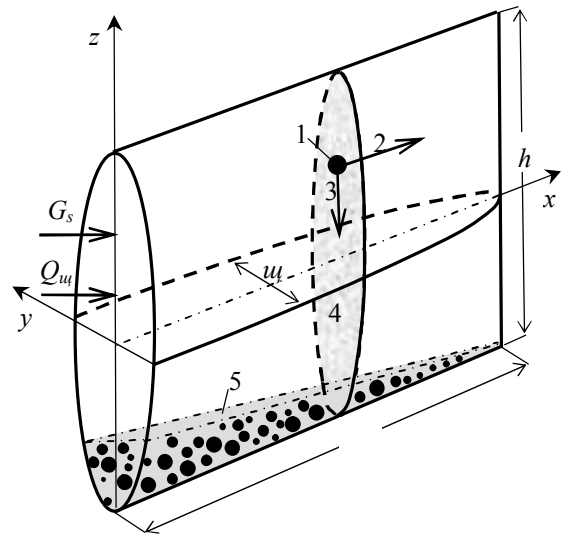


Рисунок 1 – Расчетная схема заполнения трещины гидроразрыва расклинивающими материалами: Q_w, G_s – расход жидкости и пропанта; 1 – переносимая потоком частица; 2, 3 – горизонтальная и вертикальная составляющие вектора ее скорости соответственно; 4 – произвольное поперечное сечение трещины в плоскости yz ; 5 – слой осевших частиц

$$\frac{\lambda_{kp} \bar{\rho}_{kp}}{(1 - C_p^{kp})^2} \lambda_{\omega}^{kp} \frac{(u_{\omega}^{kp})^2}{2g\sqrt{4F/\pi}} = (\bar{\rho}_s - 1)K_{kp} \quad (1)$$

Входящие в уравнение (1) параметры $\lambda_{kp}, \bar{\rho}_{kp}, K_{kp}$ определяются по следующим зависимостям

$$\lambda_{kp} = 1 + 0,52 (\lg Re_s)^{1,65} \operatorname{tg} (11,41 \Psi^{0,86}); \quad (2)$$

$$\bar{\rho}_{kp} = \frac{(1 - C_p^{kp})^3}{(1 - C_{kp}^{kp})^2} + \bar{\rho}_s C_p^{kp} \left(\frac{C_p^{kp}}{C_{kp}^{kp}} \right)^2; \quad (3)$$

$$K_{kp} = 2,166 \left(\frac{d}{\sqrt{4F/\pi}} \right)^{0,6} \operatorname{tg} (2,38 \Psi^{0,433}), \quad (4)$$

$$Re_s = \frac{\omega d}{\nu_{\omega}}; \quad \Psi_{kp} = \frac{G_s}{\rho_s Q_{\omega}^{kp}}; \quad Q_{\omega}^{kp} = F \cdot u_{\omega}^{kp};$$

$$F = \frac{\pi h \omega}{2}; \quad C_p^{kp} = \frac{\Psi_{kp}}{1 + \Psi_{kp}};$$

$$C_{kp} \left[1 - 0,45 f_p \left(1 - \frac{C_{kp}^{kp}}{C_{\max}^{kp}} \right)^{2,16} \left(\frac{u_{\omega}^{kp}}{u_{\omega}^{kp}} \right)^{1,66} \right] = C_p^{kp};$$

$$C_{\max}^{kp} = 0,3(2 - n);$$

$$f_p = 1 + \operatorname{sign} \left[\lg \left(\frac{Re_s}{7,586} \right) \right] \cdot \operatorname{tg} \left[0,967 \left| \lg \left(\frac{Re_s}{7,586} \right) \right|^{0,6} \right]$$

$$\bar{\rho}_s = \frac{\rho_s}{\rho_{\omega}}; \quad \lambda_{\omega}^{kp} = \frac{1}{(1,8 \lg Re_{\omega}^{kp} - b)^2}; \quad Re_{\omega}^{kp} = \frac{u_{\omega}^{kp} D}{\nu_{\omega}},$$

где λ_{kp} – отношение коэффициента гидравличе-

ского сопротивления при движении смеси к аналогичному коэффициенту при движении чистой жидкости; $\bar{\rho}_{кр}$ – безразмерная эффективная плотность смеси; Re_s – число Рейнольда, выраженное через гидравлическую крупность частицы $u_{ч}$ и ее средний диаметр d ; $\Psi_{кр}$ – относительная объемная расходная концентрация твердых частиц; $C_p^{кр}$ и $C_{кр}$ – средние по площади поперечного сечения трещины расходная и истинная объемные концентрации твердой фазы; $\bar{\rho}_s$ – безразмерная плотность частиц твердой фазы; ν_ω – кинематическая вязкость жидкости; G_s – массовый расход твердого материала; ρ_s, ρ_ω – соответственно плотность частиц и жидкости; $Q_\omega^{кр}$ – объемный расход жидкой фазы; F – площадь поперечного сечения трещины; $u_\omega^{кр}$ – средняя по расходу скорость движения жидкости; $u_{кр}$ – критическая скорость гидротранспортирования; C_{max} – предельно возможная объемная концентрация гидросмеси; b – параметр, характеризующий степень шероховатости внутренней поверхности трещины; n – доля частиц диаметром менее 0,1 мм в транспортируемом материале; λ_ω – коэффициент гидравлического сопротивления жидкости. Индекс $кр$ определяет значения величин в критическом режиме.

Численная модель, основанная на уравнениях (1)–(4), позволяет рассчитывать критическую скорость переносимых в трещине частиц с учетом влияния их гранулометрического и плотностного состава, а также площади сечения трещины, вязкости транспортирующей жидкости и концентрации суспензии. Получить соответствующее аналитическое решение такой задачи весьма затруднительно. Поэтому доказательство вычислительной корректности численной модели произведем для случая изменяющейся плотности частиц и жидкости [8]:

$$u_{кр} = \sqrt{2gd(\rho_s - 2\rho_\omega + \rho_n) / \rho_\omega}; \quad (5)$$

$$\rho_n = [n\rho_\omega + \rho_s(1 - m)] / [n + (1 - m)],$$

где ρ_n – плотность пульпы; n – удельный расход воды на транспортирование 1 м³ твердого материала; m – пористость частиц.

С помощью предложенной математической модели произведем расчет критической скорости суспензии, содержащей естественные расклинивающие материалы, которые с расходом 1 кг/с поступают в изменяющую сечение трещину гидроразрыва. Размеры трещины были приняты согласно выполненным в работе [6] вычислениям, а гидравлическая крупность материалов определялась в соответствии с методикой [8]. Физико-механические и гранулометрические свойства переносимых частиц приведены в табл. 1. Параметры жидкости разрыва принимались согласно рекомендациям [5].

Для заданных условий гидротранспортирования уравнения (1) и (4) решались относительно $u_\omega^{кр}$ чис-

ленными методами в программной среде Mathcad, после чего критическая скорость смеси определялась из выражения

$$u_{кр} = \frac{u_\omega^{кр}}{(1 - C_p^{кр})}. \quad (6)$$

Сопоставительные расчеты по формулам (5) и (6) были выполнены для частиц с $\rho_s = 1700$ кг/м³, $d = 10^{-4}$ – 10^{-3} м и представлены на рис. 2. Сравнение результатов показывает хорошую согласованность численной модели с аналитическим решением. Максимальные отклонения между профилями критической скорости, рассчитанными двумя методами, не превышают 0,25 м/с и характерны только для частиц с $d < 4 \cdot 10^{-4}$ м. Полученные отличия в результатах объясняются наличием параметров вязкости жидкости и диаметра частиц в уравнении (1), которые не учитываются в формуле (5), а также погрешностью численного решения.

Таблица 1 – Физико-механические и гранулометрические свойства естественных расклинивающих материалов, используемых для закрепления трещин гидроразрыва

Наименование материала	ρ_s , кг/м ³	m , д.ед.	d , м
Песок среднезернистый	1750–1950	0,3–0,5	0,0001–0,001
Древесная щепа	340–520	0,6–0,72	0,005–0,02
Окатанная скорлупа ореха	950–1025	0,25–0,4	0,01–0,04

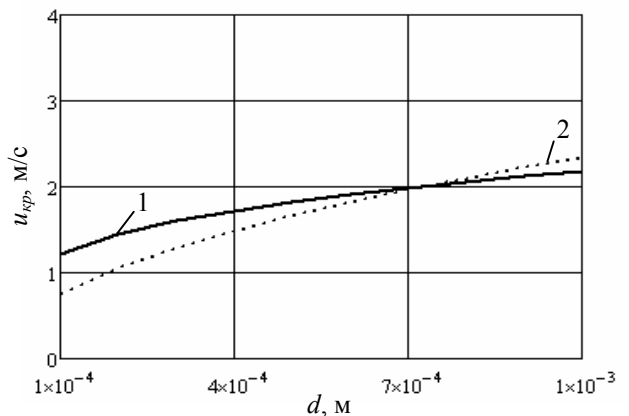


Рисунок 2 – Изменение критической скорости частиц, поступающих в трещину гидравлического разрыва в зависимости от их диаметра: 1, 2 – численные и аналитические решения соответственно

На рис. 3, 4 приведены трехмерные графики зависимости критической скорости переноса пропантов от их диаметра и плотности, а также физико-химических свойств транспортирующей жидкости. Анализ графиков показывает, что с увеличением размеров и плотности частиц их критическая ско-

рость возрастает, в то время как повышение вязкости и плотности жидкости наоборот приводит к ее уменьшению. Необходимо отметить, что влияние плотности и диаметра частиц на предельную скорость сказывается более заметно, нежели влияние физико-химических свойств жидкости.

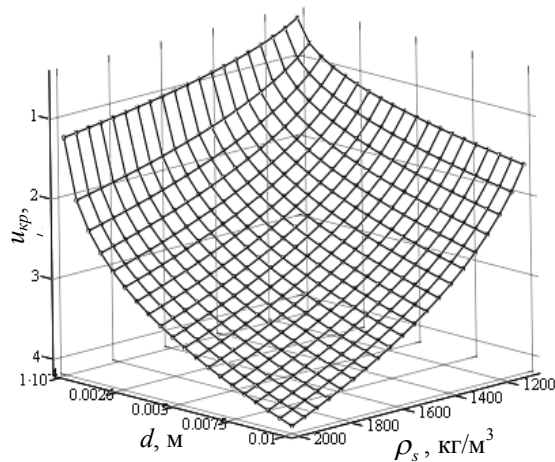


Рисунок 3 – Зависимость критической скорости движения частиц в вертикальной трещине гидроразрыва от их размера и плотности

Дальнейшее развитие данной работы целесообразно по пути определения зависимости проницаемости и устойчивости трещины от фракционного состава заполняющих ее частиц. Кроме того, необходима оценка изменения физико-механического состояния естественных расклинивающих материалов в результате взаимодействия с жидкостью разрыва и влияние этого процесса на геометрические параметры трещины.

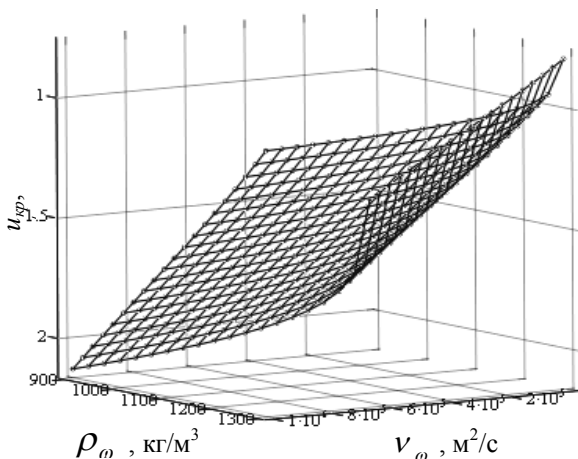


Рисунок 4 – Изменение критической скорости поступающих в трещину разрыва пропантов при различной вязкости и плотности транспортирующей их жидкости

ВЫВОДЫ. Разработанная численная модель передвижения пропантов в изменяющей геометрию трещине гидроразрыва позволяет определять критическую скорость транспортируемых частиц с учетом влияния их размеров и плотности, а также физико-химических свойств подающейся жидкости.

Использованные при тестировании модели механические и гранулометрические свойства частиц характерны для нетоксичных расклинивающих материалов, позволяющих экологически безопасно закреплять трещины гидроразрыва, предназначенные для активизации дебита скважин из низкопроницаемых коллекторов.

Сравнение результатов численного моделирования с соответствующим аналитическим решением показало точность, приемлемую для решения практических задач.

Полученные результаты позволят осуществлять направленный перенос пропантов в необходимые области трещины путем регулирования расхода подающейся жидкости и размера частиц, что обеспечит создание трещин заданных фильтрационных и прочностных свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добыча сланцевого газа в Украине [Электронный ресурс]: Форум экологических и общественных вопросов. – 2012. – Режим доступа: <http://www.ecology.mybb.od.ua/viewtopic.php>. – Название с экрана.
2. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья / Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 467 с.
3. Гидравлический разрыв пласта [Электронный ресурс]: OILLOOT.RU. – 2011. – Режим доступа: <http://www.oilloom.ru/component/content/article/77-geologiya-geofizika-razrabotka-neftnyanykh-i-gazovykh-mestorozhdenij.grp>. – Название с экрана.
4. Source of Geothermal Energy – Examples from the Rhenish Massif / G. Wieber, S. Pohl // Mine Water: In: Technical University of Ostrava Faculty of Mining and Geology, In: Proceedings of the 10th IMWA Congress –2008. – in Karlovy Vary, Check Republic. – PP. 113–116.
5. Усачев П.А. Гидравлический разрыв пласта. – М.: Недра, 1986. – 165 с.
6. Активизация темпов отбора газа плотных коллекторов на основе отечественного опыта гидроразрыва горных пород / И.А. Садовенко, А.В. Инкин // Наукові праці УКРНДМІ НАН України. – Донецьк, 2013. – Вип. 13, част. 1. – С. 346–360.
7. Аренс В.Ж. Физико-химическая геотехнология. – М.: Изд-во Московского государственного горного ун-та, 2001. – 656 с.
8. Xiuyu, L.N. and You-Kuan, Z.M. (2012), "Analytical Solution for Drainage and Recession from an Unconfined Aquifer", *Journal GROUND WATER*, Vol. 50, no. 5, pp. 793–798.

MODELING OF PROPPING AGENT TRANSPORT IN A CRACK CHANGING THE FORM DUE TO HYDRAULIC FRACTURING

I. Sadovenko, O. Inkin

State higher educational establishment "National Mining University"

prosp. Karl Marks 19, Dnipropetrovsk, 49600, Ukraine. E-mail: inkin@ua.fm

On the basis of the conducted mining-and-geological estimation of the combustible gas resources in Ukraine, it is found that the greater part of it is concentrated in low permeability rocks that could not be developed traditionally. To increase the permeability and gas recovery of such collectors, applying of the hydraulic break method is reasonable, as it is based on home experience of breaches of dense rocks at the mine fields of Western Donbas. It is shown the necessity to fix the cracks formed in order to prevent their healing because of the mountain pressure as well as environmental unfriendliness of foreign proppants and emulsions used in practice. To solve this problem a mathematical model was developed that describes transportation of non-toxic proppants in a vertical hydraulic fracture crack of varied size. As a result of calculations, it was established the dependencies of critical velocity of particles entering the crack on its grain-size and density distributions as well as physical and chemical properties of the flowing fluid. The results gained allow for directed transportation of proppants to specific zones of the crack, which provides its higher permeability and stability.

Key words: hydraulic fracturing, crack, proppant.

REFERENCES

1. "A booty of slate gas is in Ukraine", (2012), Forum of ecological and public questions, [Electronic resource] available at: <http://ecology.mybb.od.ua/viewtopic.php>.

2. Kashnikov, Y.A. and Ashixmin, S.G. (2007), *Mekhanika gornih porod pri razrabotke mestorozhdeniy uglevodorodnogo syrya* [Mechanics of mountain breeds at working mine of hydrocarbon raw material], Nedra-Biznescentr, Moscow, Russia.

3. "Hydraulic break of layer", (2011), OILLOOT.RU, [Electronic resource] available at: <http://oilloom.ru/component/content/article/77-geologiya-geofizik-razrabotka-neftyanykh-i-gazovykh-mestorozhdenij.grp>.

4. Wieber, G.A., Pohl, S. (2008), "Source of Geothermal Energy – Examples from the Rhenish Massif", *Mine Water, Proceedings of the 10th IMWA Congress*,

Technical University of Ostrava Faculty of Mining and Geology, Karlovy Vary, Check Republic, pp. 113–116.

5. Ysachev, P.A. (1986), *Gidravlicheskiy razriv plasty*, [Hydraulic break of layer], Nedra, Moscow, Russia.

6. Sadovenko, I. A., Inkin, A.V. (2013), "Activation of rates of gas of dense collectors extraction on the basis of home experience of hydraulic break of mountain breeds", *Transactions of UkrNDMI NAN Ukraine*, vol. 13, part 1, pp. 346–360.

7. Arens, V.Zh. (2001), *Fiziko-himicheskaya geotekhnologiya*, [Physical and chemical geotechnology], Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, Moscow, Russia.

8. Xiuyu, L.N. and You-Kuan, Z.M. (2012), "Analytical Solution for Drainage and Recession from an Unconfined Aquifer", *Journal GROUND WATER*, vol. 50, no. 5, pp. 793–798.

Стаття надійшла 03.02.2014.