

ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРФОРАЦІЇ СВЕРДЛОВИН: ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ

Грицуляк Г. М., Качала С. В., Шиманський В. Я.,
Фомічова О. В., Калин Т. І.

Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

У статті розглянуто екологічні та технологічні аспекти підвищення ефективності перфорації нафтових і газових свердловин. Проведено порівняльний аналіз традиційної кумулятивної перфорації, кумулятивної перфорації з низькоенергетичними вибуховими речовинами та гідроабразивної перфорації з позицій їх впливу на фільтраційні властивості привибійної зони пласта і рівень техногенного навантаження на довкілля. Експериментальні дослідження виконано на зразках керну пісковика в умовах, наближених до пластових, із визначенням зміни проникності та значень skin-фактора. Оцінено склад продуктів перфорації та вміст потенційно небезпечних компонентів у промивних рідинах і газовій фазі. Встановлено, що традиційна кумулятивна

перфорація спричиняє найбільше пошкодження колекторських порід і характеризується підвищеним екологічним ризиком. Застосування низькоенергетичних вибухових речовин дає змогу частково зменшити негативний вплив, проте не усуває його повністю. Найменше зниження проникності та мінімальні значення skin-фактора зафіксовано при гідроабразивній перфорації, що свідчить про її технологічну доцільність і екологічну безпечність. Обґрунтовано перспективність впровадження безвибухових і малоенергетичних методів перфорації як складової екологічно орієнтованого нафтогазовидобутку

Ключові слова: перфорація свердловин, екологічна безпека, техногенне навантаження, нафтогазовидобування, екологічні аспекти.

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF WELL PERFORATION: ENVIRONMENTAL ASPECTS

Hrytsulyak G. M., Kachala S. V., Shymanskyi V. Y.,
Fomichova O. V., Kalyn T. I.
Ivano-Frankivsk National Technical
University of Oil and Gas

The article considers ecological and technological aspects of increasing the efficiency of perforation of oil and gas wells. A comparative analysis of traditional cumulative perforation, cumulative perforation with low-energy explosives and hydroabrasive perforation was carried out in terms of their influence on the filtration properties of the near-hole zone of the formation and the level of man-made load on the environment. Experimental studies were performed on sandstone core samples in conditions close to reservoir conditions, with determination of changes in permeability and skin factor values. The composition of the perforation products and the content of potentially dangerous components in the washing fluids and the gas phase were evaluated. It has been established that traditional cumulative perforation causes the greatest damage to reservoir rocks and is characterized by increased environmental risk. The use of low-energy explosives makes it possible to partially reduce the negative impact, but does not completely eliminate it. The smallest decrease in permeability and the minimum values of the skin factor were recorded with hydroabrasive perforation, which indicates its technological expediency and environmental safety. The perspective of introducing explosion-free and low-energy perforation methods as a component of ecologically oriented oil and gas production is substantiated.

Keywords: well perforation, environmental safety, man-made load, oil and gas production, environmental aspects.

Постановка проблеми

Підвищення ефективності розкриття продуктивних пластів є однією з ключових умов

інтенсифікації видобутку вуглеводнів. Традиційні методи кумулятивної перфорації, широко застосовувані на нафтових і газових свердловинах, часто супроводжуються суттєвим пошкодженням привибійної зони пласта, зниженням його фільтраційних властивостей та утворенням продуктів вибуху, що можуть містити токсичні й екологічно небезпечні компоненти. Це призводить не лише до зменшення дебіту свердловин, а й до зростання техногенного навантаження на геологічне середовище та ризиків вторинного забруднення підземних вод. У зв'язку з посиленням вимог до екологічної безпеки видобувних технологій актуалізується потреба у впровадженні альтернативних способів перфорації, зокрема малоенергетичних і безвибухових, які забезпечували б ефективне розкриття пласта за мінімального негативного впливу на його структуру та довкілля. Проте на сьогодні відсутня достатньо обґрунтована порівняльна оцінка традиційних і альтернативних методів перфорації з позицій одночасно технологічної ефективності та екологічної безпеки, що й зумовлює необхідність проведення відповідних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється проблемі ефективного та екологічно безпечного розкриття продуктивних пластів нафтових і газових свердловин. Традиційна кумулятивна перфорація залишається найбільш поширеним методом, проте численні публікації вказують на її суттєві недоліки, пов'язані з пошкодженням привибійної зони пласта.

Унаслідок дії високих температур і тисків формується зона дроблення породи (*crushed zone*), що супроводжується зниженням пористості та проникності, а також зростанням гідродинамічного опору фільтрації. Це проявляється у збільшенні *skin*-фактора та зменшенні дебіту свердловини [1, 4, 6].

Ряд авторів доводять, що геометрія перфораційних каналів (довжина, діаметр, орієнтація) суттєво впливає на фільтраційні характеристики системи «свердловина – пласт». У сучасних роботах широко застосовуються чисельні методи моделювання (CFD-моделювання, метод скінченних елементів) для оцінки розподілу напружень, характеру руйнування породи та розвитку зони пошкодження. Отримані результати підтверджують, що при традиційній вибуховій перфорації зона зниженої проникності може поширюватися на кілька сантиметрів від стінки каналу, що є критичним для низькопроникних колекторів [2, 7].

У зв'язку з цим у наукових публікаціях останніх років простежується тенденція до розвитку альтернативних, малоенергетичних та безвибухових методів перфорації. Зокрема, значну увагу приділено гідроабразивній та абразивно-струменевої перфорації, які базуються на дії високошвидкісного потоку рідини з твердими частинками. Перевагою таких методів є можливість формування щілинних або орієнтованих каналів заданої конфігурації без термічного ушкодження породи. Дослідження показують, що при цьому суттєво зменшується зона механічного ущільнення та зберігається природна структура порового простору пласта [3, 5].

Окремим напрямом досліджень є вдосконалення конструкцій перфораційних пристроїв і оптимізація режимів роботи гідроабразивних систем. У публікаціях розглядаються питання зношування сопел, стабільності подачі абразиву, впливу тиску та швидкості струменя на глибину проникнення в породу. Автори наголошують, що правильний вибір режимів перфорації дозволяє не лише підвищити продуктивність свердловини, а й знизити енерговитрати та кількість технологічних відходів.

Поряд із техніко-технологічними аспектами дедалі більшої актуальності набувають екологічні дослідження. У працях, присвячених аналізу наслідків застосування вибухових речовин у на-

фтовидобувній галузі, зазначається, що продукти детонації можуть містити токсичні сполуки та важкі метали, які потенційно потрапляють у промивальні рідини та пластові флюїди. Це створює ризик забруднення ґрунтів і підземних вод, особливо за умов порушення герметичності обсадних колон або неправильного поводження з відходами буріння [3, 6].

У сучасних дослідженнях також розглядаються питання утилізації та очищення технологічних рідин після перфорації, зокрема методи фізико-хімічного та біотехнологічного очищення від іонів металів і токсичних компонентів. Показано, що поєднання інженерних і природоохоронних підходів дозволяє суттєво знизити антропогенне навантаження на навколишнє середовище [9].

Таким чином, аналіз останніх наукових публікацій свідчить про перехід від суто технічного підходу до комплексного розгляду процесів перфорації, який поєднує підвищення нафтовилучення з мінімізацією екологічних ризиків. Актуальними залишаються дослідження, спрямовані на вдосконалення безвибухових методів розкриття пластів, зменшення зони пошкодження колектора та розробку екологічно безпечних технологій ведення перфораційних робіт.

Визначення цілей статті (постановка завдання)

Метою статті є порівняльна оцінка ефективності та екологічної безпеки різних методів перфорації свердловин (традиційної кумулятивної, кумулятивної з низькоенергетичними вибуховими речовинами та гідроабразивної) з позицій їх впливу на фільтраційні властивості привибійної зони пласта та рівень техногенного навантаження на довкілля. Для досягнення поставленої мети передбачено експериментально дослідити зміну проникності колекторських порід після застосування різних методів перфорації, визначити величину *skin*-фактора як показника ступеня пошкодження привибійної зони пласта, проаналізувати склад продуктів перфорації та оцінити вміст потенційно небезпечних компонентів у промивних рідинах і газовій фазі, а також здійснити порівняльний аналіз технологічної та екологічної ефективності досліджуваних методів і обґрунтувати доцільність використання альтер-

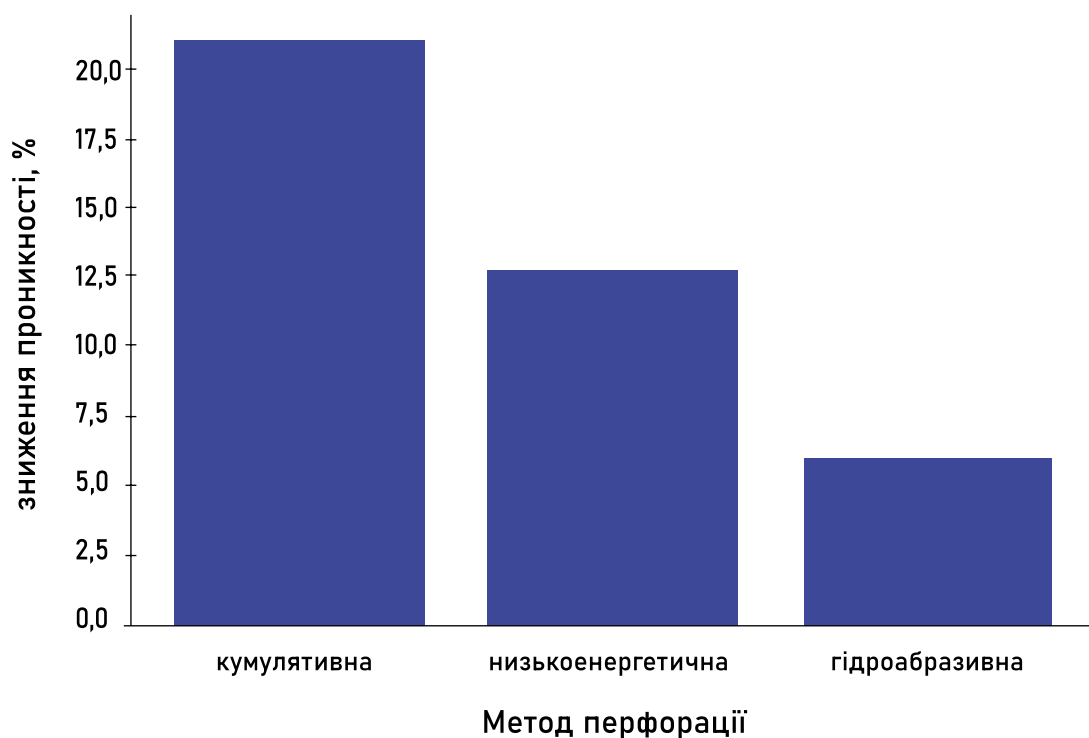


Рисунок 1. Порівняння ефективності різних методів перфорації свердловин

нативних безвибухових або малоенергетичних технологій перфорації свердловин.

Виклад основного матеріалу дослідження. Об'єктом дослідження є модельна вертикальна свердловина, пробурена у теригенних відкладах із середньою проникністю пласта 0,15–0,25 мкм². Для проведення експериментів використовувалися керни пісковика, відібрані з глибини 1800–2000 м, що відповідають умовам нафтового родовища.

Дослідження проводилися в лабораторних умовах із використанням стендової установки, що імітує пластові тиск (20–25 МПа) та температуру (60–80°C).

Для порівняння були застосовані три методи перфорації:

- традиційна кумулятивна перфорація;
- кумулятивна перфорація з низькоенергетичними вибуховими речовинами;
- гідроабразивна перфорація.

На кожному зразку керна формували по 4 перфораційні канали з однаковою глибиною проникнення (30–40 мм). Після перфорації проводили фільтраційні випробування для визначення коефіцієнта проникності та коефіцієнта пошкодження привибійної зони пласта.

Для оцінки екологічних параметрів здійсню-

вали: аналіз складу продуктів вибуху та абразивного матеріалу; визначення вмісту важких металів у промивній рідині методом атомно-абсорбційної спектроскопії; газохроматографічний аналіз складу газів після перфорації.

На рис.1 наведено порівняння ефективності різних методів перфорації свердловин за показником зниження проникності пласта. По осі абсцис відкладено методи перфорації – кумулятивний, низькоенергетичний та гідроабразивний, а по осі ординат – відсоток зниження проникності після проведення перфораційних робіт. Аналіз отриманих даних показує, що найбільше зниження проникності спостерігається при застосуванні кумулятивної перфорації і становить близько 21 %, що свідчить про істотне пошкодження привибійної зони пласта. Низькоенергетична перфорація характеризується помірним впливом на колекторські властивості порід – зниження проникності складає приблизно 12–13%. Найменший негативний ефект зафіксовано при використанні гідроабразивної перфорації, для якої зниження проникності не перевищує 6 %. Таким чином, гідроабразивний метод є найбільш доцільним з точки зору збереження фільтраційних властивостей пласта та підвищення ефективності експлуатації свердловин, тоді як

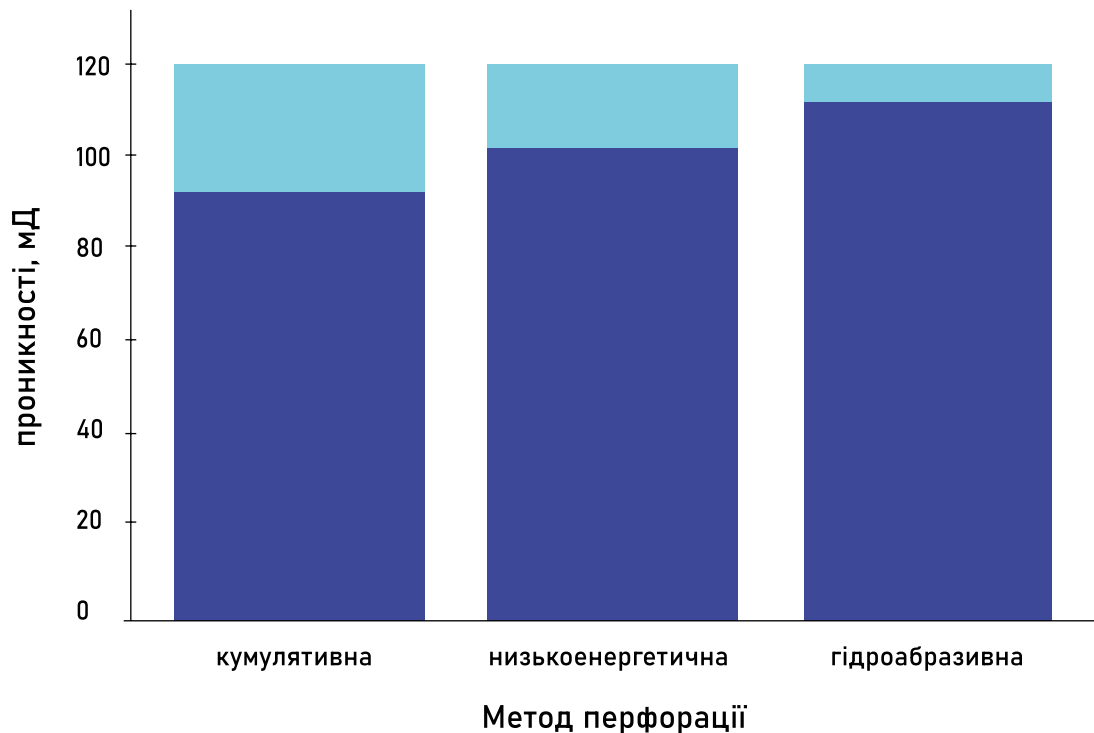


Рисунок 2. Порівняння початкової та післяперфораційної проникності пласта

традиційна кумулятивна перфорація характеризується найвищим рівнем техногенного впливу на привибійну зону.

На рис. 2 відображено порівняння початкової та післяперфораційної проникності пласта для різних методів перфорації свердловин. По осі абсцис наведено методи перфорації – кумулятивний, низькоенергетичний та гідроабразивний, а по осі ординат – значення проникності в мілідарсі (мД). Аналіз результатів показує, що для всіх досліджуваних методів початкова проникність пласта становить однакову величину, тоді як після виконання перфорації спостерігається її зменшення, ступінь якого залежить від застосованої технології. Найбільше зниження проникності зафіксовано при кумулятивній перфорації, що свідчить про суттєве пошкодження привибійної зони пласта. Для низькоенергетичної перфорації зменшення проникності є менш вираженим, що вказує на більш щадний вплив на структуру порового простору порід. Найменша різниця між початковою та післяперфораційною проникністю спостерігається при гідроабразивній перфорації, що підтверджує її переваги з точки зору збереження фільтраційних властивостей пласта. Отримані результати свідчать про доцільність

використання безвибухових або малоенергетичних методів перфорації з метою підвищення ефективності розкриття продуктивного горизонту та зменшення техногенного впливу на колекторські породи.

На рис. 3 представлено залежність значення skin-фактора від методу перфорації свердловини. По осі абсцис відкладено методи перфорації – кумулятивний, низькоенергетичний та гідроабразивний, а по осі ординат – величину skin-фактора, який характеризує додатковий гідродинамічний опір у привибійній зоні пласта. Аналіз графіка показує, що найбільше значення skin-фактора спостерігається при застосуванні кумулятивної перфорації, що свідчить про істотне пошкодження привибійної зони та погіршення фільтраційних властивостей пласта. Для низькоенергетичної перфорації значення skin-фактора є меншим, що вказує на зниження ступеня техногенного впливу на пласт порівняно з традиційним кумулятивним методом. Найменше значення skin-фактора зафіксовано при використанні гідроабразивної перфорації, що підтверджує її переваги як найбільш щадного способу розкриття продуктивного горизонту. Отримані результати свідчать про доцільність впровадження

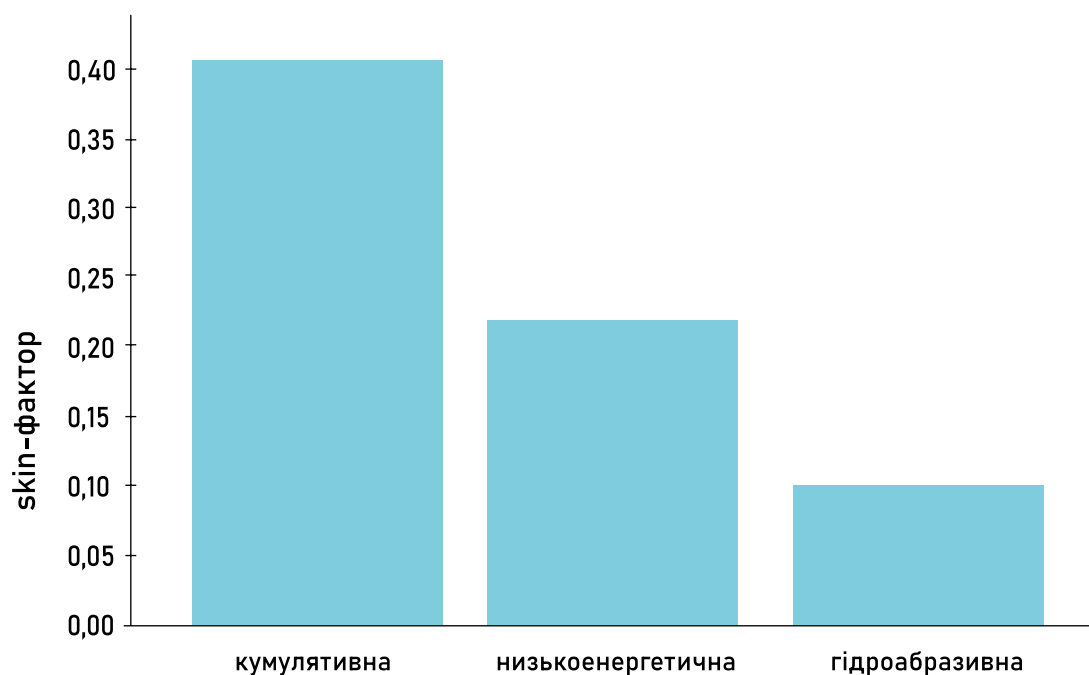


Рисунок 3. Залежність значення *skin-фактора* від методу перфорації

альтернативних безвибухових технологій перфорації з метою зменшення гідродинамічного опору, збереження колекторських властивостей порід та підвищення ефективності експлуатації свердловин.

Отримані результати свідчать про доцільність застосування альтернативних методів перфорації з метою підвищення як технологічної, так і екологічної ефективності розкриття пласта. Зменшення обсягів вторинного забруднення та збереження фільтраційних властивостей порід сприяє підвищенню дебіту свердловин і зниженню ризиків негативного впливу на підземні водоносні горизонти.

Особливо перспективною є гідроабразивна перфорація, яка дозволяє уникнути застосування вибухових речовин і зменшити утворення токсичних продуктів, що відповідає принципам екологічно орієнтованого видобутку вуглеводнів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті проведених досліджень встановлено, що вибір методу перфорації суттєво впливає як на фільтраційні властивості привибійної зони пласта, так і на рівень техногенного навантаження на довкілля. Традиційна кумулятивна перфорація характеризується найбільшим ступенем пошкодження колекторських порід, що проявляється у значному зниженні проникності

та зростанні *skin-фактора*, а також утворенні продуктів вибуху, потенційно небезпечних для геологічного середовища. Застосування низькоенергетичних вибухових речовин дає змогу зменшити негативний вплив на структуру пласта та знизити інтенсивність вторинного забруднення, проте не усуває повністю екологічні ризики, пов'язані з використанням вибухових технологій.

Найбільш екологічно доцільним та технологічно ефективним виявився гідроабразивний метод перфорації, який забезпечує мінімальне погіршення проникності пласта, найменші значення *skin-фактора* та відсутність токсичних продуктів вибуху. Це дозволяє розглядати його як перспективний напрям удосконалення технологій розкриття продуктивних горизонтів у контексті концепції екологічно орієнтованого видобутку вуглеводнів.

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з розширенням експериментальної бази шляхом випробування різних типів колекторських порід і варіації термобаричних умов, наближених до реальних пластових. Особливої уваги потребує вивчення довготривалого впливу альтернативних методів перфорації на стабільність фільтраційних властивостей пласта в процесі експлуатації свердловин, а також оцінка міграції продуктів перфорації у водоносні горизонти.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розроблення комплексних критеріїв вибору технології перфорації з урахуванням одночасно техніко-економічних та екологічних показників, що сприятиме підвищенню ефективності та безпечності нафтогазовидобутку

Список використаної літератури

1. Качмар Ю. Д., Світлицький В. М., Синюк Б. Б., Яремійчук Р. С. Інтенсифікація припливу вуглеводів у свердловину: Наукове видання. Кн.І. Львів: Центр Європи. 2004. 352 с.
2. Качмар Ю. Д., Світлицький В. М., Синюк Б. Б., Яремійчук Р. С. Інтенсифікація припливу вуглеводів у свердловину. Наукове видання. Кн.ІІ. Львів: Центр Європи, 2005. 414 с.
3. Качмар Д. Ю., Бурмич Ф. М., Андрусак А. М., Цьомко В. В. Аналіз застосування потужних гідророзривів у глибоких свердловинах України. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2002. №1. С. 17-21.
4. Качмар Ю. Д., Меркурев А. Б., Бурмич Ф. М., Савка В. М. Застосування потужних гідравлічних розривів пласта на родовищах України. Нафтова та газова промисловість. 1999. №4. С. 28-31.
5. Nolte K. G., Smith M. B. Interpretation of Fracturing Pressures. SPE 8297, J. Petr. Tech. September 1981. Vol. 33. 1767-1775.
6. Economides. M. J., Nolte K. G. Reservoir Stimulation. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, March 1989. 430 p.
7. Качмар Ю. Д., Цьомко В. В. Методика комплексного проектування гідророзриву пласта. Нафтова та газова промисловість. 2005. № 4. С. 12-15.
8. Спосіб гідроструминної перфорації свердловин: пат. на корисну модель № 150245, Україна. / Погребняк В. Г., Перкун І. В., Погребняк А. В., Шиманський В. Я. // опубл. 19.01.2022.
9. Водополімерний спосіб різання заморожених харчових продуктів та матеріалів: пат. на корисну модель №74609, Україна./ Погребняк А. В., Наумчук М.В.// опубл. 12.11.2012 р.