

8.4.

НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ

12695A

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ПРОНСЬКИЙ Дмитро Володимирович

УДК 622.257.1

**ОБҀРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТАМПОНАЖУ ЗОН  
РОЗУЩІЛНЕННЯ ПОРОДНОГО МАСИВУ  
В'ЯЗКОПЛАСТИЧНИМИ РОЗЧИНАМИ**

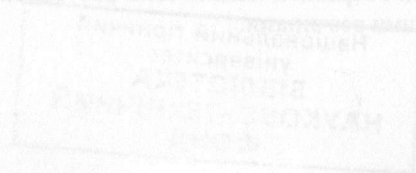
Спеціальність: 05.15.09 – «Механіка ґрунтів та гірських порід»

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2006



418

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі будівельних геотехнологій та гірничих споруд Донбаського державного технічного університету Міністерства освіти і науки України (м. Алчевськ).

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Должиков Петро Миколайович**,  
професор кафедри будівельних геотехнологій та гірничих споруд Донбаського державного технічного університету Міністерства освіти і науки України (м. Алчевськ).

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Власов Сергій Федорович**,  
професор кафедри підземної розробки родовищ Національного гірничого університету Міністерства освіти і науки України (м. Дніпропетровськ);

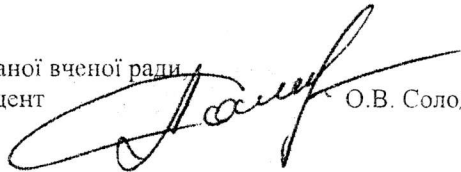
кандидат технічних наук, доцент  
**Пшеничний Юрій Олександрович**,  
заступник головного інженера ДВАТ «Донецькшахтопрохідка» Міністерства вугільної промисловості України (м. Донецьк).

**Провідна установа:** Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, відділ механіки гірських порід.

Захист відбудеться « 9 » червня 2006 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.04 для захисту дисертацій при Національному гірничому університеті Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпропетровськ, пр. К. Маркса, 19, т. 47-24-11).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного гірничого університету Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпропетровськ, пр. К. Маркса, 19).

Автореферат розісланий \_\_\_\_\_ 2006 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доцент  
 О.В. Солодянін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Тривала експлуатація об'єктів підземного та гідротехнічного будівництва, інтенсивна розробка енергетичної, хімічної і будівельної сировини в Україні, а також ряд інших причин зумовлюють зміну первісної гідро- і геодинаміки приповерхневої частини Земної кори. У результаті цього відбувається зміна фізико-механічних властивостей порід в локальних зонах гірського масиву. Утворюються ослаблені, водопроникні, розущільнені зони. У масиві порід гірничих та гідротехнічних об'єктів такі зони мають хаотичне розташування, локальну структуру і проявляються, як правило, у слабких дисперсних породах (піщаних, глинистих). При дослідженні таких зон методами геофізики вони проявляються як аномальні сплески в порівнянні із загальним фоном. Розвиток розущільнених зон в інженерній споруді або поблизу її, безумовно, сприяє розвитку аварійної ситуації. Для стабілізації масиву й запобігання аварійної ситуації необхідно перевести ослаблену, розущільнену зону до її первісних властивостей. Найбільш доцільним з техніко-економічної точки зору є спосіб тампонажу в'язкопластичним розчином з гідророзчленуванням ослабленої зони. Такий спосіб ліквідації розущільнених зон породного масиву може бути реалізований із використанням наукових основ і технологічних принципів комплексного методу тампонажу гірських порід.

У зв'язку із цим, актуальною науково-технічною задачею є обґрунтування технологічних параметрів тампонажу, які дозволять гарантовано стабілізувати розущільнену зону, шляхом консолідації порід і переведення їх до первісних властивостей.

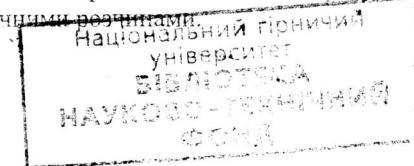
**Науковою задачею роботи** є встановлення закономірностей зміни фільтраційних і міцнісних властивостей порід розущільненої зони у процесі її тампонажу в'язкопластичними розчинами.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до координаційного плану держбюджетних тем Міністерства освіти і науки України № 39 за напрямком «Гірничі науки», тема 112 «Розробити наукові основи нової техніки і технології підземного видобутку вугілля» (№ держреєстрації 01198U0000882) і згідно наказу Міністерства промислової політики України № 221 від 15.05.02 р. по темі «Розробити комплексний проект консервації рудника № 2 і рекультивувати порушених земель Стебницького ДГХП «Полімінерал»».

**Мета і задачі досліджень.** Мета роботи полягає в обґрунтуванні технологічних параметрів тампонажу розущільнених зон масиву гірських порід в'язкопластичними розчинами для забезпечення надійності та екологічної безпеки інженерних об'єктів.

Для досягнення поставленої мети в дисертації ставляться і вирішуються наступні задачі:

1. Виконати аналіз властивостей і особливостей прояву розущільнених зон у породних масивах. Розробити модель зони розущільнення й процесу її тампонажу в'язкопластичними розчинами.



2. Дослідити процес течії в'язкопластичного розчину в каналі гідророзриву, а також технологічні параметри тампонажу зон розуцільнення.

3. Установити залежності основних фільтраційних та міцнісних властивостей розуцільнених порід від технологічних параметрів нагнітання тампонажного розчину.

4. Розробити методику проектування технологічних параметрів тампонажу зон розуцільнення в'язкопластичними розчинами та впровадити її на практиці.

**Об'єкт досліджень** – технологія ліквідації зон розуцільнення способом тампонажу в'язкопластичними розчинами.

**Предмет досліджень** – властивості розуцільнених зон залежно від технологічних параметрів тампонажу.

**Ідея роботи** полягає у використанні закономірностей процесу консолідації розуцільнених зон для обґрунтування технологічних параметрів їх тампонажу в'язкопластичними розчинами.

**Методи досліджень.** Для досягнення мети і вирішення задач, поставлених у даній дисертації, був виконаний комплекс теоретичних та експериментальних досліджень, що включає аналіз й узагальнення спеціалізованої літератури в даній області, проведення аналітичних, лабораторних і стендових експериментів, натурних досліджень і статистичний аналіз отриманих результатів. В області теоретичних досліджень розглядалися теорії підземної гідродинаміки, механіки ґрунтів, математичного моделювання. Для експериментальних досліджень застосовувалися лабораторні методи визначення інженерно-геологічних властивостей порід і властивостей тампонажних розчинів, моделювання процесу тампонажу розуцільнених зон на спеціальному стенді. Обробка експериментальних даних виконувалася на ПЕОМ методами математичної статистики та кореляційно-регресійного аналізу.

**Наукові положення,** які виносяться на захист:

1. Гідродинамічний вплив в'язкопластичного розчину на розуцільнену зону при тиску до 8 МПа приводить до зміни фізико-механічних властивостей ґрунту за рахунок формування системи фільтраційних каналів й ущільнення скелета ґрунту, причому тиск ін'єкції лінійно розподіляється уздовж каналу течії розчину, а усі властивості ґрунту взаємозалежні й визначаються значенням початкового коефіцієнта деконсолідації, що дозволяє детерміновано описати процес ін'єкції ґрунту.

2. Змінення фільтраційних і міцнісних властивостей ґрунтів розуцільнених зон у процесі їх тампонування в'язкопластичними розчинами залежить від тиску нагнітання й описується експоненційною та поліноміальною функціями, що включають коефіцієнт деконсолідації ґрунту, який змінюється від 1.4 до 1.0, що відповідає змінню фільтраційних властивостей ґрунту в 5-30 разів, а міцнісних – в 2-4 рази і дозволяє оцінити ступінь ущільнення деконсолідованої зони.

**Наукова новизна роботи** полягає в наступному:

- уперше уведений критерій оцінки ступеня розуцільненості піщано-глинистих порід – коефіцієнт деконсолідації, який дорівнює відношенню об'єм-

ної ваги скелета ґрунту в нормальному стані до об'ємної ваги скелета в розуцільненому стані;

- розроблена модель зони розуцільнення і уперше встановлена залежність коефіцієнта деконсолідації ґрунту від радіуса поширення розчину й тиску в каналі гідророзривування розуцільненої зони;

- вирішена задача про течію в'язкопластичного розчину в каналі гідророзривування й установлена залежність радіуса поширення розчину від перепаду тиску в каналі розриву розуцільненої зони;

- уперше встановлені емпірію-аналітичні залежності коефіцієнта деконсолідації, коефіцієнта фільтрації, зчеплення й кута внутрішнього тертя від тиску нагнітання розчину та початкового коефіцієнта деконсолідації розуцільненої зони.

**Обґрунтованість і достовірність** наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується застосуванням апробованих положень і законів підземної гідродинаміки, механіки ґрунтів, реології в'язкопластичних систем, методів математичного моделювання; застосуванням точних вимірювальних приладів і стандартних методів експериментальних досліджень; задовільною збіжністю лабораторних і натурних результатів досліджень (відносна похибка не більше 14 %); позитивними результатами промислових випробувань технології тампонажу розуцільнених зон на основі розробленої методики проектування.

**Наукове значення роботи** полягає у встановленні закономірностей зміни основних фільтраційних і міцнісних властивостей порід розуцільненої зони (коефіцієнта деконсолідації, коефіцієнта фільтрації, зчеплення й кута внутрішнього тертя) у процесі її тампонажу в'язкопластичними розчинами.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає в розробці методики проектування технологічних параметрів тампонажу зон розуцільнення в'язкопластичними розчинами.

**Реалізація результатів досліджень:**

- методика проектування технологічних параметрів тампонажу зон розуцільнення використовується у спеціалізованих тампонажних організаціях;

- методика проектування технологічних параметрів тампонажу розуцільнених зон успішно впроваджена на руднику №2 Стебницького ДГХП «Полімінерал» у період його консервації;

- результати досліджень використовуються в навчальному процесі при підготовці студентів ДонДТУ.

**Особистий внесок автора** в розробку наукових результатів, які виносяться на захист, полягає у визначенні мети, ідеї роботи і задач дослідження, наукових положень; критичному аналізі наукових джерел; проведенні теоретичних та експериментальних досліджень; участі у впровадженні результатів досліджень у практику тампонажних робіт.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення й результати дисертації доповідалися і були схвалені на науково-практичній конференції «Інженерний захист територій та об'єктів у зв'язку з розвитком небезпечних геологічних процесів» (Гурзуф, 2002 р.), науково-практичній конференції «Практика виконання державної експертизи інвестиційних програм і проєктів будівництва;



шлихи та методи її удосконалення» (Ялта, 2003 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Уголь – Mining Technologies 2003» (Алчевськ, 2003 р.), міжнародній конференції «Форум гірників – 2004» (Дніпропетровськ, 2004 р.), регіональній науково-практичній школі-семінарі «Прогресивні технології будівництва, безпеки і реструктуризації гірничих підприємств» (Донецьк, 2005 р.), наукових семінарах кафедри будівельних геотехнологій і гірничих споруд ДонДТУ (Алчевськ, 2002-2005 р.р.).

**Публікації.** По темі дисертації автором опубліковані 8 друкованих праць, у тому числі статей у спеціалізованих журналах, затверджених ВАК України – 3, доповідей у збірниках матеріалів конференцій -- 5.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота містить вступ, 4 розділи і висновки; 40 рисунків, 22 таблиці, перелік використаних джерел із 105 найменувань і 2 додатків; викладена на 115 сторінках машинописного тексту, загальний обсяг роботи 152 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета і задачі досліджень, наведені наукові положення, які виносяться на захист, а також дані щодо апробації і публікації результатів досліджень.

У першому розділі проаналізовано стан питання утворення й розвитку зон розуцільнення, способів їх виявлення і параметризації, а також можливих ін'єкційних способів їх ліквідації.

Розглянуто основні причини утворення й розвитку зон розуцільнення у породних масивах. Сюди входять причини пов'язані як із природними, так і з антропогенними факторами: розчинююча і вимиваюча діяльність поверхневих та підземних вод (карстоутворення і суфозія), вивітрювання порід, тектонічні процеси у земній корі, первісні умови формування порід та інженерна діяльність людини. Зараз, у зв'язку із активним та інтенсивним впливом людини на гірський масив, домінуючою причиною утворення й розвитку розуцільнених зон є техногенний фактор, пов'язаний з гідротехнічним будівництвом, підземною і відкритою розробкою родовищ, підземним будівництвом і т.д. При цьому активний розвиток і поширення розуцільнених зон відбувається, як правило, на невеликих глибинах (до 70-80 м) у дисперсних піщано-глинистих породах, які характеризуються сильною стискальністю й невеликими структурними зв'язками між мінеральними частками. У масиві порід розуцільнені зони розташовуються хаотично, мають локальну структуру і змінні фізико-механічні властивості. У порівнянні з породами нормального масиву, породи таких зон характеризуються підвищеними фільтраційними і знизженими міцнісними властивостями.

Якісна та кількісна параметризація зон розуцільнення у гірських масивах може здійснюватися різними геофізичними і інженерно-геологічними способами. Проаналізовано найпоширеніші каротажні й некаротажні методи виявлення й параметризації зон розуцільнення: електричний, радіоактивний, акустичний, ядерний і витрагометричний каротаж, гравіметрія, магнітодинамічна інтроско-

пія. Найбільш прогресивними й перспективними в цьому ряді є магнітодинаміка і гравіметрія, які володіють досить високою інформативністю, оперативністю, відсутністю свердловинної мережі й простотою.

У практиці шахтного, підземного і гідротехнічного будівництва з метою зміцнення й водоізолювання порід широко застосовуються ін'єкційні, бурін'єкційні та фізико-хімічні способи впливу на масив. Розробкою й обґрунтуванням цих способів займалися такі вчені як Айтматов Н.Г., Адамович А.М., Дуда Е.Г., Трупак Н.Г., Кіпко Е.Я., Максимов О.П., Бондаренко В.І., Усаченко Б.М., Власов С.Ф., Должиков П.М., Камбефор А., Гальченко П.П., Попов О.Б., Половев Б.Д., Спічак Ю.Н., Сиркін П.С., Хмяляйінев В.А., Шутчик М.М., Скричев В.І. і багато інших. Як показав аналіз, жоден із цих способів повністю не вирішує проблеми ліквідації локальних розуцільнених структур у дисперсних піщано-глинистих ґрунтах.

На основі комплексного методу тампонажу гірських порід запропоновано новий підхід до ліквідації зон розуцільнення методом напірних ін'єкцій з утворенням різнонаправлених каналів гідророзчленування, заповнення їх в'язкопластичним розчином і консолідацією скелета ґрунту. Причому результатом такого впливу буде стабілізація розуцільненої зони і її перехід до властивостей, близьких первісним. В якості тампонажного розчину прийнято в'язкопластичний глиноцементний розчин рецептури ДВАТ «Спецтампонажтехнологія», як матеріал, найбільш близький до піщано-глинистих порід, який надає усадок, небагато коштує і здатний забезпечити необхідні умови ін'єкції.

У другому розділі проаналізовані найбільш типові випадки розвитку розуцільнених зон на прикладах об'єктів підземного і гідротехнічного будівництва – гірських виробок неглибокого закладення, промислових відстійників і водоканалів. При цьому встановлено, що суглинки, супісці й піски є найбільш характерними породами, у яких утворюються й розвиваються зони розуцільнення.

Для комплексної оцінки стану й ступеня деструктуризації зони розуцільнення уведено новий критерій – коефіцієнт деконсолідації:

$$k_{\text{дк}} = \frac{\gamma_{\text{до}}}{\gamma_{\text{дн}}}, \quad (1)$$

де  $\gamma_{\text{до}}$  – об'ємна вага скелета ґрунту до розуцільнення, Н/м<sup>3</sup>;  $\gamma_{\text{дн}}$  – об'ємна вага скелета ґрунту в різних його станах (розуцільненому або ущільненому), Н/м<sup>3</sup>.

Для проведення аналітичних досліджень на основі гідрогео механічних процесів у гірському масиві розроблена модель зони розуцільнення й процес її тампонажу в'язкопластичними розчинами (рис. 1), яка характеризується наступними параметрами: потужністю деконсолідованої зони, ефективним та максимальним радіусами поширення тампонажного розчину і його тиском, а також потужністю еквівалентної порожнини розриву, тотожної розкриттю N-очисла каналів гідророзчленування й заповнених в'язкопластичним розчином.

При ін'єктуванні через свердловину в'язкопластичного розчину в розуцільнену зону в найбільш слабких місцях відбувається її гідророзчленування. Утворюються різнонаправлені канали розриву, які під дією перепаду тиску заповнюються в'язкопластичним розчином. При цьому, під дією тиску розчин

відбувається фільтраційне ущільнення ґрунтів розуцільненої зони та перехід їх з деконсолідованого стану в консолідований.

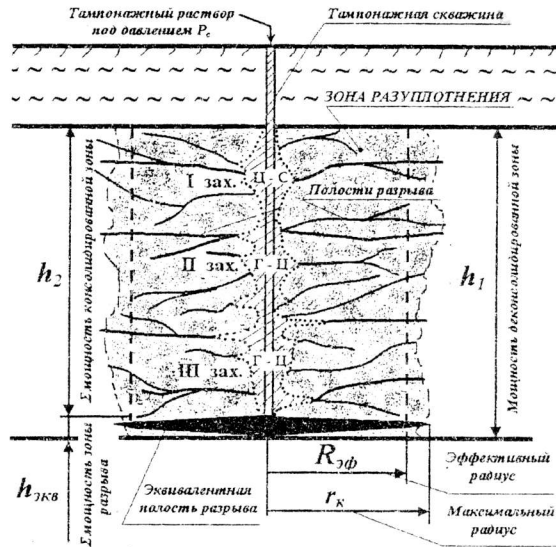


Рис. 1. Модель тампонажу розуцільненої зони в'язкопластичними розчинами

Відповідно до запропонованої моделі аналітично встановлений гірський тиск на стінки каналу розриву й величина його розкриття під дією тиску тампонажного розчину. Це дозволило вивчити процес течії в'язкопластичного розчину у пружно-пластичному каналі гідророзриву. Течія в'язкопластичної рідини підпорядковується реологічному закону Шведова-Бінгама й характеризується структурним ядром потоку. Вихідне рівняння течії в'язкопластичного розчину в каналі гідророзриву та граничні умови мають такий вигляд:

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\tau_0}{h_0} - \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha, \quad \begin{array}{l} \text{при } Q \rightarrow 0 \quad P(r_k) = P_k \\ \text{при } r = r_c \quad P(r_c) = P_c \end{array} \quad (2)$$

де  $dP$  – перепад тиску, Па;  $dr$  – радіус поширення розчину, який відповідає перепаду тиску  $dP$ , м;  $\tau_0$  – динамічне напруження зрушення тампонажного розчину, Па;  $h_0$  – ширина ядра потоку, м;  $\lambda_p$  – питома вага тампонажного розчину,  $\text{Н/м}^3$ ;  $\varphi$  – полярний кут розткання розчину, град.;  $\alpha$  – кут нахилу каналу розриву до вертикалі, град.

При цьому, як показали дослідження, залежність максимального радіуса поширення розчину від тиску нагнітання описується лінійною функцією й визначається наступним рівнянням:

$$r_k = \frac{(P_c - P_k) \cdot \delta_0 \cdot D}{2\tau_0 - \delta_0 \cdot D \cdot \lambda_p \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha} + r_c, \quad (3)$$

де  $P_c$  – тиск тампонажного розчину у свердловині, Па;  $P_k$  – гідростатичний тиск, Па;  $\delta_0$  – початкове розкриття каналу, м;  $D$  – безрозмірний комплексний параметр;  $r_c$  – радіус свердловини, м.

Потужність еквівалентної порожнини розриву буде визначатися потужністю деконсолідованої зони та відношенням коефіцієнтів деконсолідації:

$$h_{\text{екв}} = h_1 \cdot \left(1 - \frac{k_{02}}{k_{01}}\right), \quad (4)$$

де  $h_1$  – потужність деконсолідованої зони, м;  $k_{02}$  – коефіцієнт деконсолідації ґрунту після виробництва тампонажу;  $k_{01}$  – коефіцієнт деконсолідації розуцільненого ґрунту.

Тоді для ефективного впливу на розуцільнену зону ефективний тиск тампонажного розчину буде дорівнюватиме:

$$P_{\text{эф}} = \frac{h_{\text{екв}} \cdot \gamma_s}{h_1 \cdot m_0 \cdot \gamma_{d1}} = \frac{\gamma_s \cdot (k_{01} - k_{02})}{m_0 \cdot \gamma_{d0}}, \quad (5)$$

де  $h_{\text{екв}}$  – потужність еквівалентної порожнини розриву, м;  $\gamma_s$  – питома вага мінеральних часток ґрунту,  $\text{Н/м}^3$ ;  $m_0$  – коефіцієнт стискальності,  $\text{Па}^{-1}$ ;  $\gamma_{d1}$  – об'ємна вага скелета розуцільненого ґрунту,  $\text{Н/м}^3$ .

Виходячи з лінійного розподілу тиску розчину і як наслідок цього – лінійного розподілу коефіцієнта деконсолідації уздовж каналу розриву, установлені залежності ефективного радіуса поширення розчину і коефіцієнта деконсолідації від тиску:

$$R_{\text{эф}} = r_k - \frac{(P_{\text{эф}} - P_k) \cdot (r_k - r_c)}{P_c - P_k}, \quad (6)$$

$$k_{01} = k_{01} \cdot \left(1 - \frac{P_c \cdot m_0 \cdot \gamma_{d1}}{\gamma_s} + \frac{(P_c - P_k) \cdot m_0 \cdot \gamma_{d1}}{\gamma_s} \cdot \frac{(r_l - r_c)}{(r_k - r_c)}\right), \quad (7)$$

де  $r_k$  – максимальний радіус поширення розчину, м;  $P_{\text{эф}}$  – ефективний тиск тампонажного розчину, Па;  $r_l$  – відстань від осі свердловини, яка відповідає коефіцієнту деконсолідації  $k_{01}$ , м.

При цьому, необхідний об'єм тампонажного розчину для однієї свердловини буде визначатися об'ємом еквівалентної порожнини гідророзриву утвореної в результаті тампонажу, та коефіцієнтами, які враховують перекриття ефективних контурів поширення розчину, можливі втрати тампонажного розчину та нерівномірне поширення розуцільнених зон по площі і глибині.

Для запобігання динамічного руйнування порід масиву за межами зони розуцільнення й внаслідок цього виходу тампонажного розчину уведено міцнісний та швидкісний критерії нагнітання розчину, пов'язані з обмеженням тиску і витрати ін'єкції.

У третьому розділі викладені методика й результати експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей розуцільнених дисперсних порід при їх тампонажі в'язкопластичним розчином.

Для досліджень були взяті три найбільш характерні представники дисперсних порід: суглинок, супісь і дрібнозернистий пісок. У якості тампонажного

розчину використовувався в'язкопластичний глиноцементний розчин щільністю 1310 кг/м<sup>3</sup>.

При консолідації розуцільнених порід в'язкопластичним розчином визначальною є сила тиску, тому моделювання процесу тампонажу здійснювалося на основі рівності критеріїв подоби Ейлера:

$$\frac{P_n}{\rho_n \cdot v_n^2} = \frac{P_m}{\rho_m \cdot v_m^2} \quad (8)$$

де  $P_n, P_m$  – тиск нагнітання рідини у натурі і на моделі.  $\rho_n, \rho_m$  – щільність рідини у натурі і на моделі, кг/м<sup>3</sup>;  $v_n, v_m$  – швидкість течії рідини у натурі і на моделі, м/с.

Для проведення лабораторних досліджень була розроблена конструкція експериментального стенда, що дозволяє досліджувати зміну основних фільтраційних і міцнісних властивостей піщано-глинистих порід при їх консолідації в'язкопластичним розчином. У результаті стендових випробувань були встановлені стохастичні залежності коефіцієнта деконсолідації, коефіцієнта фільтрації, зчеплення й кута внутрішнього тертя порід від тиску тампонажного розчину. Наприклад, для суглинку ці залежності представлені на рис. 2.

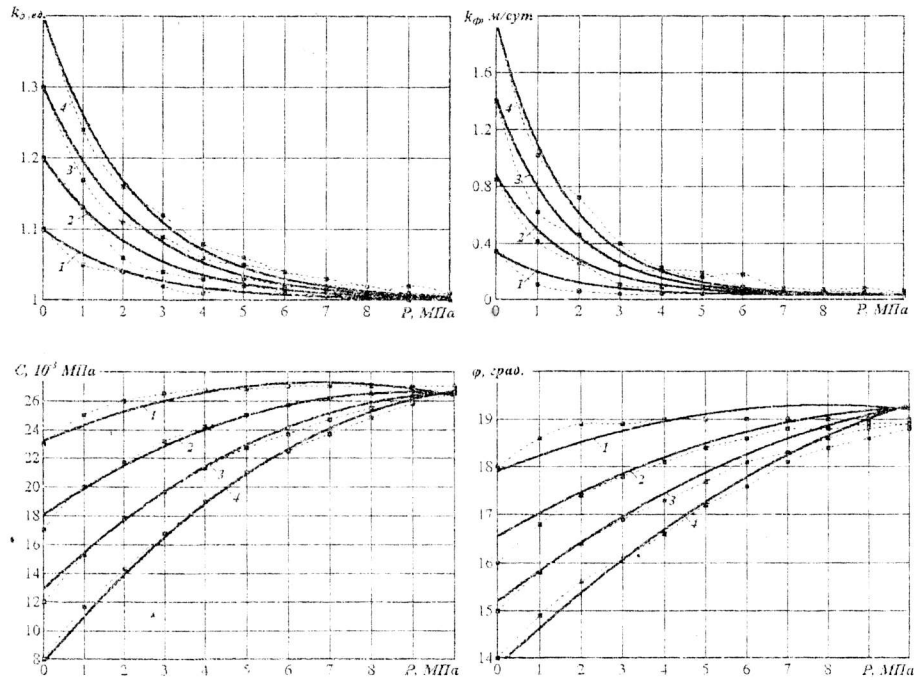


Рис. 2. Залежності фізико-механічних властивостей суглинку від тиску нагнітання глиноцементного розчину при початковому коефіцієнті деконсолідації: 1 - 1,1; 2 - 1,2; 3 - 1,3; 4 - 1,4

За результатами кореляційно-регресійного аналізу, проведеного на ПЕОМ, встановлено, що залежності коефіцієнта деконсолідації й коефіцієнта фільтрації порід від тиску нагнітання найбільш адекватно описуються експоненційною функцією (коефіцієнт кореляції 0,78-0,91):

$$k_{o2} = (\alpha \cdot k_{o1} - \beta) \cdot e^{-\gamma \cdot P} + \delta, \quad (9)$$

$$k_{\phi 2} = (\alpha \cdot k_{\phi 1} - \beta) \cdot e^{-\gamma \cdot P} + \delta, \quad (10)$$

де  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  – емпіричні параметри (табл. 1, 2);  $k_{o1}$  – початковий коефіцієнт деконсолідації порід;  $P$  – тиск нагнітання глиноцементного розчину, МПа.

Таблиця 1

Емпіричні параметри до визначення коефіцієнта деконсолідації розуцільнених порід при їх тампонажі

Тип порід	Емпіричний параметр			
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma, \text{МПа}^{-1}$	$\delta$
Суглинок	1,00	1,00	0,43	1,00
Супісь	1,00	1,00	0,55	1,00
Пісок	1,00	1,00	0,61	1,00

Таблиця 2

Емпіричні параметри до визначення коефіцієнта фільтрації розуцільнених порід при їх тампонажі

Тип порід	Емпіричний параметр			
	$\alpha, \text{м/сут}$	$\beta, \text{м/сут}$	$\gamma, \text{МПа}^{-1}$	$\delta, \text{м/сут}$
Суглинок	5,40	5,63	0,60	0,03
Супісь	8,90	9,25	0,65	0,10
Пісок	45,2	47,35	0,72	9,00

Залежності зчеплення й кута внутрішнього тертя порід від тиску нагнітання найбільш адекватно описуються поліноміальною функцією (коефіцієнт кореляції 0,83-0,9):

$$C_2 = (\alpha - \beta \cdot k_{o1}) \cdot P^2 + (\gamma \cdot k_{o1} - \delta) \cdot P + (\eta - \xi \cdot k_{o1}), \quad (11)$$

$$\phi_2 = (\alpha - \beta \cdot k_{o1}) \cdot P^2 + (\gamma \cdot k_{o1} - \delta) \cdot P + (\eta - \xi \cdot k_{o1}), \quad (12)$$

де  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \xi$  – емпіричні параметри (табл. 3, 4).

Результати аналітичних і стендових досліджень перевірялися натурним експериментом на дамбі шламовідстійника шахти «Суходольська-Східна». Дамба шламовідстійника складена насипним ґрунтом. У результаті тривалої експлуатації відстійника в тілі його дамби утворилися розуцільнені зони, які є шляхами фільтрації промвод. Цей факт був підтверджений магнітодинамічними дослідженнями уздовж гребеня дамби. Для ліквідації зон розуцільнення у тілі дамби були пробурені 9 тампонажних свердловин глибиною 10 м. Нагнітання глиноцементного розчину виконувалося за напівциркуляційною схемою, усього

було закачано 16,2 м<sup>3</sup> розчину. Магнітодинамічні дослідження, а також відбір керн з контрольних свердловин, показали зміну фільтраційно-міцнісних властивостей порід зон розуцільнення і ліквідацію шляхів фільтрації промислових вод. Порівняння фактичних і розрахункових параметрів тампонажу показало їх задовільну збіжність із відносною похибкою до 14 % (табл. 5).

Таблиця 3

Емпіричні параметри до визначення зчеплення розуцільнених порід при їх тампонажі

Тип порід	Емпіричний параметр					
	$\alpha, 10^3 \cdot \text{МПа}^{-1}$	$\beta, 10^3 \cdot \text{МПа}^{-1}$	$\gamma, 10^{-3}$	$\delta, 10^{-3}$	$\eta, 10^3 \cdot \text{МПа}$	$\zeta, 10^3 \cdot \text{МПа}$
Суглинок	0,12	0,19	7,13	6,64	79,54	51,20
Супісь	0,10	0,15	5,00	4,63	52,31	32,57
Пісок	0,12	0,13	2,76	2,67	24,99	16,47

Таблиця 4

Емпіричні параметри до визначення кута внутрішнього тертя розуцільнених порід при їх тампонажі

Тип порід	Емпіричний параметр					
	$\alpha, \text{град./МПа}^2$	$\beta, \text{град./МПа}^2$	$\gamma, \text{град./МПа}$	$\delta, \text{град./МПа}$	$\eta, \text{град.}$	$\zeta, \text{град.}$
Суглинок	0,00	0,02	1,59	1,40	32,82	13,55
Супісь	0,11	0,12	3,29	3,32	45,29	19,12
Пісок	0,20	0,20	3,92	4,04	56,04	20,78

Таблиця 5

Порівняння фактичних і розрахункових технологічних параметрів тампонажу

Найменування параметру	Розраховане значення	Середнє факт. знач.	Віднош. параметрів	Відносна похибка, %
Кінцевий тиск нагнітання на насосі, МПа	1,25	1,10	1,14	13,60
Ефективний радіус поширення розчину, м	2,00	1,80	1,11	11,10
Об'єм розчину на одну свердловину, м <sup>3</sup>	1,96	1,80	1,09	8,90
Коефіцієнт деконсолідації	1,08	1,03	1,05	4,90
Коефіцієнт фільтрації, м/сут	0,26	0,23	1,13	13,00
Зчеплення, кПа	23,20	21,40	1,08	8,40
Кут внутрішнього тертя, град.	18,00	17,20	1,05	4,70

У четвертому розділі розроблена методика проектування технологічних параметрів тампонажу зон розуцільнення породного масиву в'язкопластичними розчинами (табл. 6), що включає наступні етапи:

1. Дослідження гірського масиву способами магнітодинамічної інтроскопії або гравіметрії й параметризація розуцільнених зон.

2. Збір інформації про наявність поблизу розуцільненої зони підземних об'єктів (виробок, колекторів, каналів, технологічних засипань та ін.).

3. Буріння розвідувально-технічних свердловин на досліджуваній ділянці з метою одержання інженерно-геологічних даних про масив порід, що вміщає зони розуцільнення.

4. Вибір ресурсозберігаючого складу й визначення властивостей тампонажного розчину.

5. Науково-обґрунтований інженерний розрахунок технологічних параметрів тампонажу зон розуцільнення в'язкопластичними розчинами (радіус поширення, тиск нагнітання, кількість заходок у свердловині, витрата тампонажного розчину та ін.).

6. Обґрунтований вибір технологічної схеми тампонажу, устаткування для буріння свердловин, устаткування для готування та нагнітання розчину.

7. Контроль якості виконаних робіт (по емпірикоаналітичним залежностям (9)-(12), магнітодинамічні або гравіметричні дослідження, буріння контрольних свердловин).

Таблиця 6

Методика проектування технологічних параметрів тампонажу розуцільнених зон породного масиву в'язкопластичними розчинами

№ п/п	Етапи розрахунку	Рівняння розрахунку
1	2	3
1	Найбільший тиск тампонажного розчину у свердловині для даних умов	$P_{пред}$ (в залежності від міцності порід за межами розуцільненої зони з урахуванням швидкості ін'єктування)
2	Коефіцієнт деконсолідації порід розуцільненої зони	$k_{a1} = \frac{\gamma_{a0}}{\gamma_{a1}}$
3	Ефективний тиск тампонажного розчину на стінки каналу гідророзчленування	$P_{эф} = \frac{\gamma_s \cdot (k_{a1} - k_{a2})}{m_0 \cdot \gamma_{a0}}$
4	Тиск тампонажного розчину у свердловині	$P_{пред} > P_c > P_{эф}$
5	Найбільший радіус поширення тампонажного розчину	$r_k = \frac{(P_c - P_k) \cdot \delta_0 \cdot D}{2\tau_0 - \delta_0 \cdot D \cdot \lambda_p \cdot \cos\varphi \cdot \cos\alpha} + r_c$



1	2	3
6	Ефективний радіус поширення тампонажного розчину	$R_{эф} = r_k - \frac{(P_{эф} - P_k) \cdot (r_k - r_c)}{P_c - P_k}$
7	Визначення кількості тампонажних свердловин і вибір ступеня перекриття ефективних контурів впливу розчину	$N_{екв}$ визначається графоаналітичним способом при перекритті ефективних контурів впливу розчину не менш чим на 10-15 %
8	Середня еквівалентна порожнина гідророзчленування	$h_{екв}^{ср} = \frac{(P_c + P_k) \cdot h_1 \cdot m_0 \cdot \gamma_{dl}}{2 \cdot \gamma_s}$
9	Тиск нагнітання тампонажного розчину на насосі	$P_n = P_c + \Delta P_{мп} - P_c$
10	Об'єм тампонажного розчину для однієї свердловини	$V_1 = \pi \cdot r_k^2 \cdot h_{екв}^{ср} \cdot k_s \cdot k_h \cdot \alpha_s \cdot \zeta_s$
11	Загальний об'єм тампонажного розчину	$V_{оцн} = N_{екв} \cdot V_1$
12	Коефіцієнт деконсолідації консолидованих порід	$k_{\phi 2} = (\alpha \cdot k_{\phi 1} - \beta) \cdot e^{-\gamma \cdot P} + \delta$
13	Коефіцієнт фільтрації консолидованих порід	$k_{\phi 2} = (\alpha \cdot k_{\phi 1} - \beta) \cdot e^{-\gamma \cdot P} + \delta$
14	Зчеплення консолидованих порід	$C_2 = (\alpha - \beta \cdot k_{\phi 1}) \cdot P^2 + (\gamma \cdot k_{\phi 1} - \delta) \cdot P + (\eta - \xi \cdot k_{\phi 1})$
15	Кут внутрішнього тертя консолидованих порід	$\varphi_2 = (\alpha - \beta \cdot k_{\phi 1}) \cdot P^2 + (\gamma \cdot k_{\phi 1} - \delta) \cdot P + (\eta - \xi \cdot k_{\phi 1})$

Розроблена методика проектування успішно впроваджена при розробці проекту тампонажу зон розущільнення глинисто-гіпсової шапки в процесі консервації рудника №2 Стебницького ДГХП «Полімінерал» і рекультиватії порушених земель. Проект пройшов державну експертизу, затверджений Міністерством промислової політики України і зараз його прийнято до реалізації.

У результаті тривалої експлуатації калійного рудника №2 у глинисто-гіпсовій шапці почали утворюватися й інтенсивно розвиватися зони розущільнення. Комплексні геофізичні дослідження дозволили виявити й параметризувати ці зони, які є шляхами інфільтрації поверхневих вод через глинисто-гіпсову шапку, калійний цілик і далі – у гірничі виробки. Ділянка робіт характеризується наступними середньозваженими параметрами: коефіцієнт деконсолідації розущільнених порід – 1,34, потужність деконсолідованих порід – 60-90 м, коефіцієнт площинного розущільнення – 0,35, коефіцієнт вертикального розущільнення – 0,17. Таким чином, на руднику №2 виникла серйозна інженерно-

екологічна проблема, пов'язана із провалами земної поверхні, руйнуванням підземних камер, підвищенням водопритливом у рудник, а також забрудненням прилягаючих територій і гідросфери розсолами.

На підставі вихідних даних за розробленою методикою розраховані основні технологічні параметри тампонажу: тиск ін'єкції, ефективний та максимальний радіуси поширення розчину, кількість тампонажних свердловин, а також необхідний об'єм тампонажного розчину, які дозволять гарантовано стабілізувати масив порід і запобігти аварійній ситуації на руднику. Очікуваний економічний ефект від проведення тампонажних робіт на руднику №2 Стебницького ДГХП «Полімінерал» складе 37,4 млн. грн.

## ВИСНОВОК

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, у якій на основі вперше встановлених закономірностей зміни фільтраційних і міцнісних властивостей ґрунтів локальних зон розущільнення від тиску нагнітання й радіуси поширення розчину вирішена актуальна науково-практична задача обґрунтування оптимальних технологічних параметрів тампонажу зон розущільнення породного масиву в'язкопластичними розчинами, що дозволяє вирішувати технічні і екологічні проблеми геотехнологій.

Найбільш важливі наукові і практичні результати досліджень, висновки рекомендації полягають в наступному:

1. Аналіз інженерно-геологічних ситуацій на підземних і гідротехнічних об'єктах показав, що утворення й розвиток розущільнених зон найбільш частіше відбувається в пухких незв'язних та м'яких зв'язних породах; для виявлення й параметризації розущільнених зон у масиві гірських порід мають практичну перевагу способи гравіметрії та магнітодинаміки.

2. Розроблена модель тампонажу розущільнених зон в'язкопластичними розчинами, відповідно до якої зміна властивостей порід розущільненої зони відбувається за рахунок їх гідророзчленування в найбільш ослаблених місцях, заповненні порожнин розриву розчином і наступною консолидацією розущільнених порід. Уведено новий критерій, що дозволяє зробити оцінку ступеня деструктуризації розущільнених зон гірського масиву – коефіцієнт деконсолідації.

3. Встановлено, що радіус поширення в'язкопластичного розчину в каналі гідророзчленування лінійно залежить від величини перепаду тиску, а також початкового розкриття каналу, пружних властивостей і ступеня деконсолідації ґрунту.

4. Аналітично встановлена й експериментально підтверджена залежність зміни коефіцієнта деконсолідації порід у процесі тампонажу від тиску нагнітання розчину й радіуса поширення розчину в каналі гідророзчленування.

5. Експериментально встановлено, що при збільшенні тиску нагнітання тампонажного розчину до 8 МПа коефіцієнт деконсолідації пухких незв'язних м'яких зв'язних порід розущільненої зони наближається до одиниці.

6. Встановлені й експериментально підтверджені експоненційні та поліноміальні залежності коефіцієнта деконсолідації, коефіцієнта фільтрації, зчеп-



лення й кута внутрішнього тертя порід розущільненої зони від тиску нагнітання тампонажного розчину й початкового коефіцієнта деконсолідації. Встановлені залежності зміни властивостей розущільнених зон у процесі їх тампонажу повністю характеризують поведінку геомеханічної системи – як процес консолідації розущільненої породи під впливом тампонажного розчину.

7. Результати натурних досліджень процесу тампонажу зон розущільнення у тилі дамби шламовідстійника показали адекватність і вірогідність теоретичних і лабораторних досліджень (похибка до 14 %).

8. На підставі результатів аналітичних й експериментальних досліджень розроблена нова методика проектування технологічних параметрів тампонажу зон розущільнення породних масивів в'язкопластичними розчинами.

9. Методика проектування параметрів тампонажу розущільнених зон в'язкопластичними розчинами успішно впроваджена при розробці проекту тампонажу зон розущільнення глинисто-гіпсової шапки в процесі консервації рудника №2 і рекультивції порушених земель Стебницького ДГХП «Полімінерал».

**Основні положення і результати дисертації опубліковані в таких роботах:**

1. Должиков П.Н., Пронский Д.В. Исследование параметров тампонажа грунтов с аномальными свойствами // Сборник научных трудов. – Алчевск: ДГМИ. – 2002. – Вып. 15. – С. 45-49.

2. Соболев Е.Г., Должиков П.Н., Пронский Д.В. Магнитодинамические исследования при тампонаже аномальных зон неглубокого залегания // Научный вестник НГУ. – 2003. – № 2. – С. 29-32.

3. Должиков П.Н., Рябичев В.Д., Пронский Д.В. Исследование параметров и процесса тампонажа зон разуплотненных горных пород // Научный вестник НГУ. – 2004. – № 1. – С. 35-37.

4. Соболев Е.Г., Должиков П.Н., Пронский Д.В. О необходимости нового подхода к инженерно-геологическим изысканиям // Матер. наук.-практ. конф. «Инженерный захист територій та об'єктів у зв'язку з розвитком небезпечних геологічних процесів». – К.: Знання. – 2002. – С. 5-7.

5. Должиков П.Н., Пронский Д.В. Геофизический контроль качества формирования противодиффузионной завесы в аномальных зонах // Технология и проектирование подземного строительства: Вестник. – Донецк: Норд-Пресс. – 2003. – Вып.3. – С. 186-189.

6. Должиков П.Н., Рябичев В.Д., Пронский Д.В. О проведении экспертизы проекта тампонажа аномальных зон и карстовых пустот // Матер.наук.-практ. конф. «Практика виконання державної експертизи інвестиційних програм і проектів будівництва; шляхи та методи її удосконалення». – К.: Знання. – 2003. – С. 34-36.

7. Пронский Д.В. Актуальность и проблемы тампонирувания аномальных зон при развитии техногенных процессов // Матер.международной науч.-практ. конф. «Уголь – Mining Technologies 2003». – Алчевск: ДГМИ. – 2003. – С. 222-226.

8. Рябичев В.Д., Пронский Д.В., Сбитнев В.П. Исследования водно-физических свойств разуплотненных пород при их консолидации вязкопластичными растворами // Матер. региональной научн.-практ. школы-семинара «Прогрессивные технологии строительства, безопасности и реструктуризации горных предприятий». – Донецк: Норд-Пресс. – 2006. – С. 135-139.

**Особистий внесок** автора у роботах, опублікованих у співавторстві: [1, 3] – аналітичні дослідження процесу та технологічних параметрів тампонажу розущільнених зон; [2, 4-7] – актуальність проблеми розущільнених зон, аналіз способів їх виявлення та параметризації в масиві порід; [8] – участь у стендових дослідженнях фільтраційно-міцнісних властивостей деконсолідованих порід при їх тампонуванні в'язкопластичними розчинами та обробка результатів досліджень на ПЕОМ.

## АНОТАЦІЯ

Пронський Д.В. «Обґрунтування параметрів тампонажу зон розущільнення породного масиву в'язкопластичними розчинами». – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.09 – «Механіка ґрунтів та гірських порід». Національний гірничий університет, Дніпропетровськ, 2006 р.

Дисертація присвячена питанням ліквідації в дисперсних підцаноглинистих ґрунтах розущільнених зон неглибокого залягання, утворення й розвитку яких переважно пов'язані з експлуатацією об'єктів гідротехнічного будівництва, а також інтенсивної розробки корисних копалин. На основі комплексного методу тампонажу гірських порід запропоновано новий підхід до ліквідації таких локальних структур, який полягає у поінтервальному ін'єктуванні в'язкопластичного розчину в зону розущільнення з утворенням у ній каналів гідророзчленування й консолідацією скелету ґрунту під дією тиску розчину в цих каналах. На підставі теоретичних й експериментальних досліджень обґрунтовані технологічні параметри тампонажу зон розущільнення породного масиву в'язкопластичними розчинами, що забезпечать надійність та екологічну безпеку інженерних об'єктів.

Результати дисертаційної роботи дозволили розробити нову методику проектування технологічних параметрів тампонажу зон розущільнення породного масиву в'язкопластичними розчинами. Методика проектування успішно впроваджена при розробці проекту тампонажу зон розущільнення глинисто-гіпсової шапки рудника №2 Стебницького ДГХП «Полімінерал».

Ключові слова: породний масив, розущільнена зона, тампонаж, гідророзчленування, в'язкопластичний розчин, консолідація, фільтраційні й міцнісні властивості.