

## Збільшення продуктивності водозабору у водовмісних кристалічних породах унаслідок штучного збільшення їх тріщинуватості

*В. М. Шестопапов, А. І. Петренко, І. М. Романюк, 2021*

Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна  
Надійшла 5 липня 2021 р.

Зміни клімату, які спостерігається у світі, зокрема в Україні, в останні десятиліття можуть призвести до зменшення кількості поверхневих і підземних вод. Викликає занепокоєння високий рівень забруднення останніх та політика їх очищення. Питання пошуку додаткових та альтернативних джерел питної води на сьогодні є вкрай актуальним. Значний обсяг польових пошуково-розвідувальних робіт минулого століття був спрямований на виявлення родовищ підземних вод у тріщинуватих кристалічних породах Українського щита. Як правило, продуктивність свердловин згаданих родовищ характеризувалась невисоким дебітом, і нині більшість водоносних горизонтів, які експлуатуються, належать до осадових відкладів. Незначна продуктивність свердловин у водовмісних тріщинуватих породах передусім пов'язана із невідомою тріщинуватістю кристалічного масиву: непросто визначити шляхи припливу підземних вод до системи тріщин і, відповідно, складно обґрунтувати експлуатаційні запаси підземних вод. У статті із застосуванням геофільтраційної моделі Жашківського родовища підземних вод розглянуто збільшення продуктивності водозабору у водовмісних кристалічних породах у результаті посилення їх тріщинуватості штучним способом. Такий спосіб у гідрогеології відомий як спроба збільшення проникності навколосвердловинного простору, але як один із методів штучного поповнення запасів підземних вод водовмісних кристалічних порід використовується вкрай рідко. Досліджено типові умови водозаборів у кристалічних тріщинуватих водовмісних породах, які можуть бути рекомендовані для збільшення продуктивності способом вибуху. Штучне збільшення тріщинуватості за допомогою вибухових робіт може істотно підвищити продуктивність водозабору. Наведено основні методи використання вибухових речовин як приклад штучного збільшення тріщинуватості порід для вирішення гідрогеологічних завдань і виявлення механізмів тріщиноутворення під час дії вибуху.

**Ключові слова:** підземні води, багатководність, моделювання, тріщинуваті кристалічні породи, свердловини, вибухові роботи.

**Вступ.** *Актуальність.* Господарська діяльність багатьох поколінь людей нагромадила досвід, згідно з яким для забезпечення водою, питною чи для технічних потреб, має бути декілька джерел постачання, навіть якщо одне з них тривалий час задовольняє потребу в ній. Приводом для цього є життєвий досвід щодо раптового зменшення можливостей або повної втрати єдиного джерела забезпечення потреб у воді через несприятливі природні явища або техногенні катастрофи. В Україні є чи-

мало населених пунктів, для яких згадане правило наявності декількох джерел водопостачання не витримується. На сьогодні основними джерелами питної води і води для технічних потреб є підземні води осадових відкладів, поверхневі води з річок та водосховищ. Через зростання забруднення останніх та у контексті змін клімату в бік глобального потепління, а отже, зменшення водності річок питання пошуку додаткових джерел питної води — підземних вод тріщинуватих кристалічних відкладів,

є вкрай своєчасним. Про це наголошено і в щорічнику Державного науково-виробничого підприємства «Державний інформаційний геологічний фонд України» за 2019 р.: «Практичне значення для вирішення питань господарсько-питного водопостачання на теперішній час і у перспективі мають тріщинні води кристалічних порід...» [Стан..., 2019].

*Об'єкт досліджень* — продуктивність водозабору у тріщинуватих кристалічних породах на геофільтраційній моделі Жашківського родовища, тестові моделі тріщинуватості.

*Мета досліджень* — вивчення можливостей збільшення продуктивності водозабору за рахунок підземних вод, приурочених до кристалічних порід, у контексті штучних змін гідрогеологічних параметрів і використання залучених ресурсів.

*Методи досліджень* — аналіз матеріалів про особливості руху підземних вод у тріщинуватих кристалічних породах, математичне моделювання поведінки підземних вод на підставі пакета програм MODFLOW, реалізованого в сервісній оболонці PMWin, аналіз конкретних геолого-геофізичних, гідрогеологічних, гідрологічних, геоморфологічних умов у районі розміщення Жашківського родовища.

*Постановка задачі.* Підземні води тріщинуватої зони кристалічних порід майже на всій території Українського щита (УЩ) використовують для водопостачання ще з середини минулого століття, незважаючи на те, що окремі комплекси порід не характеризуються високою багатководністю [Шестопалов та ін., 1989]. Роботи з пошуків питних підземних вод у згаданому середовищі продовжуються і в останні десятиліття та здебільшого мають прикладний характер, що позначається на розумінні питання підходу до експлуатації тріщинних вод у цілому [Терешков, 1977; Никиташ, Литвак, 1983; Василенко та ін., 2016]. Крім того, складність гідрогеологічних умов у масивах тріщинуватих порід і недостатня розробленість методів розрахунку продуктивності водозаборів (аналітичні методи, дослідно-експлуатаційні відкачки та ін.) в

означених умовах не дають змоги вважати жоден із застосованих нині методів чи їх комплекс достатньою мірою прийнятним для вирішення практичних завдань.

Якщо діючий водозабір не забезпечується природними джерелами формування експлуатаційних запасів, то використовують штучне поповнення запасів підземних вод (ШПЗПВ). В умовах кристалічних тріщинуватих порід розширення водозабору на флангах (одного із способів збільшення запасів підземних вод) може бути неефективним, оскільки часто водоносні зони в тріщинуватих породах обмежені за площею поширення. По суті проблема підвищення водопостачання за рахунок підземних вод, що містяться у кристалічних тріщинуватих породах, зводиться до технічної можливості вилучення (водозабору) природних і залучених ресурсів з дотриманням умов допустимого ступеня впливу на навколишнє середовище. Таким чином, за умови, що є водозабір, а також обґрунтовано наявність ресурсів поверхневих вод, за допомогою яких можна створити джерело поповнення експлуатаційних запасів підземних вод, потрібно знайти або створити фільтраційні шляхи для надходження залучених ресурсів у горизонт. Разом з тим, якщо тріщинуваті кристалічні породи перекриті водоносними осадовими відкладами, які підстилаються достатньо слабопроникною зоною вивітрювання, проникність останньої може бути штучно збільшена. Створення штучної зони підвищеної тріщинуватості у породах можливе, наприклад, за рахунок гідравлічного розриву пласта, а також у разі використання вибухових речовин (ВР) як таких чи із застосуванням альтернативних способів. Використання ВР є найпоширенішим способом, тому у статті йому приділено більше уваги.

**Основна частина.** Головному дослідженню статті — розгляду збільшення продуктивності водозабору на геофільтраційній моделі внаслідок зміни деяких гідрогеологічних параметрів шарів водовмісних кристалічних порід та зони їх вивітрювання — передують аналіз літературних даних

щодо утворення тріщин у кристалічних породах способом вибуху.

*Використання вибухових речовин у гідрогеології.* Процес руйнування гірських порід вибухом має дуже складний характер і детально розглянутий в спеціальній літературі з вибухової справи [Кравець та ін., 2015; Соколов та ін., 2017; Коробійчук, 2018; Коробійчук та ін., 2019]. У гідрогеології найчастіше вибухові роботи у свердловинах проводять з метою збільшення проникності фільтрів і прифільтрових зон: руйнування глинистої кірки (кольматанту). При бурінні та експлуатації водо-збірної свердловини отвори фільтра і порода стовбура свердловини покриваються осадом — твердою речовиною, що виникає за сприятливих умов із сполук заліза. Так, за даними Н. Ф. Шапкина [Шапкин, 1952], твердість накипу-осаду на 20—30 % більша за твердість мармуру. Осад проникає на невелику глибину в тріщини та пори породи. Тому для створення штучної тріщинуватості та відновлення продуктивності свердловин на воду використовують *імпульсні методи* [Нагорний, 2011]. До них належать способи передачі закольматованим фільтру і прифільтровій зоні енергії, яка витрачається на руйнування сполук, що кольматують, у вигляді імпульсу тиску різної тривалості. Енергію можуть передавати як поодинокі імпульси, так і серія послідовних імпульсів.

На глибинах, характерних для водо-збірних свердловин, ефект дії вибуху не лише пов'язаний з очищенням поверхні породи (зокрема, тріщин від забруднень), а й виявляється у вигляді виникнення навколо стовбура мережі тріщин для збільшення припливу рідини у свердловину. Зазначений характер збурень найбільш властивий методам регенерації свердловин; це метод вибуху малих зарядів ВР, метод електрогідралічного удару (ЕГУ), дія пневмовибухом (ПВ) та імплузія [Нагорний, 2011]. На відміну від вибухового методу за методом ЕГУ як джерело енергії використовують не заряд, а потужні електричні розряди, що послідовно діють по всій довжині фільтра. В разі пневмовибуху в свердловинах ство-

рюються хвилі стискання шляхом перетворення енергії стисненого повітря при його швидкому розширенні.

Сталою практикою дії на пласт, якщо він складений твердими породами, а свердловина виявилася низькодебітною, є *торпедування*. Як заряд торпед застосовують детонувальний шнур. На багатьох свердловинах, де треба провести досить глибоке очищення поверхні породи, зокрема і тріщин, використання торпед буде економічно менш доцільним, ніж застосування довгих шнурових зарядів, що містять на 1 м довжини 0,1—1,0 кг ВР [Коробійчук та ін., 2019; Михалюк, 1986]. Прикладом промислової реалізації заряду, що складається з двох частин, є торпедування водо-збірних свердловин у с. Горенка Київської обл. [Михалюк, 1986]. Роботи проводили на трьох свердловинах, що пересікали пухкі породи (піски, суглинки) загальною товщиною 98—112 м і були заглиблені в корінні породи (граніти) на 9—21 м. Загальна глибина свердловин — 131 м. У результаті торпедування дебіт свердловин збільшився у 10,1—12,7 рази порівняно із зростанням в 5,6 рази при використанні одного заряду.

В Інституті геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України А. В. Михалюк розробив принципово нову технологію інтенсифікації видобутку рідких та газоподібних копалин [Михалюк та ін., 1997]. Фізичною основою технології є здатність гірських порід до *дилатансійного розуцільнення* під впливом об'ємних просторових навантажень високої нерівномірності, що спричиняє інтенсивне збільшення пористості (а відповідно, і фільтраційної проникності) порід. Спеціальними дослідженнями було встановлено, що внаслідок дилатансійного розуцільнення фільтраційна проникність порід-колекторів нафти і газу може збільшитись у декілька (в окремих випадках — у десятки) разів. Важливо лише встановити оптимальні умови розвитку дилатансії, які для кожного типу порід визначаються окремо. Дослідно-промислові випробування технології на видобувних свердловинах показали, що в результаті дилатансійного розуцільнення колекторів дебіт нафтових

свердловин зростає в 1,9—4,5 рази за флюїдом і в 2,5—6 разів за видобутком нафти; дебіт газових свердловин збільшується у 8—20 разів; нагнітальних свердловин — у 5—9 разів; свердловин на воду — у 3—12 разів. При цьому стійкий ефект від застосування технології зберігається протягом багатьох років [Михалюк та ін., 1997; Нагорный и др., 2009].

Для збільшення тріщинуватості під час вирішення деяких гідрогеологічних завдань також використовують спосіб *гідрравлічного розриву пласта* [Дядін та ін., 2017; Качмар та ін., 2015]. Він полягає у закачуванні в свердловину під тиском в'язкої рідини, що містить пісок. Якщо виконується низка умов, то закачування рідини супроводжується розширенням наявних і створенням нових тріщин у породі. Грубою схематизацією є уподібнення механізму розриву дії клину, що вганяється в дерево, причому роль клину відіграє рідина, що розпирає породу в якійсь початковій тріщині або перфораційному отворі. Ділянку стовбура обмежують пакерами з тим, щоб у процесі закачування якомога вище підняти тиск у рідині, що знаходиться в цій ділянці, із збереженням його протягом деякого часу, незважаючи на просування частини рідини в тріщини, що розширилися, і відхід її внаслідок фільтрації в породу. Закріплення тріщин досягається тим, що в них із рідиною вноситься пісок. Навіть у районах, де достатньо техніки — в основному цементувальних агрегатів, подібні роботи є трудомісткими і дорогими. В умовах водозабірних свердловин через відсутність необхідного устаткування, специфіку конструкції свердловин і високу вартість такий спосіб практично не застосовують.

Створення штучної тріщинуватості вибуховим способом найчастіше використовують для руйнування кольматанту довкола стовбурів свердловин, які пробурені в осадових відкладах. Тому в контексті питання збільшення продуктивності водозабору у водовмісних кристалічних породах у результаті збільшення їх тріщинуватості способом вибуху розуміння утворення

нової системи тріщинуватості (її протяжності, густоти та ширини тріщин) на фоні існуючих тріщин природного походження має важливе значення. Сучасні дослідження у сфері механіки руйнування показали, що використання критеріїв міцності, які обирають залежно від типу матеріалу та умов його руйнування, при розрахунках тіл на міцність недостатньо. Розв'язання проблеми крихкого і квазикрихкого руйнування може бути надійним лише якщо враховані в породі існуючі початкові тріщини [Морозов, 1977]. З огляду на критерії оцінювання крихкості руйнування при ударі та вибуху (запропоновані Г. П. Черепановим і А. С. Баланкіним) переважна більшість гірських порід руйнується як крихкі матеріали з утворенням дисипативних структур (ДС), зокрема, ДС у вигляді рівномірно розподілених мікротріщин в об'ємі гірської породи, крім вузького класу глинистих осадових порід та деяких сортів вугілля, де переважно створюється ДС у вигляді зони пластичної деформації [Войтенко та ін., 2017]. Формування ДС у формі локальних мікро- та макротріщин під дією вибуху та удару в монолітних породах має хвильову природу.

Для встановлення впливу тріщинуватості на об'єм скельних гірських порід за вибухового руйнування було досліджено найпоширеніші породи України [Фролов, Бритвин, 2015]. Вплив тріщинуватості досліджували зміною кількості тріщин на одиницю об'єму та початкової тріщинуватості гірського масиву. За характером зменшення об'єму руйнування залежно від збільшення відстані між тріщинами у згаданій статті скельні породи були поділені на три групи. Для першої групи порід (амфіболіт, сієніт, сланці) відбувається стрімка зміна об'єму. Зокрема, об'єм руйнування середньотріщинуватого гірського масиву порівняно з об'ємом монолітного масиву збільшується у 3,15 рази, а надзвичайно тріщинуватого — в 3,51 рази. Для групи, що складається з габро, андезиту, кварциту, магнетитових кварцитів, відбувається повільна зміна об'єму руйнування порівняно зі зміною об'єму руйнування у



монолітному середовищі із середньотріщинуватим масивом в 1,67 раза, а в монолітному середовищі з надзвичайно тріщинуватим масивом — в 1,77 раза. Для третьої групи (вапняк, гранітоїд, базальт, пісковик, туф, мармур і доломіт) зміна об'єму руйнувань незначна. У моноліті із середньотріщинуватим масивом зменшення об'єму відбувається в 1,08 раза, а з надзвичайно тріщинуватим — в 1,13 раза. Отже, згідно з аналізом змін об'ємів руйнування залежно від тріщинуватості гірського масиву, вплив фізико-механічних властивостей досліджуваних гірських порід на результати дроблення є комплексним, при цьому впливу окремої властивості на об'єм руйнування не спостерігається.

Автори публікацій [Кравець та ін., 2015; Симанов, Безматерных, 1973; Скачков та ін., 2017] зазначають, що при оцінюванні якості дроблення тріщинуватих порід слід враховувати крім величини вибухового імпульсу й фізико-механічні властивості гірських порід. У статті [Скачков та ін., 2017] проаналізовано процес зміни амплітуди та енергії в разі перетину пружною хвилею макротріщин у гірській породі, анізотропія пружних властивостей якої (зокрема кристалічних порід) найсуттєвіше впливає на характер поширення хвиль стиснення внаслідок підривання заряду ВР. Таким чином, очевидно, що у найпростіших випадках, при розкритих тріщинах, вплив на масив порід від заряду ВР, розміщеного і підірваного в ньому, буде максимальним у напрямках, перпендикулярних до його тріщинуватості й уздовж шаруватості, та поступово, при відхиленнях від цих напрямків, знижуватиметься до мінімуму, що відповідає куту повного внутрішнього відбиття хвилі від породи. Знаючи ці кути і закон поширення фронту хвилі, а також параметри заряду ВР, можна побудувати годографи поздовжніх і поперечних хвиль, а також ізолінії рівних значень різних параметрів поширення інших хвиль. Дослідженнями О. М. Ханукаєва [Ханукаев, 1962] доведено, що заповнена повітрям тріщина завширшки 2 мм знижує інтенсивність хвиль напружень у 25 разів по-

рівняно з монолітним середовищем. У разі заповнення тріщини водою напруження дорівнюють 0,85—0,9 величини напружень у монолітному середовищі і 0,7—0,75 — за ширини тріщини порядку 20 мкм. Установлено також, що в основі сучасних положень механіки руйнування тріщинуватих масивів гірських порід вибухом закладено визначення коефіцієнта інтенсивності напружень, який вважають основним параметром тріщиноутворення [Фролов та ін., 2015]. Його застосування дає можливість отримувати основні закономірності, що описують поля напружень і переміщень у вершині тріщини.

Отже, з метою освоєння і відновлення дебіту водозабірних свердловин використовують імпульсні методи порушення суцільності та руйнування глинистої кірки, в разі каптажу скельних водоносних порід — створення штучної тріщинуватості, що збільшує проникність фільтрів і прифільтрових зон. Розмір утворюваних тріщин визначається величиною заряду. За фіксованих розмірів торпеди, що передбачає створення в породі пропорційних їй за протяжністю тріщин, після вибуху слід чекати і відповідного збільшення дебіту. Як альтернативний спосіб використання ВР застосовують метод електричного розряду (ЕГУ), спосіб зміни проникності породи шляхом створення в ній тріщин гідравлічним розривом пласта. Досить перспективною, на нашу думку, є технологія, запропонована А.В. Михалюком.

*Збільшення продуктивності водозабору на моделі Жашківського родовища в результаті збільшення тріщинуватості.* З кожним роком вдосконалюються і з'являються на ринку нові спеціальні програмні засоби, які дають змогу імітувати природні процеси руху підземних вод більшою мірою для осадових відкладів і меншою — тріщинуватих скельних порід. Однак можна розглядати тріщинуваті породи як суцільне проникне середовище, яке має неперервні властивості. Цей підхід дає змогу знехтувати розмірами, конфігурацією і просторовим положенням тріщин і використати формули, що виведені для

пористого середовища. Отже, тріщинувата зона кристалічних порід докембрію може бути розглянута як суцільне середовище з неперервними властивостями, але воно характеризується великою мінливістю фільтраційних властивостей у плані.

Детально геофільтраційну модель Жашківського родовища описано у статтях [Шестопалов та ін., 2020; Петренко та ін., 2021]. Наведемо її основні елементи. Так, при схематизації гідрогеологічних умов у розрізі було враховано 1 водоносний шар, 1 водотривкий та 1 шар кристалічних гірських порід різного ступеня тріщинуватості. Спочатку розмір блока моделі дорівнював 100×100 м. Свердловини, пробурені у кристалічних породах, здебільшого не мають гідравлічного зв'язку між собою через особливості тріщинуватості відкладів [Власенко, 1956; Кадастр..., 1971; Павлюченко, 2006]. Тому зона фільтрації була розділена на окремі фрагменти, і детальне моделювання виконано з урахуванням особливостей будови пластів, умов водопровідності та перетікання підземних вод для кожного фрагмента.

Після фрагментування моделі розмір блока зменшили у 10 разів. Перший водоносний шар на моделі схематизує всі водоносні горизонти осадових відкладів, що представлені водовмісними породами різного генезису, літологічного складу і віку. За роздільний шар прийнята зона кори вивітрювання, яка поширена практично повсюдно і складена здебільшого глинистими та суглинистими відкладами. Наявність цієї зони зумовлює розрив рівнів між першим і другим водоносними шарами (шаром кристалічних порід різного ступеня тріщинуватості). Нижньою межею шару кристалічних порід взято рівень згасання тріщинуватості кристалічних відкладів (приблизно на глибині 70—100 м).

Коригування геофільтраційної моделі у цьому випадку полягало у підборі різних умов водопровідності, а також параметра перетікання для відтворення на моделі гідродинамічних умов під час експлуатації свердловини та досягнення результатів зниження рівня підземних вод,

яке було отримано під час відкачування за заданого дебіту (у польових умовах).

У однакових гідрогеологічних умовах можна отримати зовсім різну продуктивність водозабору, яка залежатиме від обраної схеми будови водозабору. Гідродинамічна ефективність будь-якої схеми будови водозабору є функцією від розміщення свердловини, її радіуса, довжини і розміщення фільтра, відстані до контуру живлення та ще деяких параметрів. При обґрунтуванні раціональної схеми водозабору комбінації та поєднання згаданих параметрів не зможуть вичерпати всієї різноманітності природних умов залягання підземних вод у тріщинуватих відкладах.

На геофільтраційній моделі Жашківського родовища було розглянуто індивідуальні підходи (з урахуванням складної гідрогеологічної обстановки та результатів геофізичних досліджень) і запропоновано такі можливі варіанти збільшення продуктивності водозабору штучним способом у типових для УЩ геолого-гідрогеологічних умовах:

1) у результаті штучного збільшення тріщинуватості водовмісних кристалічних порід (умови малотріщинуватих кристалічних порід за достатньої товщини вищезалягаючих водовмісних осадових відкладів);

2) унаслідок штучного збільшення перетікання через роздільний шар (умови сильно тріщинуватих кристалічних порід за наявності кори вивітрювання суттєво глинистого складу та достатньої товщини водовмісних осадових відкладів);

3) в умовах створення водосховища на річці (греблі) та штучного збільшення тріщинуватості водовмісних кристалічних порід (умови середньотріщинуватих кристалічних порід та наявності кори вивітрювання і осадових відкладів значної товщини).

Для виконання тестових рішень для *першого варіанта* була вибрана *свердловина 1925*. У статті [Петренко, 2021] детально описано хід моделювання, тому в табл. 1 наведено лише основні кроки та висновки. Отже, причина вибору свердловини — достатня товщина (44 м) та незначна

тріщинуватість кристалічних порід, посилення якої дає змогу розглядати (припустити) ці породи як колектори підземних вод. Склад й товщина осадових відкладів і кори вивітрювання типові для умов УЩ.

В усіх випадках під штучною «тріщиною» ми розуміємо зону кристалічних гірських порід певної (заданої на момент кожного тесту) тріщинуватості відносно фонової. Ступінь тріщинуватості на моделі задавали різними значеннями коефіцієнта водопровідності ( $T$ , м<sup>2</sup>/добу). Гірські породи штучної «тріщини» є частиною масиву кристалічних порід, тобто мають горизонтальний зв'язок завдяки руху у них підземних вод і вертикальний зв'язок унаслідок перетікання підземних вод із вищезалеганих горизонтів. Фонове значення коефіцієнта водопровідності біля свердловин брали різним для різних свердловин: від 0,1 до 100 м<sup>2</sup>/добу (свердловини 1925, 1903). Ці значення були підібрані під час корегування моделі (ство-

рення контурів відмінної від фонової водопровідності) при досягненні зниження за заданого дебіту, виміряного у польових роботах [Терешков, 1977].

Аналіз даних табл. 1 показав, що виконані дії на першому етапі — збільшення тріщинуватості безпосередньо біля свердловини — призвели до незначного зростання рівня підземних вод. Після проведення незалежних один від одного розломів 1 та 2 поблизу свердловини рівень підземних вод не підвищився, а одночасне використання двох паралельних розломів дало можливість збільшити початковий водовідбір приблизно на 55 % — до 370 м<sup>3</sup>/добу. Вдалось і наростити дебіт до 540 м<sup>3</sup>/добу за допустимого зниження.

Для виконання тестових рішень для *другого варіанта* була вибрана *свердловина 1903*. Причина її вибору — достатня товщина (26,5 м) і склад (водоносні піски та суглинки) осадових відкладів, значний ступінь тріщинуватості кристалічних порід

**Т а б л и ц я 1. Кроки моделювання збільшення продуктивності водозабору на прикладі свердловини 1925**

Характеристика моделі	$k_0/m_{om}$ доба <sup>-1</sup>	$T_{\text{контур}}^*$ м <sup>2</sup> /добу	$T_M$ м <sup>2</sup> /добу	Рівень підземних вод у свердловині на моделі після чергових розв'язань задачі, $H_M$ , м	$(Q)Q_M$ м <sup>3</sup> /добу
Розмір «поля» довкола свердловини 7×7 блоків	3·10 <sup>-4</sup>	0,75	600	167	Q=212
	3·10 <sup>-4</sup>		2600	167,1	
	3·10 <sup>-2</sup>		2600	177,7	
	3·10 <sup>-2</sup>		600	177,6	
	3·10 <sup>-2</sup>		100	184	
	3·10 <sup>-2</sup>		100	172,3	
Розмір «поля» довкола свердловини 10×10 блоків	3·10 <sup>-3</sup>	100	100	167,8	Q=212
	3·10 <sup>-3</sup>		100	178,9	
	3·10 <sup>-3</sup>			178,8	
Штучна «тріщина» 1 (горизонтальна)	3·10 <sup>-3</sup>	100	100	183	Q <sub>M</sub> =370
Штучна «тріщина» 2 (горизонтальна, під блоком, що позначає свердловину)	3·10 <sup>-3</sup>			175	
Дві штучні «тріщини» (1 і 2), задані одночасно	3·10 <sup>-3</sup>				

\*Примітка: контур — зона низької водопровідності довкола «поля» свердловини;  $Q(Q_M)$  — значення дебіту свердловини, з яким відбувалось відкачування у полі та на моделі;  $H_M$  — значення (на моделі) рівня підземних вод для шару кристалічних тріщинуватих порід при розв'язанні задачі в умовах експлуатації (відкачування), м;  $H_M=168$  м — рівень підземних вод до початку тестових рішень;  $T_M$  — значення водопровідності;  $k_0/m_0$  — параметр перетікання для проміжного шару (кора вивітрювання).

(товщина 56,4 м). Це дає змогу розглядати (припустити) породи як колектори підземних вод. Кора вивітрювання — мігматитового походження завтовшки до 3,5 м.

Для перевірки можливості збільшення величини відбору підземних вод із тріщинуватих кристалічних порід унаслідок збільшення перетікання підземних вод із осадових відкладів через кору вивітрювання у тріщинуваті кристалічні породи на моделі в умовах свердловини 1903 було виконано низку тестових рішень для розв'язання оберненої задачі, тобто з відбору гідрогеологічних параметрів (водопровідності та величини перетікання через слабкопроникну товщу) на основі величини дебіту та його зниження, отриманих під час відкачування в процесі польових робіт. Зауважимо, що наявних даних (дебіт і зниження) недостатньо для однозначного визначення гідрогеологічних параметрів,

необхідних для проведення моделювання. Тому було виконано чотири варіанти розв'язання оберненої задачі для зменшення ймовірності похибки при оцінюванні впливу пропонованого збільшення вертикального перетоку (способом механічного збільшення тріщинуватості) на величину водовідбору. У табл. 2 наведено хід тестових рішень (чотири варіанти та їх підвиди) для визначення продуктивності водозабору в результаті збільшення перетікання через роздільний шар.

Свердловина 1903 пробурена у сильнотріщинуватих гірських породах, які характеризуються високими вихідними значеннями коефіцієнта водопровідності (3500 м<sup>2</sup>/добу) та параметром перетікання 10<sup>-6</sup> доба<sup>-1</sup>, який був підібраний під час корегування. Варіант А починається із збільшення параметра перетікання на два порядки, рівень підземних вод при цьому під-

**Таблиця 2. Кроки моделювання збільшення продуктивності водозабору на прикладі свердловини 1903**

Крок моделювання	$k_0/m_{om'}$ доба <sup>-1</sup>	$T_{M'}$ м <sup>2</sup> /добу	Рівень підземних вод у свердловині на моделі після виконання рішень, $H_{M'}$ м	$(Q)Q_{M'}$ м <sup>3</sup> /добу
Варіант А	10 <sup>-4</sup>	3500	149,4	$Q=62$
а1	10 <sup>-3</sup>	$T=0,2$ (блоком навколо свердловини)	161,1	$Q_M=162$ $Q_M=230$
а2	10 <sup>-2</sup>		191,8	
а3	10 <sup>-2</sup>		165,6	
а4	10 <sup>-2</sup>		147,7	
Варіант Б	10 <sup>-6</sup>	$T=0,1$	97,1	$Q_M=162$
б1	10 <sup>-3</sup>		161,6	
б2	10 <sup>-2</sup>		191,9	
б3	10 <sup>-2</sup>		147,8	
Варіант В	10 <sup>-5</sup>	$T=0,179$	147,1	$Q_M=230$
в1	10 <sup>-3</sup>		160,7	
в2	10 <sup>-3</sup>		191,7	
в3	10 <sup>-3</sup>		147,5	
Варіант Г	10 <sup>-4</sup>	$T=0,025$	147,9	$Q_M=225$
г1	10 <sup>-3</sup>		160	
г2	10 <sup>-2</sup>		191,6	
г3	10 <sup>-2</sup>		148	

Примітка.  $H_M=147,7$  м — рівень підземних вод до початку виконання тестових рішень.



вищується відносно рівня підземних вод до початку тестових рішень. Як бачимо, протягом всіх тестових підходів значення коефіцієнта водопровідності навколо свердловини змінюється від 0,025 до 0,2 м<sup>2</sup>/добу, а параметр перетікання — від  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $1 \cdot 10^{-2}$  добу<sup>-1</sup>. При цьому шукана величина рівня підземних вод у досліджуваному горизонті коливається від  $\min 97,1$  м до  $\max 191,9$  м за різних варіантів застосування гідрогеологічних параметрів. При першому (базовому) варіанті розв'язання оберненої задачі шуканий модельний рівень становив 147,7 м. Спостерігаємо, що рівень у інших варіантах розв'язків відрізняється приблизно від -0,6 до +0,6 м. Отже, амплітуда коливань дорівнює близько 1,2 м, що є цілком прийнятним результатом.

*Хіг моделювання.* Варіант *а* — вихідні умови відповідають параметрам, за яких досягнуто зниження рівня підземних вод при бурінні під час проведення польових робіт. Довкола свердловини є контур з водопровідністю  $T=0,2$  м<sup>2</sup>/добу, параметр перетікання дорівнює  $10^{-6}$  добу<sup>-1</sup>. Через 20 м від свердловини на північ задаємо 30-метрову зону (площею відповідно 300 м<sup>2</sup>) з параметром перетікання  $10^{-4}$  добу<sup>-1</sup>. При цьому рівень підземних вод збільшився на 1,7 м. Збільшивши параметр перетоку на два порядки (до  $1 \cdot 10^{-3}$  і  $1 \cdot 10^{-2}$  добу<sup>-1</sup>), варіанти  $a_1$ — $a_2$ , отримаємо приріст рівня на 13,5 і 44,15 м відповідно.

Варіант *б* полягав у зміні коефіцієнта водопровідності контуру навколо свердловини від  $T=0,2$  м<sup>2</sup>/добу на  $T=0,1$  м<sup>2</sup>/добу. Збільшення параметра перетікання до  $1 \cdot 10^{-3}$  добу<sup>-1</sup>, а потім до  $1 \cdot 10^{-2}$  добу<sup>-1</sup> супроводжувалось збільшенням рівня на 13,9 та 44,3 м відповідно, а збільшення дебіту в майже 3,7 раза ( $b_3$ ) мало привести до встановлення рівня (147,8 м), як перед початком тестування (147,7 м). У табл. 2 на прикладі варіантів В і Г наведено подібні ітерації з підбором параметрів коефіцієнтів водопровідності та перетікання.

Аналіз усіх варіантів розв'язання (з різними варіантами умов оберненої задачі та різними варіантами пропонованого збільшення вертикального перетоку до  $1 \cdot 10^{-3}$  і

$1 \cdot 10^{-2}$  добу<sup>-1</sup>) показав, що збільшення перетікання у трьох модельних блоках до  $1 \cdot 10^{-3}$  добу<sup>-1</sup> може дати до 30 % приросту водовідбору, а при збільшенні на моделі параметра перетікання до  $1 \cdot 10^{-2}$  добу<sup>-1</sup> модельні рівні підземних вод підвищуються приблизно на 43—44 м, що аналогічно збільшенню водовідбору майже до 220—230 м<sup>3</sup>/добу.

Для виконання тестових рішень у *третьому варіанті* була обрана свердловина 1911. Причина її вибору — близькість географічного розташування відносно невеликої річки з неширокою долиною та прийнятними перевищеннями за висотою (до 240 м порівняно із відмітками долини 220 м) берегових піднять. Було враховано і задовільний опис порід, які розкрила свердловина: прийнятні товщина (18,5 м) і склад осадових відкладів (піску дрібнозернистого), значна товщина дресвянистої кори вивітрювання (22,5 м) та велика товщина кристалічних порід (150,5 м) здебільшого середнього та значного ступеня тріщинуватості.

Для збільшення величини відбору підземних вод із кристалічних порід унаслідок створення греблі в умовах свердловини 1911 було виконано ряд ітерацій з підбором параметрів для отримання найвдалішого результату.

*Хіг моделювання.* Рівень підземних вод у свердловині при відкачуванні становив 189,7 м. За рахунок греблі рівень води в річці піднявся на 3 м (212—215 м), а в горизонті — на 2 м. Таке збільшення дало змогу наростити дебіт на 10 % за допустимого зниження. Вплив дії греблі незначний, тому далі застосовували спосіб збільшення проникності проміжного шару на моделі (відповідає породам кори вивітрювання) від  $3 \cdot 10^{-3}$  на  $3 \cdot 10^{-2}$ . Після цього отримали приріст рівня 5,7 м, який дав можливість отримати 700 м<sup>3</sup>/добу за допустимого зниження.

**Обговорення.** Незначне використання підземних тріщинуватих вод пов'язане передусім із невідомою системою тріщинуватості і, відповідно, рухом цих вод, що позначається на складності обґрунтування доступної їх кількості у тріщинуватих во-

довмісних кристалічних породах. Водоносність кристалічних порід тісно пов'язана з їх тріщинуватістю. Спосіб штучного збільшення тріщинуватості порід довкола свердловини, згідно з літературними даними, дає хороші результати щодо збільшення її дебіту. Штучно збільшуючи тріщинуватість кристалічних порід, можна поповнити у них запаси підземних вод. Слід зазначити, що новизна у цьому контексті не стосується ШПЗПВ як самого по собі, а тільки у застосуванні його в умовах УЩ.

За допомогою геофільтраційної моделі, на прикладі трьох найпоширеніших геолого-гідрогеологічних умов водозабору у кристалічних тріщинуватих водовмісних породах, розглянуто збільшення продуктивності свердловин унаслідок збільшення тріщинуватості, яку у природних умовах можливо досягти із застосуванням вибухової речовини.

Типові геолого-гідрогеологічні умови водозабору включали таке розміщення свердловини 1) у малотріщинуватих кристалічних породах за достатньої товщини вищезалігаючих водовмісних осадових відкладів; 2) у сильнотріщинуватих кристалічних породах (що дає змогу розглядати їх як колектори) за наявності кори вивітрювання суттєво глинистого складу та достатньої товщини водовмісних осадових відкладів з хорошими фільтраційними властивостями; 3) поблизу водойми у кристалічних породах середнього ступеня тріщинуватості та значної товщини водовмісних осадових відкладів і наявності кори вивітрювання.

Описане вище дослідження є лише підходом до вирішення одного з елементів непростого завдання — отримати додаткове джерело водопостачання в умовах поширення тріщинуватих водовмісних кристалічних порід. Насамперед на ділянці, де заплановано роботи із збільшення продуктивності водозабору чи/або пошуку місця для нового водозабору, слід визначити величину потреб у воді та мету її використання — для питних чи технічних потреб.

При цьому необхідно виконати:

– аналіз наявних даних щодо району майбутнього водозабору(-ів) для поперед-

нього оцінювання експлуатаційних запасів підземних вод;

– додаткові дослідження для отримання інформації, якої не вистачає;

– обґрунтування способу проведення робіт з посилення тріщинуватості;

– покровові роботи з посилення тріщинуватості та експлуатації водозабору.

До аналізу наявних даних щодо району майбутнього водозабору(-ів) для попереднього оцінювання експлуатаційних запасів підземних вод можна віднести розгляд умов розташування водозабору (майбутнього чи існуючого, якщо мова йде про поновлення його роботи) відносно річкової мережі (якщо вона є), аналіз кліматичних (визначити середні значення кількості опадів, їх максимальні та мінімальні значення, інше), геоморфологічних (абсолютні позначки перевищень та понижень рельєфу), гідрологічних умов (дебіти річок, оцінювання розходу річки).

Для цього слід володіти даними щодо величини санітарного стоку річки за наявності режимних постів чи здійснювати річні гідрометричні спостереження річки, бажано вище і нижче за течією в зоні розташування майбутнього водозабору, мінімальних значень природних ресурсів підземних вод, що розвантажуються у річку (або скористатись методом аналогій) та ін. При оцінюванні експлуатаційних запасів у зазначених умовах важливо враховувати такі особливості осадових відкладів (і кори вивітрювання), як товщина і склад; від наявності цих характеристик залежатимуть фільтраційні властивості осадового шару і запаси підземних вод у відкладах. За умови, що кількість природних ресурсів підземних вод осадового чохла відома, основною невизначеністю є саме система тріщинуватості порід та їх проникність (навіть якщо відомі основні характеристики розломів чи тріщин досліджуваної зони). Інакше кажучи, до цього етапу треба віднести також геолого-геофізичну вивченість (умови залягання відкладів, наявність та розміщення розломних зон, систем тріщинуватості та їх вигляд в плані і з глибиною, геометричні характеристики основних трі-

щин чи розломів). За наявності даних стосовно структурно-текстурних характеристик та міцнісних властивостей необхідно проаналізувати напружено-деформований стан порід (за результатами сейсмічних досліджень), анізотропію фільтраційних властивостей та ін. Гідрогеологічний аналіз полягає у розгляді глибин та умов залягання водоносних горизонтів, напрямків руху підземних вод, коефіцієнтів фільтрації відкладів, параметрів водопровідності, складу підземних вод та ін.

*Виконання досліджень для отримання інформації, якої не вистачає, найчастіше може полягати у проведенні таких геофізичних робіт: вертикальне електричне зондування — для уточнення складу та умов залягання відкладів; сейсмічне знімання — уточнення залягання та простягання систем тріщинуватості та ін.; витратометрія — виявлення, наприклад, зон припливу підземних вод до свердловини та ін.*

*Обґрунтування способу проведення робіт з посилення тріщинуватості середовища кристалічних порід потенційного майбутнього водозабору може бути виконано таким чином. Для початку виключаємо з подальшого розгляду ділянки із незначною (до 10—15 м) товщиною осадових відкладів глинисто-суглинистого складу або їм подібного через незначні ємнісні та фільтраційні характеристики відкладів. Не беремо до уваги ділянки, віддалені від розломних зон чи систем тріщинуватості, та ділянки, що знаходяться на вододілах. Далі аналізуємо ступінь тріщинуватості кристалічних порід. При цьому виділяємо ділянки двох груп: I групу складатимуть ділянки, кристалічні породи яких характеризуються тріщинуватістю (ступінь тріщинуватості слабкий—середній), а II групу — ділянки сильнотріщинуватих порід.*

Далі слід проаналізувати у зазначених групах ділянок товщини та склад осадових відкладів і кори вивітрювання з урахуванням ступеня обводненості перших. Для ділянок I групи рекомендується варіант свердловини 1925 — поетапне посилення тріщинуватості кристалічних порід та на кожному покровоковому етапі здійснення

замірів рівня підземних вод, для ділянок II групи — варіант свердловини 1903 — поетапне посилення водопроникності кори вивітрювання та на кожному етапі здійснення замірів рівня підземних вод.

За умови незначного додаткового очікуваного об'єму підземних вод та розміщення сприятливої ділянки поблизу річки, абсолютні позначки висоти терас та берегів відносно рівня моря якої перевищують абсолютні позначки русла річки не менш ніж на 10 м (як у випадку свердловини 1911), та відповідно до мети збільшення водозабору шляхом створення загати слід звернути увагу на те, що на моделі підвищення рівнів завдяки греблі дало змогу наростити незначний дебіт за допустимого зниження без застосування збільшення тріщинуватості водовмісних кристалічних порід. Потрібно також зважити на відстань до річки, величину дебіту річки, її санітарного стоку, місткості водосховища з відрахуванням випаровування з його поверхні. Відстань до річки як позиція має і перевагу, і недолік. *Перевага:* близька відстань до водойми дає змогу використати мінімальну кількість вибухової речовини для збільшення тріщинуватості та забезпечення водопривливу з водойми. *Недолік:* вибух у кристалічних породах, які розкриті свердловиною, може спричинити майже прямий (без достатньої фільтрації через породи і очищення) приплив води зі ставка, яка, як правило, є нижчої якості, ніж підземні води. Потрібно застосувати балансовий метод для визначення статей витрат (випаровування, фільтрація під греблею та ін.) і прибування підземних вод. При цьому кількість води, що надходить у середовище гірських порід, має перевищувати витратну частину цих вод. Це і буде передумовою позитивних результатів збільшення продуктивності водозабору обраним способом.

**Висновки.** Отримані результати засвідчують, що запропонований спосіб штучного поповнення запасів підземних вод у тріщинуватих водовмісних кристалічних породах унаслідок посилення тріщинуватості гірських порід (зокрема відкладів кори

вивітрювання) приводить до збільшення продуктивності водозабору у зазначених умовах. Оцінений фільтраційний процес на кожному з фрагментів через невідоме розміщення тріщин у природних умовах неможливо поширити на всю зону, але розв'язки таких задач і, відповідно, надані рекомендації для кожного з проаналізованих випадків можна пропонувати для подальшого розгляду при вирішенні завдань збільшення водозабору в умовах тріщинуватих кристалічних порід. Основні види

робіт і вимоги до них при розгляді питання підвищення продуктивності водозабору за рахунок збільшення тріщинуватості водовмісних кристалічних порід, які окреслено у статті, носять попередній якісний характер. Однак запропонований спосіб збільшення продуктивності водозабору у кристалічних водовмісних породах в контексті пошуку додаткових джерел питної води чи води для технічних потреб можна розглядати як перспективний, особливо для водозабезпечення сільських господарств.

### Список літератури

- Василенко Б. В., Новак К. В., Ольшевська А. Ю. Геолого-економічна оцінка експлуатаційних запасів ділянок №1 та №2 Жашківського родовища питних підземних вод в м. Жашків Черкаської області (підрахунок запасів станом на 30.04.2015 р.). Київ, 2016. 155 с.
- Власенко А. И. Заключение о возможности артезианского водоснабжения районного дорожно-эксплуатационного участка в г. Жашкове. Жашковский район, Черкасская область. 1956. Режим доступа: [https://geoinf.kiev.ua/wp/geologichni-zviti.php?rep=fnd\\_shifr.rdf&schifr=16516](https://geoinf.kiev.ua/wp/geologichni-zviti.php?rep=fnd_shifr.rdf&schifr=16516).
- Войтенко Ю. І. Про в'язке та крихке руйнування гірських порід при ударі та вибуху. *Вісник нац. техн. ун-ту України «Київський політехнічний інститут»*. Сер. Гірництво. 2017. № 34. С. 9—17. <https://doi.org/10.20535/2079-5688.2017.34.102220>.
- Дядін Д. В., Журавель М. Ю., Клочко П. В., Борщ М. С., Яременко В. В. Оцінка впливу на підземні води на ділянці проведення гідророзриву пласта. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2017. № 2(16). С. 10—19.
- Кадастр подземных вод. Лист М-36-XXV, учетные карточки буровых скважин на 01.01.1971 г. (Днепропетровская, Запорожская, Киевская, Кировоградская, Полтавская, Сумская, Харьковская, Черниговская, Черкасская).
- Качмар Ю. Д., Цьомко В. В. До 60-річчя застосування гідравлічного розриву пласта у ПАТ «Укрнафта». *Нафтогазова галузь України*. 2015. № 4. С. 43—46.
- Коробійчук В. В. Розробка наукових основ технології супутнього видобування блоків в умовах щеленевих гранітних кар'єрів: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Київ, 2018. 36 с.
- Коробійчук В. В., Соколовський В. О., Іськов С. С. Руйнування гірських порід та безпека вибухових робіт: підручник. Житомир: Вид. Житомир. держ. технол. ун-ту, 2019. 332 с.
- Кравець В. Г., Коробійчук В. В., Бойко В. В. Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху: монографія. Житомир: Вид. Житомир. держ. технол. ун-ту, 2015. 408 с.
- Михалюк А. В. Торпедирование и импульсный гидроразрыв пород. Киев: Наук. думка, 1986. 207 с.
- Михалюк А. В., Войтенко Ю. І., Лігоцький Н. В. Нова технологія інтенсифікації видобутку нафти і природного газу із застосуванням енергії вибуху. *Нафтова і газова промисловість*. 1997. № 4. С. 24—26.
- Морозов Е. М. Введение в механику развития трещин. Москва: Изд. МИФИ, 1977. 91 с.
- Нагорний В. П. Імпульсні методи відновлення продуктивності водозабірних свердловин: довідник НАН України. Київ: Вид. Ін-ту геофізики НАН України, 2011. 187 с.
- Нагорний В. П., Глоба В. М., Денисюк І. І. Взрывные работы при добыче природных углеводородов, строительстве магистральных трубопроводов и подземных хранилищ. Киев: Полиграфист, 2009. 330 с.
- Никиташ А. П., Литвак Д. Р. Отчет о резуль-



- татах работ по оценке водообильности гидрогеологических скважин на территории УЩ применительно к задачам разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод на 1981—1983 гг. (в 4-х томах). Киев: Министерство геологии УССР, Северо-украинское ордена Ленина производственное геологическое объединение «Севукргеология». Комплексная геофизическая экспедиция. 1983. 150 с.
- Павлюченко В. Г. Звіт з ведення Державного обліку використання підземних вод і Державного водного кадастру на території Черкаської та Кіровоградської областей за 2001—2005 рр. Черкаси: Вид. ДП «Центрукгеологія», 2006.
- Петренко Л. І., Романюк І. М., Кастельцева Н. Б., Персіц І. А. Моделювання умов штучного збільшення продуктивності водозабору у кристалічних породах (на прикладі Жашківського району, Україна). *Геол. журн.* 2021. № 2. С. 47—57. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.2.224915>.
- Симанов В. Г., Безматерных В. А. О зависимости давления продуктов детонации в скважине от естественной тресчиноватости массива. *Горный журн.* 1973. № 3. С. 57—61.
- Скачков А. А., Жуков С. О., Стріха В. А. Особливості формування силових полів за вибухового руйнування тріщинуватих анізотропних гірських порід. *Вісник Нац. ун-ту водного господарства. Сер. Технічні науки.* 2017. № 3(79). С. 32—41.
- Соболев В. В., Терещук Р. М., Григор'єв О. Є. Технологія та безпека виконання підричних робіт: навч. посіб. для ВНЗ. Дніпро: Вид. Нац. гірн. ун-ту, 2017. 314 с.
- Стан підземних вод України. Щорічник Київ: Вид. Державної служби геології та надр України, ДНВП «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2019. 131 с.
- Терешков Д. И. Отчет о результатах поисков и предварительной разведки подземных вод для водоснабжения г. Жашкова, Черкасской области УССР. Белоцерковская геологоразведочная партия, 1975—1977. 190 с.
- Фролов О. О., Бритвин Ю. О Встановлення закономірностей руйнування тріщинуватих гірських порід вибухом. *Вісник нац. техн. ун-ту України «Київський політехнічний інститут». Сер. Гірництво.* 2015. Вип. 27. С. 81—89. <https://doi.org/10.20535/2079-5688.2015.27.49166>.
- Ханукаев А. Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. Москва: Госгортехиздат, 1962. 200 с.
- Шапкин Н. Ф. Характеристики твердости котельной накипи по сопротивлению ее разлому. *Заводская лаборатория.* 1952. № 4.
- Шестопалов В. М., Лялько В. И., Огняник Н. С., Дробноход Н. И. Водообмен в гидрогеологических структурах Украины: Водообмен в естественных условиях. Киев: Наук. думка, 1989. 288 с.
- Шестопалов В. М., Петренко Л. І., Романюк І. М., Кастельцева Н. Б., Персіц І. А. Нові підходи до розв'язання проблем децентралізованого водопостачання за рахунок підземних вод, приурочених до кристалічних порід (на прикладі родовища Українського Щита). Звіт про НДР ІГН НАН України. Київ, 2020. 236 с.

## Increasing the productivity of water in taken water-containing crystalline rocks by increasing their fracture by an explosion

**V. M. Shestopalov, L. I. Petrenko, I. M. Romanyuk, 2021**

Institute of Geological Sciences of the National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Global warming, which has been observed in the world and Ukraine in particular in recent decades, may lead to a decrease in surface and groundwater. In addition, the high level of groundwater pollution and the policy of water purification is a matter of concern.



Thus, the question of finding additional and alternative sources of drinking water today is highly urgent. A significant percentage of prospecting works of the last century was devoted to discovering the groundwater fields in fractured crystalline rocks of the Ukrainian Shield. As a rule, the productivity of wells of these formations did not have high flow rates, so even now, mostly the aquifers in sedimentary deposits have been exploited.

The low productivity of most wells in water-bearing fractured rocks is associated with the unknown degree of fracturing of the crystalline massif: it is difficult to determine the pathways of groundwater inflow into the fracture system and, accordingly, it is not easy to justify the exploitable groundwater reserves. In this paper, using the groundwater flow model of the Zhashkiv groundwater deposit, it is considered an increase of the productivity of water intake wells in the water-bearing crystalline rocks due to the increasing degree of their fracturing by an explosion. Thus, in hydrogeology, this technique is known when trying to increase the permeability in the near-borehole space, but as a method of artificial recharge of aquiferous crystalline rocks is used very rarely. The paper also examines typical water intakes conditions in fractured crystalline water-bearing rocks, which can be recommended for increasing their productivity by the blasting method. The results indicate that an artificial increase in fracturing degree can have a significant effect on increasing the productivity of water intakes. The basic methods of using explosives, as an example of an artificial increase in fracturing degree, in solving hydrogeological problems and the mechanisms of fractures' formation during the action of blasting are considered.

**Key words:** groundwater, resources, groundwater productivity, modeling, fractured crystalline rocks, wells, blasting operations.

### Reference

- Vasylenko, B. V., Novak, K. V., & Olshevska, O. Yu. (2016). *Geological and economic assessment of operational reserves of sites №1 and №2 of Zhashkiv drinking groundwater deposit in Zhashkiv, Cherkasy region (calculation of reserves as of 30.04.2015)*. Kyiv, 155 p. (in Ukrainian).
- Vlasenko, A. I. (1956). *Conclusion on the possibility of artesian water supply to the district road maintenance site in the town of Zhashkov, Zhashkovsky district, Cherkasy region*. Retrieved from [https://geoinf.kiev.ua/wp/geologichni-zviti.php?rep=fnd\\_shifr.rdf&schifr=16516](https://geoinf.kiev.ua/wp/geologichni-zviti.php?rep=fnd_shifr.rdf&schifr=16516) (in Russian).
- Voytenko, Yu. I. (2017). About the viscous and brittle destruction of rocks by impact and explosion. *Visnyk natsional'ho tekhnichnoho universyteu Ukrayiny «Kyyivskyy politekhnichnyy instytut»*. Ser. Hirnyctvo, (34), 9—17. <https://doi.org/10.20535/2079-5688.2017.34.102220> (in Ukrainian).
- Dyadin, D. V., Zhuravel, M. Yu., Klochko, P. V., Borsch, M. S., & Yaremenko, V. V. (2017). Assessment of the impact on groundwater at the site of hydraulic fracturing. *Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannya*, (2), 10—19 (in Ukrainian).
- Groundwater cadastre, sheet M-36-XXV, registration cards of boreholes in 01.01.1971 (Dnepropetrovsk, Zaporozhye, Kiev, Kirovograd, Poltava, Sumy, Kharkov, Chernigov, Cherkasskaya) (in Russian).
- Kachmar, Yu. D., & Tsomko, V. V. (2015). To the 60th anniversary of the application of hydraulic fracturing in PJSC «Ukrnafta». *Naftohazova haluz Ukrayiny*, (4), 43—46 (in Ukrainian).
- Korobiychuk, V. V. (2018). Development of scientific bases of technology of accompanying extraction of blocks in the conditions of crushed stone granite quarries. *Extended abstract Doctor's thesis*. Kyiv, 36 p. (in Ukrainian).
- Korobiychuk, V. V., Sokolovsky, V. O., & Iskov, S. S. (2019). *Destruction of rocks and safety of blasting: a textbook*. Zhytomyr: Publ. of Zhytomyr State Technological University, 332 p. (in Ukrainian).
- Kravets, V. G., Korobiychuk, V. V., & Boyko, V. V. (2015). *Physical processes of applied geodynamics of explosion: monograph*. Zhytomyr: Publ. of Zhytomyr State Technological University, 408 p. (in Ukrainian).
- Mikhalyuk, A. V. (1986). *Torpedoing and pulsed fracturing of rocks*. Kiev: Naukova Dumka, 207 p. (in Russian).
- Mykhaluk, A. V. Voytenko, Yu. I., & Ligotskiy, N. V.

- (1997). New technology for intensification of oil and natural gas production with the use of explosion energy. *Naftova i hazova promyslovisht, (4)*, 24—26 (in Ukrainian).
- Morozov, E. M. (1977). *Introduction to the mechanics of crack development*. Moscow: Moscow: Ed. of the Moscow Engineering Physics Institute, 91 p. (in Russian).
- Nagornyi, V. P. (2011). *Impulse methods for restoring the productivity of water intake wells: Handbook of the NAS of Ukraine*. Kyiv: Publ. by the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 187 p. (in Ukrainian).
- Nagornyi, V. P., Globa, V. M., & Denysuk, I. I., (2009). *Blasting operation sin the extraction of natural hydrocarbons, construction of trunk pipelines and underground storage facilities*. Kiev: Poligrafist, 330 p. (in Russian).
- Nikitash, A. P., & Litvak, D. R. (1983). Report on the results of the work on the assessment of the water availability of hydrogeological wells in the territory of the USh with reference to the tasks of exploration and assessment of the operational reserves of groundwater for 1981—1983. (in 4 volumes). Kiev: MinGeo URSR «Sevukgeologiya», Complex geophysical expedition, 160 p. (in Russian).
- Pavlyuchenko, V. G. (2006). *Report on the State Accounting of Groundwater use and the State water cadastre on the territory of Cherkasy and Kirovohrad regions for 2001—2005*. Cherkasy: Ed. of the SE «Tsentrukrgeologiya» (in Ukrainian).
- Petrenko, L. I., Romanyuk, I. M., Kasteltseva, N. B., & Persits, I. A. (2021). Modelling of artificial increase in productivity of water intake wells in crystalline rocks (for conditions of Zhashkiv groundwater deposit, Ukraine). *Heolohichnyy Zhurnal, (2)*, 47—57. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.2.224915> (in Ukrainian).
- Simanov, V. G., & Bezmaternykh, V. A. (1973). On the dependence of the pressure of detonation products in the well on the natural cracking of the rock mass. *Gornyy Zhurnal, (3)*, 57—61 (in Russian).
- Skachkov, A. A., Zhukov, S. O., & Strikha, V. A. (2017). Peculiarities of force fields formation in explosive destruction of cracked anisotropic mountain rocks. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva. Ser. Tekhnichni nauky, (3)*, 32—41 (in Ukrainian).
- Sobolev, V. V., Tereshchuk, R. M., & Grygor'yev, O. E. (2017). *Technology and safety of blasting: textbook for universities*. Dnipro: Publ. of the National Mining University, 314 p. (in Ukrainian).
- State of groundwater in Ukraine. Yearbook.* (2019). Kyiv: State Service of Geology and Subsoil of Ukraine, SE «State Information Geological Fund of Ukraine», 131 p. (in Ukrainian).
- Tereshkov, D. I. (1977). *Report on the results of prospecting and preliminary exploration of groundwater for water supply of the city of Zhashkov, Cherkasy region of the Ukrainian SSR*. Belotserkovsk geological exploration field party, 1975—1977. 190 p. (in Russian).
- Frolov, O. O., & Britvin, Y. O. (2015). Establishment of patterns of destruction of fractured rocks by explosion. *Visnyk natsional'ho tekhnichnoh universyeteu Ukrayiny «Kyyivs'kyy politekhnichnyy instytut»*. Ser. Hirnytstvo, (27), 81—89. <https://doi.org/10.20535/2079-5688.2015.27.49166> (in Ukrainian).
- Khanukaev, A. N. (1962). *The energy of stress waves during the destruction of rocks by an explosion*. Moscow: Gosgortekhzdat, 200 p. (in Russian).
- Shapkin, N. F. (1952). Characteristics of hardness of boiler scale on resistance to its fracture. *Zavodskaya laboratoriya, (4)* (in Russian).
- Shestopalov, V. M., Lyalko, V. I., Ognyanik, N. S., & Drobnokhot, N. I. (1989). *Water exchange in hydrogeological structures of Ukraine: Water exchange in natural conditions*. Kiev: Naukova Dumka, 288 p. (in Russian).
- Shestopalov, V. M., Petrenko, L. I., Romanyk, I. M., Kasteltseva, N. B., & Persits, I. A. (2020). New approaches to solving the problems of decentralized water supply due to groundwater dedicated to crystalline rocks (on the example of the Ukrainian Shield deposit). Report on research work of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv, 236 p. (in Ukrainian).

## **Увеличение производительности водозабора в водовмещающих кристаллических породах за счет увеличения их трещиноватости способом взрыва**

*В. М. Шестопалов, А. И. Петренко, И. М. Романюк, 2021*

Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина

Изменение климата, наблюдаемое в мире, в частности в Украине, в последние десятилетия может привести к уменьшению количества поверхностных и подземных вод. Вызывает беспокойство и высокий уровень загрязнения вод, и политика их очистки. Вопрос поиска дополнительных или альтернативных источников питьевой воды на сегодня крайне актуален. Значительный объем полевых поисково-разведочных работ прошлого века был направлен на выявление месторождений подземных вод в трещиноватых кристаллических породах Украинского щита. Как правило, производительность скважин упомянутых месторождений характеризовалась невысоким дебитом, и в настоящее время большинство эксплуатируемых водоносных горизонтов относятся к осадочным отложениям. Незначительная производительность скважин в водовмещающих трещиноватых породах связана, как правило, с неизвестной трещиноватостью кристаллического массива: непросто определить пути притока подземных вод в систему трещин и, соответственно, сложно обосновать эксплуатационные запасы подземных вод. В статье с применением геофильтрационной модели Жашковского месторождения подземных вод рассмотрено увеличение производительности водозабора в водовмещающих кристаллических породах в результате усиления их трещиноватости искусственным способом. Этот способ в гидрогеологии применяется при попытках увеличения проницаемости вокруг скважинного пространства, но как один из методов искусственного пополнения запасов подземных вод водовмещающих кристаллических пород используется крайне редко. Исследованы типичные условия водозаборов в кристаллических трещиноватых водовмещающих породах для увеличения производительности способом взрыва. Искусственное увеличение трещиноватости может существенно увеличить производительность водозабора. Описаны основные методы использования взрывчатых веществ как пример искусственного увеличения трещиноватости при решении гидрогеологических задач и механизмы трещинообразования во время действия взрыва.

**Ключевые слова:** подземные воды, водообильность, моделирование, трещиноватые кристаллические породы, скважины, взрывные работы.