Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

«СТІЙКІСТЬ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННИХ МАСИВІВ ПРИ РОЗРОБЦІ ЗАЛІЗОРУДНИХ РОДОВИЩ»

висувається на здобуття премії Президента України для молодих вчених

Автори роботи: *к.т.н., доц. Петльований М.В.,*
к.т.н. Шустов О.О.,
к.т.н. Зубко С.А.,
ас. Шерстюк Є.А.

2020 рік

Мета роботи полягає у науковому обґрунтуванні параметрів і принципів формування стійкого стану природних та техногенних масивів при розробці залізорудних родовищ на основі встановлення характеру та закономірностей розвитку геомеханічних, геофільтраційних та фізико-хімічних процесів.

Ідея роботи полягає в урахуванні закономірностей зміни кількісно-якісних величин та параметрів геомеханічних, гідрогеомеханічних та фізико-хімічних процесів при видобутку залізних руд для розробки ресурсозберігаючих заходів з підвищення стійкості природно-техногенних масивів.

Об’єкт дослідження – процеси порушення стійкості природно-техногенних масивів в технологічному процесі видобутку залізних руд підземним та відкритим способами.

Предмет дослідження – закономірності розвитку геомеханічних, гідрогеомеханічних та фізико-хімічних процесів у природно-техногенних масивах, що характеризують їх стійкий стан.

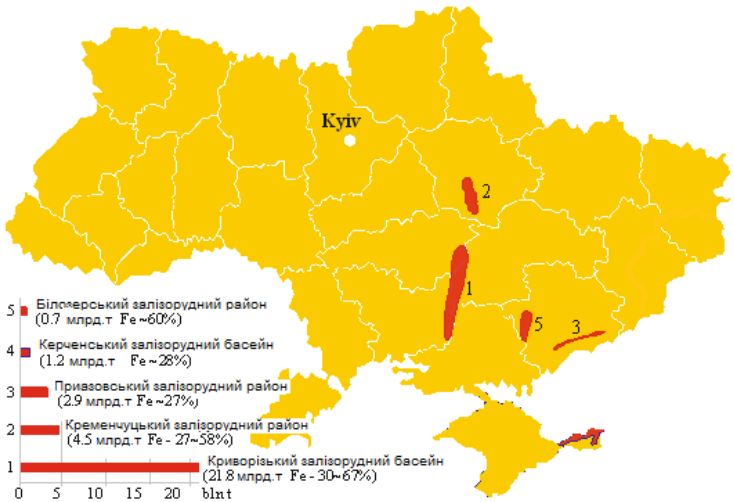
Наукова новизна та практична цінність досліджень
детально наведені **в РЕФЕРАТІ РОБОТИ**

Для досягнення поставленої мети сформульовано і вирішено **наступні задачі**:

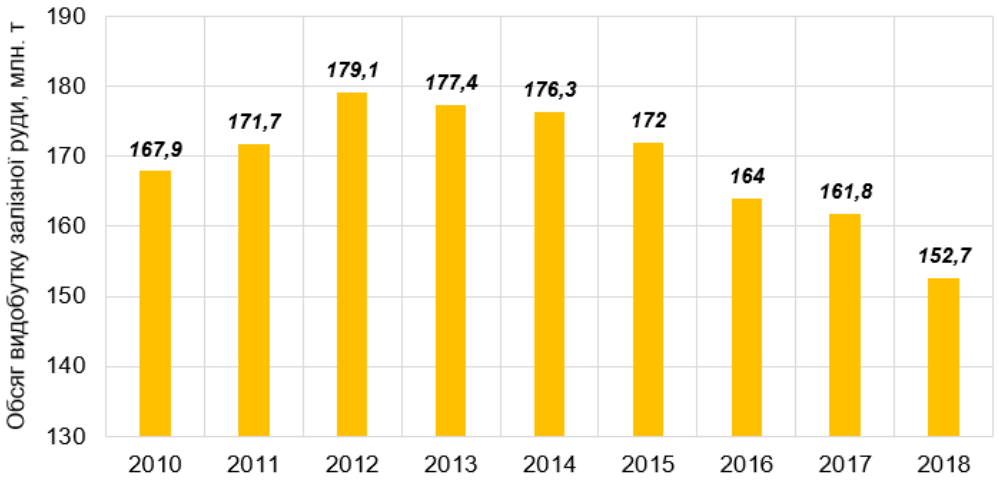
- розкрити уявлення щодо формування природно-техногенних масивів в процесі розробки залізорудних родовищ й сформулювати основні геомеханічні та гідромеханічні проблеми їх стійкості;
- розробити нові й вдосконалити існуючі методики та алгоритми проведення комплексу досліджень з формування стійких природно-техногенних масивів залізорудних родовищ при їх розробці;
- дослідити ступінь впливу геологічної будови рудних родовищ на показники якості видобутку залізних руд;
- встановити закономірності формування полів напружень та розвитку деформаційних процесів в природному та закладному масиві рудних родовищ при підземних гірничих роботах;
- встановити закономірності утворення стійкої хімічної структури та підвищення міцнісних характеристик закладного масиву та параметрів його формування у виробленому просторі;
- виконати комплексні геодезичні, інженерно-геологічні, геофізичні дослідження стану зсувних процесів при формуванні відвалів кар’єрних порід;
- встановити закономірності та розробити прогноз розвитку геофільтраційних та гідрогеомеханічних процесів в умовах зсувонебезпечних масивів;
- розробити комплекс ресурсозберігаючих заходів з підвищення стійкості конструктивних елементів систем розробки та ефективних схем формування закладного масиву;
- розробити технічні заходи гідрозахисту зсувонебезпечних поверхневих техногенних масивів та прибортових зон кар’єрів в умовах постійного обводнення, зумовленого забезпеченим фільтраційним живленням;
- виконати оцінку економічної доцільності запропонованих науково-технічних рішень з підвищення стійкості природних та техногенних масивів

Актуальність роботи

Розподіл запасів та вмісту заліза по залізорудних басейнах і районах України



Динаміка видобутку залізних руд у 2010-2018 рр. (відкритий та підземний спосіб)



Експорт руди та залізорудних концентратів в 2019 р. на **3,4 млрд $**

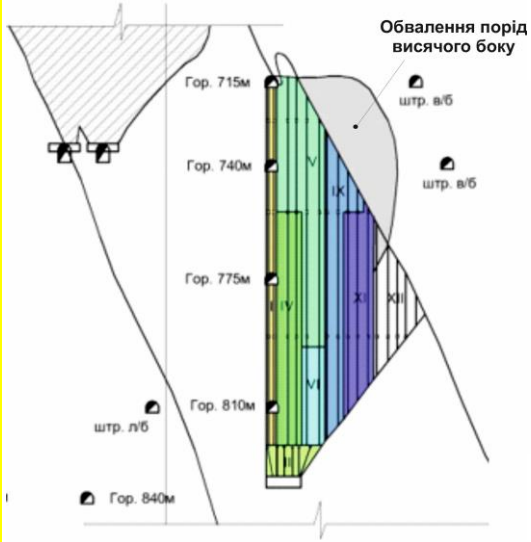
Динаміка зміни цін на залізну руду (фьючерс на залізну руду, Китай)

Вміст заліза (Fe) в руді **62%**

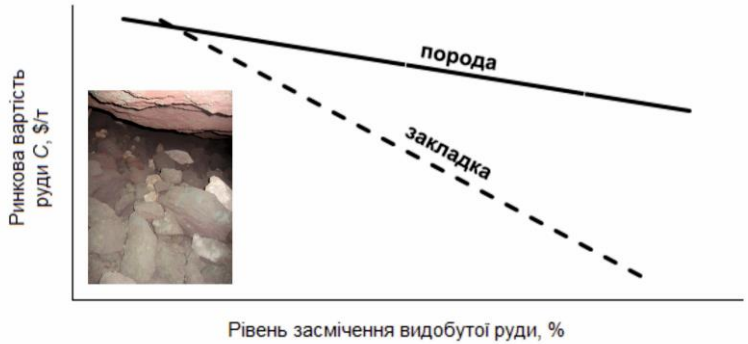
Стійкість масивів при видобутку залізних руд суттєво впливає на їх **якісні показники та собівартість**, а ринкові ціни утворюються залежно від вмісту заліза **(Fe)** у руді

Проблеми зниження стійкості природно-техногенних масивів при підземній розробці

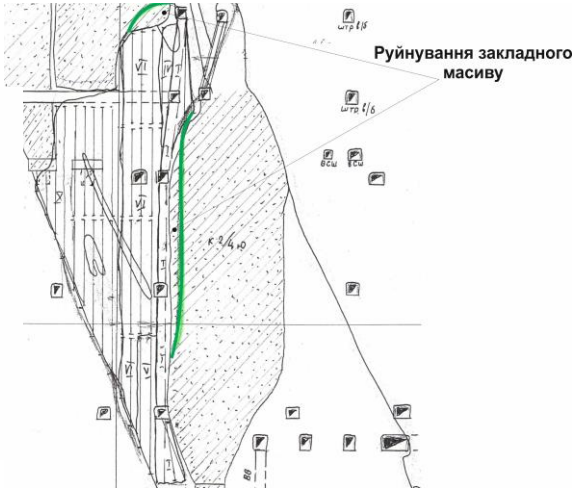
Руйнування природного масиву (обвалення вміщуючих порід)

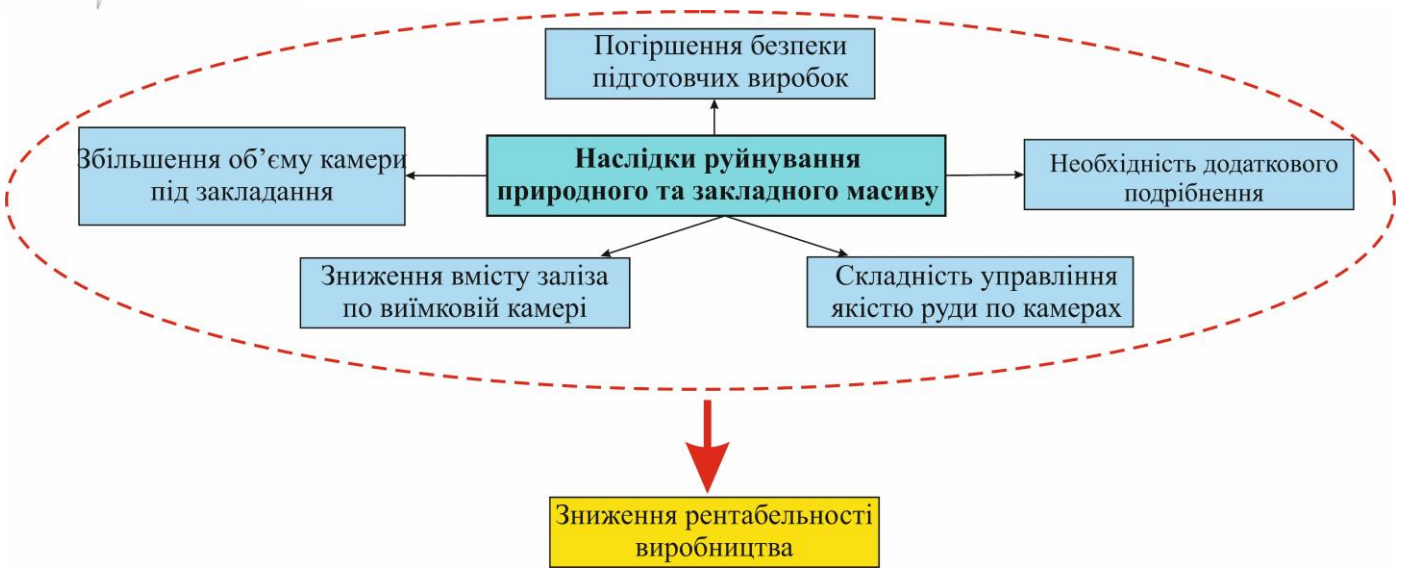


Характер впливу на ціну руди рівня її засмічення породами та закладкою



Руйнування закладного (техногенного) масиву

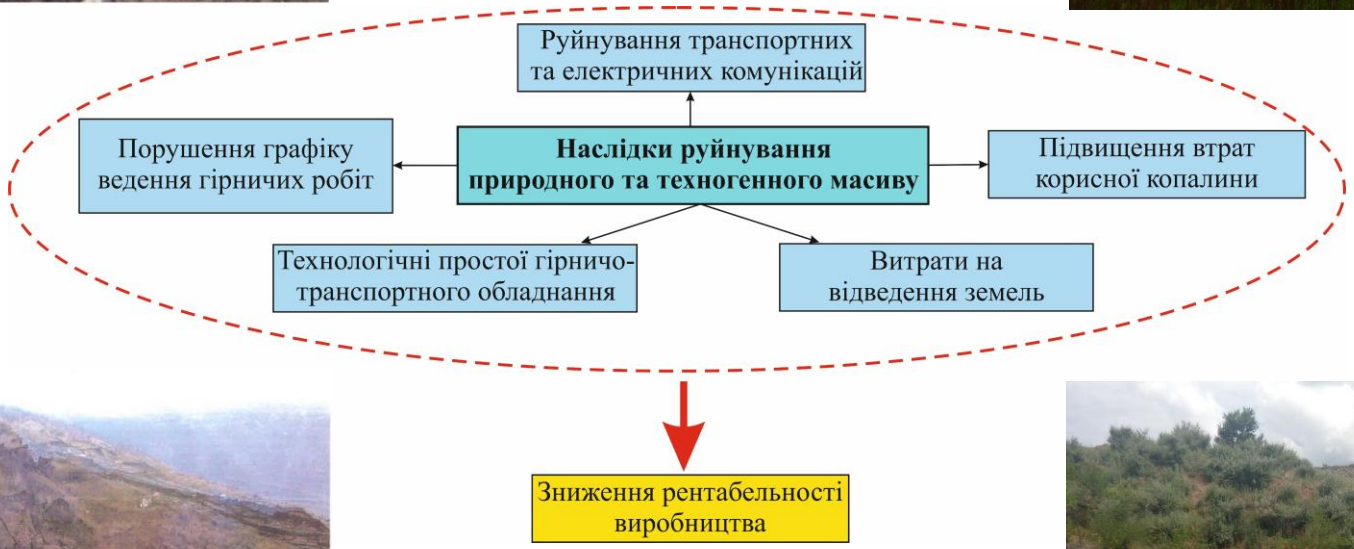




Проблеми зниження стійкості природно-техногенних масивів при відкритій розробці

Руйнування природного масиву (обвалення порід на уступі)

Руйнування техногенного масиву (зсувні процеси на відвалах)



Комплексний методичний підхід до виконання досліджень

(методики дослідження напружено-деформованого стану масивів при підземній розробці)

Дослідження процесів деформацій на моделях з еквівалентних матеріалів

Схема моделі й порядок відпрацьовування камер

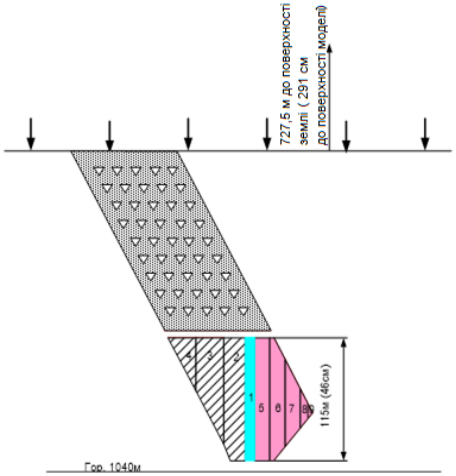
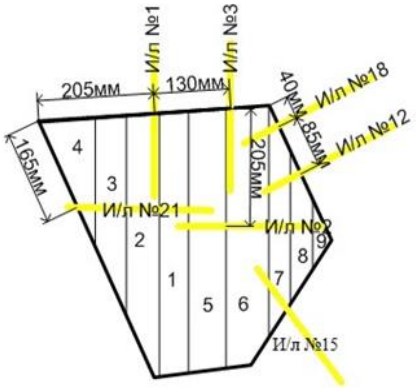


Схема розміщення індикаторних лінійок

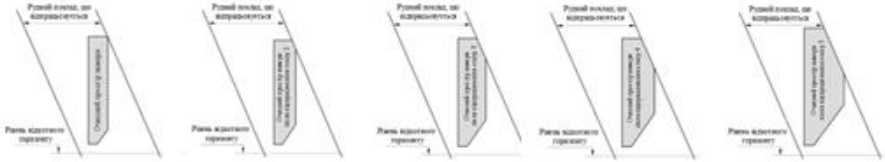


Фізико-механічні властивості гірських порід і еквівалентних матеріалів

Найменування гірських порід	Фізико-механічні властивості гірських порід натури			Фізико-механічні властивості еквівалентних матеріалів				Еквівалентні матеріали, співвідношення компонентів, % за вагою					
	коефіцієнт міцності	кут внутрішнього тертя, градус	межа міцності одноосьовому стисненню, МПа	об'ємна вага, т/м³	кут внутрішнього тертя, градус	зчеплення, МПа	межа міцності одноосьовому стисненню, МПа	пісок	цемент	солідол	парафін	тальк	алебастр
Залізисті кварцити	8 – 12	35	100	2,0	25	0,3	0,23	96	–	–	–	–	4
Сланці кварц-хлорит-серицитові	6 – 9	29	55	2,0	26	0,5	0,55	95	5	–	–	–	–
Руда гематит-мартитова	5 – 7	23	30	2,0	22	0,03	0,05	96	–	3	1	–	–
Сланці серицит-хлоритові отальковані	4 – 6	25	30	2,0	15	0,01	0,03	–	–	–	–	100	–
Шлако-піщане закладання	до 3	25	2-3	2,0	21	0,03	0,03	97	–	3	–	–	–

Дослідження напруженого стану на оптико-поляризаційних моделях

Схема моделей й порядок відпрацьовування камери



Вибір складу ігдантину як поляризаційно активного матеріалу

Склад ігдантину, %			Модуль пружності *E*, кГ/см	Оптичний коефіцієнт напружень С-10⁷ см/кГ	
желатин	гліцерин	вода			
10	30	60	0,250	15000	
15	30	55	0,550	10000	
20	30	50	1,000	8000	
25	30	45	1,600	6000	Обраний склад ігдантину
30	30	40	2,200	4500	
35	30	35	3,000	3500	

Чисельне моделювання напруженого стану закладного (техногенного) масиву

Схема до моделювання традиційного масиву

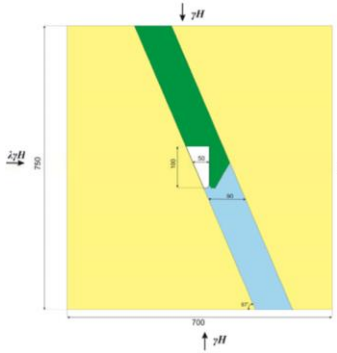
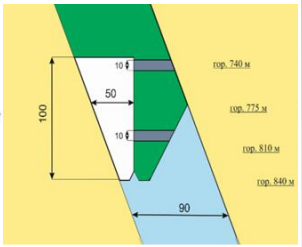
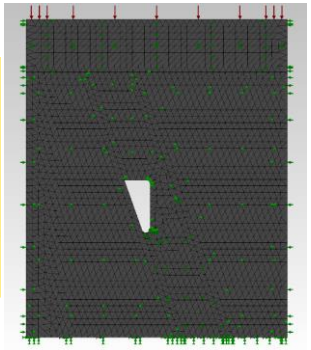


Схема до моделювання зміцненого масиву



Мережа кінцевих елементів моделі



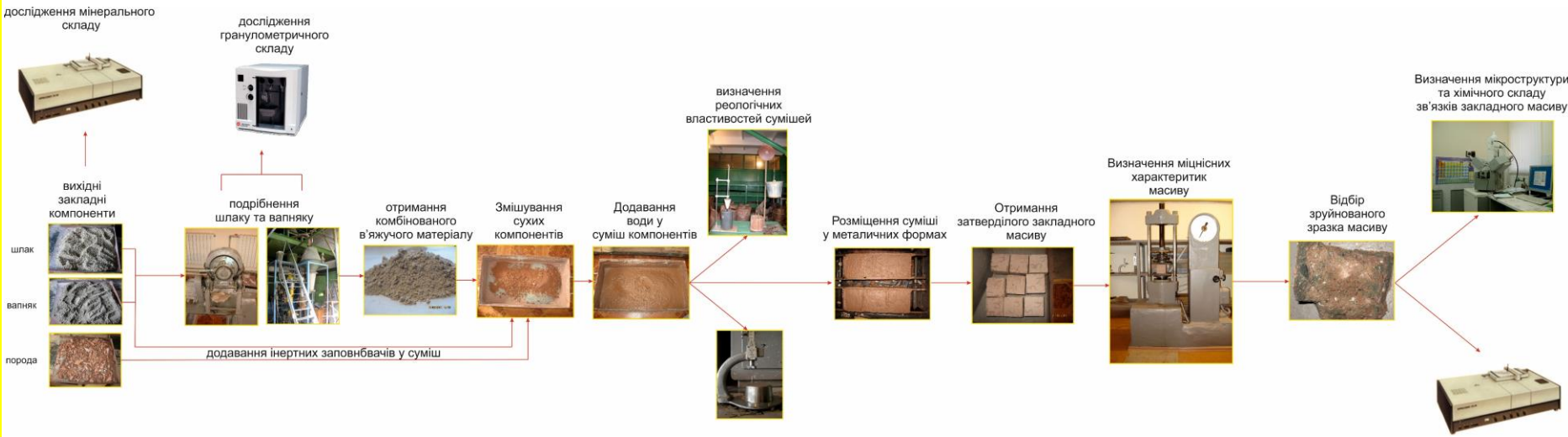
Фізико-механічні властивості порід, руди та закладки

Параметр	Породи висячого боку	Породи лежачого боку	Рудний масив	Штучний масив	Зміцнений штучний масив
Щільність, т/м³	3,5	2,7	3,9	2,3	2,3
Модуль Юнга, МПа	15000	8000	6000	600	1000
Коефіцієнт Пуасона	0,25	0,25	0,25	0,15	0,15

Комплексний методичний підхід до виконання досліджень

(методики дослідження фізико-хімічних процесів та структури закладного масиву)

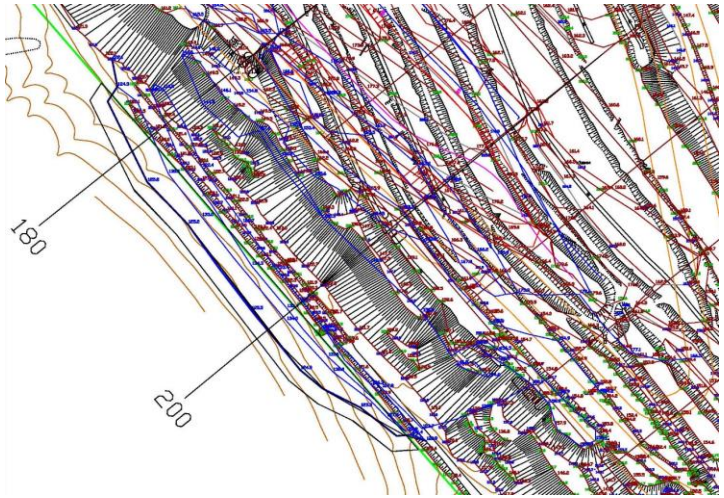
Комплексний алгоритм приготування закладних сумішей, визначення їх властивостей та структури закладного масиву



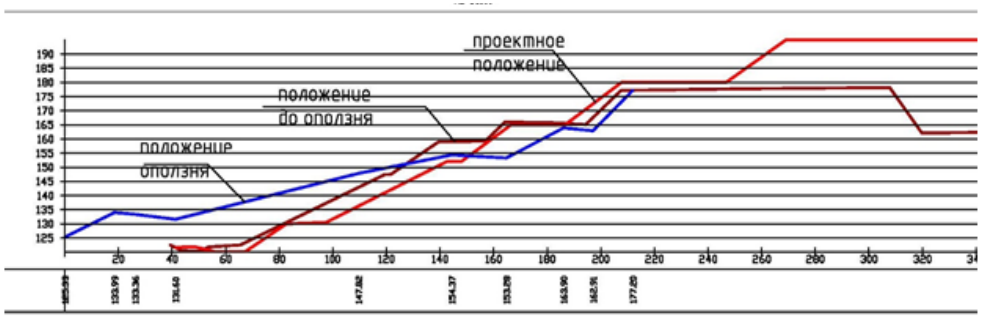
Комплексний методичний підхід до виконання досліджень

(методики дослідження стійкості бортів кар'єрів і відвалів, розвитку геофільтраційних процесів при відкритій розробці родовищ)

Аналіз плану зсуву порід відвалу



Перерізи по відвалу в місцях проявлення зсуву



Параметри зсуву та тіла випирання за даними топографічної зйомки

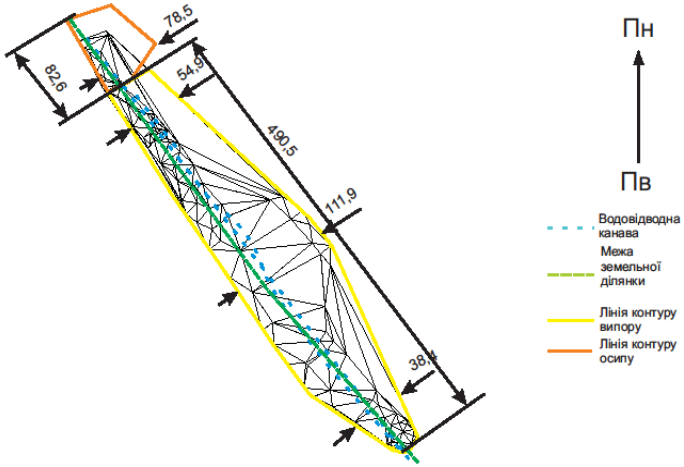
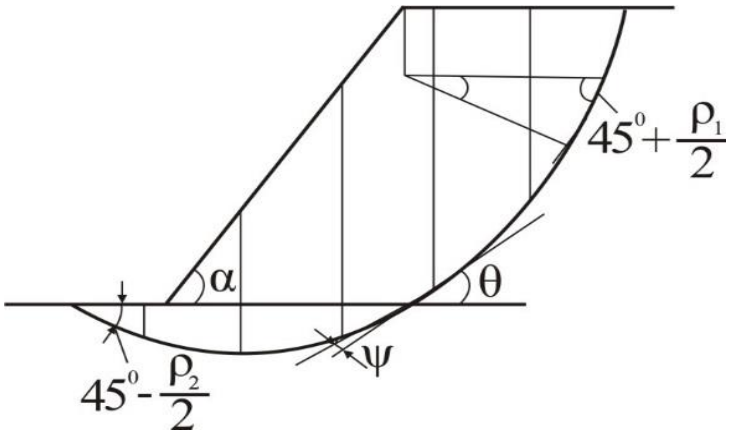


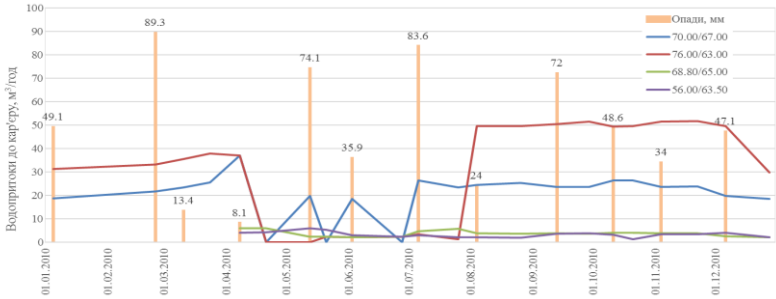
Схема до визначення параметрів стійкості укосу, що складений обводненими рихлими породами з основою із пластичних глин



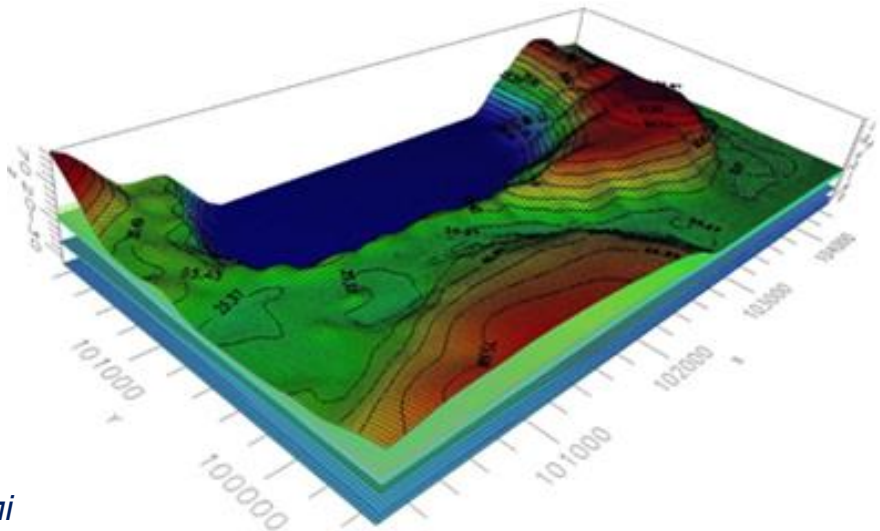
Комплексний методичний підхід до виконання досліджень

(методики дослідження стійкості бортів кар'єрів і відвалів, розвитку геофільтраційних процесів при відкритій розробці родовищ)

Аналіз динаміки водопритоків до борту кар'єру



Просторове представлення структури модельованої області в межах борту кар'єру



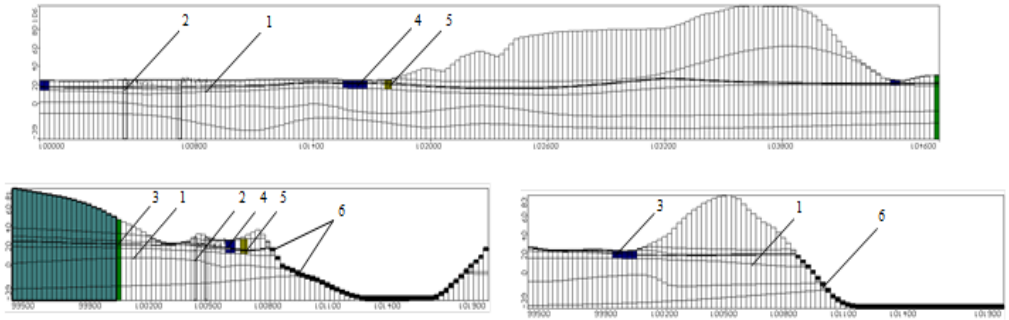
Просторове моделювання фільтрації підземних вод

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)+W=S_s\frac{\partial h}{\partial t}$$

Розрахункові фільтраційні параметри чисельної моделі

Розрахунковий шар	Фільтраційні параметри		
	Коефіцієнт фільтрації, K ($K_X = K_Y = K_Z$), м/доб	Коефіцієнт гравітаційної водовіддачі μ, дол. од.	Коефіцієнт пружної водовіддачі, μ^*, дол. од.
Шар 1 – відвальні породи	0,5…0,7	0,10	0,0001
Шар 2 – суглинки і супіски	0,001…0,7	0,10	0,0001
Шар 3 – піски мілкі	0,001…0,84	0,15	0,00001
Шар 4 – глини піщанисті	0,001	0,02	0,00001
Шар 5 – піски різнозернисті	6,9…13,0	0,20	0,00001
Шар 6 – глини алевритові	0,00001	0,01	0,00001
Шар 7 – глини вуглисті	0,0005	0,01	0,00001
Шар 8 – сланці вивітрілі	0,00005	0,01	0,00001

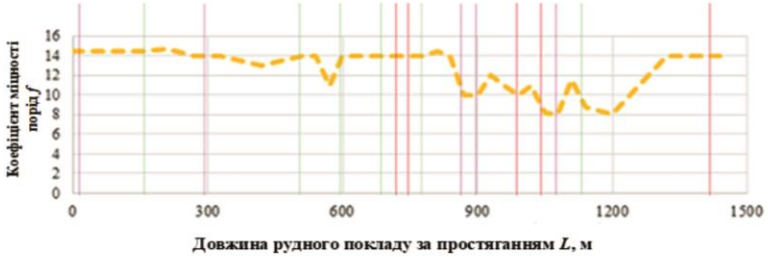
Структура модельованої області у вертикальному перерізі

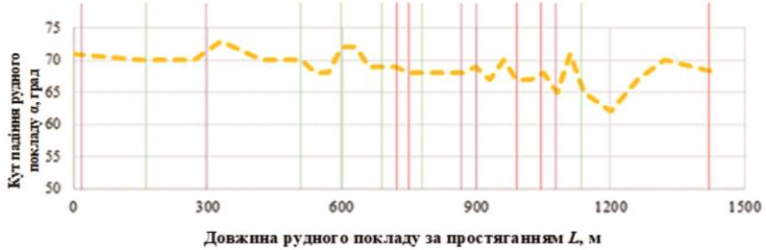


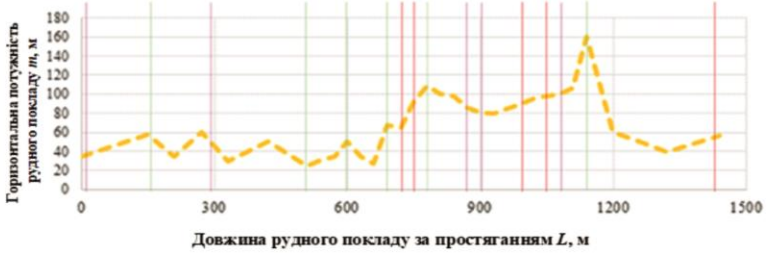
1 – границі розрахункових шарів; 2 – розвідувальні свердловини; 3, 4 – зовнішні і внутрішні гідродинамічні границі; 5 – протифільтраційна завіса; 6 – контури дренування в межах північно-східного борту кар'єру

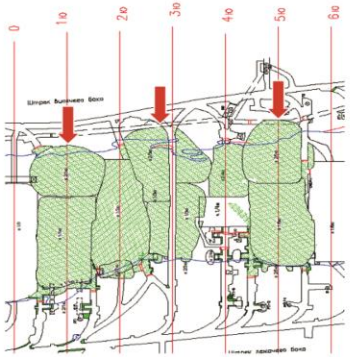
Виявлення впливу гірничо-геологічних характеристик родовища на стійкість природного масиву порід

Групування очисних камер за величиною засмічення породами

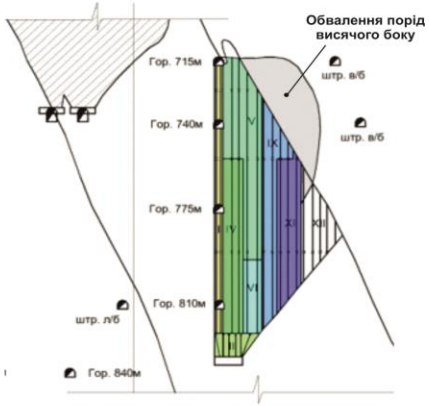








Зони порушення стійкості вміщуючих порід

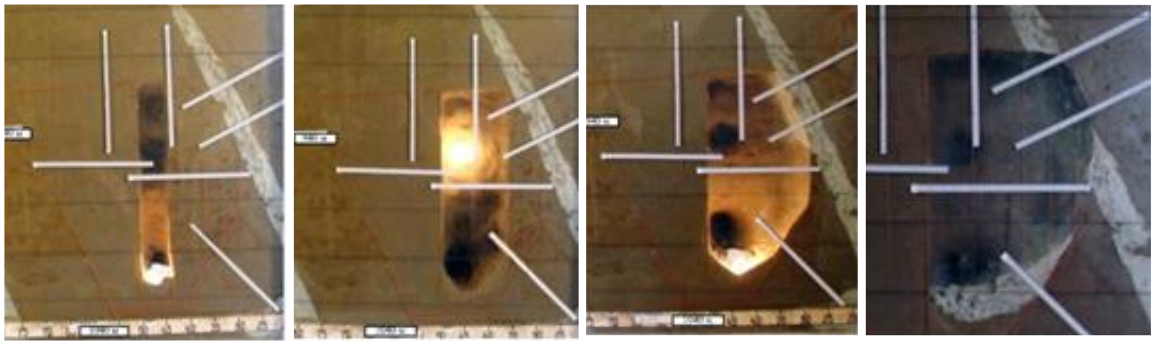


Необхідність оптимізації параметрів системи розробки для підвищення стійкості масиву

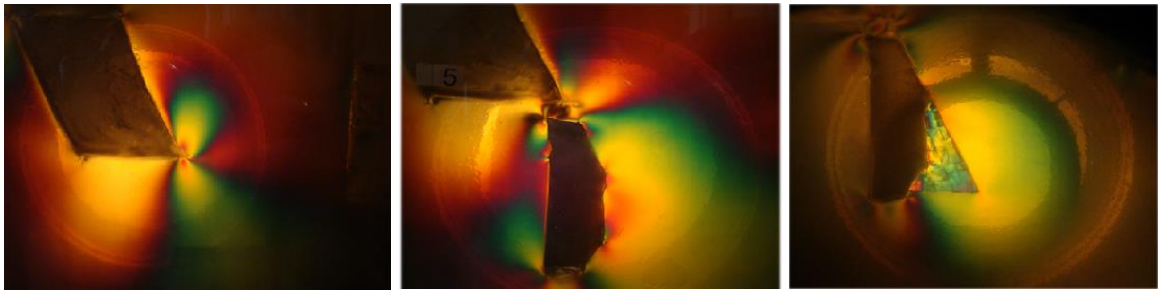
Виявлено кількісний взаємозв'язок величини та інтенсивності обвалень вміщуючих порід висячого боку зі зміною їх морфологічного складу, міцнісної характеристики, кутом падіння та потужністю рудного покладу

Встановлення характеру та закономірностей розвитку геомеханічних процесів у природному масиві

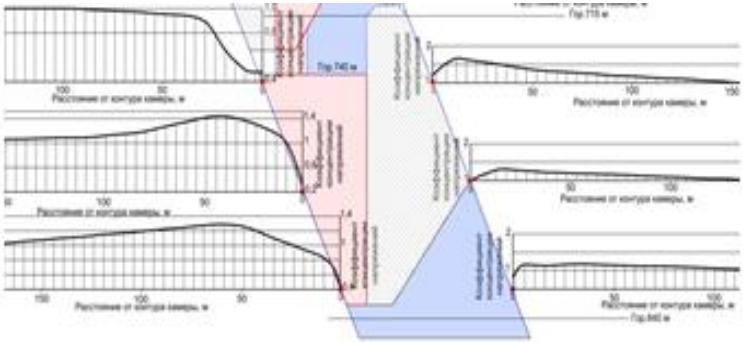
Моделювання етапів відпрацьовування камери висячого боку



Моделювання етапів відпрацьовування камери висячого боку



Епюри коефіцієнтів концентрації максимальних напружень



Коефіцієнт концентрації максимальних напружень

$$K_{кн} = 1{,}79e^{(0{,}0009H - 0{,}01L)}$$

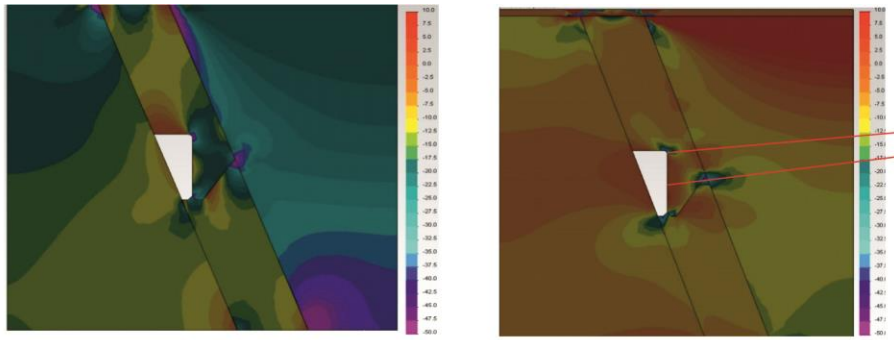
Залежність величини деформації масиву висячого боку від глибини розробки

Залежність коефіцієнта концентрації напружень від глибини розробки

Залежність коефіцієнта концентрації напружень від контуру камери убік порід висячого боку

Встановлення характеру та закономірностей розвитку геомеханічних процесів у закладному масиві

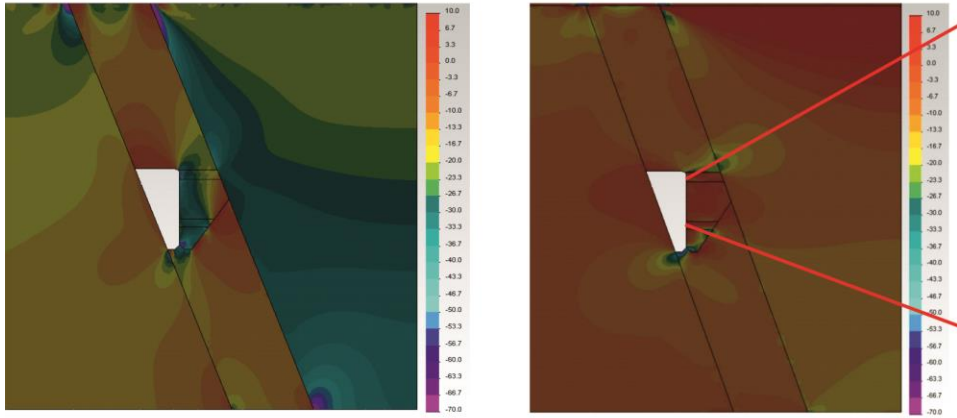
Епюри розподілу вертикальних та горизонтальних напружень при суцільному закладному масиві (традиційний варіант)



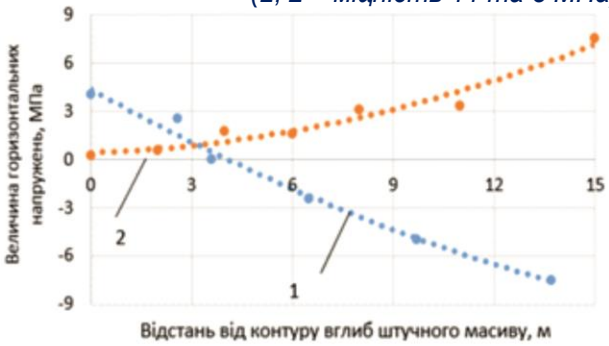
Області концентрацій підвищених напружень у закладному масиві

Залежність горизонтальних напружень на сполученні покрівлі з боком закладного масиву від його контуру вглиб (1, 2 – міцність 11 та 8 МПа)

Епюри розподілу вертикальних та горизонтальних напружень при суцільному різноміцнісному закладному масиві



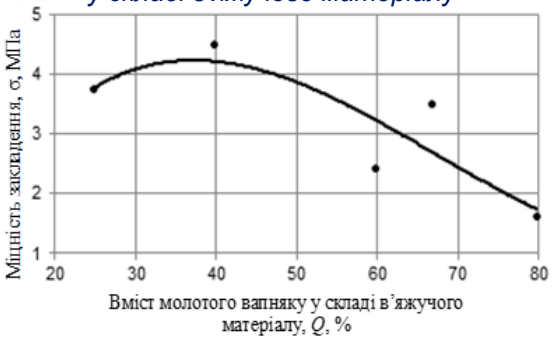
Залежність горизонтальних напружень в області закладного масиву 775 – 810 м від його контуру вглиб (1, 2 – міцність 11 та 8 МПа)



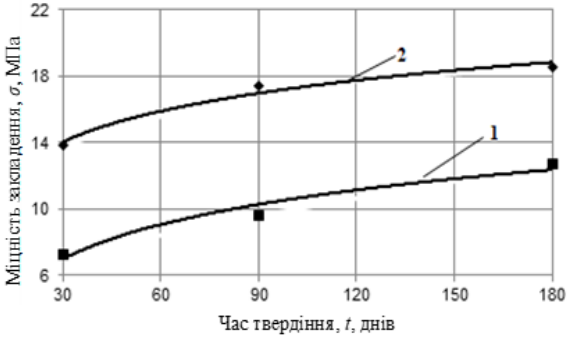
Закономірності утворення стійкої хімічної структури та підвищення міцнісних характеристик закладного масиву

Залежність міцності закладки:

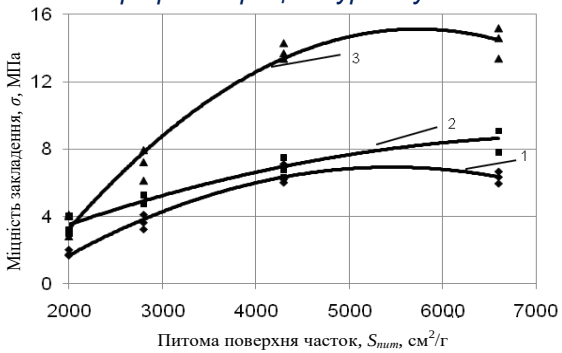
від вмісту мелених флюсових відходів у складі в'яжучого матеріалу



від часу твердіння при різних рецептурах суміші

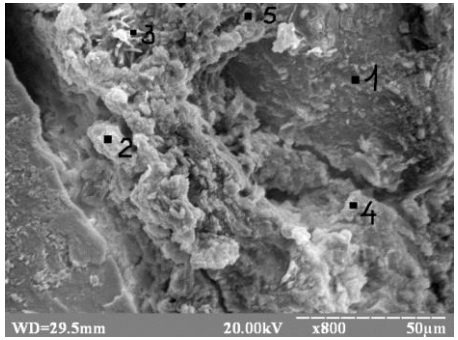


від питомої поверхні в'яжучого матеріалу при різних рецептурах суміші

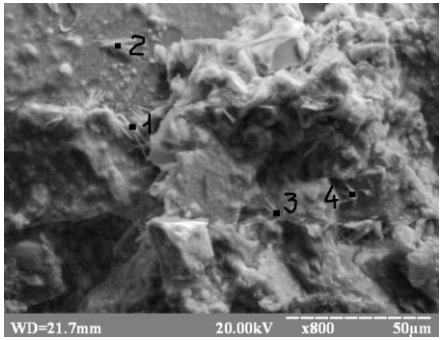


Еволюція структури закладного масиву при питомій поверхні часток комбінованого в'яжучого матеріалу:

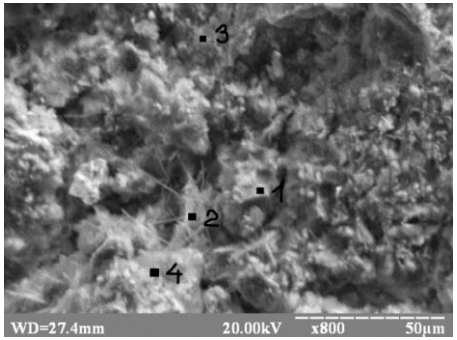
2000 см²/г



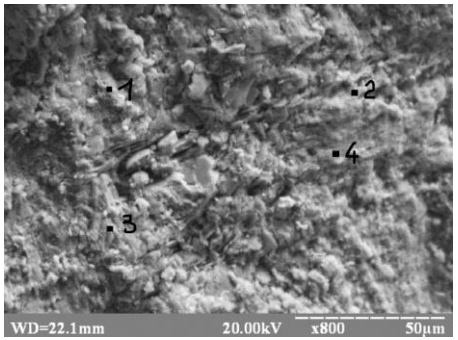
2800 см²/г



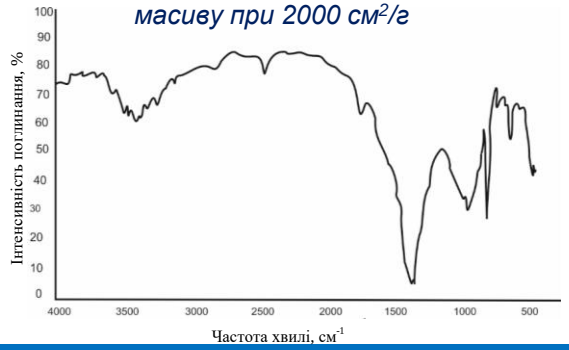
4300 см²/г



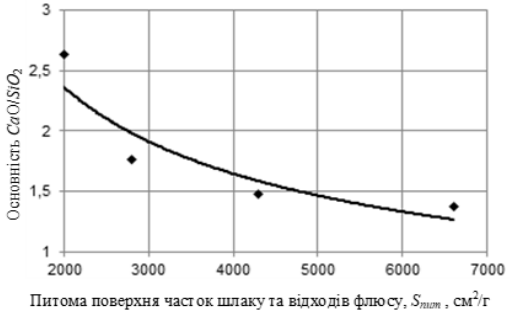
6600 см²/г



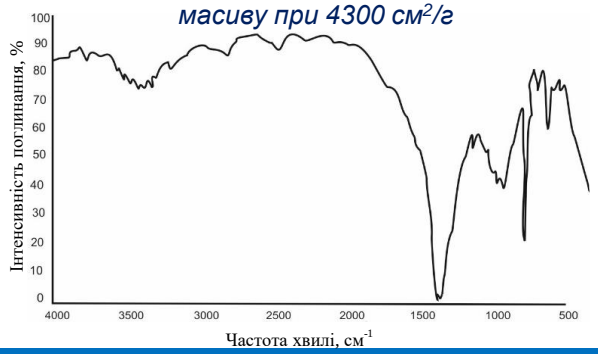
Інфрачервона спектрограма закладного масиву при 2000 см²/г



Залежність основності CaO/SiO_2 гідросилікатів кальцію від питомої поверхні часток

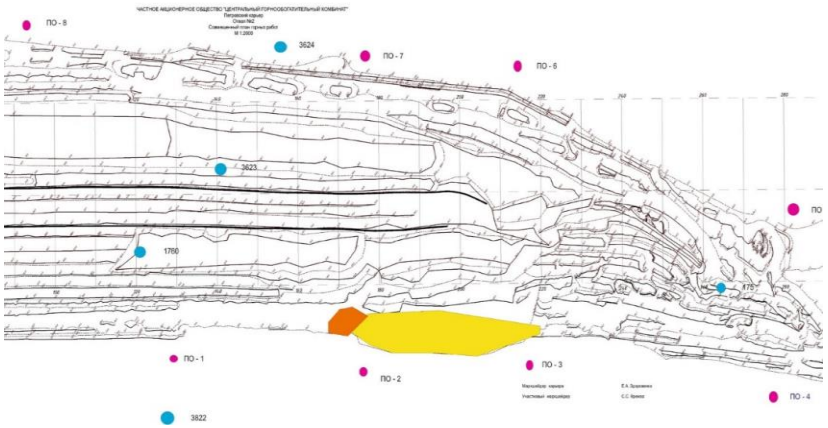


Інфрачервона спектрограма закладного масиву при 4300 см²/г



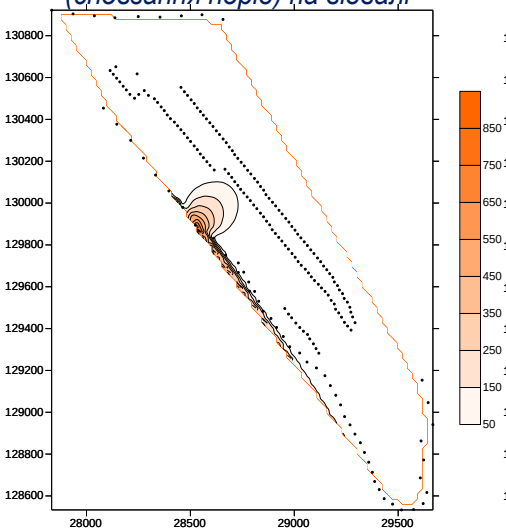
Кількісно-якісна оцінка геомеханічного стану відвалу пустих порід

Схема розміщення бурових свердловин по площі породного відвалу

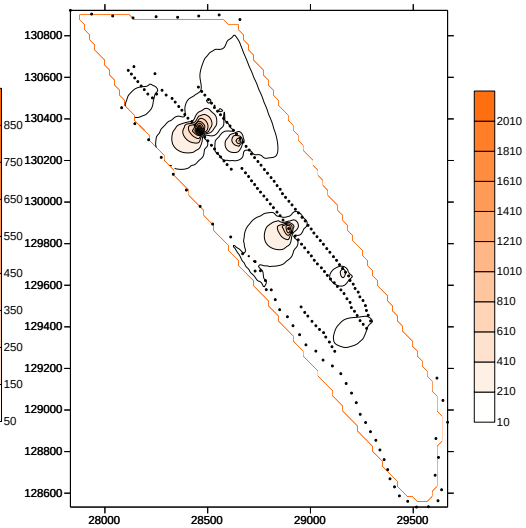


Площадкова інтерпретація результатів дослідження методом ПІЕМПЗ:

зони крипа (сповзання порід) на відвалі



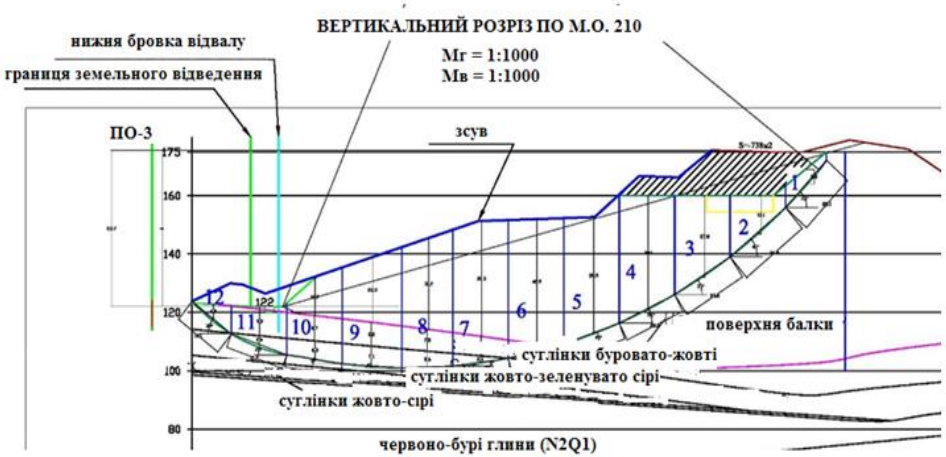
зон міграції вод на відвалі



Розрахунок стійкості по розрізу однієї з маркшейдерських осей

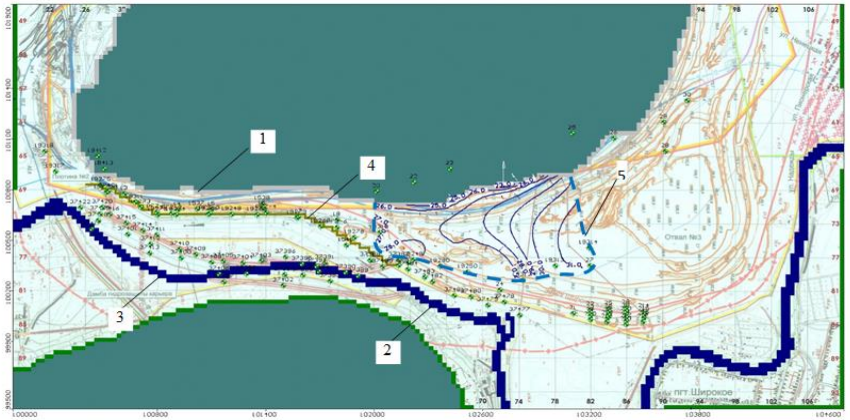
	Ширина блоку	Кут нахилу площадки ковзання	Довжина площадки ковзання	Породи відвалу	Суглинок жовто-сірий з прожилками і гніздами озалізнення з рідкими включеннями дресви	Супісь від жовто-сірої до зеленувато-сірої	Загальна сила дії			Утримуючі сили	Сили що зрушують	Коефіцієнт стійкості
№блока	*ai,м*	*φi*, град	*li*, м	*Pc*	*Pв1*	*Pв2*	*ΣPi*	*N*	*C*li*	*ΣN*	*ΣT*	*Ку*
1	14,8	48	22	177,60	0,00	0,00	177,60	30,70	45,82	76,52	131,9825	
2	20	40	26,2	628,80	0,00	0,00	628,80	124,46	54,56	179,02	404,1848	
3	20	33	23,8	1334,40	0,00	0,00	1334,40	289,15	49,57	338,72	726,7663	
4	20	26	22,3	1876,80	0,00	0,00	1876,80	435,84	46,44	482,28	822,735	
5	20	20	21,3	1915,20	0,00	0,00	1915,20	465,00	44,36	509,36	655,037	
6	20	14	20,6	2059,20	108,68	0,00	2167,88	543,49	42,90	586,39	524,4576	
7	20	8	20,2	1896,00	280,06	84,00	2260,06	578,26	42,07	620,33	314,5396	
8	20	2	18,5	1497,60	313,50	196,00	2007,10	518,27	38,53	556,80	70,04678	
9	20	4	21,6	1070,40	342,76	245,00	1658,16	427,38	44,98	472,37	-115,667	
10	20	9	20,2	609,60	363,66	220,50	1193,76	304,64	42,07	346,71	-186,745	
11	20	20	21,2	0,00	413,82	101,50	515,32	125,12	44,15	169,27	-176,25	
12	14,2	38	18,1	0,00	145,42	0,00	145,42	29,61	37,70	67,30	-89,5308	
										4405,06	3081,556	1,43

Графічна частина інтерпретації розрахунку стійкості по розрізу однієї з маркшейдерських вісей

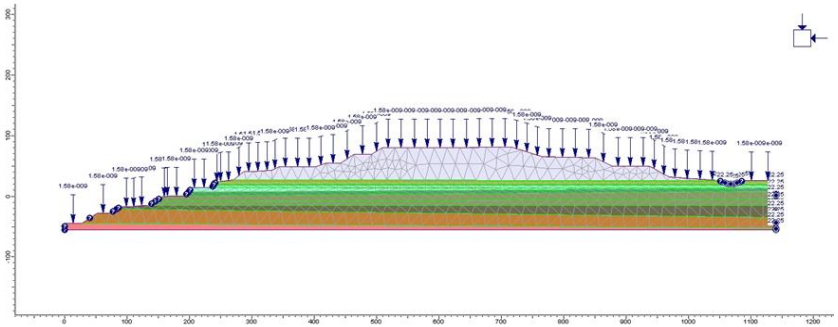


Дослідження розвитку геофільтраційних процесів та їх впливу на стійкість бортів кар'єрів та породних відвалів

Схема до прогнозу гідродинамічного режиму алювіального водоносного горизонту при просуванні контуру кар'єру



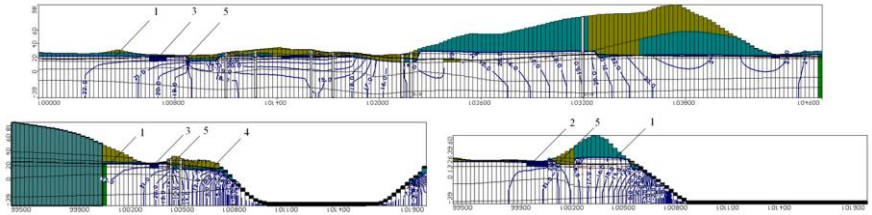
Розрахункова гідродинамічна схематизація борту кар'єру і породного відвалу



Розрахункові значення коефіцієнтів запасу стійкості ділянки сполучення борту кар'єру і відвалу

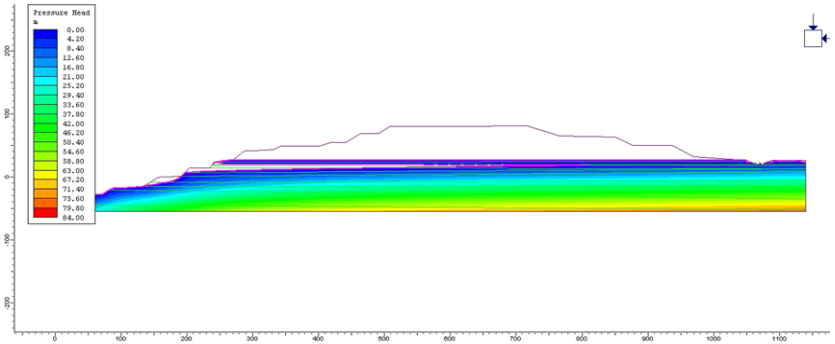
Розрахункові варіанти	Коефіцієнт стійкості, $K_{ст}$, дол. од.	
	Розрахункові профілі	
	м.о. 66 – 68	м.о. 72 – 74
Необводнений породний масив	1,359	1,315
Обводнений породний масив	1,266	1,091

Гідродинамічні профілі досліджуваної території в умов проектованого положення нового русла р. Інгулець при спорудженні нової ПФЗ і очікуваному положенні контуру кар'єра

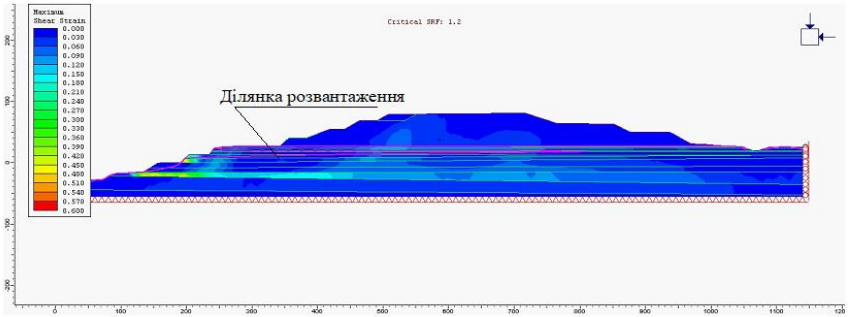


1 – рівнева поверхня; 2, 3 – відповідно існуюче і проектоване положення нового русла р. Інгулець; 4, 5 – відповідно існуюча і проектована ПФЗ

Розподіл гідравлічних напорів в модельованому породному масиві

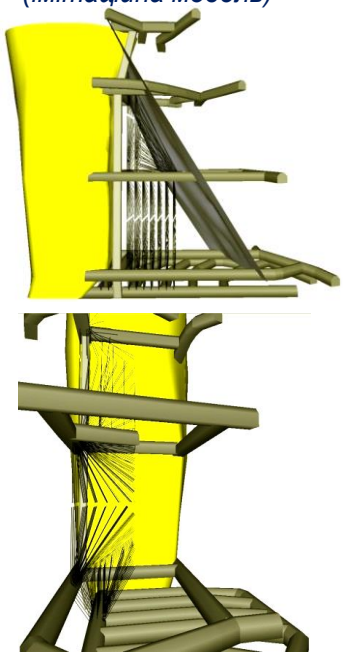


Характер зсувного деформування ділянки сполучення борту кар'єру і породного відвалу



Обґрунтування технологічних рішень та економічної ефективності щодо підвищення стійкості природно-техногенних масивів

Оптимізовані параметри камер (імітаційна модель)



Проект відпрацювання камери

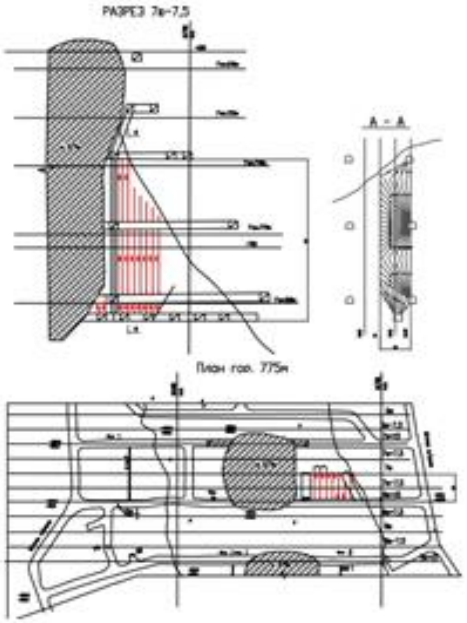
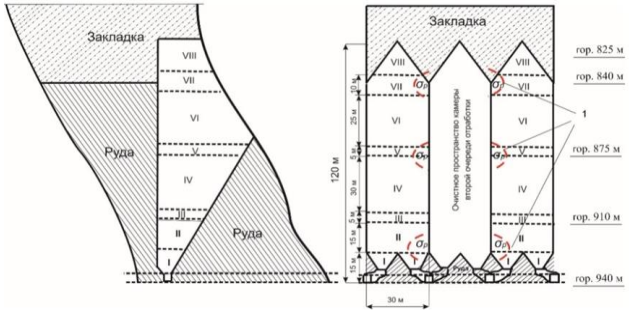
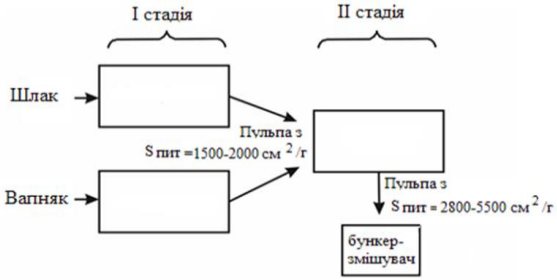


Схема формування стійкого різноміцного закладного масиву



Рекомендована схема подрібнення шлаку і флюсу для приготування закладної суміші



Залежність обсягу порід розкриву, що оберігається від порушення при збільшенні кута укосу борту кар'єра зі зростанням його висоти: 1– 50º; 2 – 60º; 3 – 70º; 4 – 80º

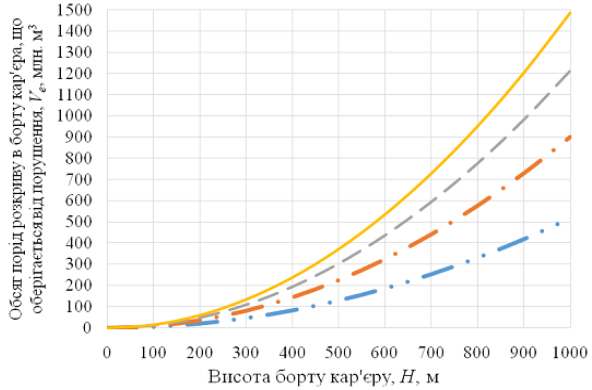
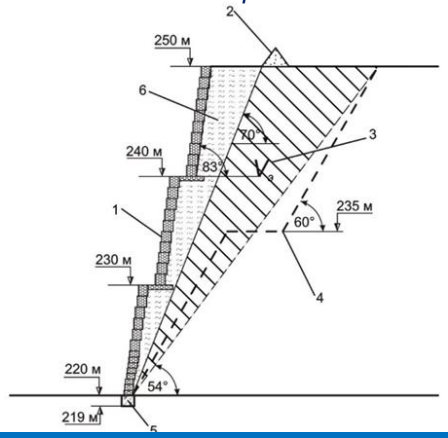
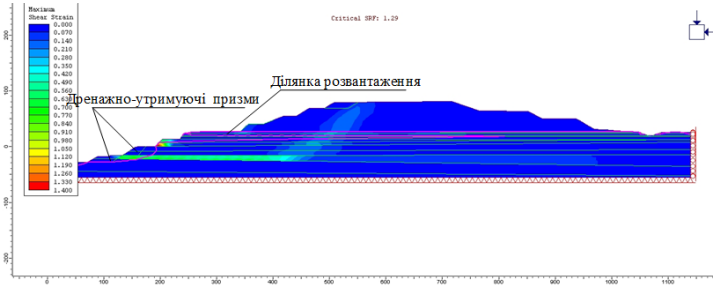


Схема формування уступів неробочого борту кар'єра зі зведенням підпірної стінки з габіонів



Спорудженні дренажно-утримуючих призм і породних смуг (коефіцієнт запасу стійкості K_{cm} = 1,29)



Основні техніко-економічні показники застосування розроблених ресурсозберігаючих технічних заходів з підвищення стійкості природно-техногенних масивів

- формування підпірних призм дозволяє підвищити стійкість відвалів і розмістити додаткові об’єми порід розкриву у межах 290 – 385 тис.м^3 із зниженням витрат до 18-20% у розрахунку на 1 м^3 гірничої маси;

- оптимізація параметрів камер знижує на 13% питому вагу підготовчих робіт при видобутку руди з камери та на 13% – витрати на повторне подрібнення та ремонтні роботи;

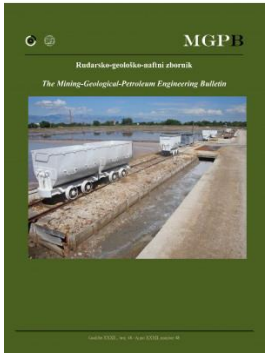
- зниження рівня збіднення видобутої руди, що досягається при оптимізації розмірів камер, дозволяє підвищити ціну на +4,5%, що дозволяє збільшити рентабельність продукції на 10%;

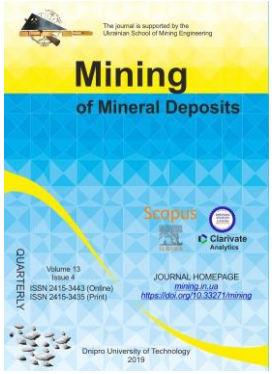
- на 10-15% знижуються витрати на формування стійкого штучного масиву при одночасному підвищенні міцності до 25%.

Публікація та реалізація результатів досліджень роботи

Основні результати роботи опубліковано у **110** наукових працях, серед яких: **1** колективна монографія та **2** колективні розділи закордонної монографії; **2** навчальні посібники; **31** стаття у журналах, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science; стаття у закордонних журналах; **34** фахових статті з переліку МОН України; **35** статей та тез доповідей у матеріалах закордонних та вітчизняних конференцій; **4** патенти на винахід. За напрямом представленої наукової роботи захищено **3** кандидатські дисертації та **1** кандидатська дисертація готується до захисту.

h-індекс роботи за наукометричними базами даних: Scopus – **7**; Web of Science – **3**; Google Scholar – **13**.





Реалізація результатів роботи. Масштаби реалізації результатів роботи підтверджуються їх впровадженням в проектну документацію та у формі науково-технічних рішень на ПрАТ Петровський кар’єр «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат», ПрАТ «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат», ПрАТ «Запорізький залізорудний комбінат».

Основні наукові та практичні результати роботи

- ✓ Сформульовано та розкрито поняття та уявлення щодо природно-техногенних масивів при розробці залізорудних родовищ та основні геомеханічні та гідромеханічні проблеми їх стійкості, складена їх класифікація;
- ✓ Вперше виявлено кількісний взаємозв'язок величини та інтенсивності обвалень вміщуючих порід висячого боку рудного покладу зі зміною їх морфологічного складу, міцнісної характеристики, кутом падіння та потужністю рудного покладу. Зона інтенсивних руйнувань порід вимагає оптимізації параметрів системи розробки;
- ✓ Вперше встановлено шляхом моделювання на еквівалентних матеріалах, що напруження порід висячого боку рудного покладу зменшуються у 3 рази шляхом залишення рудного цілика рівного 0,5 ширини очисної камери в слабких породах; встановлені експоненційні залежності зміни величин деформації та коефіцієнту концентрації напружень у масив зі збільшенням глибини гірничих робіт та відстані від контуру камер в сторону порід висячого боку;
- ✓ Вперше встановлено граничне значення питомої поверхні частинок доменного шлаку та вапняку $S_{пит}$=5500 см^2/г у формуванні структури стійкого закладного масиву, вище якого його міцність не змінюється. Виявлені нові стійкі форми структурних утворень у закладному масиві залежно від хімічного складу при різній питомій поверхні частинок шлаку та вапняку;
- ✓ Доведено, що тренд зменшень напружень спрямований на підвищення міцності штучного масиву на контурі його відслонення очисними роботами, при чому зміцнення шару штучного масиву на 30% зменшує зону стискаючих напружень у 2 рази і більше в вертикальному та горизонтальному напрямках;
- ✓ Встановлено, що гідродинамічний вплив породного відвалу в межах борту кар'єру визначається рівнем інфільтраційного живлення ділянки розташування відвалу та наявністю шару слабопроникних ущільнених порід в його підошві, що сприяє формуванню в нижньому інтервалі складованих порід водонасиченої зони;
- ✓ Надано кількісно-якісну оцінку геомеханічного стану відвалу пустих порід з концентрацією напружень в середній частині відвалу та встановлено коефіцієнти стійкості, що свідчать про достатнє стійкого положення укосів відвалу. Встановлено залежність обсягу порід розкриву, що зберігається від порушення при збільшенні кута укосу борту кар'єра зі зростанням його висоти;
- ✓ Удосконалено існуючу методику визначення стійких параметрів камерних систем розробки із закладанням виробленого простору твердіючими сумішами і рекомендовано застосовувати камерну систему розробки з твердіючим закладенням в умовах нестійких порід шириною камери 15 м і висотою від 35 до 80 м залежно от контурів рудного покладу;
- ✓ Розроблено рекомендації параметрів технології формування стійкого різноміцного закладного масиву з дрібнодисперсних в'язких часток шлаку і відходів флюсу при відпрацьовуванні запасів залізної руди;
- ✓ Рекомендовано для прибирання зруйнованої частини відвалу і повернення його в межі земельного відводу здійснити комплекс заходів: виймання частини порід відвалу поярусно з першого та другого ярусу, а для підвищення коефіцієнту стійкості пропонується породи зсуву перемістити в основу відвалу і сформувати підпорну призму висотою 9,0 м. Ширина призми по верхній частині складає 20 м. При цьому коефіцієнт стійкості на проблемній ділянці відвалу буде становити 1,11;
- ✓ Визначено, що спорудження протифільтраційної завіси шириною 0,7 м і гідравлічній проникності матеріалу завіси не вище 0,001 м/доб забезпечує захист східного борту від водопритоків з алювіальних відкладень р. Інгулець в кар'єр при існуючому положенні його контуру.