

УДК 512.546

ПРОТИАВАРІЙНІ ЗАХОДИ НА ДІЛЯНЦІ ПІВНІЧНО–КРИМСЬКОГО КАНАЛУ (162 км), ДЕ В ГРУНТОВИХ ОСНОВАХ РОЗПОВСЮДЖЕНІ ГІПСИ

А. І. БІЛЕУШ, Т. В. ЛІТВІНЧУК, І. А. ОМЕЛЬЧЕНКО

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

Одержано 20.09.2005

Запропоновано комплекс протиаварійних заходів на основі моделювання процесів фільтрації на комп'ютері з використанням програми "Kust". Споруди та заходи, які прийняті, забезпечують підвищення стійкості укосів каналу. Комплекс протиаварійних заходів було виконано на 162 км Північно-Кримського каналу (ПКК) для запобігання аварії, підвищення коефіцієнта стійкості укосів дамби каналу та зменшення фільтраційних витрат. Враховуючи дані натурних спостережень, проаналізовано ефективність споруд комплексу.

Предложен комплекс противоаварийных мероприятий на основании моделирования процесса фильтрации на компьютере с использованием программы "Kust". Выбранные сооружения и мероприятия обеспечивают повышение устойчивости откосов канала. Комплекс противоаварийных мероприятий был выполнен на 162 км Северо-Крымского канала (СКК) с целью предотвращения аварии, повышения коэффициента устойчивости откосов дамбы канала и уменьшения фильтрационных потерь. По данным натурных наблюдений проанализирована эффективность сооружений комплекса.

Is proposed complex anti-damage measures on the basis of simulation of a straining action on digital computer with usage of the program "Kust". Selected buildings and the measures ensure a stability improvement of slopes of the channel. The complex anti-damage of measures was carried out on 162 km of the North-Crimean channel (NCC) with the purpose of prevention(exclusion) of failure, heightening of a stability factor of slopes of a dam of the channel and diminution of filtration losses. On data of full scale observations the effectiveness of buildings of a complex is parsed.

ВСТУП

Будівництво гідротехнічних споруд у межах розповсюдження в ґрунтових основах порід, що включають гіпси, завжди вимагало уваги до конструкції споруд та їх експлуатації в часі. При будівництві таких споруд змінюється гідродинамічний режим ґрунтових вод. В масив ґрунтових основ, що включають гіпси, інфільтруються води, недонасичені сульфатом кальцію. Такі ґрунтові води створюють умови для інтенсивного розчинення гіпсу. З часом збільшується тріщинуватість і водопроникливість порід, що викликає збільшення швидкості ґрунтових вод. Таке явище веде до підвищення інтенсивності розчинення гіпсів, активізує суфозію, фільтраційні деформації, а в межах наявності в масиві ґрунту дотичних напруг – до розвитку зсувних деформацій. Наведемо декілька прикладів з світової практики будівництва гідротехнічних споруд на ділянках, де в основах були присутні гіпси. В провінції Провансаль (Франція) під час відкриття котловану під греблю були відкриті мергелі, які включали гіпси. Подальше будівництво гідротехнічних споруд було зупинено. У Франції були також зупинені пошукові роботи під будівництво греблі Ріан і греблі в місцевості Альтер, де в ґрунтових основах були присутні гіпси.

Такі самі випадки мали місце в Німеччині, Іраку, США. Деякі спеціалісти вважають неприпустимим будувати гідротехнічні споруди на ґрунтових основах, які в своєму складі мають гіпси [1].

1. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз особливостей фільтрації води в умовах інтенсивного техногенного впливу показує, що процеси суфозії і кольматажу значно впливають на формування структури порового простору, фільтраційні і механічні властивості ґрунтів. Тривалій розвиток процесів хімічної та механічної суфозії може викликати збільшення водопроникності ґрунту, втрату його міцності та стійкості. Такі явища приводять до опущення і навіть провалів поверхні землі, які спричиняють аварії і повне руйнування гідротехнічних споруд, будинків і різних інженерних комунікацій з важкими екологічними наслідками [2, 3].

2. ІНЖЕНЕРНО–ГЕОЛОГІЧНІ ТА ГІДРОГЕОЛОГІЧНІ УМОВИ ДІЛЯНКИ КАНАЛУ

Інженерно-геологічні умови ділянки ПКК від

ПК 1620 до ПК 1624 (правостороння дамба) в геоморфологічному відношенні характеризуються її положенням у межах Присивашської акумулятивної низовини. Поверхня землі полого, із перепадом абсолютних відміток від 0.5 до 8.0 м.

Гідрогеологічні умови

В межах ділянки протифільтраційних заходів знаходяться три водоносних горизонти:

- в четвертинних відкладах;
- у відкладах кимерій–куяльницького ярусу;
- у вапняках понтичного ярусу.

З точки зору даних досліджень інтерес представляє водоносний горизонт у четвертинних відкладах. Цей водоносний горизонт залягає на глибинах 0.25÷5.0 м. Ухил ґрунтового потоку має орієнтацію в сторону озера Сиваш. Глибина залягання рівня горизонту в межах правої дамби. Цей водоносний горизонт залягає на глибинах 7.0÷9.5 м. Відносним водопором є важкі суглинки, регіональним – пліоцен–нижньочетвертинні глини. Горизонт безнапірний. Живлення відбувається за рахунок фільтрації з каналу та атмосферних опадів. Мінералізація води коливається в межах 2.1÷6.02 ‰. Води сульфатні і сульфатно–хлоридні, магнієво–кальцієво–натрієві. Мінералізація води в каналі 0.4÷0.5 г/л. Вода сульфатно–гідрокарбонатно–хлоридна, кальцієво–магнієва. Будівництво ПКК дещо змінило гідрогеологічні умови на даній ділянці, особливо в четвертинних відкладах. Фільтрація води з каналу привела до періодичного підйому горизонту води, з'явилися підтоплені ділянки, виходи води на денну поверхню, на деяких ділянках виникали прориви дамб, активізувалась хімічна та механічна суфозія в загіпсованих породах. В наслідок розвитку таких явищ розвивались просідання ґрунтів та фундаментів споруд. Свідченням подібних явищ стали події, що відбулися в жовтні місяці 2002 року в створі ПК 1621 ПКК.

Гіпсоносні породи в основах

Будівництво каналу в межах розповсюдження в ґрунтових основах порід вимагало проведення спеціальних інженерних та інженерно–геологічних досліджень. Перед початком будівництва Північно–Кримського каналу та греблі Феодосійського водосховища в Інституті гідромеханіки НАН України були проведені значні дослідження впливу гіпсів на надійність роботи ґрунтових основ гідротехнічних споруд.

Дослідженнями було встановлено, що при будівництві каналу зміниться гідродинамічний режим ґрунтових вод. У масив ґрунтових основ, що включають гіпси, будуть інфільтруватися води, недонасені сульфатом кальцію. Такі ґрунтові води

створять умови для інтенсивного розчинення гіпсу. З часом таке явище збільшить тріщинуватість і водопроникливість порід, що викличе збільшення швидкості ґрунтових вод, інтенсивність розчинення гіпсів, призведе до суфозії і фільтраційних деформацій.

Для зменшення негативних наслідків таких явищ було запропоновано на ділянках наявності в основах гіпсів стінки і дно каналу прокривати надійним протифільтраційним екраном.

Інженерно–геологічні умови

У геологічній будові даної ділянки приймають участь сучасні елювіальні відклади (eIV), які з поверхні (а також під дамбою) перекриті ґрунторослинним шаром, суглинками середніми, темно–брунатно–сірими, гумусоватими, із коренями рослин, потужністю 0.2÷0.6 м, рідко до 1.0 м.

Тіло дамби складають сучасні техногенні утворення (tIV) – насипні ґрунти: перевідкладені лесовидні суглинки, середні червонувато та бурувато–брунатні, із включенням подових відкладів, карбонатів (до 15.1 ‰), слабо загіпсовані (3.3 ‰), слабо–засолені, напівтверді та тугопластичні. Потужність насипу збільшується від ПК 1618+80 до труби № 4 відповідно з 4.7 до 13.2 м.

Нижче по розрізу залягають середньочетвертинні еолово–делювіальні (vd – II) суглинки, лесовидні жовто–брунатні суглинки з включенням карбонатів до 14 ‰, загіпсовані до 13.3 ‰, сильно засолені, потужність відкладів до 3.6 м.

На ділянці також мають місце подові відклади: суглинки важкі зеленувато–сірі з включенням карбонатів (~ 21.1 ‰) та гіпсу (~ 4 ‰). Нижче залягають нижньочетвертинні еоло–делювіальні (vdI) лесовидні суглинки середні й важкі, червонувато–коричневі, з включенням карбонатів (15.7 ‰ і 13.9 ‰) та гіпсу (3.5 ‰). Консистенція середніх суглинків м'якопластична й тугопластична; важких – від піропластичної до напівтвердої. Потужність відповідно 2.4÷3.7 м та від 2.2 м до 10 м і більше.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для встановлення впливу каналу на динаміку ґрунтових вод і розвиток процесів суфозії розглянемо наступну математичну модель [4, 5]. Основою для побудови моделі фільтрації ґрунтових вод з врахуванням факторів і процесів механічної суфозії є рівняння руху і нерозривності рідини, конвективної дифузії, зважених частинок і масообміну, а також експериментальні співвідношення, що виражають закон опору і залежність коефіцієнта

фільтрації від концентрації осаду.

У випадку лінійної фільтрації однокомпонентної рідини ці рівняння можна записати в наступному загальному виді:

$$\mu_e \frac{\partial H}{\partial t} = \operatorname{div} (k(\sigma) \operatorname{grad} H), \quad (1)$$

$$\frac{\partial(nC)}{\partial t} = \operatorname{div} (D \operatorname{grad} C - \bar{V} C) - \frac{\partial \sigma}{\partial t}, \quad (2)$$

де $\bar{V} = -k(\sigma) \operatorname{grad} H$,

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = f(C, \sigma, C_{\max}, \sigma_{\max}, \eta_1 \dots \eta_N), \quad (3)$$

де t – час; $H = H(x, y, z, t)$ – гідродинамічний напір; $C = C(x, y, z, t)$ – масова концентрація зважених дрібнодисперсних забруднень; $\sigma = \sigma(x, y, z, t)$ – масова концентрація осаду; \bar{V} – вектор швидкості фільтрації; μ_e – коефіцієнт пружної ємності шару; n – пористість ґрунту; $k(\sigma)$ – коефіцієнт фільтрації, що залежить від концентрації осаду; C_{\max} , σ_{\max} – максимальні концентрації забруднень у поровому розчині і твердій фазі; D – коефіцієнт конвективної дифузії; η_1, \dots, η_N – експериментальні коефіцієнти.

Рівняння кінетики (3) описує різні випадки масообміну зважених у фільтраційній воді часток з матеріалом пористого середовища, причому аналіз літературних джерел [6-7] показав, що для опису суфозії ґрунту найчастіше використовуються характерні рівняння нерівновагової оборотної фізичної адсорбції і десорбції (кольматації і суфозії).

Для однозначного визначення невідомих функцій з використанням рівнянь задаються початкові і граничні умови, що для характерних випадків фільтрації і масопереносу розглянуті в цитованих роботах.

Розв'язання розглянутих вище нелінійних рівнянь фільтрації, масопереносу і масообміну для практичних задач отримані на основі використання наближених чисельних методів.

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ГРУНТОВИХ ВОД З КАНАЛУ

Для розв'язання записаних вище рівнянь застосовано метод кінцевих елементів (елементи трикутні). Профільна нестационарна задача вирішувалась при напірному і безнапірному режимах. При нестационарному режимі положення вільної поверхні змінюється в часі відповідно до рішення рівняння (1)–(3).

Реалізації алгоритму чисельного розв'язання задачі здійснена на персональному комп'ютері за допомогою обчислювальної програми.

Для розв'язання задачі створюється розрахункова модель на основі спрощеного розрахункового інженерно-геологічного поперечника. В розрахунковій моделі проводять апроксимацію плавних кривих границь інженерно-геологічних елементів (ІГЕ) ламаними лініями. Кількість ІГЕ спрощується до мінімуму, поєднуючи шари з близькими коефіцієнтами фільтрації в один елемент. Контур кожного ІГЕ на схемі показується безупинною, замкнутою послідовністю відрізків. Опис контуру відбувається шляхом уведення координат вузлових точок контуру за чи проти стрілки годинника. Для розрахункової моделі по контуру фільтрації задаються граничні умови. Поняття контур фільтрації співпадає з границями масиву, де рухається фільтраційний потік.

Розв'язання задачі на комп'ютері проводиться після визначення границь, через які вода надходить до схеми, границь відтоку води зі схеми, границь, по яких вирізували розрахунковий поперечник з масиву, і приблизно установлюють границю вільної поверхні (крива депресії). На розрахунковій схемі ці границі повинні бути відображені замкнутим ланцюжком відрізків.

Для запобігання руйнуванню укосів дамб каналу згідно рішення технічної ради Держводгоспу від 04.12.2002 року були вирішені вказані нижче задачі, розроблено та виконано низку протифільтраційних заходів.

Моделювання роботи дренажів та протифільтраційного екрана каналу виконано на ПК. Розрахункова схема розроблялась для кожного інженерно-геологічного розрізу. Апроксимація здійснювалась з метою спрощення опису ІГЕ числами. Зміст апроксимації полягає в заміні плавних кривих – границь між окремими інженерно-геологічними елементами – ламаними лініями. Точки перелому і перетинання ліній задаються двома координатами. При описі схеми контур кожного ІГЕ представляють у виді замкнутої послідовності координат вузлів. Після відображення розрахункового поперечника на кресленні пронумеровують його інженерно-геологічні елементи.

На внутрішнім джерелі задавалася величина напору усередині контуру фільтрації. Таким джерелом у межах досліджуваних схем був недосконалий дренаж. Якщо джерело торкається крива депресії навіть у процесі рішення задачі, то такі точки перестають бути джерелом. Для них граничні умови задаються за правилами, що наведені вище. Джерело завжди повинно бути нижче кривої де-

пресії і розташовуватися усередині контуру фільтрації.

Поза контуром фільтрації можуть задаватися величини інфільтрації й випаровування. Величини інфільтрації чи випаровування задаються питомими (на 1 м довжини відрізка) витратами на відрізках, які розташовані поза контуром фільтрації. При дослідженні фільтрації води з ППК величини інфільтрації і випаровування внаслідок їх незначних величин не враховувались.

Моделювання роботи дренажів на ділянці каналу від ПК 1620 до ПК 1624 та оцінка впливу виходу з ладу дренажу на динаміку рівнів ґрунтової води проводилась для шести інженерно-геологічних розрізів.

Дослідження виконувались з використанням матеріалів інженерно-геологічних досліджень та розрізів, складених ВАТ “Укрводпроект”.

Розрахункові схеми для кожного інженерно-геологічного профілю та граничні умови задачі розроблені на основі використання положень, указаних вище. Конструкція протифільтраційного екрану в межах розрахункових схем моделювалась шаром глинистого ґрунту на укосі та дні каналу. Товщина такого шару та величина коефіцієнта фільтрації розраховувались на основі рівності фільтраційних опорів шару глинистого ґрунту і реального екрану.

Результати досліджень характеру руху ґрунтових вод з каналу по поперечному профілю 2 – 2 при наповненні його до позначки 11.4 приведені на рис 1.

5. ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ УКОСІВ КАНАЛУ

Розрахунки стійкості укосів дамб каналу проведені за схемами, що побудовані відповідно до скорегованих інженерно-геологічних розрізів для дослідження фільтрації. Абсолютні позначки поверхні землі й дна котловану у межах окремих розрізів коливаються від 13.4 до 0.6 м у нижній частині ділянки. Відповідно ДБН В.1.1.3-97 “Інженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення” для безпеки функціонування об’єкта, який експлуатується, величина коефіцієнта стійкості окремих ділянок повинна складати не менше 1.25.

Розрахунки стійкості укосів дамб каналу в межах ділянки ППК при прогнозованих рівнях ґрунтової води, що визначені на основі досліджень фільтрації води з каналу, виконані на комп’ютері з використанням програми “Kust”.

Після введення до комп’ютера необхідної ін-

формації (положення в розрізах інженерно-геологічних елементів, даних прогнозованого рівня ґрунтових вод, розрахункових характеристик ґрунтів, навантажень на гребінь каналу та ін.) й запуску програми виконуються розрахунки стійкості укосу по сотнях поверхонь ковзання. До друку видаються дані коефіцієнта стійкості по десятках поверхонь ковзання, для яких величина коефіцієнта стійкості є меншою з усієї сукупності. Серед сотень поверхонь ковзання обчислювальна програма знаходить найбільш імовірну поверхню, для якої коефіцієнт стійкості найменший. Розрахункова схема для окремих перерізів будується за такими самими правилами, що вказані вище для розрахункової схеми по дослідженню фільтрації. Вона складається з геометричного образу, подібного до вказаного розрізу, для якої задана геометрія інженерно-геологічних елементів (ІГЕ). Дія механізмів у межах їх розміщення для окремої схеми задається окремими елементами з ґрунту, вага яких по підшві відповідає заданим навантаженням.

Для оцінки ефективності запланованих заходів по забезпеченню стійкості укосів каналу виконані розрахунки величини коефіцієнта стійкості для згаданих умов. В якості заходів, що підвищують величину коефіцієнта стійкості укосів каналу, враховані протифільтраційний екран, горизонтальний закритий дренаж, горизонтальний відкритий дренаж та привантаження укосів каналу чи автомобільної дороги. Для окремих розрахункових схем на основі вирішення задачі стійкості укосу каналу встановлювались перелік необхідних протиаварійних заходів, позначки дренажу, об’єми контрбанкету та ін.

ВИСНОВКИ

На основі проведених розрахунків і моделювання роботи каналу при найвищих горизонтах води в ППК були запропоновані необхідні конструктивні заходи. Аналіз результатів моделювання дозволив встановити наступне:

- якісний протифільтраційний екран та закритий горизонтальний дренаж підтримують необхідну глибину ґрунтових вод у дамбі і прилеглий території, забезпечують незначні величини градієнтів фільтраційного потоку, при яких не розвивається механічна суфозія, що забезпечує нормативну величину коефіцієнта стійкості укосів дамб каналу;
- при якісному протифільтраційному екрані усталений рівень горизонту ґрунтових вод не всти-

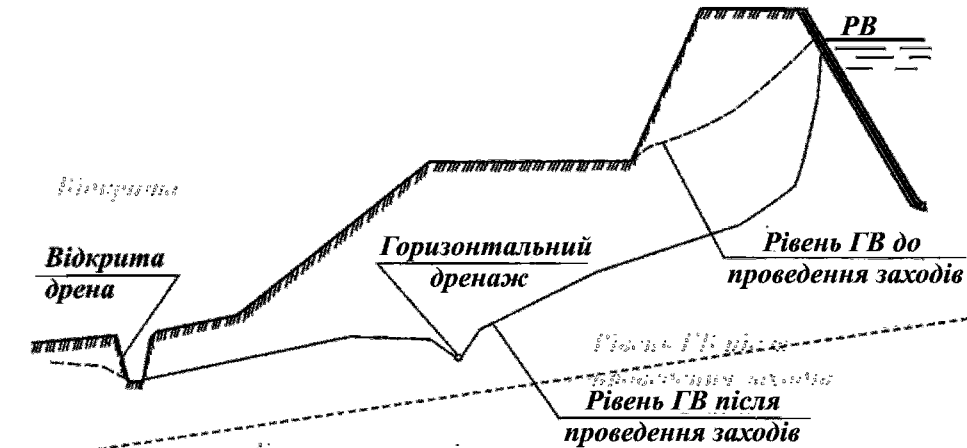


Рис. 1. Дослідження фільтрації води з каналу по профілю 2 – 2

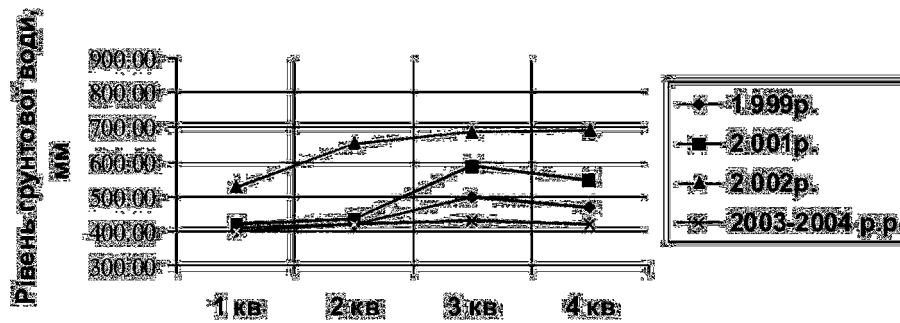


Рис. 2. Динаміка рівнів ґрунтової води в свердловині за 1999–2003 рр.

гає сформуватись. При цьому рівні ґрунтових вод займають нижче положення, що підвищує величину коефіцієнта стійкості укосів дамб каналу;

– при виході з ладу горизонтального закритого дренажу рівні ґрунтових вод у дамбі і на прилеглий території дещо підіймаються, що призводить до зменшення величини коефіцієнта стійкості каналу.

На основі проведених досліджень виконані наступні конструктивні заходи:

– влаштовано піскоцементний екран під бетонним покриттям каналу. Екран було створено за рахунок закачування під тиском піскоцементного розчину у свердловини, що розбурювались в плитах кріплення;

– ґрунтова призма – привантаження зовнішнього укосу дамби каналу;

– відкритий дренажний канал;

– перебудова ділянки закритого дренажу (від колодязя № 3 до колодязя № 6).

Для спостереження за рівнем ґрунтових вод було обладнано три режимно-спостережних створи.

Нагляд за рівнем ґрунтових вод на вказаній ділянці каналу після завершення робіт по протифільтраційним заходам проводить Кримська гідрогеолого-меліоративна експедиція. Дані спостережень за рівнями ґрунтових вод в окремі роки наведені на рис. 2.

На основі даних спостережень за рівнем ґрунтових вод та аналізу динаміки нестационарного фільтраційного потоку, порівнянні положення нестационарних рівнів ґрунтових вод до і після проведених заходів, виконаний аналіз гідрохімічного режиму ґрунтових вод дамби дає можливість стверджувати:

– динаміка рівнів ґрунтової води, яка зафіксована по свердловинам № 2^а та № 3^а на ПК 1619+73 показує, що після влаштування протифільтраційних заходів рівні ґрунтових вод на один і той же час (в порівнянні 2002 і 2003 роки) понизились на 0.7÷1.0 м;

– на вересень 2002 року мала місце заболоченість території між дамбою каналу і насипом залізничної дороги. На вересень 2003 р. та 2004 р. рі-

вень ґрунтових вод не піднявся до позначки закритої дрени, яка в період експлуатації каналу після проведення протиаварійних заходів була постійно сухою. Відкрита дрена, що розташована ближче до залізниці, теж практично суха;

– окремі ділянки дамби каналу (п'єзометр Р-1 та Р-13), де має місце локальне підняття рівня ґрунтової води, що пов'язано з особливостями будови тіла дамби, в цілому не загрожують порушенню стійкості укосів;

– зменшується мінералізація ґрунтових вод і спостерігається зміна хімічного складу – з хлоридно-сульфатно-кальцієво-магнієво-натрієвого на сульфатний натрієво-кальцієвий.

Аналіз динаміки рівнів та гідрохімічного складу ґрунтових вод у дамбі і приканальній зоні дає можливість стверджувати, що проведені протифільтраційні заходи дали позитивні результати і дамба каналу в межах ПК 1619 – 1624 на сьогодні знаходиться в задовільному стані.

1. Максимович Г. А., Горбунова К. А. Карст Пермской области.– Пермь: Недра, 1953.– 121 с.
2. Аравин В. И., Носова О. Н. Натурные исследования фильтрации.– Л.: Энергия, 1969.– 255 с.
3. Гавшина З. П., Дзекцер Е. С. Условия подтопления ґрунтовыми водами застраиваемых территорий.– М.: Стройиздат, 1982.– 116 с.
4. Кремез В. С. Моделирование влияния кольматации ґрунта на уровень ґрунтовых вод при фильтрации из водохранилища // Гидравлика и гидротехника.– К.: Техніка.– 1999.– Вип. 60.– С. 67–71.
5. Поляков В. Л. Механічна суфозія ґрунтів при роботі дренажу в режимі зволоження // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки.– К.– 2003.– Вип. 1.– С. 102–107.
6. Веригин Н. Н., Васильев С. В., Саркисян В. С., Шержуков Б. С. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород.– М.: Недра, 1977.– 271 с.
7. Алексеев В. С., Коммунар Г. М., Шержуков Б. С. Массоперенос в водонасыщенных горных породах // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. Гидрогеология. Инженерная геология.– М.– 1989.– N 11.– С. 1–142.