



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИ
СЪЮЗ ПО МИННО ДЕЛО,
ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛУРГИЯ



ЕЛАЦИТЕ МЕД
25 ГОДИНИ В ГРУПА ГЕОТЕХМИН



СБОРНИК ДОКЛАДИ

ТРЕТА НАЦИОНАЛНА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКА КОНФЕРЕНЦИЯ

УПРАВЛЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩА

11–13 юни 2025 г.

Комплекс „20-ти април“

гр. Копревщица

Посвещава се на:



140 години
ФЕДЕРАЦИЯ НА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИТЕ СЪЮЗИ В БЪЛГАРИЯ



60 години
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИ СЪЮЗ ПО МИННО ДЕЛО, ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛУРГИЯ



50 години
ЕЛАЦИТЕ-МЕД АД
25 години
В ГРУПА ГЕОТЕХМИН



**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИ
СЪЮЗ ПО МИННО ДЕЛО,
ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛУРГИЯ**



ЕЛЦИТЕ МЕД
25 ГОДИНИ В ГРУПА ГЕОТЕХМИН

СБОРНИК ДОКЛАДИ
ТРЕТА НАЦИОНАЛНА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКА КОНФЕРЕНЦИЯ
УПРАВЛЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТ
НА ХВОСТОХРАНИЛИЩА

КОНСУЛТАТИВЕН СЪВЕТ

**проф. д-р инж. Димитър Тошев, проф. д-р инж. Мария Маврова-
Гиргинова, д-р инж. Тоньо Чолаков,
доц. д-р инж. Кремена Дедеянова, инж. Стоил Димитров,
проф. д-р инж. Георги Михайлов, инж. Георги Петров,
инж. Мариела Джиджинкова,
доц. д-р инж. Екатерина Серафимова, инж. Щерьо Щерев**

ISSN 2815-472X

**Научно-технически съюз по минно дело,
геология и металургия**



АСАРЕЛ МЕДЕТ·АД

МИННО-ОБОГАТИТЕЛЕН КОМПЛЕКС - ГР. ПАНАГЮРИЩЕ



МИННО-ОБОГАТИТЕЛЕН КОМПЛЕКС
„Асарел-Медет“ АД
4500 Панагюрище, България
e-mail: pbox@asarel.com
www.asarel.com







ПРОЕКТИРАНЕ И СТРОИТЕЛСТВО НА ИНФРАСТРУКТУРНИ ОБЕКТИ

ПРОЕКТИРАНЕ И СТРОИТЕЛСТВО НА ПРОМИШЛЕНИ ОБЕКТИ

ПРОЕКТИРАНЕ И СТРОИТЕЛСТВО НА ГРАЖДАНСКИ ОБЕКТИ

ГЕОДЕЗИЧЕСКИ УСЛУГИ

WWW.GEOSTROY.COM





ГРУПА ГЕОТЕХМИН  GEOTECHMIN GROUP

www.geotechmin.com



THE
PARTNER
YOU
CAN **RELY ON**



geotradin.bg



ИНВЕСТИРАМЕ В БЪДЕЩЕТО



dundeeprecious.com



•МИНИ МАРИЦА-ИЗТОК• ЕАД

ЕНЕРГИЙНА НЕЗАВИСИМОСТ И НАЦИОНАЛНА СИГУРНОСТ



„Мини Марица-изток“ ЕАД, гр. Раднево е най-голямото открито въгледобивно предприятие в Република България. Неговата дейност е с определяща значимост, както за националния енергиен баланс, така и за икономическия просперитет на региона и страната. Основната мисия и цел на дружеството е: енергийна независимост и национална сигурност чрез ритмичната доставка на въглища за термичните централи в региона. Дружеството има три открити рудника в експлоатация: рудник „Трояново-1“, рудник „Трояново-север“ и рудник „Трояново-3“. Те доставят лигнитни въглища на термичните електроцентрали в комплекса „Марица-изток“: „ТЕЦ Марица изток 2“ ЕАД, „ТЕЦ Контур Глобал Марица Изток 3“ АД, ТЕЦ „Ей И Ес-Гълъбово“ и „Брикел“ ЕАД.

Седемдесет години историята на „Мини Марица-изток“ е историята на съвременния открит въгледобив в България. Най-голямото българско въгледобивно дружество работи за енергийната независимост и сигурността за развитието на националната икономика. „Мини Марица-изток“ ЕАД (ММИ) е 100% държавно предприятие, което експлоатира най-големите лигнитни мини в България, разположени в югоизточната част на района на Горнотракийската низина с обща площ на лигнитното находище около 240 кв.км.

Добиваната електроенергия от лигнитните въглища е с относително най-ниска себестойност и висока конкурентоспособност, което предопределя изключително важното значение на добива от Източномаришкото находище за енергийния баланс и енергийната независимост на страната.

Цяло седемдесетилетие лигнитните въглища, добивани в „Мини Марица-изток“ са единственият конкурентен местен енергиен ресурс в електроенергийния баланс на Република България сред останалите енергийни източници.

От началото на експлоатацията на „Мини Марица-изток“ ЕАД до юли 2022 г. вкл. в дружеството са добити 1 278 527 986 тона въглища и са разкрити, транспортирани и насипани 4 940 182 548 кубични метра земна маса.

„Мини Марица-изток“ ЕАД е живата история на откритият въгледобив в България. развитието на дружеството е цел и мисия на няколко поколения българи. От основаването си досега, комплексът е част от енергийната независимост на страната ни. Той е най-големият на Балканския полуостров и стратегически обект от националната сигурност.

Водеща компания в добива на оловно-цинкови руди



В хармония
с Природата



Фотоволтаични

печи

Водоелектроенски

Офиси

Мини, промишлено и гражданско

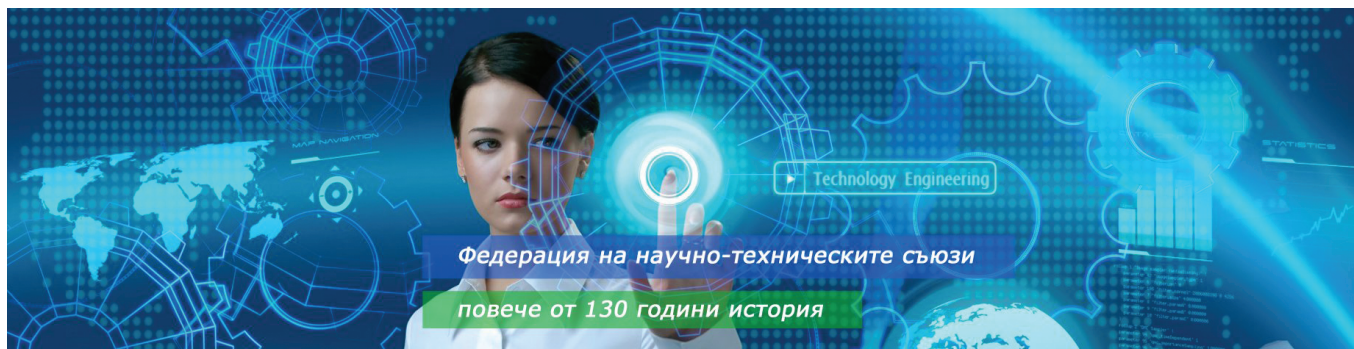
Хотели и балнео туризъм



Енергийна инфраструктура



Минстрой Холдинг АД
бул. „Д-р Г. М. Димитров“ №57
1700 София
tel.: +359 2 963 55 55
fax: +359 2 962 50 85
www.minstroy.com



Федерацията на научно - техническите съюзи (ФНТС) в България, е творческо - професионално, научно-просветно, неполитическо сдружение с нестопанска цел на юридически лица - съсловни организации, регистрирани по ЗЮЛНЦ, в които членуват инженери, икономисти и други специалисти от областта на науката, техниката, икономиката и земеделието. През 2015 г. ФНТС чества 130 години от учредяването си.

ФНТС обединява 19 национални сдружения - научно-технически съюзи (НТС) и 34 териториални сдружения - ТС на НТС, в които членуват над 15000 специалисти от цялата страна.

ФНТС е съучредител и член на Световната федерация на инженерните организации (WFEO). ФНТС членува и в Европейската федерация на националните инженерни асоциации (FEANI).

ФНТС е собственик на еднолично дружество с ограничена отговорност "ИНОВАТИКС" ЕООД което се занимава с инженерно-внедрителска дейност.

ФНТС издава свой собствен вестник "Наука и общество". Членове на ФНТС издават 12 научно-технически списания.

Към ФНТС функционира Център за професионално обучение, лицензиран от НАПОО - към Министерски съвет.

Основните задачи на ФНТС са:

- **Да утвърждава организацията като активен член на гражданското общество, да съдейства за повишаване общественото влияние и престижа на българските инженери, икономисти, специалисти в земеделието, техници, учени и изобретатели.**
- **Да стимулира и насърчава творческата активност и постижения на своите членове, както и да защитава професионалните им интереси.**

ФНТС, съвместно с националните и териториалните сдружения, организира годишно повече от 600 научно - технически мероприятия: конференции, симпозиуми, семинари, дискусии и др.

Нашият Дом на техниката се намира на ул. Г. Раковски 108, в гр. София.

Повече информация ще намерите на www.FNTS.bg.

СЪС СЪДЕЙСТВИЕТО НА

- Министерство на енергетиката
- Министерство на икономиката и индустрията
- Министерство на околната среда и водите

СЪОРГАНИЗАТОРИ

- Федерация на научно-техническите съюзи в България
- Българска минно-геоложка камара
- Българска асоциация на металургичната индустрия
- Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски"
- Университет по архитектура, строителство и геодезия
- Химикотехнологичен и металургичен университет
- Българско дружество по големите язовири

ПАРТНЬОРИ

- "Асарел-Медет" АД
- "Аурубис България" АД
- "Геопроект" ЕООД
- "Геострой" АД
- "Геотехмин" ООД
- "Геотрейдинг" АД
- "Горубсо-Мадан" АД
- "Дънди Прешъс Металс Крумовград" ЕАД
- "Дънди Прешъс Металс Челопеч" ЕАД
- "Екоинженеринг-РМ" ЕООД
- "Елаците-Мед" АД
- "Каолин" ЕАД
- "Мини Марица-изток" ЕАД
- "Минстрой Холдинг" АД
- "Родопи Еко Проджектс" ЕООД
- "Холдинг КЦМ 2000" АД

С МЕДИЙНОТО СЪДЕЙСТВИЕ НА

- сп. "Минно дело и геология"
- сп. "Геология и минерални ресурси"
- в-к "Рудничар"
- в-к "Наука и общество"

ОРГАНИЗАЦИОНЕН КОМИТЕТ

Председател	
доц. д-р инж. Кремена Дедеянова	Председател, НТС по минно дело, геология и металургия
Почетен председател	
проф. д-р инж. Цоло Вутов	Почетен председател, НТС по минно дело, геология и металургия
Зам.-председатели	
инж. Стоил Димитров	Генерален директор, "Елаците-Мед" АД
д-р инж. Владимир Вутов	Зам.-председател, НТС по минно дело, геология и металургия
инж. Драгомир Драганов	Председател, БМГК
проф. д-р инж. Илия Гърков	Изпълнителен вицепрезидент и Главен оперативен директор, Дънди Прешъс Металс
проф. д-р инж. Мария Маврова-Гиргинова	Университет по архитектура, строителство и геодезия
проф. д-р инж. Николай Вълканов	Почетен председател, Българска минно-геоложка камара
инж. Николай Пелтеков	Изпълнителен директор, "Асарел-Медет" АД
проф. д-р Светлана Браткова	Зам.-Ректор, Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски"
Тодор Тодоров	Изпълнителен директор, "Мини Марица-изток" ЕАД
инж. Щерьо Щерев	Зам.-председател, НТС по минно дело, геология и металургия
Членове	
доц. д-р инж. Андриана Сурлева	Химикотехнологичен и металургичен университет
инж. Андриян Вълчев	Ръководител направление „Оперативна дейност“, "Каолин" ЕАД
доц. д-р арх. Гичка Кутова - Каменова	Ректор, Университет по архитектура, строителство и геодезия
инж. Данчо Тодоров	Изпълнителен директор, "Нипроруда" АД
инж. Димо Кирилов	Директор Производство, "Аурубис България" АД
инж. Ивайло Станев	Управител, "Геопроект" ЕООД
д-р инж. Иван Вутов	Председател на СД, "Геотрейдинг" АД
доц. д-р инж. Иван Митев	Изпълнителен директор, Българска минно-геоложка камара
доц. д-р Никола Добрев	"Холдинг КЦМ 2000" АД
д-р инж. Никола Рангелов	Председател, Българска асоциация на металургичната индустрия
проф. д-р Румяна Вацева	Геологически институт, БАН

СЪДЪРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ НА УТАЕЧНИТЕ ЕЗЕРА НА ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ „БЕНКОВСКИ 2“	1
Лъчезар Геров, Момчил Бояджиев	
ТЕНДЕНЦИИ И ПОДХОДИ ЗА МОНИТОРИНГ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩА В РЕАЛНО ВРЕМЕ	8
Димитър Фотев, Драгомир Бояджиев	
ИНТЕГРИРАНО СЪОРЪЖЕНИЕ ЗА СЪХРАНЕНИЕ НА МИННИ ОТПАДЪЦИ, ЕКСПЛОАТАЦИЯ, МОНИТОРИНГ И КОНТРОЛ НА КРИТИЧНИ ПАРАМЕТРИ	18
Аница Николова, Орлин Коруев	
ИЗСЛЕДВАНИЯ И АНАЛИЗИ НА ОПАСНОСТТА ОТ ВТЕЧНЯВАНЕ НА ХВОСТА НА ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ „ЛЮЛЯКОВИЦА“. МЕРОПРИЯТИЯ ЗА ОСИГУРЯВАНЕ НА УСТОЙЧИВОСТТА	25
Стефан Тангъров	
НАДГРАЖДАНЕ НА КОНТРОЛНО-ИЗМЕРВАТЕЛНАТА СИСТЕМА (КИС) ЗА ПОВЪРХНОСТЕН И ПОДЗЕМЕН МОНИТОРИНГ ПРИ НАРАСТВАНЕ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ „ЛЮЛЯКОВИЦА“ ВЪВ ВИСОЧИНА	31
Владимир Додников	
СЪВРЕМЕНЕН ПОДХОД ЗА ГЕОТЕХНИЧЕСКО ХАРАКТЕРИЗИРАНЕ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩА – ДВА БЪЛГАРСКИ ПРИМЕРА ОТ ПРАКТИКАТА	39
Николай Милев	
ХИДРОТРАНСПОРТНА СИСТЕМА НА ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ „БЕНКОВСКИ 2“. ОСНОВНИ ПОЛОЖЕНИЯ ПРИ ХИДРАВЛИЧНО ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА НАПОРЕН ХИДРОТРАНСПОРТ	58
Веселин Карасинкерев, Йоана Балачева	

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА РЕАГИРАНЕ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩА	66
Лена Михова, Николай Керенчев	
ГЕОТЕХНИЧЕСКА БАЗА ДАННИ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ „БЕНКОВСКИ 2“	74
Никола Тошков, Цветан Дилов, Желязко Ялъмов	
ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОТЕНЦИАЛА НА ХВОСТОХРАНИЛИЩАТА НА РУДНИ НАХОДИЩА КАТО ИЗТОЧНИЦИ НА КРИТИЧНИ И СТРАТЕГИЧЕСКИ СУРОВИНИ: ПРЕДВАРИТЕЛНИ РЕЗУЛТАТИ	80
Димитрина Димитрова, Румяна Вацева, Диана Йорданова, Ирена Пейчева	
МИННИ И МЕТАЛУРГИЧНИ ОТПАДЪЦИ ОТ ДОБИВА НА МЕТАЛИ И ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ТЯХНОТО ОПОЛЗОТВОРЯВАНЕ. ПРЕГЛЕД НА БЪЛГАРСКАТА И СВЕТОВНАТА ПРАКТИКА	87
Ирина Маринова, Борислав Барбов, Лилия Цветанова	
ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ ЧЕЛОПЕЧ – НАШИЯТ ПОДХОД КЪМ ПОСТИГАНЕ НА СЪОТВЕТСТВИЕ С ГЛОБАЛЕН ИНДУСТРИАЛЕН СТАНДАРТ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА МИННИ ОТПАДЪЦИ	97
Люdmил Стоянов Кантарджиев	



УПРАВЛЕНИЕ НА УТАЕЧНИТЕ ЕЗЕРА НА ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ „БЕНКОВСКИ 2“

инж. Лъчезар Геров, l.gerov@ellatzite-med.com
инж. Момчил Бояджиев, m.boyadzhiev@ellatzite-med.com
„Елаците-Мед“ АД

„Елаците-Мед“ АД е водещо дружество в минната индустрия на Република България, с основен предмет на дейност добив и първична преработка на медно-порфирни златосъдържащи руди и производство на меден концентрат от находище „Елаците“ (Фиг.1). Добитата и натрошена скална маса се транспортира по магистрална гумено-транспортна лента под „Стара планина“ от открития рудник, разположен в землищата на гр. Етрополе и с. Челопеч, до Обогатителния комплекс, с. Мирково. След преработката отпадъкът от флотацията се депонира в хвостохранилище „Бенковски-2“. Компанията се стреми към устойчиво развитие, като инвестира в най-съвременно оборудване и технологии, въвежда и популяризира добрите практики, инициативи и иновации в областта на производството, здравословни и безопасни условия на труд и опазване на околната среда.



Фиг. 1. Рудник „Елаците“ и Обогатителен комплекс с.Мирково.

Хвостохранилище „Бенковски-2“

Хвостохранилище „Бенковски-2“ (Фиг.2) се намира на 7 km от обогатителната фабрика в село Мирково, Софийска област, в непосредствена близост до селата Чавдар и Бенковски. В предвид



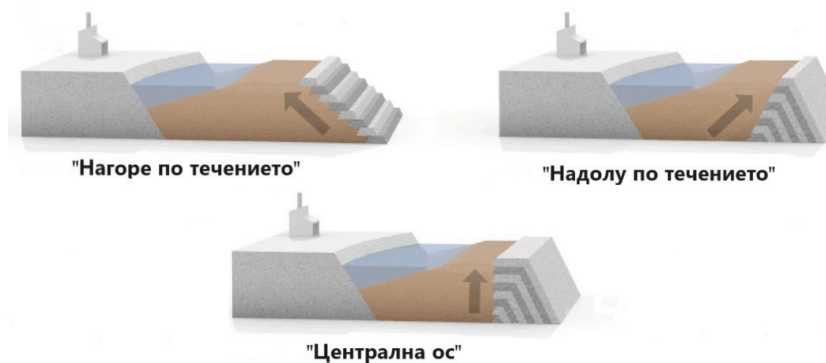
натрупания опит от хвостохранилище „Бенковски-1“, „Бенковски-2“ също е скатен тип. Заема площ от 4000 декара и е разделено на две секции, „Ай дере“ и „Сулуджа дере“, които се запълват посредством конфигурацията на терена и насипни съоръжения надграждащи се във височина със запълването на съоръжението. Секциите са отделени технологично една от друга чрез „Разделителна дига“, като всяка има свое утаечно езеро образувано в нейната опашка.



Фиг. 2. Въздушен откос, секция „Ай дере“

Технология на изграждане

Хвостохранилището влиза в експлоатацията през 1998г., като основните стени на двете клетки се изграждат чрез хидроциклонирание по схема „Надолу по течението“ (Фиг.3). Животът му е удължаван няколко пъти през последните десетилетия с минимални разширявания на заливаемите площи и максимално оползотворяване на наличните такива. С нарастване на съоръжението във височина и излизане извън естествените форми на релефа се пристъпи към комбинирана схема на изграждане с основна технологична схема „Надолу по течението“ и съпътстваща „Нагоре по течението“. След усвояването на обемите от страната на въздушните откоси на съоръжението съпътстващата схема се превръща в основна.



Фиг. 3. Технологични схема на изграждане на хвостохранилище

Сепарирането на хвоста се извършва с помощта на хидроциклони с диаметър $\varnothing 500$ mm, които са разположени през 8 m по дължината на работни короните на двете секции. При хидроциклонирането се



отделят фракции с диаметър $d_{ср.} \geq 0,18 \text{ mm}$ върху въздушния откос, като по този начин короната нараства изпреварващо от плажа с 5 m във височина. Фините частици от разделянето, с диаметър $d_{ср.} \leq 0,04 \text{ mm}$, се отвеждат в езерото, където се осъществява тяхното утаяване. Когато височината на плажът достигне до работната корона, депонирането се прехвърля към съседната секция. В запълнената клетка след консолидация се оформя нова работна корона, 5 m по-висока от предходната. Намивният хвостопровод, хидроциклоните и полустационарната дъждовална система се монтират върху нея. Първоначалния проект предвиждал експлоатация едва до 2016 г. Актуалният работен проект предвижда експлоатацията да продължи до 2031 год., като за безопасността на съоръжението, е необходимо изграждането на опорна призма от хидроциклонирани пясъци за повишаване на стабилитета на оградна дига „Улама“.

Управление на утаечните езера

Дейностите по изграждането на гореспоменатата призма стартираха през 2018 год., като с отлагането на хидроциклонирани пясъци върху въздушния откос, започна и намив от финни частици и образуване на нова плажна зона, с цел осигуряване на устойчиво водно ниво в новата хвостова стена. В резултат на срещуположния намив през годините се наблюдава редуциране на площта на утаечно езеро, намаляване на водния стълб и влошаване на качествата на избистрените води в него, до нива негодни за осъществяване на производствени процеси. В същото време при преминаване към основна схема на надграждане „Нагоре по течението“ за основната хвостова стена водещо до допълнително свиване на езерото в секция „Ай дере“, изправя ръководството на цех „Водно и хвостово стопнаство“ пред ново предизвикателството. А именно да осигури промишлени води за нуждите на Обогатителен комплекс, както и управлението на утаечните езера за осигуряване на безопасни плажни зони и условия за избистряне до целесъобразни нива. Обратната пропорционалност затруднява решението, тъй като за избистряне на постъпващите промишлени води е необходима площ и дълбочина за успокояване на потока, което противоречи с осигуряването на плажни ивици за статическия и хидравличен стабилитет на съоръжението. На фигури 4 и 5 са визуализирани промените в утаечните езера през годините.



Фиг. 4. Сателитно изображение на хвостохранилище „Бенковски-2“ 2016 год.



Фиг. 5. Сателитно изображение на хвостохранилище „Бенковски-2“ 2022 год.



Вследствие на гореизложеното през 2019 година се взе решение в северния край на „Разделителна дига“ да се изгради шахтов преливник, с помощта на който контролирано да се прехвърлят водите от секция „Ай дере“ в секция „Сулдужа дере“ за по-нататъшно избистряне и вкарване в оборотен цикъл. За проследяване на процеса са извършени редица измервания на двете езера, като обобщените данни са представени във Фиг. 6

Годи на	секция "Ай дере"	секция "Сулдужа дере"
	Обем на утаечно езеро	Обем на утаечно езеро
	[m ³]	[m ³]
2019	333 954	558 781
2021	317 260	571 928
2023	212 500	641 900

Фиг. 6. Данни за водните обеми в утаечните езера на х-ще „Бенковски 2“



Фиг. 7. Сателитно изображение на хвостохранилище „Бенковски-2“ 2024 год.

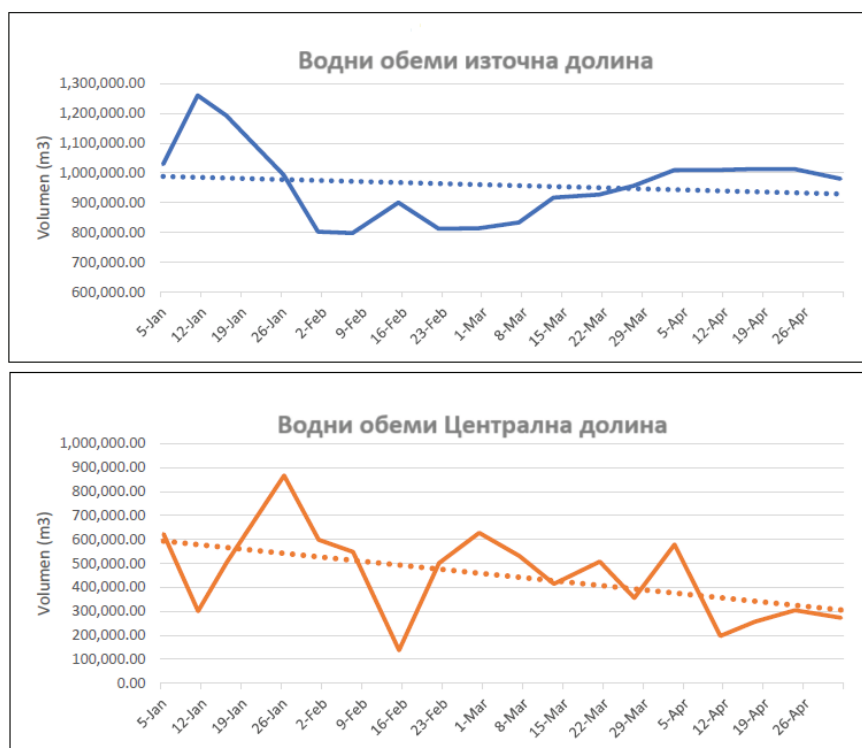
На Фиг. 7 се представят настъпилите промени в утаечните езера след изграждането на шахтовия преливник.

Ползи от процеса „Мъдфарминг“ при управлението на утаечните езера

В световен мащаб технологията „Мъдфарминг“ добива все по-голяма популярност, като през 2025 год. бяха доказани допълнителни ползи от процеса върху управлението на езерата и елиминиране на безотточни зони чрез използване на специализираната машина „Мъдмастер“.

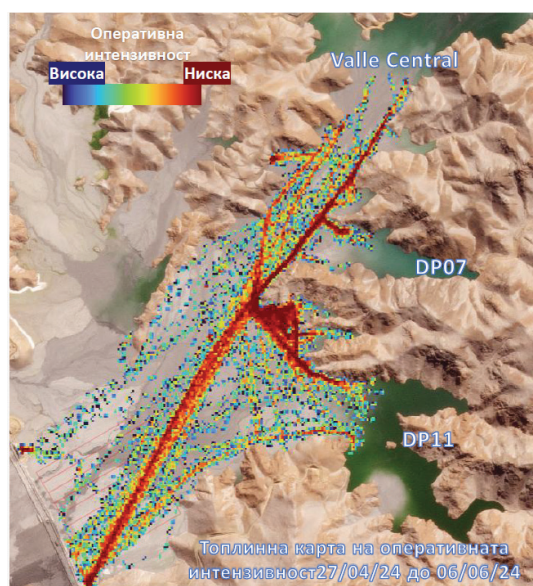


Фиг. 8. Ситуация преди обработка с „Мъдмастер“.



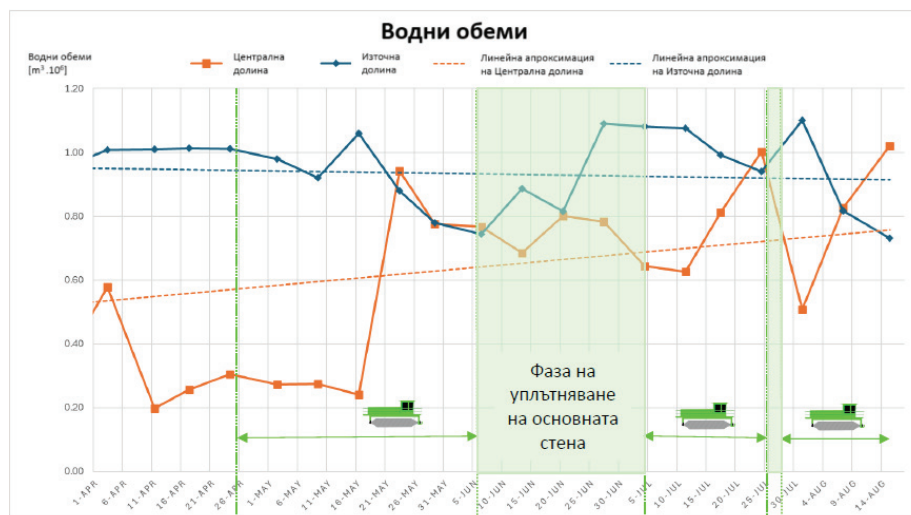
Фиг. 9. Водни обеми в Централна и Източна долина преди „Мъдфарминг“.

Основната задача в представения пример (Фиг. 8) е ликвидиране на безотточни зони DP07 и DP11 („Източна долина“) и насочване на освободените води към „Централна долина“, за осигуряване на нуждите на обогатителната фабрика. След подробен анализ на наличните водни количества в „Източна“ и „Централна долина“ (Фиг. 9), топографията на релефа и оперативния план на хранилището се съставя план за действие. Целта му е създаване на „канали“, чрез ускорена механична консолидация, позволяващи оттичането на водата задържана в DP07 и DP11 и насочването и към „Централната долина“ с поэтапното ликвидиране на двете безотточни зони.



Фиг. 10. Оперативна интензивност на „Мъдмастер“.

В топлинната карта се представя оперативната интензивност на специализираната машина „Мъдмастер“. В резултат от обработката на плажната зона, на Фиг.10 се визуализира нарастване на водния обем акумулиран в „Централна долина“ от над 570 хил. m^3 , едновременно с това се създава тенденция за намаляване на задържаните обеми вода в „Източна долина“ (Фиг.11) и се наблюдава и увеличаване на депонирания отпадък в DP11, като мощностите на натрупаните пластовете са над 3 m.



Фиг. 11. Водни обеми в Централна и Източна долина след „Мъдфарминг“.

Заклучение

На фона на настъпващите климатични промени водещи до намаляване на водните ресурси на Република България и зачестяването на водните режими по населите места, ръководството на „Елаците-Мед“ АД се стреми да ограничи използването на свежи води за производствени процеси. След представянето на резултатите от изследването върху управлението на езерата чрез „Мъдфарминг“, екипа на цех „Водно и хвостово стопанство“ съставя план за действие. Целта на който е оформяне на „канал“ за извеждане на остатъчните водни количества от секция „Ай дере“ (Фиг.12). Ликвидирането на утаечното езеро, гарантира статическия и хидравличен стабилитет на



съоръжението, както и непрекъснатото подаване на промишлени води за производствени цели. По този начин потреблението на свежи води се свежда до минимум.



Фиг. 12. План за действие 2025 год. за ликвидиране на утаечното езеро в секция „Ай дере“

Литература

1. Рекултивация на хвостохранилища „Бенковски 1“ и „Бенковски 2“ - инж. Стоил Димитров, инж. Лъчезар Геров, инж. Момчил Бояджиев
2. Геодезически измервания на подводния релеф на х-ще „Бенковски 2“ – „Гео Марк инженеринг“ ООД
3. Обобщен доклад – Индустриално изпитване на TSF 2024 – “Phibion” Pty. Ltd.



ТЕНДЕНЦИИ И ПОДХОДИ ЗА МОНИТОРИНГ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩА В РЕАЛНО ВРЕМЕ

гл. ас. др. инж. геол. Димитър Фотев – УАСГ София, email: fotev_fte@uacg.bg
инж. Драгомир Бояджиев – „Сентра“ ООД, email: boyadzhiev@sentra.bg

РЕЗЮМЕ

Настоящото изследване представя моментна картина и поглед върху тенденциите, моделите и общите съображения, идентифицирани в настоящата практика за мониторинг на хвостохранилища в реално време. Основавайки се предимно на информация, получена от съпътстващи изследвания на авторите (под формата на каталог на уредите и техниките за мониторинг в реално време за хвостохранилища), се обсъждат предизвикателствата и възможностите при системите за мониторинг в реално време. Разгледани са научените уроци и ключовите съображения между различните подходи за мониторинг, включително темите за предимствата и недостатъците, които са наблюдавани последователно чрез обратната връзка с глобалните доставчици

1. ВЪВЕДЕНИЕ

През последните десетилетия са документирани аварии, свързани с разрушаване на стени на хвостохранилища в различни региони по света, което закономерно поражда сериозна обществена загриженост. В отговор на нарастващото внимание към този проблем, минната индустрия е принудена да усъвършенства своите стандарти за проектиране, експлоатация и контрол на хвостохранилищата чрез прилагане на най-добрите налични технологии, с цел повишаване на сигурността и минимизиране на риска от инциденти.

В контекста на настъпващата цифровизация, сензорните технологии за мониторинг намират все по-широко приложение в минния сектор, предоставяйки възможности за непрекъснато наблюдение на състоянието на критичната инфраструктура.

Настоящият доклад разглежда степента на внедряване на сензорни системи за автоматизиран мониторинг и управление на риска при хвостохранилища, с акцент върху технологичния напредък и добрите практики, идентифицирани в съвременната научна литература. Анализът се основава предимно на данни, събрани в рамките на съпътстващи изследвания на авторите, както и на изготвен каталог на съществуващите уреди и техники за мониторинг, предлагани на пазара. В статията се анализират ключовите предизвикателства и възможности, свързани с внедряването на системи за мониторинг в реално време, както и уроците, извлечени от прилагането на различни подходи в практиката. Посочват се предимствата и недостатъците на част от технологиите, използвани за наблюдение и контрол на хвостохранилища.

2. РАЗРАБОТВАНЕ НА ПРОГРАМИ ЗА МОНИТОРИНГ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩА

При разработването на програми за мониторинг на хвостохранилища е необходимо да се спазват следните стъпки:

- Определят се видове измервания, които са необходими;
- Прави се подбор на измервателни инструменти, които да са най-подходящи за нуждите на конкретното хвостохранилище;
- Планира се местоположението, броя и дълбочината, на която ще бъдат разположени измервателните уреди;
- Избира се методологията за отчитане на измерванията;
- Вземат се решения относно обработката и представянето на получените данни.

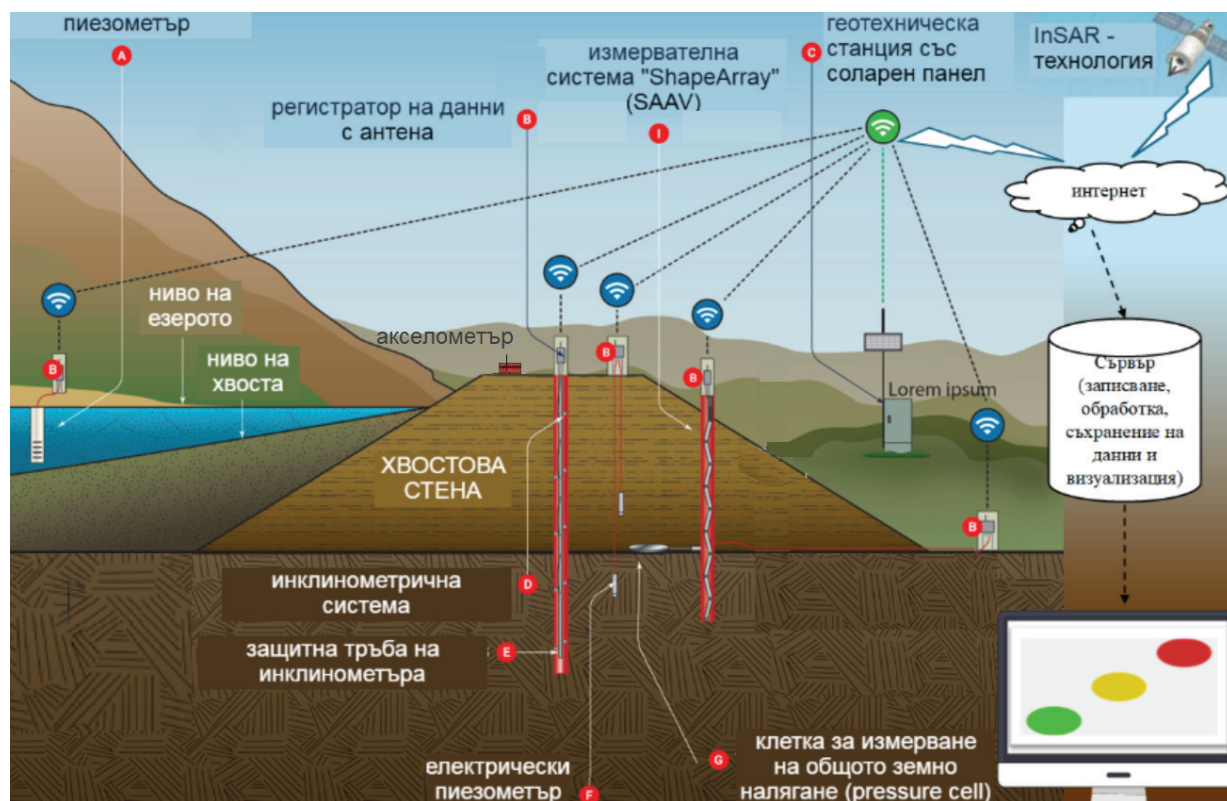
При повечето хвостохранилища се използват комплексни системи за мониторинг, които са предназначени за откриване и диагностициране на необичайни работни ситуации. Сложността на



системата за мониторинг зависи от сложността на обработката на данни, видът на сензорите, които се използват и потенциала за приложение на системата. В най-простия си вид системата за мониторинг има четири компонента основни функции:

- получаване на данни от сензори;
- предаване на тези данни към облак или централен компютър или регистратор на данни за съхранение;
- обработка на съхранените данни;
- показване на информацията във визуална, графична или цифрова форма.

На фигура 1 е показана типова схема при мониторинг на хвостохранилища на която са посочени най-често използваните за тази цел инструменти на канадската компания RST Instruments.



Фигура 1. Типова схема при мониторинг на хвостохранилища

3. КОНТРОЛНИ ПАРАМЕТРИ И ИНСТРУМЕНТИ ЗА МОНИТОРИНГ

В тази точка се разглеждат основните параметри, имащи значение за безопасността на хвостохранилищата, като са описани методите, начините и средствата, използвани в мониторинговите програми.

3.1 Мониторинг на поровите налягания и водните нива в хвостовите стени

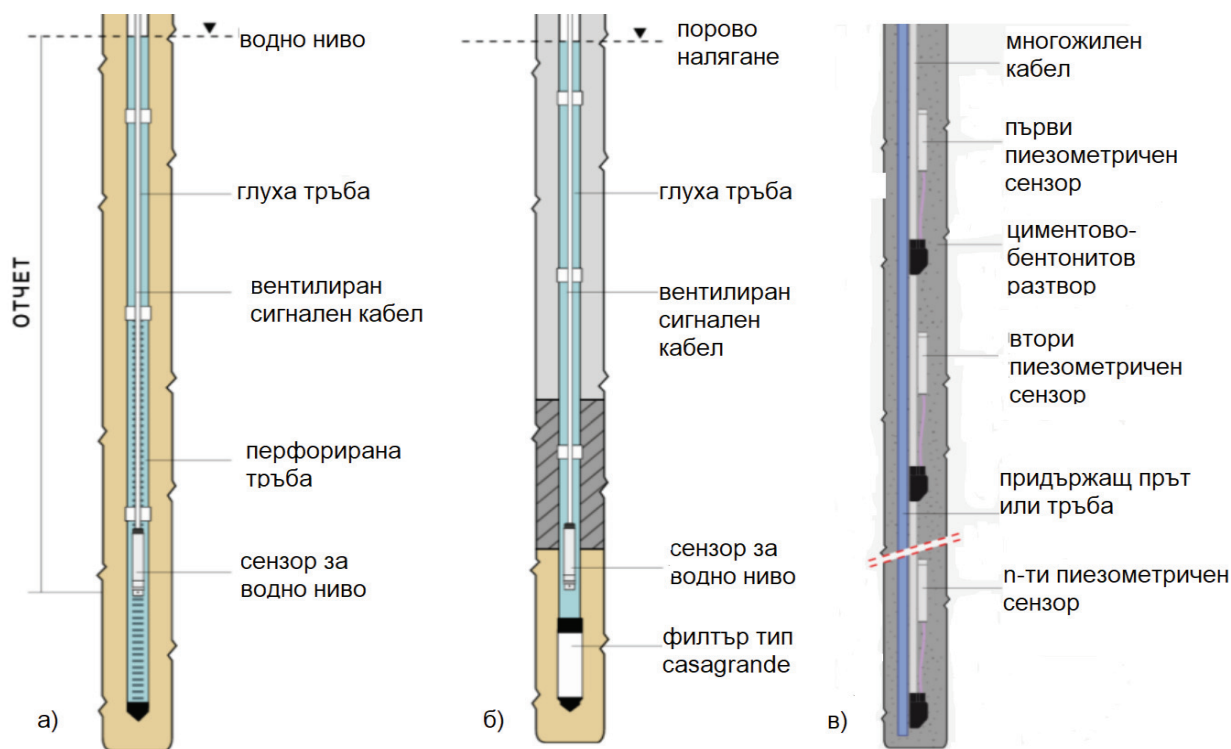
Най-често срещаната практика за наблюдение на депресионната линия на водите, филтриращи през хвостовите стени, е използването на пиезометри. Те са основни инструменти в геотехническия мониторинг, използвани за измерване и проследяване на поровото налягане в дисперсни и скални формации. Пиезометрите играят критична роля за безопасността на хвостохранилищата. Чрез предоставяне на прецизни данни за поведението на подземните води, пиезометрите помагат на геотехническите инженери да оценят стабилитета на съоръженията и рисковете, свързани с тяхната експлоатация.



Изборът на подходящи пиезометри за дадено съоръжение зависи от филтрационните характеристики на материалите и целите на измерването – дали се следи нивото на подземните води или налягането в порите. Най-общо пиезометрите се делят на два основни вида: *отворени пиезометри* и *затворени пиезометри*.

Тръбните пиезометри (standpipe) представляват тръба, чиято долна част съдържа филтър (напр. филтърна PVC тръба (фиг. 2-а) или порест филтър тип Casagrande (фиг. 2-б), свързан с горна, „глуха“ тръба, която достига до повърхността. Водата навлиза във филтъра и се изравнява до определено ниво в зависимост от проникваемостта на почвата. Ако филтърът е във водоносния хоризонт, се измерва нивото на подземната вода. Ако е изолиран в специфичен почвен слой, се измерва поровото налягане в този слой.

Запълнените пиезометри се монтират директно в почвата, когато е необходимо точно измерване на поровото налягане. За целите на хвостохранилищата най-често се използват пиезометри с вибрираща струна, които са идеални за дългосрочен мониторинг – често използвани при язовири. Голямо приложение намират и многоточкови пиезометри използвани за измерване на налягане на различна дълбочина (фиг. 2-в). За оптимални резултати, тези пиезометри обикновено се монтират по метода на пълното запълване (fully grouted method), при който сондажите се запълват с циментово-бентонитов разтвор. Този метод осигурява бърза инсталация и добра чувствителност към промените в налягането. Възможни са и други подходи – например чрез използване на пясъчна възглавница или циментови тапи.



Фигура 2. Типови схеми на различни видове пиезометри

В таблица 1 е извършено сравнение между тръбните и запълнените пиезометри, като са посочени предимствата и недостатъците за всеки тип.



Таблица 1. Предимства и недостатъци на тръбните и запълнените пиезометри

Тип пиезометър	Предимства	Недостатъци
Тръбни пиезометри	- Прости за инсталиране и икономични - Резултатите са по-лесни за тълкуване - Подходящи са за измерване на нивата на подземните води на водопроницаеви почви - Лесни са за поддръжка - Могат да се мерят с преносими инструменти - Могат да се вземат водни проби - Могат да се използват за измерване на филтрационните параметри	- Бавна реакция на промени в налягането - Възможността за запушване на филтрите - Не са ефективни в слабо проницаеми или наслоени почви
Запълнени пиезометри	- По-точни при измерване на порово налягане в различни геоложки слоеве - Подходящи за дългосрочен мониторинг - Работят ефективно в слабо проницаеми почви и под хидростатично налягане	- По-скъпи и изискват по-сложна инсталация - Необходимост от електронно оборудване и калибрация

3.2 Мониторинг на хоризонталните премествания

Мониторингът на хоризонталните премествания в стените на хвостохранилищата е от съществено значение за оценката за тяхната устойчивост и за ранно предупреждение от потенциални разрушаване. Прецизното проследяване на такива движения позволява своевременно предприемане на мерки за предотвратяване на аварии с тежки екологични и социално-икономически последици. Сред най-ефективните и често използвани технологии в тази област се отличават инклинометричните системи (ръчни и автоматични), рефлектометрията (TDR), интерферометричната радарна интерферометрия (InSAR) и геодезическите GNSS системи.

Инклинометрите измерват промените в наклона на тръби, поставена в сондажи, и по този начин се изчислява разпределението на страничните движения. Тръбите обикновено са PVC и са снабдени са с канали за ориентиране на сензорите за ориентиране на сензорния блок. Обикновено се използват тръби с диаметър между 70 и 85 мм.

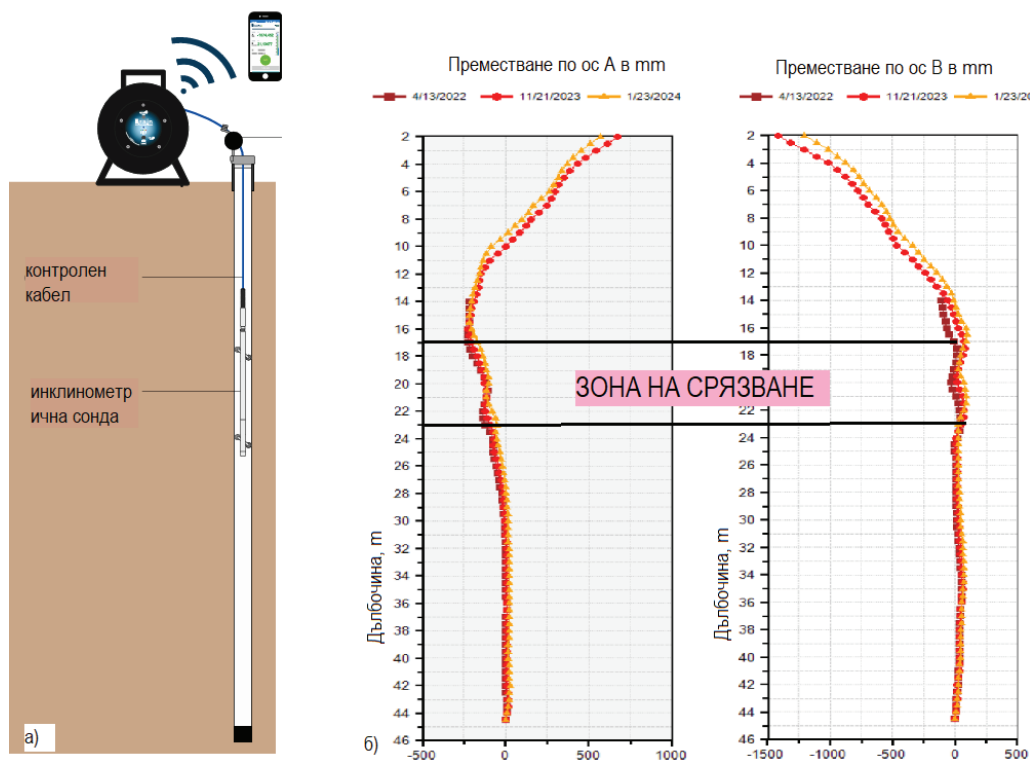
Ръчните инклинометрични измервания се извършват чрез инклинометрична сонда (фиг. 3-а), която се спуска в предварително инсталирана инклинометрична тръба с четири надлъжни канала. Сондата измерва ъгъла на наклон в две ортогонални равнини (А и В) на определени интервали по дължината на тръбата. Тези измервания позволяват определяне на хоризонталните премествания в дълбочина и идентифициране на активни зони на срязване. Резултати от инклинометрични измервания са представени на фигура 3-б. Деформационните криви на инклинометъра показват зоната на срязване, която се намира между неподвижната зона и предвижващите се части на масива.

Инклинометричният стринг представлява серия от последователно свързани двуосни MEMS - сензори, разположени по дължината на инклинометричната тръба. Тази система позволява непрекъснато автоматично измерване на хоризонталните премествания в реално време. Данните се събират и предават дистанционно, което позволява бърза реакция при отклонения от нормалното поведение на съоръжението.

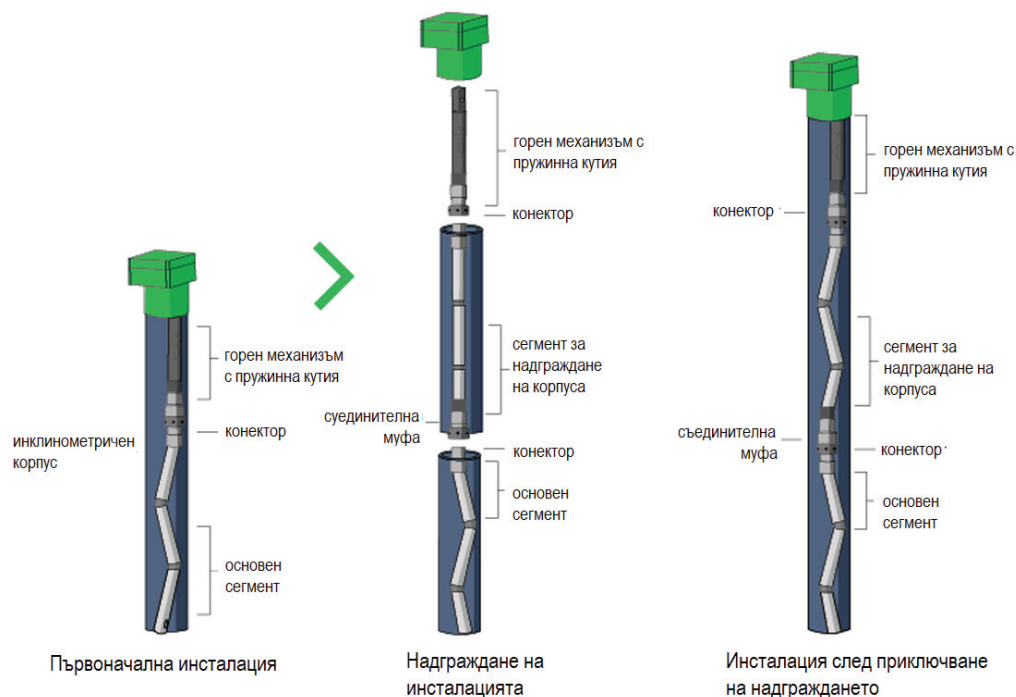
SAAV Extend е иновация, която е насочена към предизвикателствата на непрекъснатото издигане на хвостовите стени. Тя е част от модулната система ShapeArray™. Базирана е на модулни MEMS сензори, които се монтират директно в инклинометрична тръба без необходимост от ориентационни канали. SAAV Extend включва горен модул, който се свързва с базов модул, създавайки непрекъснат профил за следене на деформациите. Когато дойде време за надграждане, между горната и базовата сглобка могат да се добавят сегменти за удължаване на SAAV Extend Lift Extension, за да се увеличи общата дължина на сензора (фиг. 5). Уникалното при SAAV Extend е, че системата може да се разгъне и удължи, което я прави подходяща за дълбоки сондажи и зони с променливи дълбочини. Технологията позволява непрекъснато събиране на данни с висока разделителна способност и



дистанционен достъп чрез LTE/LoRa комуникация. Това я прави особено ефективна за дългосрочен мониторинг на устойчивостта на стените на хвостохранилища.



Фигура 3. Измервания с преносима инклинометрична сонда

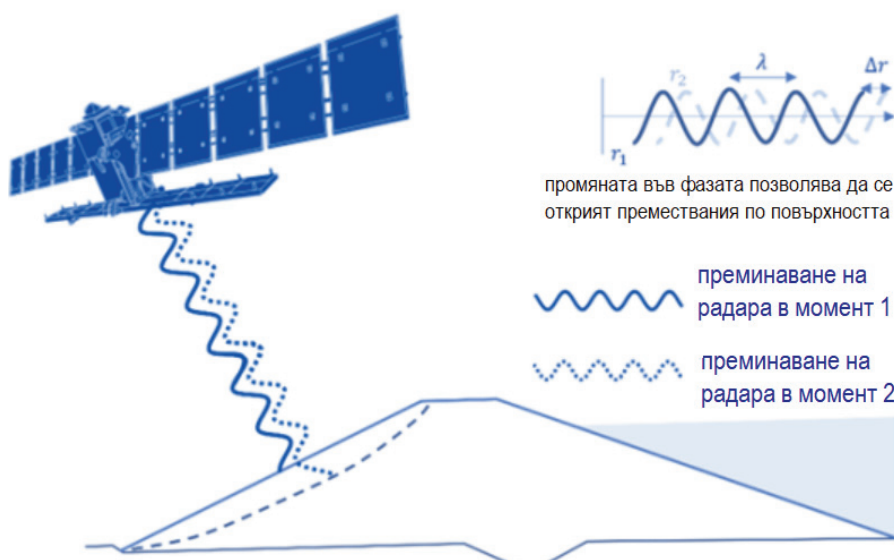


Фигура 4. Процес на надграждане на инклинометрична система SAAV Extend



TDR (Time Domain Reflectometry) като метод е един изключително икономичен подход за наблюдение на деформации на база геоложката структура на масива. На характерни места от деформационната зона в специално направени сондажи се поставят коаксиални кабели, които се фугират и по тях се изпращат електрически импулси. Отраженият електрически импулс, от мястото където е деформацията на кабела, определя промените в масива. Деформацията се регистрира само като промяна на разстоянието от повърхността, без да се определя посока.

InSAR е сателитна технология, която използва радарни изображения за откриване на деформации на земната повърхност. Основната идея на метода е да се формира интерферограма, която е резултат от наслагването от две радарни изображения на една и съща територия. Чрез сравнение на изображения, направени в различни моменти, се откриват промени в милиметров мащаб, включително хоризонтални и вертикални премествания. InSAR е особено полезен за мониторинг на големи площи и за откриване на бавни, постепенно развиващи се деформации.



Фигура 5. Принцип на InSAR- технология

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) системите се използват за прецизно проследяване на триизмерни премествания в конкретни точки, оборудвани с GPS/GLONASS приемници. При постоянно измерване GNSS позволява детайлен анализ на скоростта и посоката на движенията на повърхността на хвостохранилището.

В таблица 2 е извършено сравнение между гореописаните методи за мониторинг на хоризонталните премествания.

Таблица 2. Предимства и недостатъци на различни методи и за мониторинг на хоризонтални премествания при хвостохранилища

МЕТОД	ПРЕДИМСТВА	НЕДОСТАТЪЦИ
Ръчна инклинометрия	- Висока точност при измерване в дълбочина - Позволява точно локализиране на зони на срязване - Относително ниска първоначална цена	- Не е автоматична - изисква физическо посещение - Риск от човешки грешки при измерване - Трудоемко и времеемко при чести измервания
Инклинометричен стринг	- Автоматични измервания в реално време - Висока разделителна способност - Подходящ за непрекъснат мониторинг	- По-висока цена за инсталация - Изисква стабилно хранване и комуникационна връзка



SAAV Extend	- Не са необходими от специални тръби - Лесна инсталация и адаптивност към различни дълбочини - Автоматични измервания с висока точност	- Висока цена на оборудването - Ограничения в много дълбоки сондажи (>200 м)
Рефлектометрия (TDR)	- Добра за откриване на срязвания и внезапни деформации - Автоматичен мониторинг - Относително устойчива система	- Не предоставя информация за цялостно разпределение на преместванията - Трудности при калибриране на резултатите за малки деформации
InSAR	- Широкообхватен мониторинг (десетки до стотици км ²) - Милиметрова точност при подходящи условия - Без необходимост от наземна апаратура	- Чувствителност към растителност, сняг и промени на повърхността - Не винаги осигурява точна дълбочинна информация - Изисква специализиран софтуер за обработка
GNSS системи	- Прецизно триизмерно проследяване на точки - Подходящи за динамичен мониторинг на конкретни зони - Висока надеждност при добро покритие	- Извършва само точкови измервания (не площни) - Изисква постоянно поддържане на захранване и връзка - Скъпа мрежа при големи площи

3.3 Мониторинг на водните нива в хвостовите езера

Мониторингът на нивото на повърхностните води може да даде ранна индикация, в случай че има внезапно покачване на нивото поради наводнения, обилни дъждове или снеготопене. За да се избегне преливане, което може да доведе до разрушаване на хвостохранилището и/или изпускане на опасни отпадъци е важно да се определи максималното безопасно ниво на водата в езерото.

За наблюдения на нивата на хвостови езера се използват следните три вида сензори:

- хидростатични - измерващи налягането на водния стълб върху сензора;
- ултразвукови - излъчва ултразвукова вълна и измерват времето за нейното отразяване от повърхността;
- Радарни - излъчват микровълнова радиовълна и измерва времето за нейното отразяване от повърхността.

Характеристиките им са представени в таблица 3.

Таблица 3. Характеристики на инструменти и за мониторинг на повърхностните води

Характеристика	Хидростатичен сензор	Ултразвуков сензор	Радарен сензор
Контакт	Контактен (пополяем)	Безконтактен (над водата)	Безконтактен (над водата)
Точност	Много добра ($\pm 0.1\%$ от обхвата)	Средна до добра (зависи от условията)	Отлична ($\pm 0.05\%$ от обхвата)
Чувствителност към външни влияния	Чувствителен към промени в температурата и запушване	Чувствителен към мъгла, прах, вятър и валежи.	Минимална чувствителност към атмосферни условия
Издръжливост	Добра, но е нужен контрол срещу замърсяване и отлагания.	Може да се влияе от агресивна среда	Висока издръжливост в тежки среди.
Цена	Относително ниска	Средна	По-висока
Обслужване	Редовно почистване и проверка	По-рядка поддръжка.	Почти без поддръжка
Подходящи условия за работа	Спокойни води, контролирана среда	Открити, но не екстремни условия.	Всякакви, включително агресивна среда и големи площи.



3.4 Мониторинг на филтрационните води в хвостовите стени

Цялата вода филтрираша хвостовите стени трябва да се събира, а дебитът и може да бъде измерен чрез преливници с V-образен (фиг. 6), правоъгълен или трапецовиден тип. Използват се същите видове сензори, които са разгледани в т. 3.3. Инфилтрационният дебит е най-важният фактор, който трябва да се измерва по отношение на стабилитета на хвостовите стени. Той може да послужи като доказателство за всяка една сериозна повреда в хвостохранилищата. Обикновено е показателен за суфозионни процеси в хвостовите стени.



Фигура 6. Измерване на количеството на филтрация с V-образен преливник и радарен сензор

3.5 Мониторинг на общото почвено налягане

Измерването на общото налягане се използва за ефективното налягане в масива, което е необходимо при стабилитетните изчисления. То се определя от общото налягане, след изваждане на измереното порно налягане от него:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1)$$

където: σ е общото налягане, σ' – ефективно напрежение, а u е поровото налягане.

За измерването на общото налягане се използват специални камерите за измерване на общото почвено налягане. Това са плоски сензори (обикновено с кръгла или елипсовидна форма), които се вграждат в конструкцията на хвостохранилището (в основите на дигите, между слоевете от хвост, и др.). Състоят се от две стоманени плочи с флуид (или електрически компонент) между тях, който реагира на приложеното налягане. При натиск, течността/елементът вътре се компресираща, а промяната се отчита чрез датчик с вибрираща струна. За да се определяне поровото налягане, измерванията може да се комбинират с пиезометър за измерване на порово налягане (виж т. 3.1)



3.6 Сеизмичен мониторинг

Сеизмичният мониторинг, условно може да се поделити на два вида:

Активен мониторинг включва използването на изкуствени източници на сеизмични вълни, като взривове или удари, за генериране на сеизмични сигнали. Чрез анализ на отразените вълни се получава информация за подземните структури.

Пасивен мониторинг се базира на запис на естествени сеизмични вълни, произтичащи от земетресения, амбиентен шум или други природни явления. Този метод позволява наблюдение на динамичното поведение на хвостовата стена без необходимост от външни източници на вълни.

Големите хвостохранилища и особено тези, които се намират в сеизмични райони, изискват мрежи за наблюдаване на сеизмичните събития. Използват се „акселерографи за силни движения“, които регистрират по-силните земетресения над определен праг, който може да се променя по желание и обикновено е $0,1g$. Мрежата трябва да е съставена от най-малко два или три акселерографа. Първия акселерограф се поставя върху свободна скала, на подходящ участък близо до хвостовата стена, на разстояние до 3-4 пъти височината на стената. Вторият акселерограф се поставя средната точка на билото на стената, а третия – на берма или в подножието на хвостовата стена. Централният записващ апарат следва да разполага с необходимите канали, за да комуникира с всеки акселерограф.

Данните, получени от акселерометрите, могат да бъдат използвани за оценка на отговорите на хвостовата стена при различни натоварвания (анализ на динамичното поведение) или за откриване на необичайни вибрации, които могат да индикират проблеми като ерозия или пукнатини.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторингът на хвостохранилища в реално време представлява съществен компонент от стратегиите за управление на риска и опазване на околната среда в минната индустрия. Съвременните технологични решения – включително сензори за порово налягане, инклинометрични стрингове, сеизмографски системи, радарна интерферометрия (InSAR) и иновативната технология SAAV Extend – осигуряват възможности за ранно предупреждение при структурни отклонения и рискове от отказ.

Подходящият избор или комбиниране на тези методи следва да бъде съобразен с геотехническите характеристики на обекта, неговата сложност и поставените цели на наблюдение.

Автоматизацията и дистанционното събиране и обработване на данни значително подобряват ефективността и надеждността на мониторинга, като минимизират човешкия фактор и съкращават времето за реакция при инциденти. Въпреки това, успешната интеграция на такива системи изисква детайлно планиране, стабилна комуникационна инфраструктура и разработка на прецизни алгоритми за анализ и интерпретация.

В научната база данни не е налична достатъчна информация относно проблемите, свързани със сензорните технологии, което може да се отрази негативно върху развитието на знанията в конкретната област. Голяма част от придобития практически опит и извлечените уроци остават в рамките на технически доклади и презентации на професионални конференции, а не достигат до научните списания и академичните форуми. Макар че се наблюдава напредък в областта на управлението на хвостохранилища, включително публикации по теми като интеграция на сензорни системи с платформи за изкуствен интелект, все още липсват достатъчно емпирични данни и докладвани казуси, фокусирани върху ефективността и ограниченията на сензорните технологии в реална среда.

Очаква се в близко бъдеще все по-широко приложение на изкуствен интелект и машинно обучение, които ще надградят възможностите за предикативен анализ и автоматично идентифициране на аномалии. Интегрирани мониторингови платформи, обединяващи традиционни и съвременни технологии, се очертават като най-обещаващ път към устойчиво и безопасно управление на хвостохранилищата в съответствие със съвременните стандарти за екологична и социална отговорност.



Литература

1. Прокопов, Я. Методи и средства за изследване на деформационни процеси в открити рудници. Геодезия, картография, земеустройство, 2020, № 5-6, с. 33–40.
2. Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Dam safety: Monitoring of tailings dams and safety reviews. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 10, 249–289. <https://doi.org/10.47260/jesge/1117>
3. Armstrong, M., Petter, R., & Petter, C. (2019). Why have so many tailings dams failed in recent years? *Resources Policy*, 63, 101412. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101412>
4. Cacciuttolo, C., Guzmán, V., Catriñir, P., & Atencio, E. (2024). Sensor technologies for safety monitoring in mine tailings storage facilities: Solutions in the Industry 4.0 era. *Minerals*, 14(5), 446. <https://www.mdpi.com/2075-163X/14/5/446>
5. Dunnicliff, J. (1993). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. Wiley.
6. Ledesma, O., Sfriso, A., & Manzanal, D. (2022). Procedure for assessing the liquefaction vulnerability of tailings dams. *Computers and Geotechnics*, 144, 104632. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104632>
7. Measurand. (2024). *Installing SAAV Extend*. <https://support.measurand.com/support/solutions/articles/19000122819-installing-saav-extend>
8. RST Instruments. (2025). *Monitoring instruments for tailings dams*. <https://rstinstruments.com/applications/mines/tailings-dams/>
9. Settles, E., Göttle, A., & Von Poschinger, A. (2008). Slope monitoring methods – A state of the art report. *ClimChalp Interreg III B Alpine Space, Work Package 6*, 164.
10. Sisgeo. (2023). *Piezometers technical datasheets*. <https://www.sisgeo.com>



ИНТЕГРИРАНО СЪОРЪЖЕНИЕ ЗА СЪХРАНЕНИЕ НА МИННИ ОТПАДЪЦИ, ЕКСПЛОАТАЦИЯ, МОНИТОРИНГ И КОНТРОЛ НА КРИТИЧНИ ПАРАМЕТРИ

инж. Аница Николова - Anitsa.Nikolova@Dundeeprecious.com

инж. Орлин Коруев – Orlin.Koruev@Dundeeprecious.com

РЕЗЮМЕ

В доклада са представени проектни изисквания за изграждане на съоръжението, елементи от КИС свързани с безопасната експлоатация, оценка и система за информиране. Критерии за представяне на ИССМО в различните етапи на надграждане на база предварително дефинираните нива на задействие, мерки и действия при превишаване на тези стойности.

Описани са внедрените софтуери, системи и практики, които се следват при извършването на анализ и контрол на съоръжението.

Разгледани са управленски похвати допринасящи за разширено познание за потенциалните рискове с навременна оценка на промените или несъответствията в периода на надграждане и експлоатация.

INTEGRATED MINE WASTE FACILITY, OPERATION, MONITORING AND CONTROL OF CRITICAL PARAMETERS

eng. Anitsa Nikolova- Anitsa.Nikolova@Dundeeprecious.com

eng. Orlin Koruev - Orlin.Koruev@Dundeeprecious.com

ABSTRACT

The paper presents the design requirements for the construction of the facility, instrumentation ensuring safe operation, assessment and information system.

IMWF performance criteria at various stages of development based on predefined trigger levels, measures and response when these levels are exceeded.

It presents the softwares, systems and practices that are in place and used in the analysis and operation control of the facility.

It discusses management tools that enhance the knowledge of potential risks with timely assessments of changes or non-conformances during construction and operation periods.



Фиг. 1 Изглед от ИССМО „Ада Тене“



Въведение

Находище „Хан Крум“ попада в административните граници на община Крумовград, област Кърджали. Участък „Ада Тепе“ от находището се намира на около 3 км. югозападно от град Крумовград. Разполага се в района на връх Ада тепе и заема площ около 0.7 км². В находището се включват и разположените в близост около Ада тепе участъци: Сърнак, Скалак, зона Синап, Къклица и Къпел.

Миннодобивните и преработвателни дейности включват добив по открит способ и първична преработка на руда по технологична схема, включваща трошене и смилане на рудата с последваща флотация до краен продукт златосъдържащ концентрат.

Стремешът за минимизиране на влиянието върху околната среда и общността доведе до решението за изпълнение на интегрирано съоръжение за съхранение на минни отпадъци (ИССМО), което позволява комбинирано съхранение на стерилна скална маса и флотационен отпадък в значително по-малка площ, отколкото би било възможно при конвекционално депониране.

Стерилният скален материал осигурява необходимата здравина и цялостния стабилитет, а също така и вътрешно дрениране за отвеждане на филтриращите в съоръжението води, както и водите дрениращи от флотационния отпадък по време на консолидацията му, към основната дренажна система.

Контрола по отношение на качествено изпълнение на строителството е постигнат чрез въвеждане на ежедневно проследяване на основни параметри, а мониторинговата система включва безнапорни пиезометри (48бр.), пиезометри (53 бр.), пиезометри с вибрираща струна в комплект с клетки за земен натиск (50 бр.), инклинометри (13 бр.), комбинирани инклинометри с екстензометри (12 бр.), геодезичен и автоматизиран мониторинг (104 бр. марки), сеизмично измерване, периодични геофизични измервания и видеозаписи с дрон.

Заснемането с дрон се използва успешно за месечно/тримесечно наблюдение, като част от цялостната техническа програма. Дрон заснемането, както и работата на специализирана геодезична фирма осигуряват подробни екзекутивни заснемания - 3D геометрии на всяка клетка, ниво, откоси.

Данните от мониторинга подлежат на преглед и верифициране от проектанта, независими експерти на месечна, тримесечна и годишна база.

Съоръжението е въведено в експлоатация през 2019 г., предвидено е да заема площ от 41 ха и се категоризира като съоръжение категория В.

Условия на площадката:

ИССМО е разположено върху стръмно залягащ терен с надморска височина от 220 м до 500м, като резервоарите за вода, фабриката и рудничният котлован се намират по протежението на открояващ се рид, ориентиран по посока север-юг. Естественият релеф на обекта, в който ИССМО лежи в деретата на два потока, осигурява известен хидравличен обем в най-ниските части на съоръжението. Река Крумовица тече в долната част на деретата и обхваща водоносен хоризонт от наносни чакъли.

Геологията установена от геотехническите проучвания през 2012 г. в обсега на основата на ИССМО се състои от гнайси и метагранити, покрити от почвен слой с приблизителна дебелина 1,5м. Под повърхността, преди достигането на свежа основна скала, се установява типично изветряла зона с дебелина приблизително 5м, като някои сондажи установяват свежа скала почти веднага под покриващия материал.

Методологията на изграждане/надграждане на ИССМО взема предвид тази особеност и налага престъргване до здрава скала за всяка работна зона.

Климатичните условия в района обуславят мека, влажна зима и топло, сухо лято. Климатът най-общо може да се определи като преходно-континентален до преходно-средиземноморски в района на съоръжението. Максималното количество денонощен валеж в района на съоръжението е измерено на етапа на проектиране – 106.5 мм на 25.09.2012 г., като към 2021 г. продължава да бъде най-високо.



Компоненти на ИССМО:

Началните етапи на изграждане на ИССМО включват следните компоненти:

- Стартови платформи- северно дере до кота 310 и южно дере до кота 300;
- Основна дренажна система по продължение на двете дерета представлява комбинация от площен дренаж и мрежа от перфорирани тръби, през които водите дрениращи през съоръжението постъпват в зумпфове в петата на всяко от деретата.
- Прилежаща инфраструктура от вътрешно транспортни пътища, резервоар за технологични води, Резервоар за дъждовни води, по-малки обектови резервоари в зоната на ОФ и др.
- Хидротранспортна система;
- Поетапно надграждане на ИССМО - изграждане на клетки, депониране на отпадък и изпълнение на прогресивна рекултивация на въздушните откоси;
- Противофилтрационна и дренажна завеси в петата на съоръжението;

Техника и технология за депониране на стерилна скална маса:

Основните дейности по надграждане на всяко ниво на ИССМО, за да бъде готово за депониране на флотационен отпадък, се състоят в: подготовка на терена, покриване на предхождащата клетка със стерилна скална маса, изграждане на челна, странични и разделителни берми, осъществяване на връзка с основната дренажна система, полагане на скални и геосинтетични дренажни материали.

Методологията на полагане е установена опитно, а постигането на проектните изисквания се потвърждава чрез ежедневни полеви изпитвания от Акредитирана лаборатория за определяне степента на уплътнение и якостни показатели на изпълнените пластове. Извършват се тестове с пясъчно заместване и натискова плоча на всеки изпълнен пласт. В случай, че не е постигнат търсеният резултат, пластът се разбухва и валира или изцяло се изгребва за повторно изпълняване.

Производственият процес в дружеството е непрекъснат, което налага надграждането и наливният процес да се извършват едновременно. Всяко от нивата на съоръжението разполага с няколко клетки, които последователно се запълват и затежняват в хода на експлоатация.

Клетките са с височина 10м, въздушният откос е с наклон 1:2,5, а вътрешния откос на клетките е с наклон 1:1,5. Разделителните берми варират от 10-20м широчина.

Технология за депониране на флотационен отпадък:

Минният отпадък от флотацията допълнително е сгъстен в конусовиден сгъстител, откъдето посредством два броя центробежни помпи се изпомпва по тръбопроводи ПЕВП Ø180 към клетките на ИССМО. Дебит 89 м³/час (при 68% съдържание на твърди частици) и 122 м³/час (при 56% съдържание на твърди частици) при производителност на мелницата 105 т/ч, проектно заложили стойности.

Депонирането на флотационен отпадък в клетките на ИССМО се осъществява чрез тръбни отклонения от магистралния хвостопровод, разположени върху оградните (челни) берми на клетките. Извършва се постепенно, във всяка клетка, която се използва, докато нивото (при заустващата тръба) достигне максимално допустимото (до 50 см под кота корона).

Концепцията, която стои в основата на последователността на депониране на флотационния отпадък, има за цел да осигури един непрекъснат процес на депониране, за да може консолидирането и строителните работи да протичат едновременно с депонирането.

Дренажна система

Дренажната система на ИССМО включва улавяне и събиране на контактни води в основна дренажна система, както и улавяне на оттока, генериран от незасегнатия от минните дейности водосбор и отвеждането и събирането на този отток в два събирателни зумпфа.

Събраният дренажен поток е основен източник за осигуряване на нужните обеми вода за



процеса. Водният цикъл е затворен, цялата попаднала на площадката дъждовна вода или рециклирана се връща обратно в Резервоар за технологични води, а от там в процеса.

Параметри на флотационния отпадък

Съгласно схемата на депониране, последващо дрениране и консолидиране, зърнометрията на пулпа и процентът състеноост са от съществено значение. Системата разполага със състистел, а зърнометрията е стриктно координирана при процеса на производство. Установено е, че ИССМО работи най-добре при преобладаваща зърнометрия на пулпа Р80 над 30 μ m и твърда фаза от 58-63%. Тези параметри осигуряват стабилен поток от бистра дренажна вода към зумпфове и надеждна работа на филтрите. Зърнометричният състав на отпадъка се следи ежедневно, като анализи се извършват от Акредитирана външна лаборатория и Лабораторията на Дружеството.

Критерии за представяне и мониторинг на ИССМО:

Публикуването на Глобалния стандарт за управление на хвостохранилища (GISTM) подчертава важността и значението на Ръководствата за поддръжка и управление, а една от основните негови цели е да представи критерии за представяне на съоръжението, критерии за контрол на риска и критични контроли, които са обвързани със специфични действия очаквани от екипа отговорен за експлоатацията на съоръжението, така и от отговорни членове на висшето ръководство.

ДПМК приведе в съответствие своето ръководство така че да отговори на изискванията като включи индикаторите за представяне, критичните контролни мерки и работни диапазони, свързани с конкретни, предварително зададени действия за управление. Също така включва процедурите за събиране, анализ и докладване на резултатите от наблюдението по начин, който дава възможност за ефективно, навременно взимане на решения.

Неразделна част от ръководството са Плановите за реакция и задействане, в които според големината на наблюдаваните промени са определени следните нива по скала на важност:

- зелена категория, включва очаквани условия; жълта/оранжева категория е за случаи извън очакваните условия; червената е за притеснителни ситуации;

Комбинация от надвишения в червената категория и надвишения на прагови стойности биха задействали най-високото ниво на тревога и съответните мерки.

Важно е да се отбележи, че критериите за дефинирането на всяко от различните нива на задействане са специфични за конкретна ситуация и се установяват от проектанта на съоръжението, базирани на детерминистичен анализ, анализ на исторически данни и инженерна преценка, на база познание за жизнения цикъл на конструкцията. Тъй като съоръжението е действащо, с напредването на експлоатацията и събирането на все по-вече информация за неговото поведение и представяне критичните нива подлежат на периодично калибриране.

Различен тип числено моделиране може да се използва за потвърждение и/или проверка на стабилитета на насипни съоръжения и хвостохранилища, а комбинация от симулации и измервания получени от различните инструменти могат да се използват за предписване на критичните стойности, за да потвърдят, че очаквания коефициент на сигурност е постигнат. Тъй като не разполагаме с директни способности за измерване на коефициента на сигурност се налага сравнение на редица физически свойства получени от мониторинга.

Деформации на масива, порово налягане във всяка клетка, дрениране са примери за физични параметри, които се измерват за да се интерпретира работата на съоръжението. Тълкуването на данните от измерванията обаче може да бъде сложно, тъй като зависи от различни фактори - хидравлично състояние, зонироване на съоръжението и вариации в натоварването според фазата на надграждане. Потвърждаването на проектните критерии и прието поведение на материалите изисква периодични полеви измервания и изпитвания, т.нар in-situ тестове.

Настоящият доклад представя методологията, използвана към момента на създаването му за оценка на данните от мониторинга на ИССМО, документиране и потвърждение.

[illegible]

Фиг. 2 Обща ситуация на КИС, ИССМО

По време на изграждането на берми от стерилна скала върху плажовете от хвост се наблюдава временно увеличение на поровото налягане в клетката подлежаща на запечатване и в тази непосредствено под нея. За да се подпомогне разсейването на това порово налягане, в хвоста са монтирани дренажни фитили през 2 м във височина и на 1,5 м хоризонтално един от друг. Дренажните фитили са свързани към система за закрепване в двете противоположни берми на клетката. Така се намалява максималния път на дрениране от 5 на 1.0 м. Това ускорява времето за консолидиране с близо 90% в сравнение с това без дренажни фитили. Дренирането на поровите води дава възможност на водата в почвата да постигне равновесие под приложеното натоварване.

С бързото изграждане на бермите върху хвоста се ускорява рязко и поровото налягане. При значително увеличаване на поровото налягане има риск от локализирани провадания на бермите от стерилна скала, които са изградени върху хвоста. В този смисъл е важно да се следи поровото налягане, паралелно с общото налягане (или земно налягане) за да се гарантира, че реалното натоварване в хвоста не надхвърля реалната якост на хвоста.

Използвани уреди за измерване:

Пиезометри тип „вибрираща нишка“ WWP3100 на Geosense, или Soil Instruments, модел W4with c LAE (филтър от неръждаема стомана) 50 микрона (високо устойчив); Клетки за общ земен натиск, WWTPC-4000; Безнапорни пиезометри (БП), оборудвани със сензор за ВН, автоматизирани и визуализирани в Trimble.

Инклинометрите се използват за наблюдение на движенията в бермите на ИССМО, в дълбочина, чрез измерване на вертикалността им по протежение на цялата им дълбочина. Там, където са инсталирани екстензометри, те се комбинират с инклинометрите, използващи същата обсадна система.

На обекта са внедрени следните софтуерни системи за събиране, предаване и обработка на данни:

Софтуерен пакет PI Vision и Inclinalysis за презентирание на данни от измервателните уреди, включително за измерване на геомеханични параметри (където е възможно да се включат в системата); и Софтуер Trimble – използва се предимно за оценка и презентирание на данни от контролните репери



(за слягането) и ВН в отворени пиезометри, макар че пакетът може да се ползва също и за презентирание и споделяне на мониторингови данни от други уреди за геомеханични измервания.

Наблюдения и тенденции:

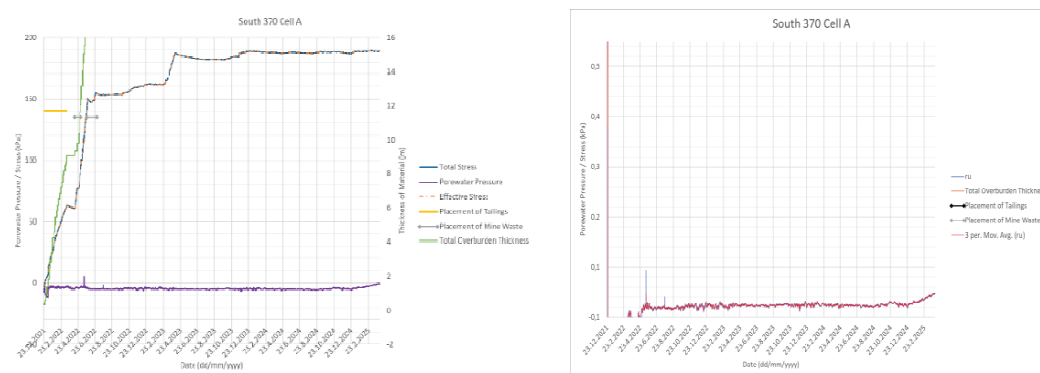
Приборите на мониторинг на ИССМО са предназначени за наблюдения на краткосрочни и дългосрочни тенденции в данните. Като цяло, тенденциите в данните трябва да отразяват текущата скорост на изграждане на съоръжението, освен това, може да се влияят от сезонните климатични условия.

Порово налягане:

Комбинираните показания от вибрационните инструменти се използват за изчисляване на коефициента на поровото налягане, R_u , който въпреки че е опростена мярка за анализ на стабилността служи като практическо ръководство за определяне на краткосрочни нива на задействане и предупреждение по време на строителството на берми над хвостохранилищата.

По време на строителната фаза, задействане се достига, когато R_u надвиши 0.3, а предупреждение когато R_u надвиши 0.4. След завършването на периметровия насип, нивото на задействане се определя на 0.15, а предупреждението на 0.3. Тези прагове, подробно описани в ръководството за експлоатация и мониторинг, помагат в етапа на надграждане, като насочват при необходимост от действия за намаляване на поровото налягане. Отчетите са изцяло автоматизирани, като при достигане на критична стойност екипа на ДПМК получава известие по имейл.

Данните са представени таблично и графично, а автоматизиран достъп на сурови и обработени данни за бързи анализи се осъществяват в PI Vision.



Фиг. 3 Графики представящи поровото налягане в една от клетките на ИССМО

Депонираният в клетките хвост остава водонаситен известно време, независимо, че дренажната система извежда водата и хвостът не остава наситен дълго време. Очаква се хвостът да се консолидира под собственото си тегло до проектната обемна плътност в рамките на 12 седмици. Това е изчислено въз основа на инсталирането на хоризонтално разположени дренажни фитили по хвостовите плажове на 2 метра вертикални интервали и на 1,5 метра странично от центровете. Практиката показва, че в рамките на шест седмици в зависимост от геометрията на клетката се постига консолидиране от 80 до 90%, след което може да започне следващо надграждане.

Депресионна повърхност:

Референтните прагове са определени с фокус върху стабилитета в контекста на 3D анализа по методите на граничното равновесие за експлоатационния срок на съоръжението. Разгледани са два сценария, при които повишаването на депресионната повърхност може да компрометира стабилитета на ИССМО:

- общо покачване на водните нива с прогресивно оводняване на цялото съоръжение; и



- локализирано повторно оводняване с повишаване на поровото налягане в една клетка.

И за двата механизма са дефинирани отделни референтни прагове. Те са цветово кодирани по схемата тип „светофар“. Стойностите под праговете влизат в зеленото ниво, което е индикация, че съоръжението е с достатъчно висок коефициент на сигурност и работи нормално. Първият праг представлява жълто или предупредително ниво, като стойностите над него, но под втория праг, дава сигнал, че трябва спешно да се разгледа коефициента на сигурност на съоръжението и че то вероятно работи в условията на аномални промени; обикновено се препоръчва да се увеличи честотата на мониторинга доколкото това е безопасно. Вторият праг представлява червено или алармено ниво, като неговото превишаване сигнализира за потенциален проблем. Достигането на жълто ниво на опасност се разглежда в контекста на обща устойчивост на съоръжението, което може да включва временна корекция на референтните прагови стойности в зоната на превишението с оглед на текущите условия.

Референтните нива са базирани на пределни (гранични) стойности на коефициента на сигурност: при жълто алармено ниво K_s е 1,5, а при червено 1,3.

Индикатори за движение:

Сляганията могат да бъдат наблюдавани като част от голямо свличане на откоса, както е обсъдено по-горе, но се очаква да се получат по-малки вертикални премествания, тъй като хвостът се консолидира. Мониторингът на сляганията включва данните от геодезичните замервания и данните от екстензометрите. Автоматизираната тоталната станция е изградена с добра висимост срещу двете дерета, което позволява получаване и анализиране на данни в реално време. Разработен е деформационен модел определящ максималните очаквани деформации и премествания за всяко ниво на надграждане до кота 400 на Южно ИССМО. Приети са общи критични стойности: зелено (под 5мм), жълто (нарастваща тенденция) и червено (над 10мм за три месеца). Предвид скоростта на надграждане на съоръжението е очаквано в първите месеци след изграждане на нивото да се наблюдават по-завишени стойности за слягане.

План за действие и реакция:

Планът за действие и реакция е разработен на база количествена и качествена оценка на риска на ИССМО. Той включва общо 13 сценария, които се основават на натрупания опит и информация относно рисковете, свързани с работата на съоръжението. Този план е неразделна част от аварийното планиране и действия при извънредни ситуации на ИССМО.

Заклучение:

Важно е да се подчертае, че анализът на състоянието на безопасност на ИССМО се извършва и потвърждава от експерти с дългогодишен опит, анализирайки всички налични данни, включително данните от инструментите от различни устройства, инсталирани за измерване на различни параметри като водни нива, деформации, напрежение или поток.

Подходът, представен в този доклад, позволява оценка на развитието на показанията на инструментите и проверка на тенденции или модели на поведение с течение на времето, за да се открие аномално поведение на показанията, преди да станат критични.

От изключителна важност е обменът на информация между проектанта и отговорния персонал на ИССМО с цел повишаване на познанията си, за да могат чрез прегледите предвидени в Ръководството за мониторинг и експлоатация да внедрят тези знания и да ги трансформират в по-безопасни условия за експлоатация и управление на съоръжението.

Използвана литература:

KGP100—0500-1000-MAN-1001_6- РЪКОВОДСТВО ЗА ЕКСПЛОАТАЦИЯ, ПОДДРЪЖКА И МОНИТОРИНГ (ЕПМ);

KGP100-0500-1000-PLN-1001 Instrument trigger and alert levels;

KGP100-0500-1500-RPT-1000 Instrumentation plan;

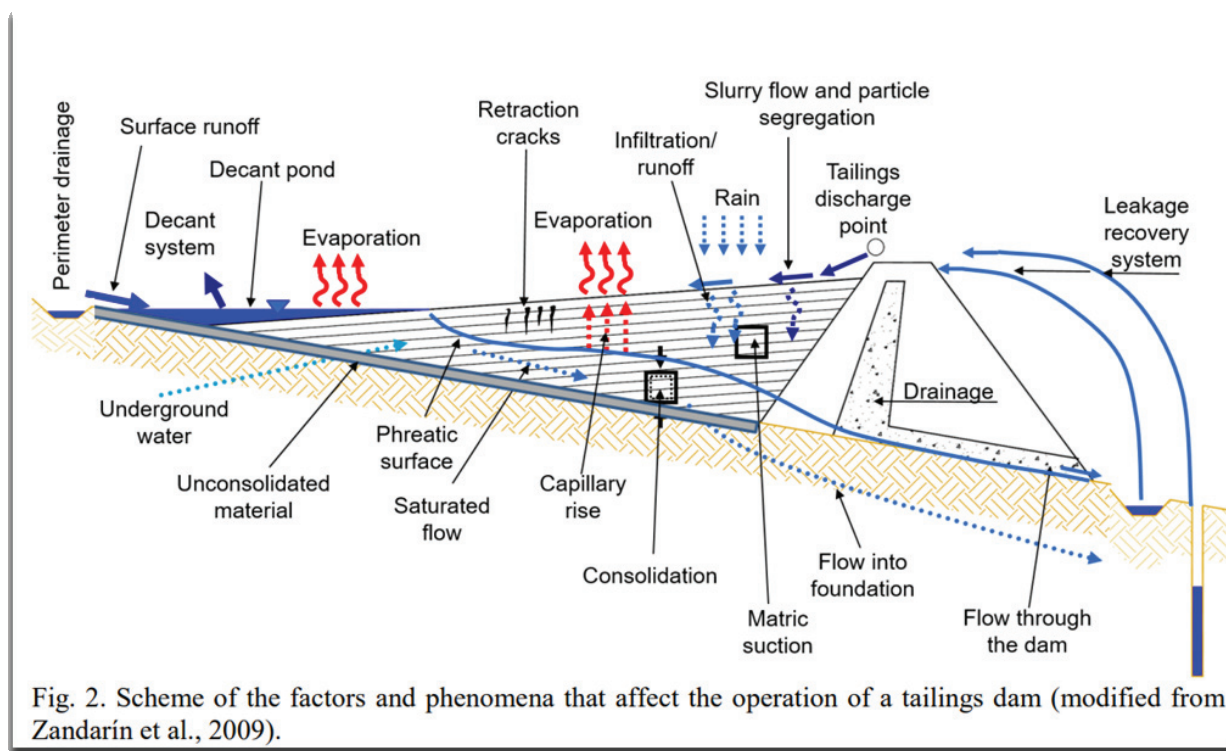


ИЗСЛЕДВАНИЯ И АНАЛИЗИ НА ОПАСНОСТТА ОТ ВТЕЧНЯВАНЕ НА ХВОСТА НА ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ „ЛЮЛЯКОВИЦА“. МЕРОПРИЯТИЯ ЗА ОСИГУРЯВАНЕ НА УСТОЙЧИВОСТТА

инж. Стефан Тангъров
Главен инженер ХТС, цех „ВОС, ПС и SX-EW“
Асарел-Медет АД

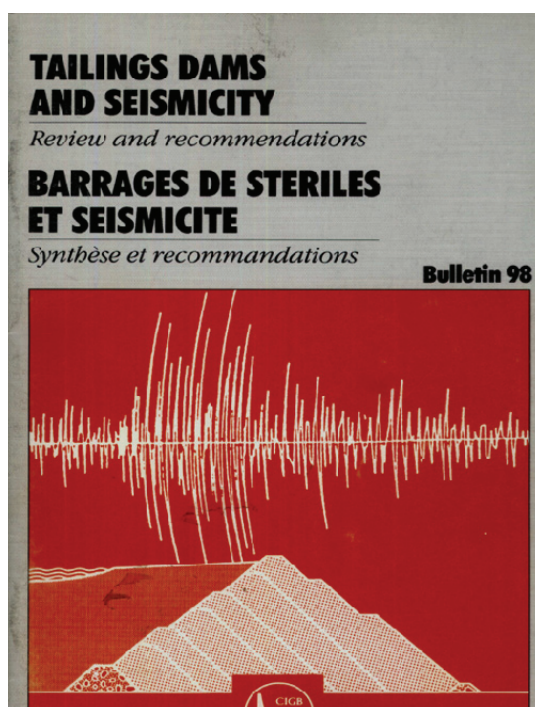
Раздел I – Фактори, действащи втечняването определени в специализираната литература

Втечняването е едно от най-интересните и противоречиви явления в геотехническо инженерство. Терминът "втечен" е използван за първи път от Hazen (1918, 1920), за да опише песъчливите почви, участващи в аварията на язовир „Калаверас“, а по-късно от Терцаги и Пек (1948). Терминът „втечняване“ се използва за описание на различни явления, които засягат *водонаситени*, предимно дребно- до среднозърнести пясъци, с малко съдържание на фини (прах и глина) частици.



Втечняването на почви се дефинира като механизъм, при който почвена маса се трансформира в „течно състояние“ и губи устойчивост вследствие на значителна загуба на якостта на срязване от нарастване на поровото налягане, предизвикано от активиращ фактор (*triggering factor*). Втечняването бива динамично, ако активиращият фактор е циклично натоварване (напр. земетресение, производствени вибрации, скални удари), и статично - при монотонно натоварване (напр. филтрация, външен товар).

За динамичното втечняване при хвостохранилищата е изготвен *Bulletin 98 от 1995 г. на ICOLD (Международната комисия по големите язовири)* – „Хвостохранилища и сеизмичност. Преглед и препоръки.“ Освен него е дадена препоръчителна процедура за оценка на потенциала на втечняване, регламентирана в Еврокод 8, Част 1 и Част 5, която подробно е разяснена в Ръководството за проектиране към EN 1998-1 and 1998-5 (Fardis et al., 2005). Съгласно тази процедура оценката на опасността от втечняване и потенциалните последствия включва следните три стъпки:



- (1) **Податливост** към втечняване – показва дали в профила има почви, склонни към втечняване (например, ако съдържанието на фини фракции (прах и глина) е високо, то втечняването се изключва *a priori*);
- (2) **Опасност (хазарт)** от втечняване – т.е. дали ще настъпи втечняване при дадено проектно земетресение (например, почвата може да е податлива на втечняване, но генерираните срязващи напрежения може да не са достатъчно силни за предизвикат това явление);
- (3) **Риск** при втечняване – т.е. възможността за настъпване на разрушения, ако се получи втечняване, и последствията от тях.

TECHNICAL BULLETIN:
Application of Dam Safety
Guidelines to Mining Dams

(2019 Edition)



Canadian Dam Association
Association Canadienne des Barrages
www.cda.ca

Както вече знаем, след аварията с хвостохранилището в Брумандиньо (Бразилия, 2019), статичното втечняване е другото основно явление, което предизвиква световни реакции. В тази връзка бяха създадени нови допълнителни бюлетени на ICOLD, ANCOLD, CDA и FEMA.

Например: В Технически бюлетин „Насоки по безопасност при хвостохранилища“ на Канадската асоциация по язовирите (CDA, 2019) характерните задействащи механизми за статично втечняване включват:

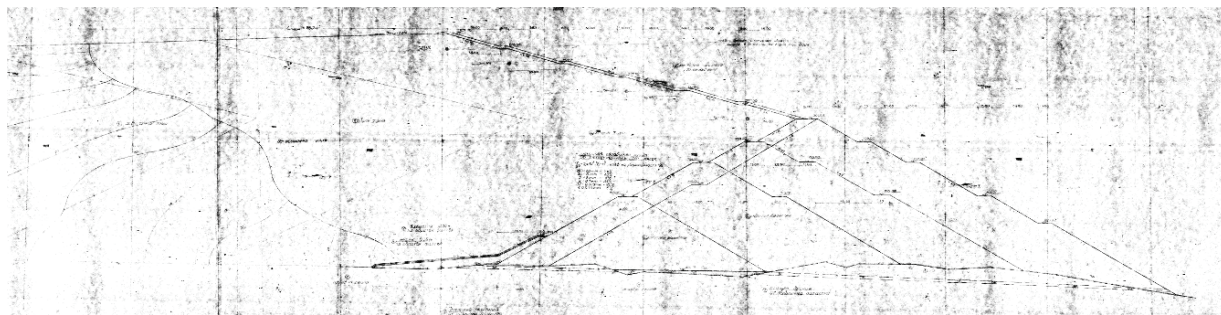
1. Добавено почвено натоварване към стената на хвостохранилището (надграждане на стената на хвостохранилището, наливване на хвост и др.);
2. Намалено почвено натоварване при въздушния откос или опорната призма (поради ерозия или извършени строителни промени);
3. Деформация при чисто срязване при



- свиващи се материали (деформация при чисто срязване в недренирано състояние);
4. Развиване на значителни ерозионни процеси върху въздушния откос на хвостохранилището, дължащи се на валежи, които могат да променят напрегнатото състояние и деформацията в стената на хвостохранилището (това поражда опасения повече при закриването му);
 5. Повишаване на поровото налягане поради нарастване на водните нива или авария на водоотвеждаща система;
 6. Промени в състоянието на поровото налягане в стената или фундамента на хвостохранилището, дължащи се на отводняване, което предизвиква повишаване на ефективните напрежения и води до деформации, които задействат събитието в недренирано състояние;
 7. Прогресивно разрушаване (пренапрежение на локална зона в почвата или скалата, водеща до предаване на напрежението и разрушаване на близко разположените зони);
 8. Комбинация от всички гореизложени.”

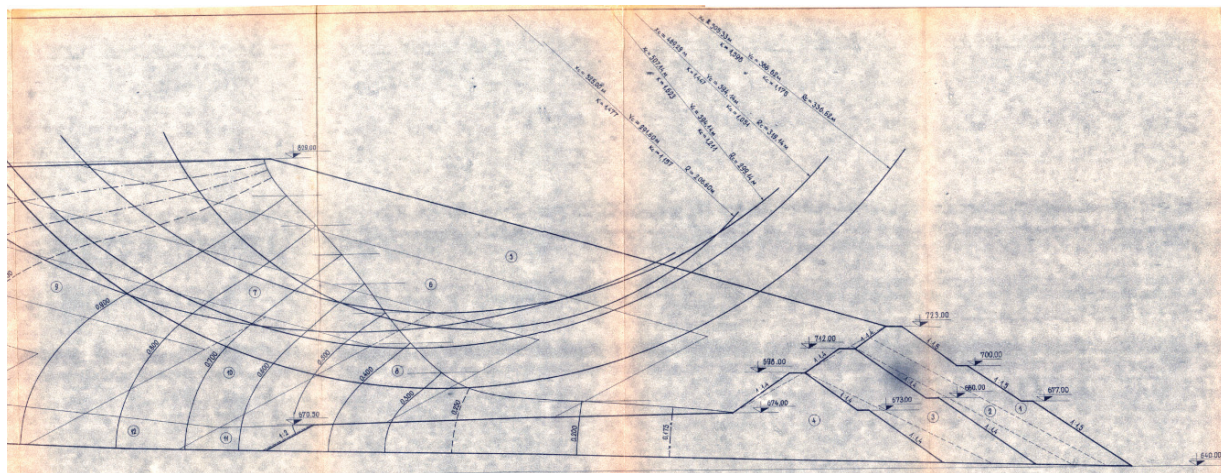
Към настоящия момент нито един от задействащите механизми за статично втечняване (CDA, 2019) не е налице при хвостохранилище „Люляковица“.

Раздел II – Кратка история на изследванията за втечняване провеждани за хвостохранилище „Люляковица“.



Фиг. 1 Напречен профил на наливно хвостохранилище „Люляковица“, 1983 г.

Хвостохранилище „Люляковица“ е проектирано от „Нипроруда“ в края на 1983 г. като наливно хвостохранилище. Впоследствие през 1984 г. е прието предложение и внедряване на изобретение АС 34696 на Сектора проучване и проектиране (СПП) при ВИАС, гр. София (днес ЦНИП-УАСГ) за намаляване обема на каменната опорна призма чрез изграждане на дренажен език.



Фиг. 2 Напречен профил на наливно хвостохранилище „Люляковица“, 1984 г.



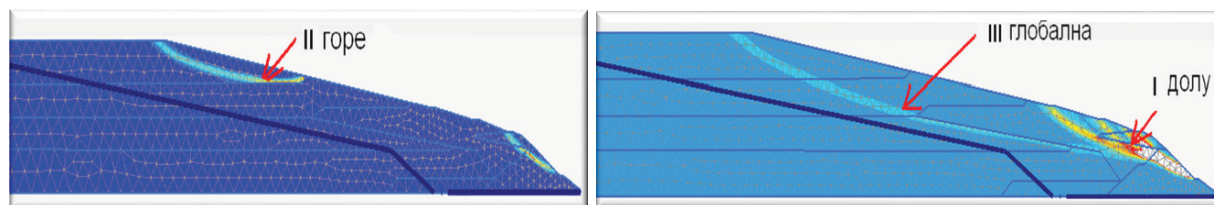
Още тогава по отношение на втечняването са проведени редица проучвания, които можем да квалифицираме като значителни за времето си. Първоначално са изследвани влиянието на филтрацията на хвоста, изграждането на дренажен език по определена технология, утаяването на частиците, физико-механичните показатели на скалите и хвоста, от там определяне на порово налягане и консолидация.

Всички тези проектни стъпки спомагат за получените положителни резултати при изследването на динамичната устойчивост. За нея са използвани три различни критерии: методика на Митчел и Морганщерн (1975), псевдостатични методи на Луи Базант (1979) и конструктивни и оперативни процедури по Валде (1982).

През деветдесетте години на 20. Век и първото десетилетие на 21. век, работните проекти на хвостохранилище „Люляковица“ търпят няколко допълнения и актуализации поради данни от контролно-измервателните системи, физико-механични показатели, производствени причини и др.

В тези периоди също така текат постоянни промени и актуализации в нормативните изисквания на национално и международно ниво. Заради тях, както и поради планираното разрастване на хвостохранилище „Люляковица“ след кота 829, „Асарел-Медет“ АД не спира да инвестира в нови полета, лабораторни и научни разработки, включително надграждане на контролно-измервателната система (КИС). Целта им е да се осигури дългосрочното устойчиво развитие на съоръжението, като се гарантира безопасното изграждане и управление на хвостохранилище „Люляковица“.

В периода 2014-2017 г. са проведени голям брой изследвания, вследствие на които е утвърдено „Детайлно микросейсмично райониране и определяне на проектни сейсмични характеристики“. То е извършено от Националния институт по геофизика, геодезия и география (НИГГ) при Българската академия на науките (2018).



Фиг. 3 Меродавни плъзгателни повърхнини.

Тази разработка можем да наречем научен документ, тъй като включва съвременните европейски и световни практики, изисквания и стандартни за определяне на сейсмични характеристики. При изпълнението на тази задача е проведено ново проучване за съпротивителната способност на хвоста срещу втечняване при сейсмични характеристики. В резюме, изследването показва: при поддържане на нивото на подпочвените води (НПВ), т.е. депресионната повърхност, на минимум 20 м под повърхността по въздушния откос на хвостохранилище „Люляковица“, хвостът има нормативната съпротивителна способност.

От данните на КИС виждаме, че НПВ са по-ниски и се предприемат своевременни действия по контрола и управлението им.

След аварията в Бразилия, 2019 г., и предвид стратегическите програми за развитие на „Асарел-Медет“ АД, предприехме нови допълнителни изследвания.

Въпреки липсата на задействащи механизми за статичното втечняване, допълнихме работния проект за експлоатационно изграждане на хвостохранилище „Люляковица“ до к. 900 (УАСГ-ЦНИП, 2019, 2023). В него бяха предвидени допълнителни мероприятия за намаляване на поровото налягане и увеличаване на консолидацията на хвоста. Първоначалното предвиждане беше мерките да се изпълнят за 3 години, но екипът на компанията успя да ги реализира в рамките на 2 години. Така до края на 2024 г. бяха изградени направляващи диги до 350 м навътре в плажа и вертикални сондажи от тях, общо 32 бр. диги и сондажи с дължина над 69 000 м.



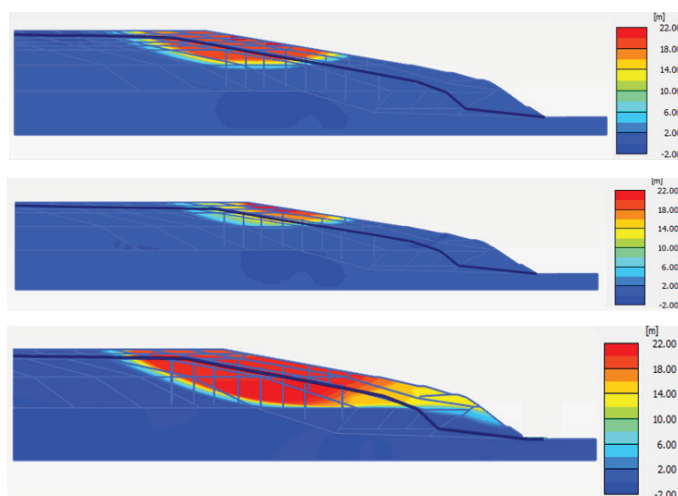
Фиг. 4 Допълнителни мероприятия за намаляване на порово налягане и ускоряване процесите на консолидация.

През 2020 г. и 2021 г. стартира широкообхватна задача с научния институт по хидротехника „ВНИИГ им. Б.Е. Венедеева“, която е част руската компания ПАО „РусГидро“. Целта бе да получим допълнителен и независим прочит при изчисляването на филтрацията, консолидацията и оценка на постигнатите

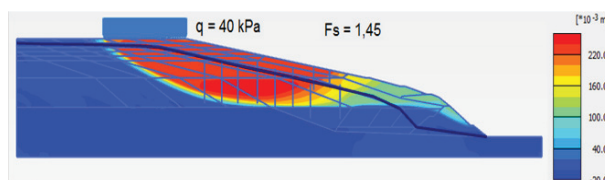
резултати с препоръки за по-нататъшна безопасна експлоатация на съоръжението.

Изпълнихме нови допълнителни геотехнически изследвания, като възложихме на Геологическия институт „Страшимир Димитров“ при БАН да извърши полеви изследвания и на база световната практика да изследва срещу

статично втечняване хвоста на хвостохранилище „Люляковица“. Изпълнени бяха 2 подхода: емпиричен по метода на Олсън (2001) и анализ по МКЕ.



В резюме: при поддържане на НПВ под 30-35м от повърхността, стената е осигурена срещу статично втечняване ($K_{уст} \geq 1,4$).

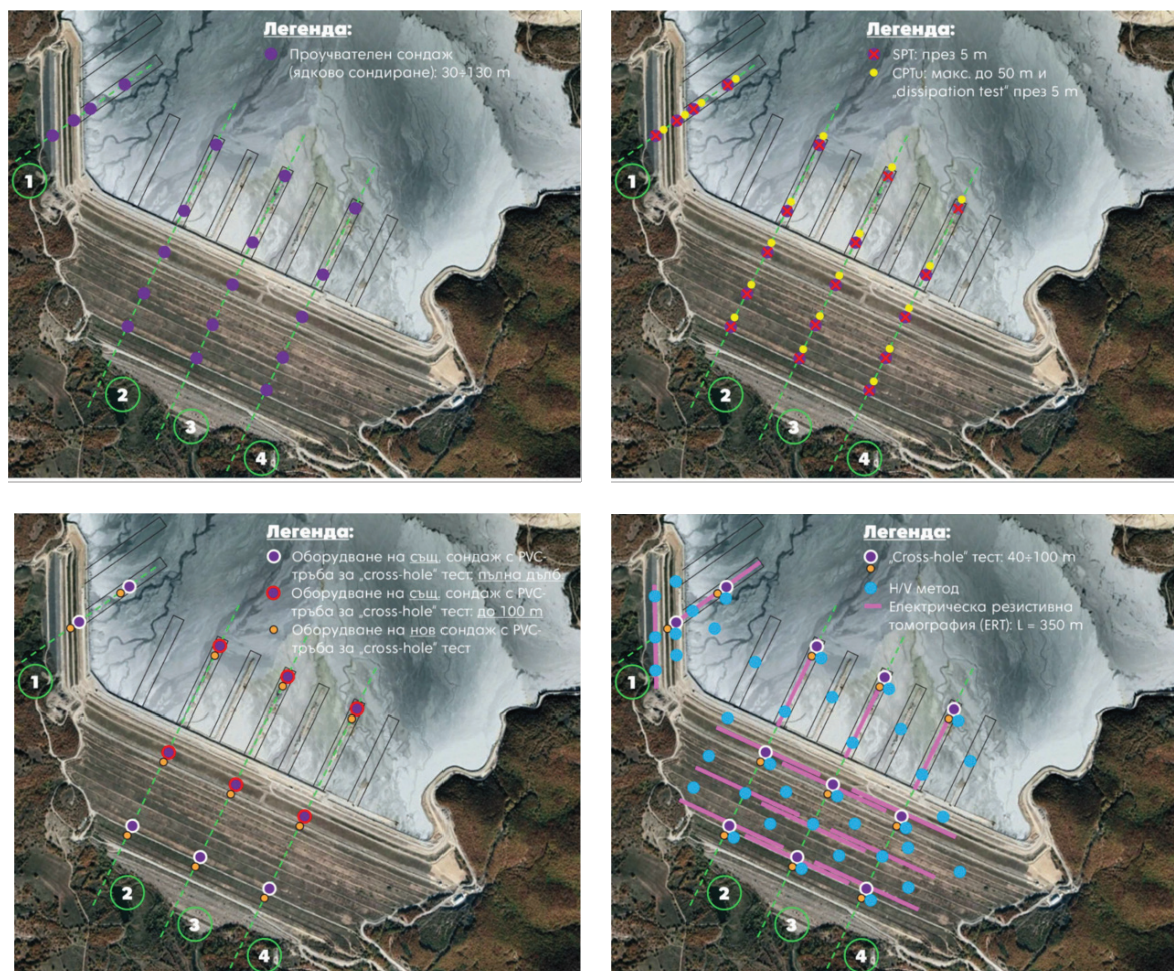


Фиг. 5. Потенциални механизми на загуба на устойчивост, определени от нарастването (increment) на преместванията, вследствие нарастването във височина и от допълнителен товар



Въпреки тези резултати, паралелно се правят допълнителни оценки от трети независими страни, така че най-обективно и всеобхватно да се оценяват всички аспекти, свързани с безопасната експлоатация на хвостохранилище „Люляковица“.

През 2025 г. бяха стартирани нови действия: проучвателно сондиране, геотехнически измервания (in-situ) и геофизични проучвания. Успоредно с тях в лабораторни условия ще се изпълнят лабораторни тестове в две направления: статични триосови и компресионни опити, и динамични с триосови апарати. Екипите, които ще вземат участие в тези изследвания, са тясно специализирани по темата „втечняване“, като имат огромен опит във високосейзмични райони от Япония, Турция, Мексико, Италия и България.



Фиг. 6 Нови изследвания: проучвателно сондиране, геотехнически измервания (in-situ) и геофизични проучвания.

Раздел III – Инвестиции на „Асарел-Медет“ АД за изготвяне на анализи и изпълнение на мероприятия, увеличаващи устойчивостта на хвостохранилище „Люляковица“ срещу втечняване през последните години

„Асарел-Медет“ АД последователно си сътрудничи с академичната общност и инвестира значителен ресурс, за да проучи и приложи новите научни достижения и най-добрите практики.

Само за последните 5 години в разработването на научнообосновани оценки, проекти и изследвания на хвостохранилище „Люляковица“ са вложени над 5 млн. лева. В този период за изпълнение на допълнително планираните мероприятия срещу втечняване на хвоста са вложени над 20 млн. лв. Това са значими инвестиции в съвременното управление на хвостохранилището, които осигуряват неговото безопасно експлоатационно изграждане и дългосрочно устойчиво развитие.



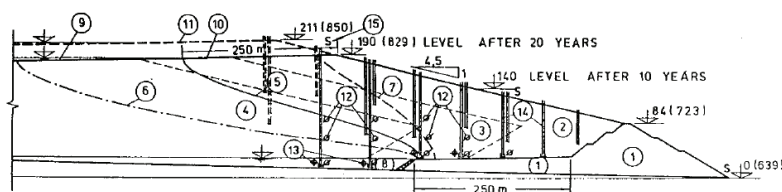
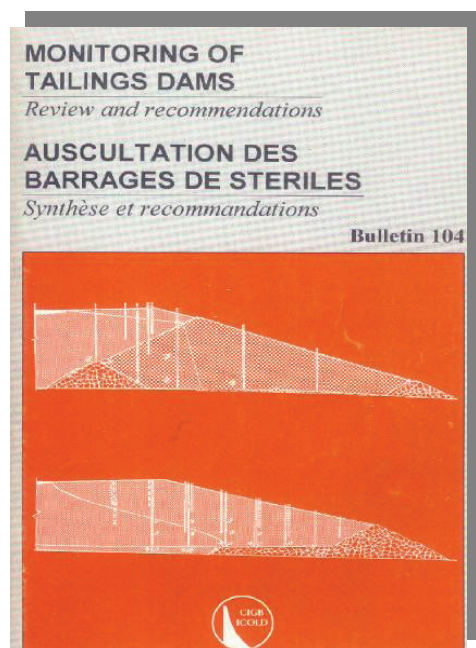
НАДГРАЖДАНЕ НА КОНТРОЛНО-ИЗМЕРВАТЕЛНАТА СИСТЕМА (КИС) ЗА ПОВЪРХНОСТЕН И ПОДЗЕМЕН МОНИТОРИНГ ПРИ НАРАСТВАНЕ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ „ЛЮЛЯКОВИЦА“ ВЪВ ВИСОЧИНА.

инж. Владимир Додников
Технолог ИХ, цех „ВОС, ПС и SX-EW“
Асарел-Медет АД

Раздел I – Кратка история за подземна и повърхностна КИС на хвостохранилище „Люляковица“.

Първата Контролно-измервателна система (КИС) на хвостохранилище „Люляковица“ е изградена още след стартирането на експлоатационното му изграждане през 1989 г.

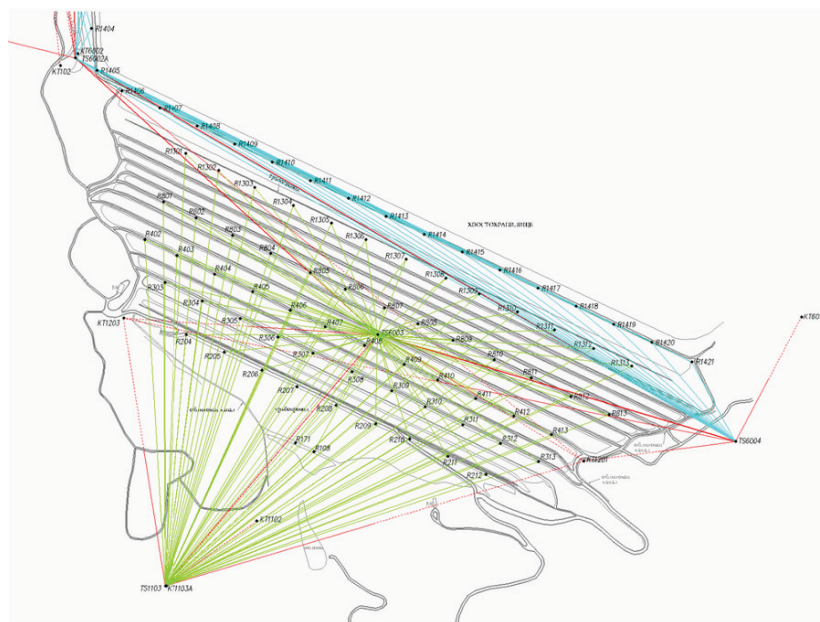
Внедрените системи през деветдесетте години на 20. век са включени в *Bulletin 104* от 1996 г. на ICOLD (Международната комисия по големите язовири) – Мониторинг на хвостохранилища. Преглед и препоръки.



Фиг. 1 Включване на КИС в бюлетин 104/1996 на ICOLD като добра практика

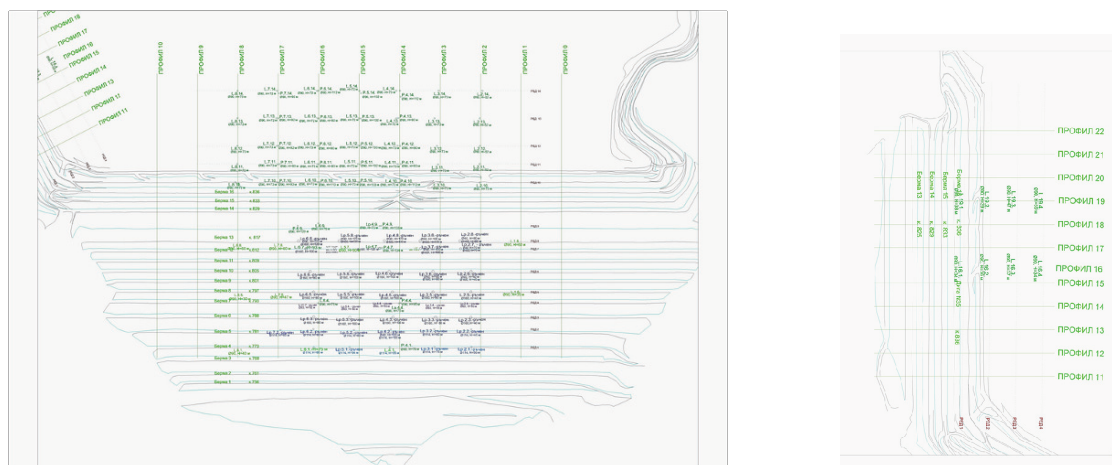
В периода на експлоатацията на съоръжението системата за подземен мониторинг е надградена четири пъти.

Що се касае за геодезическата мрежа, до първото десетилетие на 21. век е бил избран т.нар. створен метод на измервания и според него са изградени опорните геодезически мрежи и точки. Но бумът на дигиталните технологии дава сериозен тласък и на геодезическите измервания, което води до търсене на по-глобални, по-прецизни и автоматизирани решения.



Фиг. 2 Система за повърхностен мониторинг – геодезическа мрежа.

През 2025 г. към системата за подземен мониторинг има над 120 пиезометри за следене на хидростатичното и порово налягане, а към системата за повърхностен мониторинг – 6 бр. роботизирани тотални станции, 46 изходни контролни точки за вертикални и хоризонтални измервания, 88 бр. наблюдателни точки.



Фиг. 3 Система за подземен мониторинг – пиезометри за хидростатично и порово налягане.

Раздел II – Възникнали проблеми при експлоатацията на подземната и повърхностната системи за мониторинг

Важно е да се има предвид, че част от новата КИС за подземен мониторинг, изградена през 2019 г., се намира в плажа на хвостохранилище „Люляковица“.



Фиг. 4 Пиезометри в плажа на хвостохранилище „Люляковица“, 2024 г.

В системата за подземен мониторинг:

1. При някои пиезометри за ръчно измерване на нивото на депресионната крива, се констатира образуване на налепи по тръбите. Подобни образувания срещат и хидрогеолозите от рудник „Асарел“. Проучванията показват, че поради технологични процеси това са железни окиси. Решението, което прилагаме, е периодично промиване на сондажи.
2. При сондажите с автоматично измерване на депресионната крива има малка тръбичка Ø32 за връзка с атмосферното налягане и контролно измерване. В някои пиезометри тя се запушва. Решението отново е промиване на целия пиезометър, демонтаж на тръбичката и сензорите и повторен монтаж. Другата трудност е, когато пиезометърът се намира навътре в плажа на съоръжението. За целта се прави насип с достъп до него, за да може сондажната техника да стигне и да се обособи работна площадка.
3. В определени ситуации не достига времето за осушаване на плажа. Поради това най-вътрешните пиезометри (около 150 м) са почти недостижими пеша. Това налага прокарването на нови насипи до тях, изчакване до няколко дни, за да е безопасно влизането преди работа на място.



Фиг. 5. Система за повърхностен мониторинг, 2025 г.



В системата за повърхностен мониторинг:

1. Ежегодно буйната растителност като храсти, клони, разлистването през лятото пречи на ориентацията на тоталните станции и наблюдението на определени точки. Периодично се налага да правим просеки, тъй като разстоянията са до и над 1000 м.
2. Друг проблем може да има със захранването и сигнала от и до тоталните станции. До 2024 г. захранването на станциите беше автономно, но имаше прекъсвания и липса на комуникация. Поради това надградихме почти всички станции с постоянно електрозахранване, оптична връзка и СОР. По този начин спестяваме много време за реакция и проверка, както и обезпечаваме мрежата.
3. Не на последно място - наличието на горски фонд в близост до изходната геодезическа мрежа. Премахването на растителност в тези зони е бавен процес и това изисква дейностите да се предвидят доста по-рано, за да се извършат съответните нормативни процедури.



Фиг. 6 Въздушен откос на основна стена, по която са разположени наблюдателни точки.

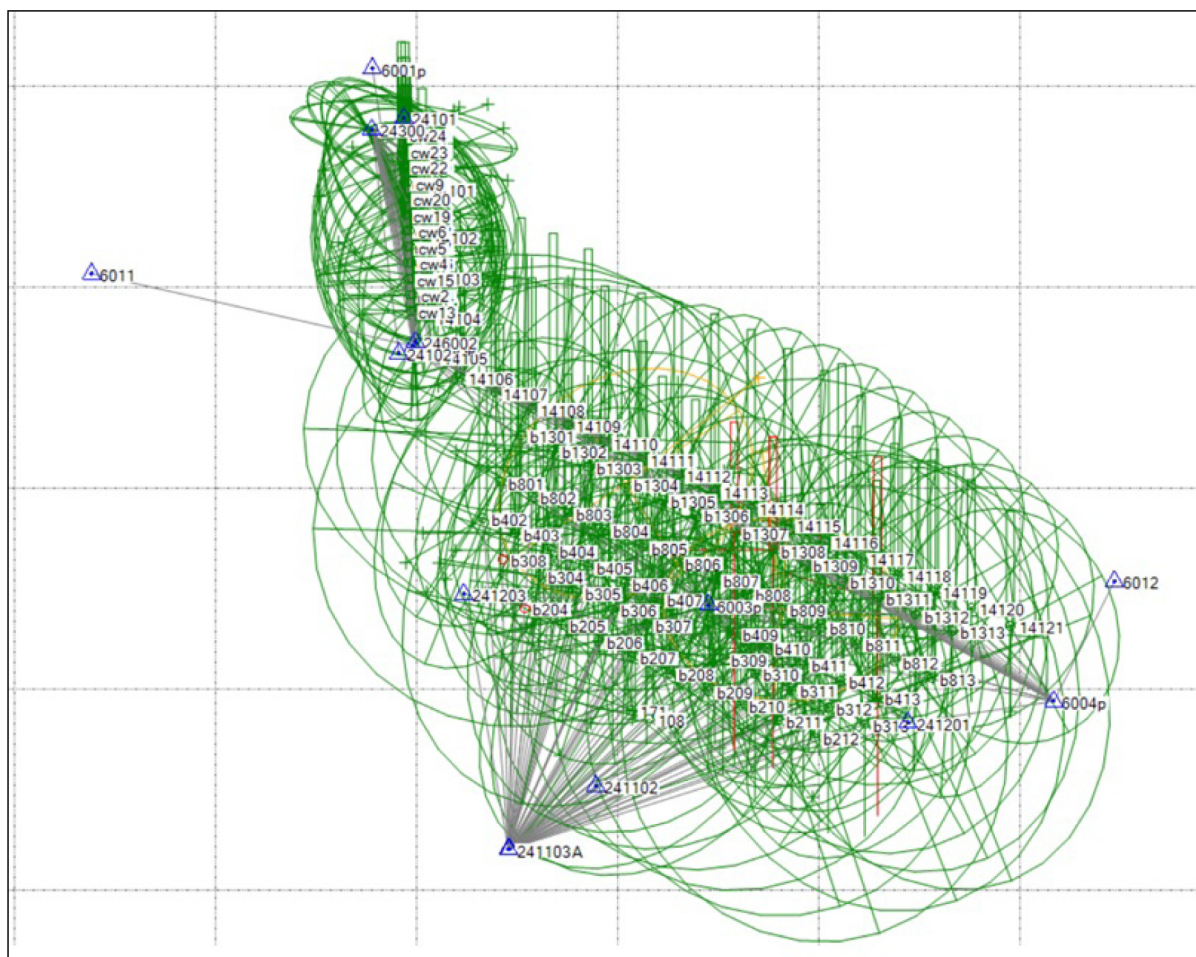
Раздел III – Изпълнени проекти за надграждане на КИС от 2023 до 2025 г.

През последните две години (2023 - 2025) бяха изпълнени няколко проекта за надграждане на системата за повърхностен мониторинг.

Геодезическата мрежа е надградена, съгласно работния проект за експлоатационно изграждане на хвостохранилище „Люляковица“ до кота 900,. Някои наричат подобна система „георобот“ – автоматизирани тотални станции, работещи в синхрон и последващо изравняване на получените резултати.



Фиг. 7 Надграждане системата за повърхностен мониторинг, 2024-2025 г.



Фиг. 8 Справка от изпълнени измервания на 5 бр. роботизирани тотални станции от последно поколение, ГНСС приемници и изходни точки.



За хвостохранилище „Люляковица“ основни ограничения при избора, вида и методологията на геодезически измервания са топографията и големите разстояния. Имаме денивелация от -30 м до +200 м, която ще нараства, както и дължинни разстояния от 50 м до 1800 м.

Тези обстоятелства бяха истинско предизвикателство пред проектантите, експлоатационния екип и строителна фирма, ангажирана за изпълнение на задачата.

Направено бе преизчисляване на цялата мрежа с GPS измервания на всяка точка. Също така се работи в локална координатна система (кадастрална, редуцирана), което допълнително доведе до нови координати. В този случай впечатлява точността, тъй като разликата е само няколко сантиметра.

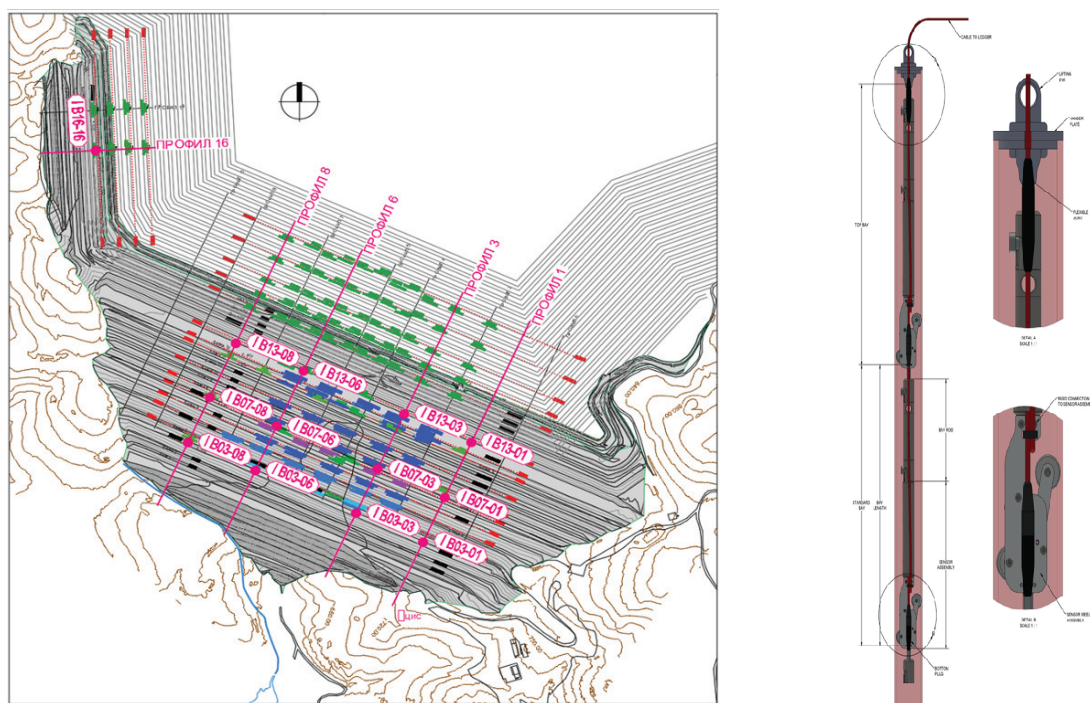
При първоначалната ориентация на всяка станция са измерени всички възможни изходни точки, така че абриса на станцията да бъде високоточен и правдоподобен. Всяка станция е с твърди координати, а на определени изходни точки има монтирани GNSS приемници, които да следят координатите им. При промяна в тях се променят и координатите на станциите.

От експлоатационна гледна точка имаме ограничения в прилежащите терени – някои точки попадат в горски фондове. Направихме необходимите действия и разрешителни процедури, за да осигурим видимост между контролни точки и станции и наблюдателни точки.

Друг интересен казус е интеграцията на цялата мрежа и измерванията в Trimble 4D Control. За целта са проведени редица изследвания в програмата – с какви и кои изчислителни модули да изравнява програмата, в кои часови диапазони на денонощието се получават най-правдоподобни измервания или нереални такива, дали да се работи с единични или групови енджини. На база тези тестове и набиране на данни преценяваме как да работи „геороботът“.

Използването на тотални станции и призми дори вече е не толкова популярен метод за следене на премествания, тъй като технологиите напреднаха значително и започнаха да се използват облитания с дрон, лазерни измервания, сателитни методи (InSAR) и т.н. Въпреки това поради естеството на хвостохранилище „Люляковица“, вариантът с тотални станции и призми е достатъчно високоточен и надежден.

По отношение на системата за подземен мониторинг през 2024 г. приехме работен проект за внедряването на инклинометри. Това е утвърдена световна практика, която се препоръчават бюлетините на ICOLD.



Фиг. 9 Надграждане на системата за подземен мониторинг – In-Place Inclinometers, 2025.



На последната работна среща на „Технически комитет А“ на ICOLD в гр. София от м. април 2024 г., е обявено, че предстои издаването на нов бюлетин по отношение на численото моделиране на язовирните стени и провеждането на статични и динамични изследвания при различните етапи от жизнения цикъл на съоръженията. Именно определянето на хоризонталните премествания за всеки етап е един от основните акценти при оценката на устойчивостта на стените и се превръща в добра практика по света. Сравняването на проектните изследвания и реалните данни от инклинометрите показва поведението на съоръжението и дава насоки на експлоатацията за по-нататъшни действия.

В случая за хвостохранилище „Люляковица“ първо беше направено предпроектно проучване за избор на подходящ вариант на инклинометри. Предвид мащабите избрахме т.нар. In-Place Inclinometers (IPI). В проекта са заложили 13 бр. инклинометри на този етап от развитието на съоръжението с обща дължина 986 м. Системата е проектирана, така че да има лесно надграждане с нови инклинометри при необходимост в бъдеще.

Малко по-детайлна информация за конструкцията: в инклинометричните тръби се инсталират вериги от инклинометри (стрингове), с помощта на които се отчитат завъртанията в определени точки на колоната. Уредите, предвидени за инсталиране, представляват сглобяема система от модули с определена дължина, съдържащи носеща част, сензор и сигнален кабел. За всеки елемент е определена инструкция за инсталиране.

Раздел IV – Планирани дейности по надграждането на КИС за 2025 г.

Както стана ясно, за 2025 г. планираме изграждането на 13 бр. инклинометри с обща дължина 986 м.



Фиг. 10 – Надграждане системата за подземен мониторинг – нови профили за следене на депресионната линия.

Освен тях, поради нарастването на хвостохранилище „Люляковица“, се налага да увеличим профилите в източната част на съоръжението и пред контрастената в западната част. Затова предвиждаме общо 3 профила с по 4 бр. пиезометри с автоматично отчитане и онлайн наблюдение.

Раздел V – Размер на инвестициите на „Асарел-Медет“ АД за реализация на проектите по надграждане и поддръжка на КИС на хвостохранилище „Люляковица“

Всичките тези системи за контрол и наблюдение са много важна част от съвременния мониторинг и управлението на хвостохранилище „Люляковица“.



Като отговорен оператор „Асарел-Медет“ АД последователно инвестира в подобрения и иновации, които да осигурят максималната сигурност на хвостохранилището. Само последните 3 години дружеството е инвестирало над 1,6 млн. лв. за надграждане и развитие на Контролно-измервателната система с адаптиране на най-добрите практики в тази област.

Използвана литература:

1. Static liquefaction in tailings dam and flow failure, 2019, worldminetailingsfailures.org,
2. Tailings dam and seismicity - Bulletin 98 ICOLD, 1995.
3. Technical bulletin “Application of Dam Safety Guidelines of Mining Dams”, Canadian Dam Association, 2019.
4. Работни проекти на хвостохранилище „Люляковица“, 1983 и 1984 г.
5. Изследвания за определяне коефициенти на реагиране на хвостохранилище „Люляковица“ и анализ на опасността от втечняване на хвоста при статични натоварвания, ГИ „Страшимир Димитров“, БАН, 2023 г.
6. Детайлно микросеизмично райониране и определяне на проектните сеизмични характеристики на хвостохранилище „Люляковица“, НИГГГ-БАН, 2018 г.
7. „Оценка на риска за статично и динамично втечняване“, „ЙОДА“ ЕООД, 2025 г.



СЪВРЕМЕНЕН ПОДХОД ЗА ГЕОТЕХНИЧЕСКО ХАРАКТЕРИЗИРАНЕ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩА – ДВА БЪЛГАРСКИ ПРИМЕРА ОТ ПРАКТИКАТА

Николай Милев

Катедра „Геотехника“, Университет по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ),
бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, България, milev_fte@uacg.bg

РЕЗЮМЕ

Минната индустрия, която е от ключово значение за световната икономика, генерира остатъчен материал (т. нар. „хвост“), изискващ безопасно и дългосрочно съхранение. С намаляването на пространството за нови хвостохранилища съществуващите съоръжения се надграждат – това ги прави дори още по-отговорни. В световен мащаб, все по-често срещани са внезапните аварии вследствие на статично втечняване, а в сеизмичните райони рискът от динамично втечняване следва да бъде оценен. Докладът представя съвременен подход за геотехническо характеризиране на тези мащабни съоръжения: какви изследвания да се извършат, как да се обхване целият диапазон на деформации, как да се отчете ефектът на структурата на материала и как резултатите да се използват в аналитични и числени (МКЕ) анализи. Два български примера от практиката (хвостохранилища „Люляковица“ и „Бенковски-2“) демонстрират използването на най-модерните и наложилите се с времето геофизични, полеви и лабораторни методи – за целите на дефиниране на „критичното състояние“ на материала и калибриране на конститутивни модели.

Ключови думи: хвостохранилища, статично втечняване, динамично втечняване, геотехническо характеризиране, ефект на структурата на материала, коравина при малки деформации, МКЕ, устойчивост на откоси, критично състояние

STATE-OF-THE-ART APPROACH FOR GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF TAILINGS DAMS – INSIGHTS FROM TWO BULGARIAN CASE STUDIES

Nikolay Milev

Department of Geotechnics, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy,
1 Hristo Simirnenki Blvd., Sofia 1164, Bulgaria; milev_fte@uacg.bg

ABSTRACT

The mining industry, which plays a key role in the global economy, produces residual material (commonly known as tailings) that requires safe and long-term storage. As space for new tailings storage facilities becomes scarce, existing dams are raised higher – making them even more critical structures. Around the world, sudden failures caused by static liquefaction are becoming increasingly common, while in seismic regions, the risk of dynamic liquefaction must also be carefully assessed. This paper presents a state-of-the-art approach for geotechnical characterization of such large-scale facilities: which tests to perform, how to capture the full range of strain behavior, how to account for the effect of soil fabric, and how to use the results in both analytical and numerical (FEM) analyses. Two Bulgarian case studies (Lyulyakovitsa and Benkovski-2 tailings dams) demonstrate the use of cutting-edge and well-established geophysical, in-situ, and laboratory methods to define the critical state of tailings materials and calibrate appropriate constitutive models.

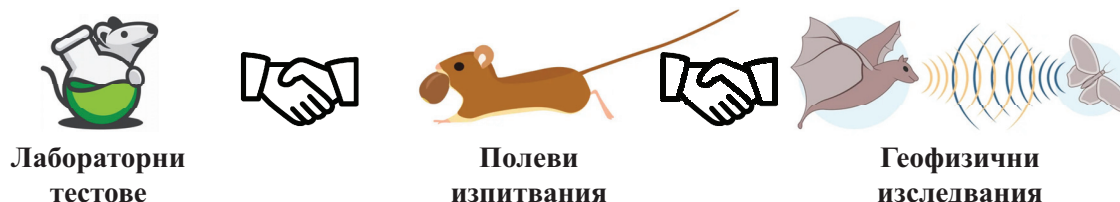
Key words: tailings dams, static liquefaction, dynamic liquefaction, geotechnical characterization, soil fabric effect, small-strain stiffness, FEM, slope stability, critical state



ВЪВЕДЕНИЕ

Минната индустрия е един от основните двигатели на световната икономика, осигурявайки суровини за множество индустриални сектори. Наред с ползите си, тази дейност генерира значителни количества остатъчен материал, наричан хвост, който следва да бъде съхраняван безопасно и дългосрочно. Това налага изграждането на хвостохранилища – съоръжения, които в много случаи се надграждат с развитието на добивните дейности. Поради ограничените терени за нови обекти, все по-често съществуващите хвостохранилища се доизграждат на височина – което ги прави още по-отговорни и рискови съоръжения. През последните две десетилетия в световен мащаб се наблюдават множество внезапни и катастрофални аварии с хвостохранилища, включително при такива без наличие на земетръсно въздействие – в резултат на т. нар. „статично втечняване“. В сеизмично активни региони рискът от динамично втечняване също е съществен, особено при рохки водонаситени материали. Подобен тип разрушения и загуба на носимоспособност не само застрашават човешки животи и околната среда, но оронват и авторитета на минната индустрия пред обществото – ето защо те трябва да бъдат избегнати.

За да се гарантира дългосрочната устойчивост на хвостохранилищата, е необходимо прецизно и адекватно геотехническо характеризиране, тъй като именно то е в основата на всяка оценка на устойчивостта – както статична, така и динамична – и е пряко свързано с надеждността на използваните аналитични или числени (МКЕ) модели. Основното предизвикателство се крие в това, че този тип съоръжения са мащабни, често хетерогенни, по своя характер, и изградени на етапи. Тези предпоставки поставят редица въпроси: на колко места да се извършват изследвания, на каква дълбочина, и най-вече – какви методи следва да се приложат, за да се „опише“ поведението на материала в пълния диапазон на деформации (от „малки“ до „големи“). На практика няма универсален метод, който да предостави цялата необходима информация и е нужен комбиниран подход – Фигура 1.



Фиг. 1. Схематично представяне на съвременните методи за геотехническо характеризиране

Геофизичните методи – като MASW+MAM („Multichannel Analysis of Surface Waves“ в комбинация с „Microtremor Array Measurement“), „cross-hole“, електрическа томография (ERT) и методът „Н/V“ на Накамура – са особено ефективни за обхващане на големи площи, откриване на потенциални аномалии и определяне на коравината при малки деформации чрез измерване на скорост на разпространение на напречни вълни. Освен това, те предоставят индиректна информация за структурата на материала (т. нар. „soil fabric“), която е от ключово значение при оценката на склонността към втечняване на хвоста.

Полевите изпитвания, като статични пенетрационни тестове с измерване на порен натиск (CPTu) и стандартизирани пенетрационни тестове (SPT), имат предимството да изпитват материала непрекъснато в дълбочина, в неговото естествено състояние, и при „големи“ деформации. Тези методи се използват широко в геотехническата практика заради утвърдени корелации, включително при определяне на относителна плътност и динамична устойчивост („носимоспособност“) – т. нар. „коефициент на циклична носимоспособност“ – Cyclic Resistance Ratio – CRR.

Лабораторните изпитвания, например монотонни и циклични триосови опити с измерване на скорост на разпространение на срязващи вълни чрез „бендер-елементи“, дават възможност за задълбочен анализ на поведението (реагирането) на материала в пълния диапазон на деформации – при статично и динамично въздействие. Този тип тестове предоставят зависимости „напрежения-



деформации“, „пътека на напреженията“ (т. нар. „stress path“), „нарастване на порен натиск“ и други връзки, чрез които могат да се калибрират подходящи конститутивни модели (базирани на анализ при ефективни напрежения) за оценка на склонност към втечняване чрез МКЕ. Недостатък на лабораторните изследвания е практическата невъзможност за вземане на ненарушени проби от хвостовия материал – ето защо измерванията на скорост на разпространение на напречни вълни чрез геофизични методи и бендер-елементи са особено важни, за да може да бъде отчетено влиянието на структурата на материала (т. нар. „soil fabric“) – „полева“ спрямо „лабораторна“ (при подготовка на „нарушен“ образец).

Част от крайните цели на геотехническите проучвания могат да бъдат систематизирани по следния начин: 1) да бъдат обхванати големи площи и зони, за да могат да бъдат идентифицирани потенциални неочаквани аномалии в съоръженията; 2) да бъде достигната достатъчна дълбочина на изпитванията – включително под потенциални хлъзгателни повърхнини при оценка на обща устойчивост; 3) да бъдат осигурени надеждни входни данни за числено моделиране по МКЕ – т.е. да бъдат калибрирани подходящи конститутивни (физични) модели, улавящи промяната в ефективните напрежения при външно въздействие; 4) да бъдат извършени аналитични решения, отчитащи действителната якост на срязване на хвоста – в зависимост от „дренраното“ или „недренираното“ състояние на материала („рохък“ или „сбит“ в контекста на „земна механика на критичното състояние“ – т. нар. „Critical State Soil Mechanics“); 5) да бъде направена оценка относно склонността към статично и динамично втечняване с отчитане на структурата на материала (т. нар. „soil fabric“).

В доклада са описани по-детайлно някои съвременни методи за геотехническо характеризиране на хвостохранилища, като приложението им е демонстрирано чрез два практически примера от България – хвостохранилища „Люляковица“ и „Бенковски-2“.

ЗЕМНАТА МЕХАНИКА НА КРИТИЧНОТО СЪСТОЯНИЕ (CRITICAL STATE SOIL MECHANICS – CSSM) – ПРИЛОЖЕНИЕ ПРИ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

Когато дадена почва е подложена на срязване, тя се стреми да достигне до гранично състояние – „уникално“ взаимно положение на средни ефективни напрежения, p' , девиатор на напрежения, q' , и коефициент на порите, e , при което се генерират относително големи ълови деформации при относително малко нарастване на срязващите напрежения. „Земната механика на критичното състояние“ (Critical State Soil Mechanics – CSSM) предвижда как биха реагирали „сбити“ и „рохки“ материали при прилагане на външно въздействие. Тя предоставя рамка за математическо моделиране на поведението на почвите и хвоста. Фундаменталното правило при CSSM е, че механичното реагиране (поведение) на почвата или хвоста зависи от тяхното състояние. В тази връзка, е важно да се отбележи, че якостта на срязване на материала не е фиксирана (константна) характеристика, а варира според състоянието, в което се намира той (например: според коефициента на порите, напрегнатото състояние и взаимната подредба на частиците, т.е. структурата на материала – „soil fabric“) – [10]. CSSM е базирана на основен принцип, който предполага, че почвата достига „критично състояние“ („critical state“), когато спре да променя обема си (нито се разширява, нито се свива при последващо нарастване на тангенциалните напрежения) – независимо от началната си относителна плътност. Теорията спомага прогнозирането на това как хвостът би се деформирал (реагирал) при прилагане на нови (допълнителни) геоложки товари и хидравлично породени допълнителни напрежения (например: при промяна на водното ниво). Това е особено важно при осигуряване на общата устойчивост на хвостохранилищата.

В класическата земна механика якостта на срязване и консолидацията се възприемат като два независими един от друг феномена – те се разглеждат поотделно. Въпреки това якостта на срязване на почвата / хвоста и консолидацията са директно свързани и могат да бъдат отчетени едновременно – по този начин реагирането на масива при прилагане на външно натоварване може да бъде разбрано много по-добре. Този подход е заложен в „земната механика на критичното състояние“ („Critical State Soil Mechanics“ – CSSM) и дава връзка между добре познатите концепции за едномерна консолидация (изразена чрез зависимост „коефициент на порите срещу вертикални ефективни напрежения“) и

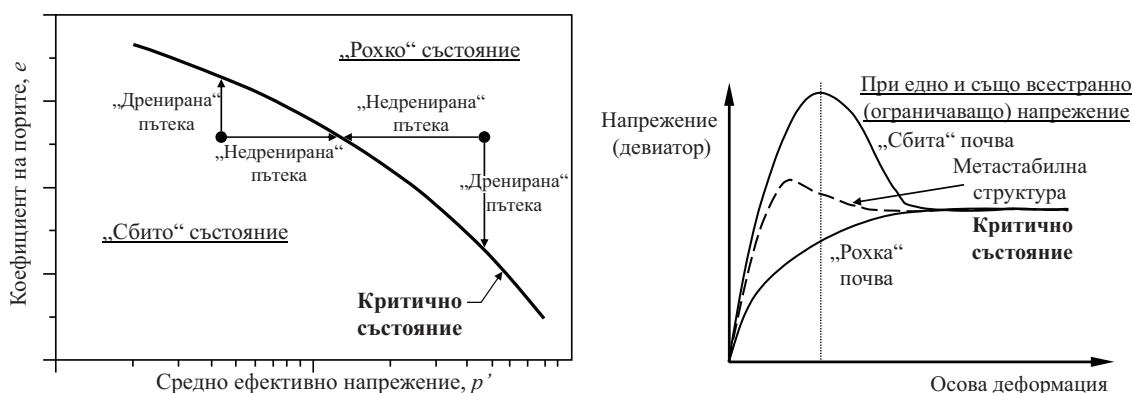


реагиране на база на връзка между срязващи и нормални напрежения (зависимост „срязващи напрежения срещу вертикални ефективни напрежения“ и „пътека на напреженията“ – „stress path“).

Добре известен факт е, че почвата, независимо от състоянието, в което се намира („рохко“ или „сбито“), при относително големи деформации, клони към т. нар. „критично състояние“ („Critical State“ – CS) – в това положение структурата на почвата („soil fabric“) е дотолкова нарушена, че началното състояние (или началната относителна плътност) не е от значение и остатъчната якост на срязване диктува реагирането на масива – Фигура 2.

CSSM, дори в най-базовата си формулировка, е достатъчен инструмент, за да бъде „разбрано“ сложното реагиране на почвата или хвоста, а то включва:

- Срязване на нормално уплътнени или преуплътнени почви и процеси на консолидация;
- „Пътеки на напреженията“ („stress paths“) в дренирано и недренирано състояние при срязване;
- Развитие на положителен и отрицателен порен натиск по време на срязване;
- Обемни деформации (склонност към свиване или разширяване при срязване);
- Предвиждане на недренираната якост на срязване;
- Конститутивно (физично) поведение на почвата (например: зависимости „напрежения – деформации“, които отчитат еластичното или еласто-пластичното поведение на материала).



Фиг. 2. „Пътека на напреженията“ („stress paths“) при монотонно дренирано натоварване (константно средно ефективно напрежение, p') / недренирано натоварване (срязване при константен обем) – водонаситен „рохък“ и „сбит“ материал (ляво) и зависимост „напрежения-деформации“ – почви в различни състояния (дясно)

Минималният набор от параметри, позволяващ използването на CSSM е: ϕ' или ϕ'_{cr} (ъгъл на вътрешно триене в „критично състояние“), C_c (коефициент на компресия, характеризира степента на компресия при първично натоварване), C_r (коефициент на рекомпресия, характеризира степента на компресия при вторично натоварване), e_0 (коефициент на порите в естествено / начално състояние), σ'_v (вертикални ефективни напрежения) и OCR (коефициент на преуплътняване). Основните предпоставки на CSSM могат да бъдат систематизирани както следва:

- Почвата не се разрушава при „консолидация“ (тя може да консолидира „безкрайно“), а вследствие на срязване;
- Всички напрежения / „пътеки на натоварване“ („load paths“) водят към „линията на критичното състояние“ („Critical State Line“ – CSL);
- Разрушението в почвата настъпва, когато напрежения / „пътеки на натоварване“ („load paths“) стигнат до „линията на критичното състояние“ („Critical State Line“ – CSL) – тя играе роля на „гранична обвивка на разрушение“ („failure envelope“);
- За разлика от критерия за разрушение на Мор-Кулон, CSSM отчита обемните деформации;
- Тъй като CSSM отчита обемните деформации, тя възприема величини (девиатор, q' , и средно ефективно напрежение, p'), които са базирани на триизмерни (пространствени) напрежения.



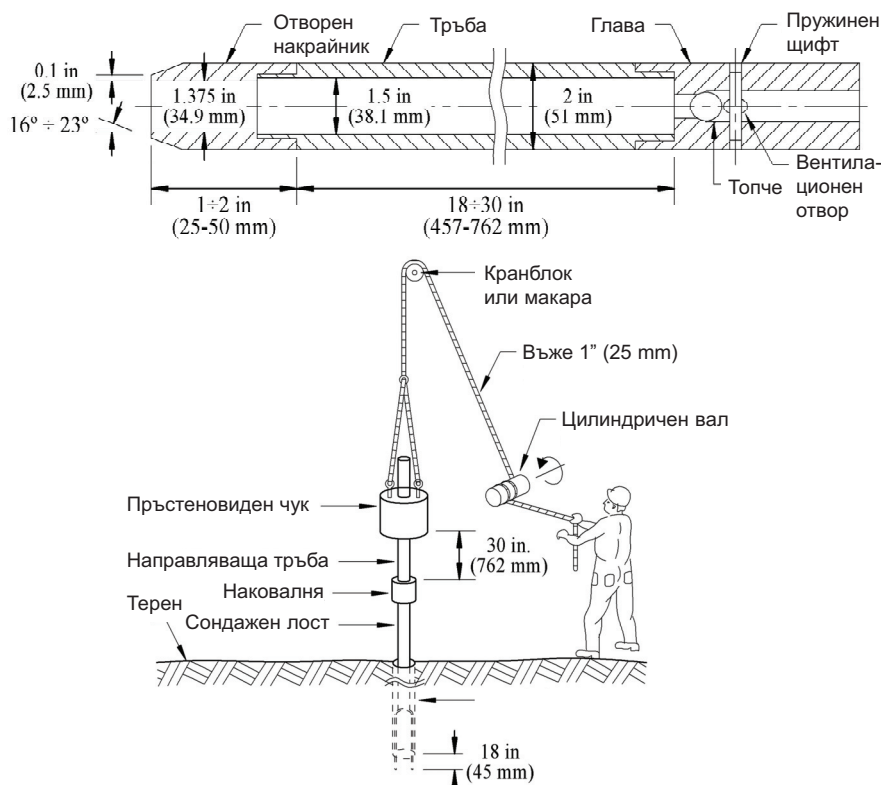
CSSM е най-ефективна, когато масивът се разглежда като непрекъсната среда с „плавни“ промени в напреженията и деформациите – хвостохранилищата обикновено реагират именно така.

Възприемането на CSSM е нецелесъобразно в случаите на възникване на хлъзгателни повърхнини и/или неравномерно разпределяне (концентрация) на напрежение и деформации.

ПОЛЕВИ („IN-SITU“) ИЗПИТВАНИЯ

➤ Стандартизиран пенетрационен тест (SPT)

Стандартизираният пенетрационен тест (SPT) се провежда в процеса на сондиране и проникване в масива в дълбочина с цел приблизително измерване на динамичното почвено съпротивление и вземане на нарушени образци. Този тип изпитване може да бъде приложен за широк спектър от почви (включително и хвост) и често се използва както за определяне на относителната плътност на материала, D_r , така и за директна оценка на риска от „динамично“ втечняване. В някои случаи той не е подходящ, тъй като е възможно да даде заблуждаващо големи стойности за D_r за чакъли, а същевременно не е и достатъчно чувствителен (прецизен) за целите на характеризирането на меки глини и други подобни материали (например: хвост в „рохко“ водонаситено състояние).



Фиг. 3. Стандартизиран пенетрационен тест (SPT) – инструмент (горе) и провеждане на опит (долу)

Процедурата за провеждане на стандартизиран пенетрационен тест (SPT) е детайлно показана в [4] и [7], а с оглед използването на метода за оценка на риска от „динамично“ втечняване следва да бъде използван [3], тъй като там са дадени подробни насоки и изисквания. Тестът предвижда набиване на стандартен цилиндричен накрайник в земната основа чрез свободно падаща тежест и измерване на броя удари за проникване на дълбочина от 450 mm (300 mm). Чукът, с маса 63.5 kg, се издига на височина 0.76 m и се пуска до достигане на 6 (шест) последователни инкременти от по 75 mm, всяка. Първите 2 инкременти се записват до достигане на материал в естествено състояние, а сумата от



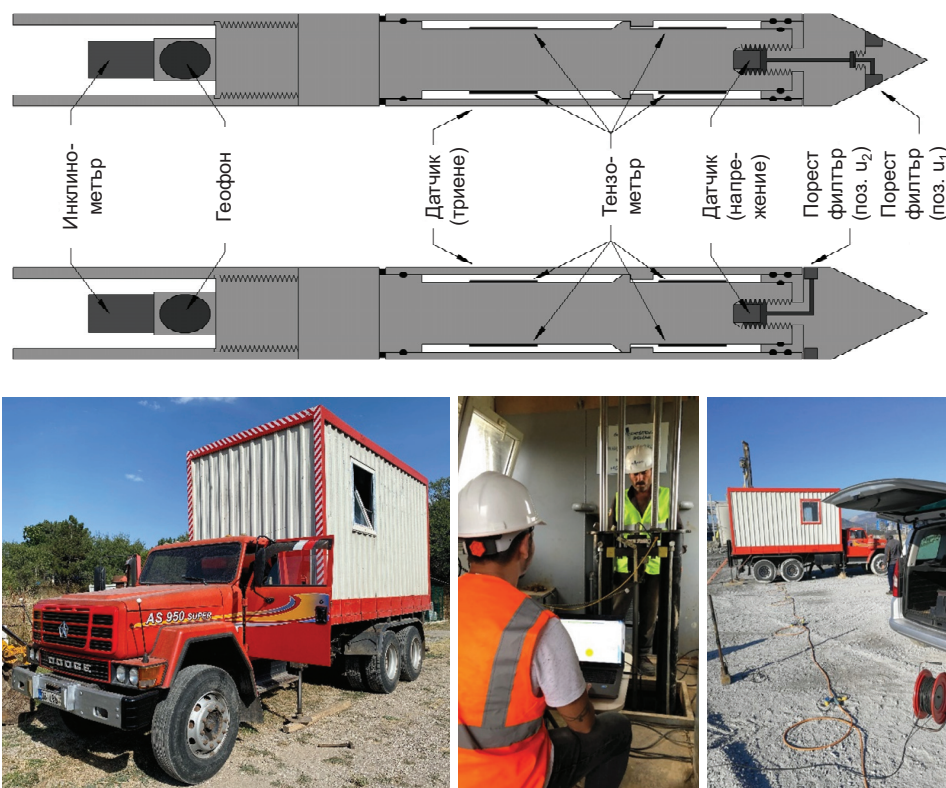
последващите 4 инкременти дава т. нар. N -стойност (брой удари за навлизане на накрайника на дълбочина от 300 mm) – Фигура 3.

Най-често използваният подход за определяне на цикличната недренирана якост на материала (хвоста), Cyclic Resistance Ratio – CRR , на база полеви измервания, е разработен според резултати от стандартизирани пенетрационни тестове (SPT). Ето защо този тип измервания обикновено е неразделна част от работните програми за оценка на риска от „динамично“ втечняване на хвостохранилища.

В някои от често срещаните случаи в практиката, се предвижда в процеса на прокарване на проучвателните ядрови сондажи, да бъдат изпълнявани и стандартизирани пенетрационни изпитвания (SPT) през дадено разстояние в дълбочина. Преди провеждане на SPT дъното на сондажа внимателно трябва да бъде почистено от обрुшки (почвата задължително трябва да бъде в състояние близко до „естественото“, а оводняването на сондажа е недопустимо). Често срещана практика е, преди започване на тестовете, да бъде калибрирана използваната установка, а енергийното ѝ съотношение (ER) – да бъде определено опитно.

➤ Статично пенетрационен тест с измерване на порен натиск (CPTu)

Статичният пенетрационен тест с измерване на порен натиск (CPTu) е един от най-разпространените полеви методи за геотехническо проучване на земната основа. Това се дължи на факта, че методът е относително бърз за прилагане, а освен това, в повечето случаи, е и икономически целесъобразен – дава възможност за изследване на широк спектър от почви – от пясъци до глини.



Фиг. 4. Статичен пенетрационен тест с измерване на порен натиск (CPTu) – инструмент (горе) и провеждане на опит (долу)

Стратиграфията и якостните параметри на почвите или хвоста се получават директно в процеса на проникване на инструмента, и тъй като всички измервания се правят на място (полево), не се взимат образци, което от своя страна води до спестяване на време и финансови средства. Един от



основните недостатъци на теста се крие в това, че се губи визуалната класификация на материала – не се тестват проби, съответно няма как да бъдат изведени съществени показатели, които могат да бъдат получени единствено чрез лабораторни изпитвания. Методът е фундаментален при оценката на риска от статично втечняване, като той дава и точна информация относно пластовете в дълбочина, които са съставени или от „рохки“, или от „плътни“ прослойки – съществено разделение за възприемане на „недренирана“ (според коефициента на вертикално напрежение, [16], или метод SHANSEP – Stress History and Normalized Soil Engineering Properties – [12]) или „дренирана“ (според теория на Мор-Кулон) якост на срязване в изчисленията.

Провеждането на статичен пенетрационен тест (CPTu) се извършва съгласно [2] или [8] и се състои в постепенно (плавно) хидравлично вкарване на стоманен инструмент (сонда) в земната основа при постоянна (константна) скорост (около 20 mm/s) – измерва се съпротивлението при навлизане (Фигура 4). Съществуват редица подразновидности на метода, в зависимост от оборудването – от малки (преносими) системи, които намират приложение в трудно достъпни площадки, до едрогабаритни конфигурации, които са монтирани в камиони. При използване на хидравлична система с възможност за прилагане на сила до 100 kN, е възможно достигане на дълбочина от порядъка на 20÷25 m за 1.0÷1.5 часа, в условия на средно твърди или твърди почви (хвост). Конвенционалният статичен пенетрометър се състои от метален инструмент (сонда), който измерва едновременно следните три параметъра:

- Върхово съпротивление;
- Околно триене;
- Порен натиск при навлизане.

Не винаги се правят измервания на порния натиск, а когато това е предвидено, тестът се нарича „CPTu“ вместо „CPT“. Стандартният статичен пенетрометър има конусен накрайник с ъгъл при върха от 60° и цилиндричен инструмент (прът) с диаметър 35.7 mm или 43.7 mm. Система с автоматичен дигитален запис отчита върховото съпротивление, околното триене и порния натиск в дълбочина. Данните се използват за генериране на профил непрекъсната стратиграфия, интерпретация на почвените / хвостовите разновидности и получаване на някои съществени геотехнически параметри.

Един от най-разпространените методи за определяне на цикличната недренирана якост на материала (в случая – хвоста) е базирана на резултати от статични пенетрационни тестове с измерване на порен натиск (CPTu). Нещо повече – това е най-подходящият полеви опит за оценка на риска от статично втечняване и определяне на остатъчната якост на срязване в недренирано състояние на хвоста – в положение, в което порният натиск в него рязко нараства. Ето защо възприемането на този тип измерване е особено важно при оценката на риска от втечняване.

На Фигура 4 (долу) е показана система Vertek Hogentogler, монтирана в 20-тонен камион, с цилиндричен инструмент (прът) с диаметър 35.7 mm (площ на напречното сечение – 10 cm²), оборудвана с пиезометър за измерване на порен натиск (тип u₂ – датчик, монтиран непосредствено след конусния накрайник) и двуосов инклинометър. Така оформената конфигурация е с възможност за проникване до 50 m дълбочина (типичните записи са до около 30 m). Краят на теста настъпва при достигане на едно от следните състояния:

- Върхово съпротивление и/или околното триене достигнат горната граница на обхвата си, съответно 90 MPa и 6.9 MPa;
- Недопустим наклон (изкривяване) на цилиндричния инструмент (лоста).

Достигането на гранична сила на проникване (сума от върховото съпротивление и околното триене), в зависимост от пластовете, през които преминава инструментът, се контролира чрез два манометъра – един за измерване на силата на проникване и един за регистриране на възможен дисбаланс в превозното средство (той следи за концентрация на напрежения в хидравличната система). Именно поради тази причина, предварителната подготовка на терена е от съществено значение преди започване на статичен пенетрационен тест – трябва да бъде избегнато внезапно

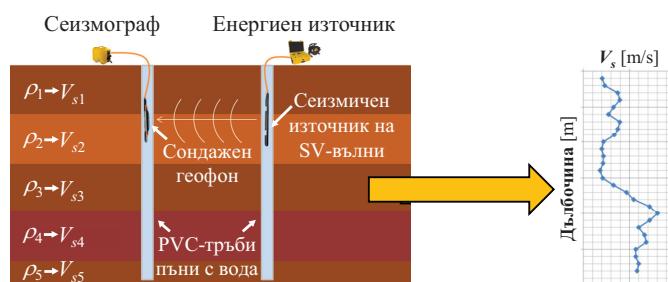


потъване на някоя от гумите на камиона, тъй като това би довело до преждевременно прекратяване на измерванията.

ГЕОФИЗИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

➤ „Cross-hole“ метод

„Cross-hole“ методът представлява геофизичен подход за определяне на скорост на разпространение на срязващи вълни, V_s , в масива (хвоста) чрез двойка обсадени сондажи – Фигура 5. Тестът се състои в спускане на сеизмичен източник (изпълчвател) в един от сондажите и сензор-приемник (датчик) в другия, на една и съща дълбочина – вълните се генерират и регистрират в множество точки по височина. Този метод е подходящ, когато се изисква подробна и точна информация за масива (хвоста), особено при очаквано наличие на зони с различни характеристики (изразяващо се в увеличаване или намаляване на скоростите на вълните). Той се счита за най-директният и прецизен тест за полево геофизично изпитване на земната основа. За да бъде проведен в дадена точка, е необходимо специално оборудване на два сондажа. Разстоянието между сондажите в план в дадена локация на изследване следва да бъде от порядъка на 2.5 m. След приключване на серия от проучвателни дейности (например: стандартизирани пенетрационни тестове, SPT, и проучвателно ядрово сондиране за определяне на физични параметри) вече изпълнените сондажи могат да бъдат проширени до диаметър 165 mm (или близък до него, но непревишаващ 175 mm), до желаната за изпитване дълбочина, след което, в така оформените изработки, се вкарват PVC-тръби с вътрешен диаметър около 3" (~76 mm), фиксатори и тапа от долната им страна (препоръчително е да бъде сложена тапа и от горната страна на тръбите, за да се избегне замърсяване). Предварително се проверява вертикалността на PVC-тръбите чрез жироскоп, след което те се пълнят с вода, а зоната между тях и сондажа се компенсира с разтвор, съгласно изискванията на [1]. Разтворът се инжектира под ниско налягане „отдолу-нагоре“, с помпа, и посредством тръба с диаметър около 20÷25 mm. Тръбите се прихващат (анкерират), за да се избегне тяхното преместване (изплуване). За подготвянето на сондажите за провеждане на геофизични проучвания се следват всички препоръки на [1].



Фиг. 5. „Cross-hole“ метод за определяне на скорост за разпространение на срязващи вълни – опитна постановка (ляво) и резултати (дясно)

В някои случаи е възможно регистриране на „паразитни“ вълни при идентифицирането на срязващи вълни. За да бъде сведена до минимум появата им, се препоръчва „захващането“ на PVC-тръбите към хвостовия (почвения) масив да бъде извършено съобразно изискванията на стандартите (например: [1]), а същинските изследвания да бъдат проведени минимум 14 дни след инжектиране. Ако „паразитни“ вълни бъдат регистрирани, обикновено се налага водата от PVC-тръбите да бъде отстранена.

Преди започване на дадена серия от изследвания, е необходимо вземането на отчети чрез жироскоп, за да могат да бъдат точно заснети разстоянията между сондажите в дълбочина (пространственото им разположение).

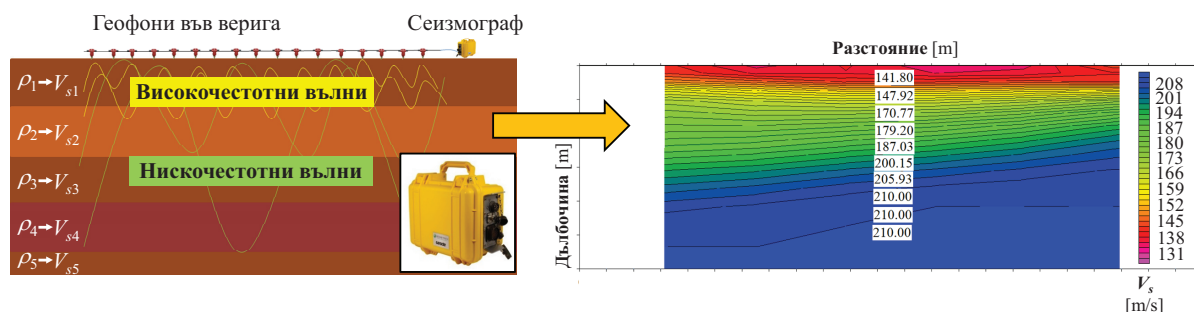


„Cross-hole“ методът се счита за най-директния и точен подход за определяне на обемни сеизмични вълни в масива – съответно той е най-прецизен и с най-добра резолюция в дълбочина. Серия от такъв тип изследвания позволява идентифицирането на пространствени изменения в хвоста, а резултатите от тестовите могат да послужат за следното:

- Директна оценка на склонността на почвите към втечняване;
- Пряка информация относно структурата на материала (т. нар. „soil fabric“);
- Входна информация за „статичен“ и „динамичен“ анализ (скорост на разпространение на натискови, P , и срязващи, S , вълни – съответно V_p и V_s);
- Определяне на коравината на материала при малки деформации (начален модул на срязване, G_0) и коефициент на Поасон, ν ;
- Микросеизмично класифициране – в контекста на [5].

➤ Анализ на повърхностни вълни (MASW+MAM)

Анализът на повърхностни вълни (MASW+MAM – „Multichannel Analysis of Surface Waves“ в комбинация с „Microtremor Array Measurement“) представлява геофизична процедура за определяне на скорост на разпространение на срязващи вълни, V_s , в масива (хвоста) чрез анализ на повърхностни вълни (т. нар. „surface waves“) – Фиг. 6. Той се състои във полагане (фиксиране) на верига (редица) от нискочестотни геофони, на равни разстояния, на терена (линейна конфигурация), като фокусът е регистриране на т. нар. „Rayleigh-вълни“ от активни (удари с чук) и пасивни (околен шум) източници.



Фиг. 6. Анализ на повърхностни вълни (MASW+MAM) за определяне на скорост за разпространение на срязващи вълни – опитна постановка (ляво) и резултати (дясно)

Процедурата предполага получаване на дисперсионно изображение с помощта на τ - ρ преобразуване и метод, базиран на пространствена автоматична корелация (т. нар. „Spatial Auto Correlation“). Впоследствие се генерират дисперсионни криви, които биват трансформирани с цел получаване окончателни стойности на скоростта на разпространение на срязващи вълни в дълбочина.

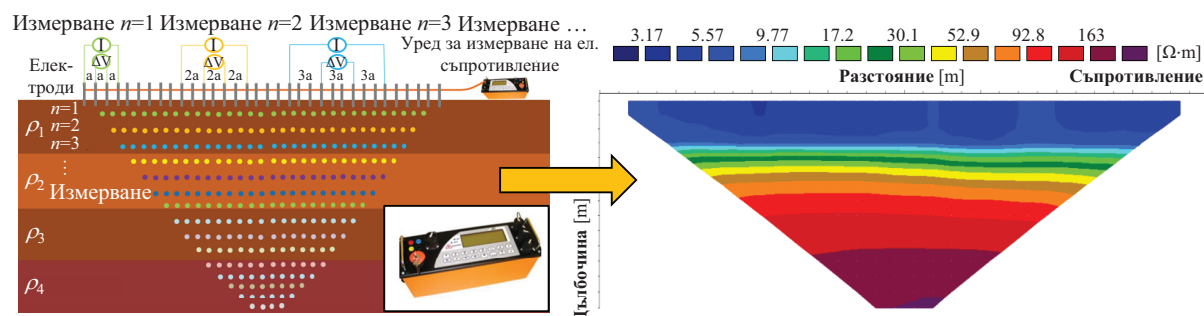
Счита се, че тази процедура е със средна разделителна способност и е добра база за бърза оценка на скоростите на разпространение на срязващи вълни, въпреки ограничената дълбочина, която може да бъде достигната при измерванията – тя е индивидуална и зависи от спецификите на материала.

➤ Електрическа резистивна томография (ERT)

Електрическата резистивна томография (ERT) представлява геофизичен подход за двумерно представяне на хвостовия масив чрез електрически записи, провеждани на повърхността – Фигура 7. Методът се състои в измерване на съпротивление посредством четири електрода, които са фиксирани на терена, на едно и също разстояние. Два електрода се използват за вкарване на ток в земята, а другите два измерват потенциалната разлика, след което съпротивлението се изчислява, като се взима предвид взаимната позиция на използваните електроди. Процесът е автоматизиран с помощта на



електронен резистометър и серия от електроди, поставени по линията на изследване. Техниката предполага вариране с различни електроди и разстояния, за да бъде получен двумерен профил под установката.



Фиг. 7. Електрическа резистивна томография (ERT) – опитна постановка (ляво) и резултати (дясно)

Тъй като съпротивлението зависи от плътността, водното съдържание, минералния състав и други, електрическата резистивна томография (ERT) е многофункционално средство, което е ценно за идентифицирането на широк спектър от състояния на материала (хвоста), например – разграничаване на отделни слоеве, оценка на тяхната непрекъснатост или хомогенност, геометрия на почвения (хвостовия) масив, дълбочина до материал с относително голяма коравина и други.

С оглед на това, че електрическото съпротивление на материалите е чувствително към водно съдържание, минералогия, обем на порите и водопропускливост, електрическата резистивна томография (ERT) позволява цялостно характеризиране на хвоста – в състояние е да идентифицира пространствени промени в материала. Резултатите от тестовете могат да послужат за следното:

- Информация относно хомогенност или хетерогенност на хвоста;
- Засичане на пространствени вариации в масива в дълбочина;
- Регистриране на ниво на подземните води;
- Идентифициране на аномалии, които е възможно да са свързани с по-голямо процентно съдържание на пясък.

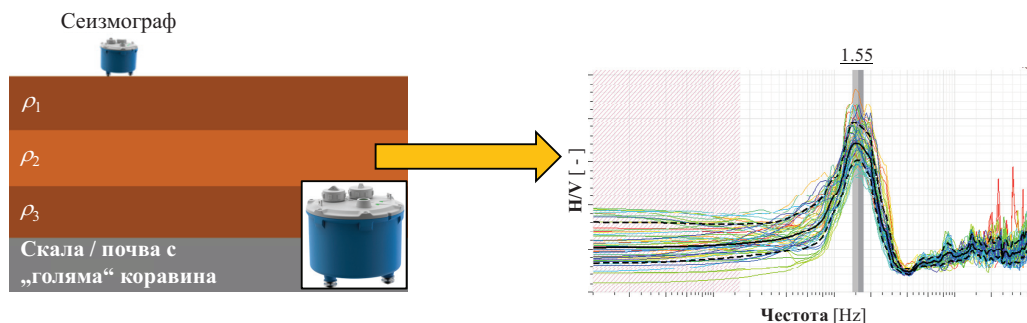
➤ Метод със спектрални отношения (H/V)

Методът със спектрални отношения (H/V), познат още като „метод на Накамура“, [14], представлява геофизичен подход за определяне на собствената честота (или период) на почвения (хвостовия) масив – Фигура 8. Техниката се състои в поставяне на триосов сензор (засичащ хоризонтални, напречни и вертикални компоненти) за измерване на микротрептения в дадена локация, през определен период от време. Записаната информация се трансформира в честотни спектри в хоризонтално и вертикално направление посредством метода на Фурие, след което двата хоризонтални честотни спектъра се осредняват и разделят на вертикалния спектър, за да бъде определена собствената честота на масива – пикът в графиката (Фигура 8 – дясно). H/V-методът позволява относително лесно да бъде получена ценна качествена информация във връзка с пространствената вариация на свойствата на масива, която е пряко обвързана с мощността (дълбочината) на „мекия“ материал (хвост), $V_s \leq 800$ m/s, и скоростта на разпространение на сръзваци вълни.

Техниката на Накамура позволява да бъде определена резонантната честота на масива. Серия от измервания в дадено хвостохранилище може да предостави данни във връзка със собствената честота на съоръжението в множество точки в план – този показател се влияе както от начина, по който е изградено хвостохранилището, така и от структурата на самия хвост (т. нар. „soil fabric“).



Резултатите от тестовете служат за идентифициране на резки промени в собствената честота на съоръжението, които могат да бъдат свързани със зони с аномалии, нуждаещи се от специално внимание – относително ниски честоти биха дали индикация за материал с „по-слаби“ механични показатели.



Фиг. 8. Метод със спектрални отношения (H/V) – опитна постановка (ляво) и резултати (дясно)

СПЕЦИАЛИЗИРАНИ ЛАБОРАТОРНИ ТЕСТОВЕ

- „Статични“ – дренирани и недренирани монотонни натискови триосови опити

Една от основните цели на лабораторните тестове (консолидирани дренирани и недренирани монотонни натискови триосови опити) е да бъде „захранен“ подходящ конститутивен (физичен) модел на хвоста (например: NorSand), който впоследствие да послужи за база за провеждане на анализ по метод на крайните елементи (МКЕ) и съответно за оценка на риска от статично втечняване.

Конститутивният модел NorSand е създаден от Майк Джефрис през 1993 г., [9] – от тогава до сега той е усъвършенстван и надграждан многократно от други автори през годините – [6]. NorSand е разработен, за да симулира прецизно и коректно поведението на несвързани почви и хвост в широк спектър от състояния – от „сбито“ (проява на т. нар. „дилатансия“) до „рохко“ (свиване при срязване). Приложението на NorSand е демонстрирано успешно и при изготвянето на разширено техническо становище във връзка с аварията в хвостохранилище „Фундао“ (Бразилия) през 2015 г.

Физичният модел е базиран на теорията на граничното състояние (т. нар. „Critical State Theory“) или казано по друг начин: когато дадена почва е подложена на срязване, тя се стреми да достигне до гранично състояние – уникално взаимно положение на средни ефективни напрежения, p' , девиатор на напрежения, q' , и коефициент на порите, e , при което се генерират относително големи ъглови деформации при незначително нарастване в срязващите напрежения.

Трите основни групи параметри, които са необходими за коректно дефиниране на модела NorSand могат да бъдат систематизирани както следва: 1) еластични (коравина); 2) пластични (якостни) и 3) линия на граничното състояние (якостни).

За целите на калибрирането им, съответно и на входните параметри към модела NorSand, обикновено е необходимо провеждане на 7 броя консолидирани дренирани монотонни натискови триосови опита и 5 броя консолидирани недренирани монотонни натискови триосови опита – при различно напрегнато състояние (ефективни напрежения в образеца) и при различна относителна плътност („сбити“ и „рохки“ образци).

При консолидираните дренирани монотонни натискови триосови опити се следят следните зависимости:

- Девиатор на напреженията срещу вертикални деформации („ q - ε_v “);
- Девиатор на напреженията срещу средни ефективни напрежения („ q - p' “);
- Обемни деформации срещу вертикални деформации („ ε_v - ε_v “);
- Параметър на гранично състояние („critical state parameter“) срещу вертикални деформации („ ψ - ε_v “).



При консолидирани недренирани монотонни натискови триосови опити се следят следните зависимости:

- Девиатор на напреженията срещу вертикални деформации („ $q-\varepsilon_v$ “);
- Девиатор на напреженията срещу средни ефективни напрежения („ $q-p^*$ “);
- Порен натиск срещу вертикални деформации („ $u-\varepsilon_v$ “);
- Параметър на гранично състояние („critical state parameter“) срещу вертикални деформации („ $\psi-\varepsilon_v$ “).

Гореописаните лабораторни изпитвания дават солидна база за калибриране на конститутивния модел NorSand, като някои допълнителни входни параметри могат да бъдат определени от други ключови изследвания (например: геофизични методи за определяне на скорост на разпространение на срязващи вълни). Последната стъпка на процедурата е свързана с „напасване на параметрите“ („parameter fitting“), за да могат да бъдат прецизно симулирани триосовите опити чрез числени решения.

➤ „Динамични“ – недренирани циклични триосови опити

Втората група лабораторни опити спомага оценката на риска от динамично втечняване на хвоста (чрез класически метод, [15], и прецизна процедура – [11]), да бъдат получени динамичните характеристики на материала, както и да бъдат калибрирани някои класически конститутивни (физични) модели (UBCSand и PM4Sand), които са често използвани в практиката за провеждане на числени решения по метод на крайните елементи (МКЕ) с анализ, базиран на ефективно напрежение (т. нар. „effective stress analysis“) – т.е. регистриране на нарастване на порен натиск и влиянието му върху деградацията на коравината на материала и намаляване на якостта на срязване.

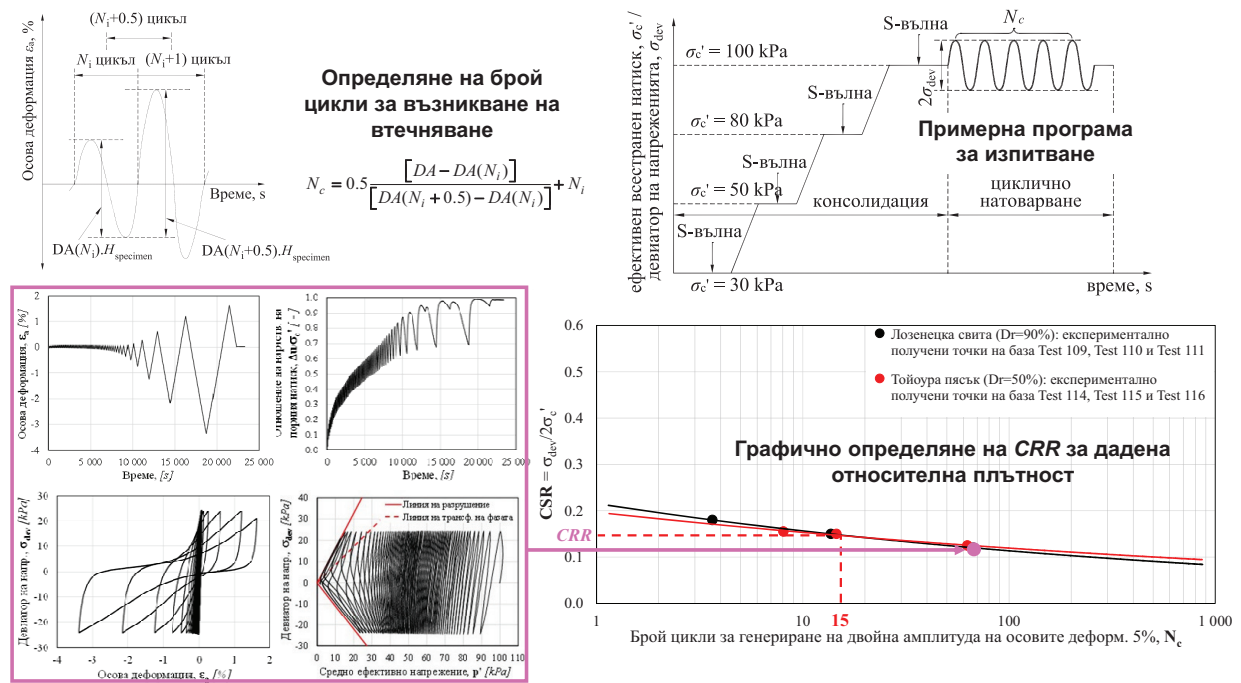


Фиг. 9. Цикличен триосов апарат с бендер-елементи и цикличен торсионен апарат с бендер-елементи (Лаборатория за редуциране на риска от геотехнически бедствия към Токийски университет – Токио, Япония), съответно ляво и среда, и цикличен мултипосочен апарат за плоскостно срязване (Middle East Technical University, METU – Анкара, Турция), дясно

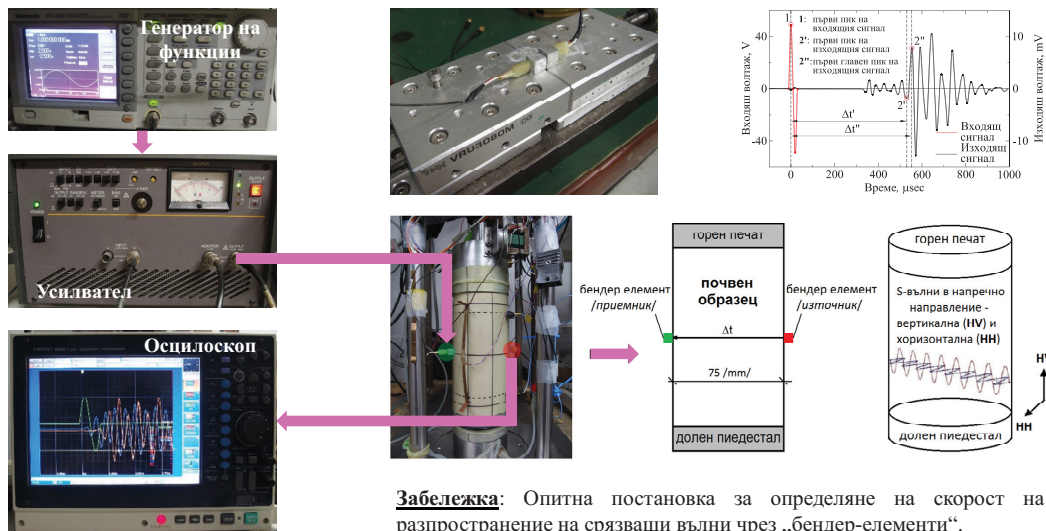
В случаите, в които хвостовият материал има приблизително един и същ зърнометричен състав и пластични показатели в преобладаващите зони (макар да е в състояние на различна относителна плътност), то, при дадени предпоставки, той може да бъде считан за представителна извадка за масива – съответно да бъде изследван със съвременни динамични лабораторни методи, които са



времеемки и изискват квалифициран персонал. Хвостът следва да бъде тестван при различни относителни плътности, D_r , като за всяка една от тях е необходимо да бъдат направени минимум 3 броя опита – с цел получаване на криви „коэффициент на циклично натоварване, Cyclic Stress Ratio – CSR, срещу брой цикли за получаване на осова деформация от 5%, N_c “ – т. нар. „cyclic strength curves“.



Фиг. 10. Примерна програма за изпитване на образци чрез „динамичен“ триосов апарат – опити проведени в периода от 2014 г. до 2015 г. в Геотехническа лаборатория на Токийски университет – [13]



Фиг. 11. Примерна опитна постановка за определяне на скорост на разпространение на напречни вълни чрез „бондер-елементи“ – опити проведени в периода от 2014 г. до 2015 г. в Геотехническа лаборатория на Токийски университет – [13]

Честа практика е, по време на провеждане на подобен тип лабораторните тестове, да бъде измервана и скорост на разпространение на срязващи вълни, V_s , чрез „бондер-елементи“. Освен пряко дефиниране на коравината на материала при малки деформации, G_0 , това се явява и подход за

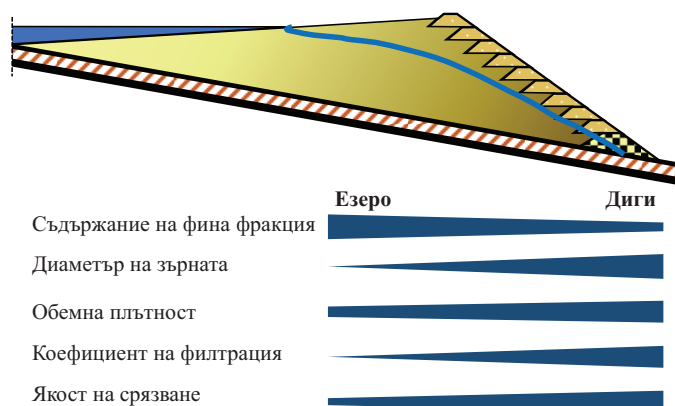


количествено регистриране на структурата на материала – по този начин е възможно V_s от лаборатория да се съпостави с V_s полево (от геофизични изследвания) и да се направи връзка между двете.

При провеждане на една серия от лабораторни изследвания (за една хвостова разновидност) е целесъобразно да бъдат проведени минимум 9 броя опита (за различни стойности на относителната плътност, D_r , т.е. 3 състояния с по 3 броя опити – „рохко“, „средно“ и „сбито“). Подобен набор от тестове би позволило окончателно описване на следната крива по 3 точки – „коефициент на циклична носимоспособност, Cyclic Resistance Ratio – CRR , срещу относителна плътност, D_r “. По този начин полевата динамична носимоспособност (изразена чрез CRR) за материала в неговото естествено състояние може да бъде дефинирана за всички зони, в които той се среща.

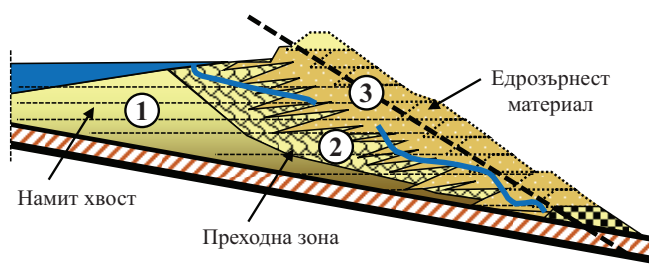
ТИПИЧНА ПРОСТРАНСТВЕНА ВАРИАЦИЯ НА ФИЗИЧНИ ПОКАЗАТЕЛИ И ЗЪРНОМЕТРИЧЕН СЪСТАВ В ХВОСТОХРАНИЛИЩА

Един от основните въпроси при използването на „земна механика на критичното състояние“ („Critical State Soil Mechanics“ – CSSM) при изследване на хвостохранилища е: колко на брой хвостови разновидности (според физични показатели и зърнометричен състав) са налице в съоръжението?



Фиг. 12. Типична пространствена вариация на физичните показатели в хвостохранилища

Добре известен факт е, че „земна механика на критичното състояние“ („Critical State Soil Mechanics“ – CSSM) предполага положението на материала („рохко“ или „сбито“) да бъде отчетено чрез „параметъра на състоянието“ (т. нар. „state parameter“), ψ , но, от друга страна, „линията на критичното състояние“ („Critical State Line“ – CSL) се явява уникална характеристика за съответния тип хвост. Дефинирането на CSL е трудоемка задача, която изисква висококвалифициран персонал, и в повечето случаи тя се определя опитно за представителни разновидности хвост от дадено съоръжение – т.е., на практика, се оказва невъзможно (а и ненужно според CSSM) да бъдат изведени десетки на брой CSL.



Фиг. 13. Типична пространствена вариация на зърнометричния състав в хвостохранилища и генерално разделяне на видовете материал в съоръжението – съответно 1, 2 и 3

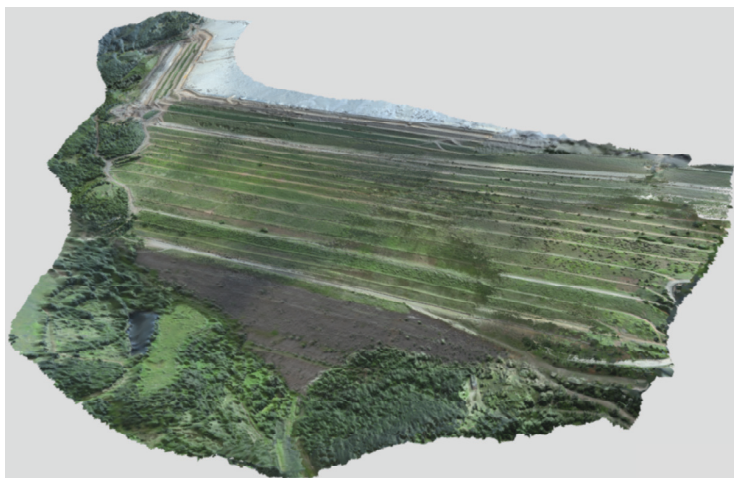


В много от случаите типичната пространствена вариация на физичните показатели в хвостохранилищата изглежда по начина, който е схематично демонстриран на Фигура 12 – това е една добра отправна точка за генерално разделение на отделните геотехнически разновидности.

Друга възможна линия на разсъждение е показана на Фигура 13 – в общия случай, генерално могат да бъдат идентифицирани 3 зони с различен зърнометричен състав – намит хвост (фин материал), преходна зона (междинно състояние) и едрозърнест материал – в близост до въздушния откос. По-приоритетно, с оглед оценката на риска от статично и динамично втечняване, е изследването на материала, който се намира под нивото на подземните води – хвост 1 и 2, в контекста на Фигура 13.

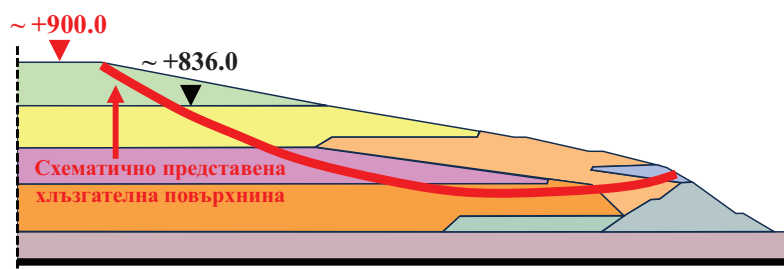
ГЕОТЕХНИЧЕСКО ХАРАКТЕРИЗИРАНЕ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ „ЛЮЛЯКОВИЦА“

Целта на геотехническото характеризиране на хвостохранилище „Люляковица“ на „АСАРЕЛ-МЕДЕТ“ АД в гр. Панагюрище (Фигура 14) е да даде база за оценка на риска от рязко намаляване на якостта на срязване на хвоста вследствие на нарастване на порния натиск в него и съответно да бъде изготвено експертно становище относно възможността за втечняване – потенциална причина за загуба на обща устойчивост при относително рязко увеличаване на геоложкия товар (по време на надграждане) и/или динамично въздействие (земетръс) – Фигура 15.

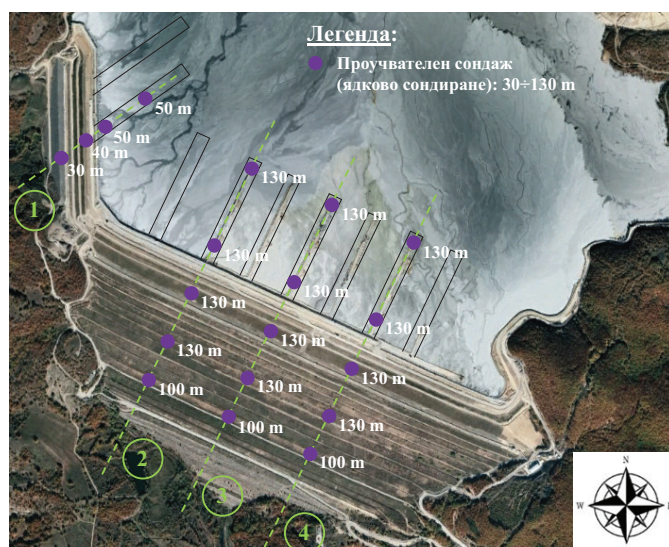


Фиг. 14. Пространствен геометричен модел на хвостохранилище „Люляковица“ – генериран на база заснемане с дрон

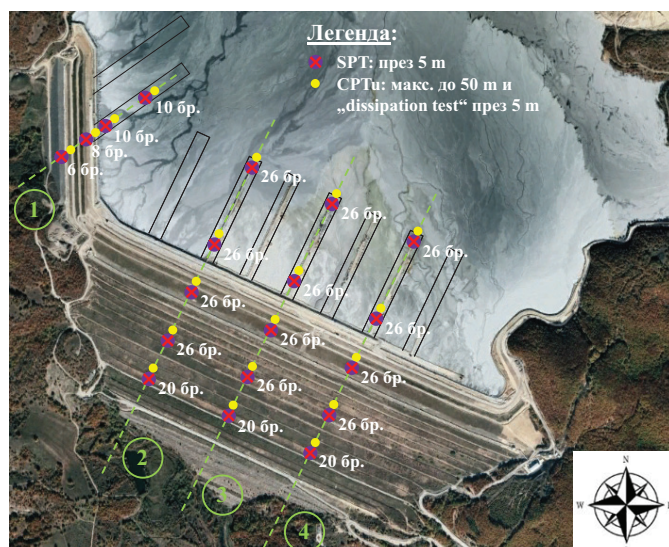
Решаването на поставените задачи не само би позволило даването на точна оценка относно риска от статично и динамично втечняване на хвоста, но би предоставило и задълбочена информация за реагирането на материала, намиращ се в хвостохранилище „Люляковица“, при бъдещи натоварвания (вследствие нарастване на геоложкия товар по време на надграждане, сеизмични въздействия и други).



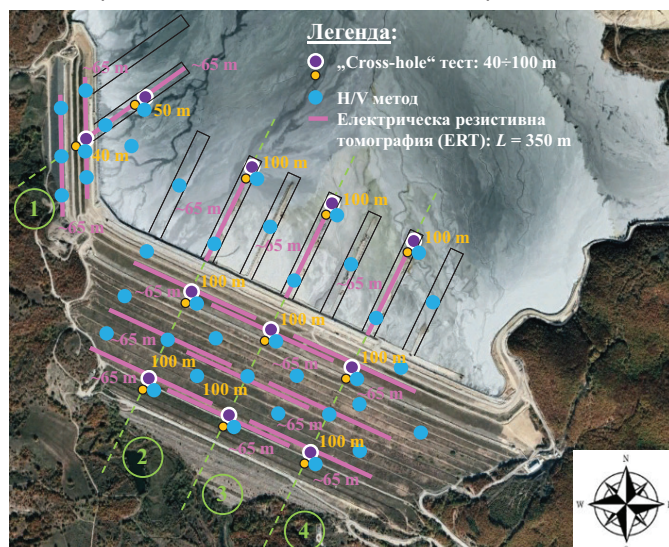
Фиг. 15. Схематичен разрез на хвостохранилище „Люляковица“, демонстриращ целта на геотехническото характеризиране



Фиг. 16. Планирано проучвателно сондиране – хвостохранилище „Люляковица“



Фиг. 17. Планирани полеви изпитвания – хвостохранилище „Люляковица“



Фиг. 18. Планирани геофизични изследвания – хвостохранилище „Люляковица“



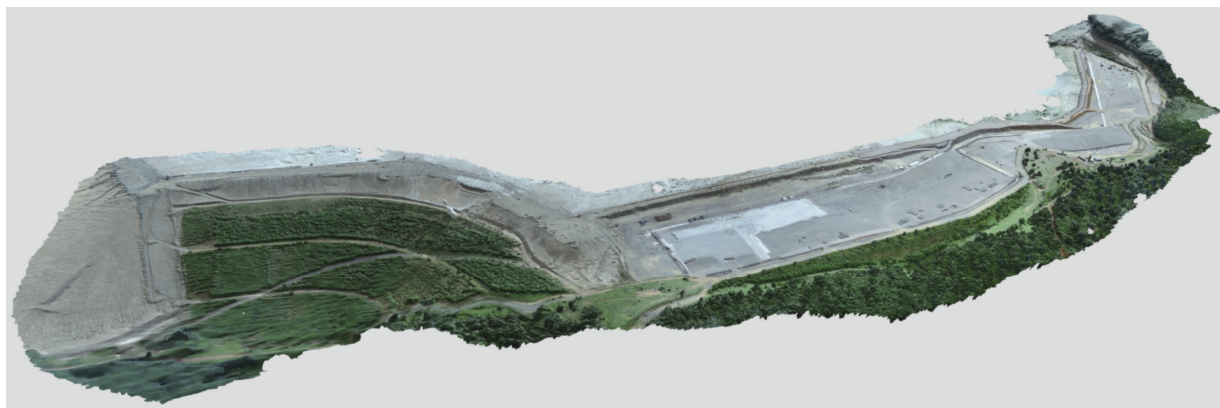
Изготвената работна проучвателна програма (показана на Фигура 16, Фигура 17 и Фигура 18) е базирана на описаните в доклада методики и предвижда събиране на достатъчно информация, за да може да бъде направен съвременен анализ във връзка с възможното намаляване на якостта на срязване на хвоста вследствие увеличаване на порния натиск.

ГЕОТЕХНИЧЕСКО ХАРАКТЕРИЗИРАНЕ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ „БЕНКОВСКИ-2“

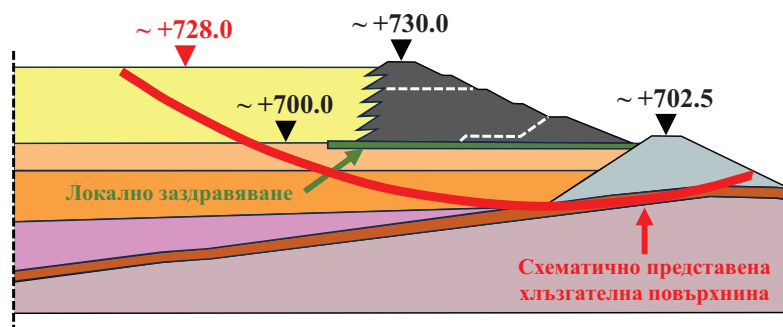
Замисълът на проучвателните дейности отново е свързан с оценка риска от внезапна деградация на коравината на материала в хвостохранилище „Бенковски-2“ (секция „Сулджа дере“), показано на Фигура 19, вследствие на намаляване на ефективните напрежения и съответно да бъде направено еднозначно заключение относно склонността към втечняване – възможна причина за загуба на обща устойчивост на масива при динамично въздействие (земетръс). Акцент на изследванията е профила при дига с височина ~ 30 m, която понастоящем е в процес на изграждане – Фигура 20.

Обхватът на геотехническото характеризиране на „Бенковски-2“ (секция „Сулджа дере“) е показан на Фигура 21 – той засяга всички съвременни подходи, които се прилагат и на международно ниво.

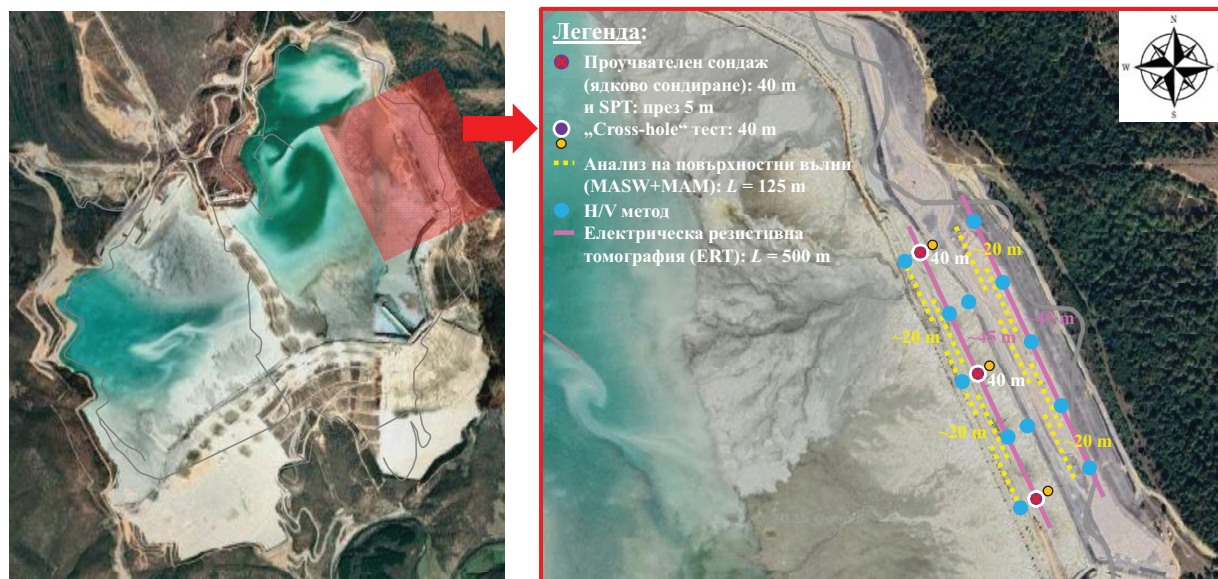
Предвижда се събраната геотехническа информация да даде възможност и за прилагане на прецизна процедура, която отчита структурата на хвоста (т. нар. „soil fabric“) – [11]. По този начин могат да бъдат избегнати твърде консервативни заключения относно устойчивостта на съоръжението.



Фиг. 19. Пространствен геометричен модел на хвостохранилище „Бенковски-2“ – генериран на база заснемане с дрон



Фиг. 20. Схематичен разрез на хвостохранилище „Бенковски-2“, демонстриращ целта на геотехническото характеризиране



Фиг. 21. Планирано геотехническо характеризиране – хвостохранилище „Бенковски-2“

Нещо повече, планираната серия от динамични лабораторни опити ще послужи и за база за калибриране на модерни и точни конститутивни (физични) модели на хвоста (UBCSand и PM4Sand), които са в основата на числените решение по метод на крайните елементи (МКЕ). Комбинацията от всички предвидени методи би дала допълнителна увереност относно бъдещото надграждане на хвостохранилище „Бенковски-2“ (секция „Сулджа дере“) на „Елаците-Мед“ АД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геотехническото характеризиране на хвостохранилища изисква интегриран и съвременен подход, базиран на комбиниране на геофизични, полеви и лабораторни методи, които да обхващат пълния диапазон от деформации на материала (от „малки“ до „големи“) и да отчитат ефекта на структурата на хвоста (т. нар „soil fabric“). Теоретичната рамка на „земната механика на критичното състояние“ (CSSM) позволява разбиране и моделиране на поведението на хвоста при различни въздействия, включително възможността за втечняване – както статично, така и динамично.

Примерите от практиката (хвостохранилища „Люляковица“ и „Бенковски-2“) демонстрират прилагането на утвърдени и иновативни методи, чиято основна цел е надеждното определяне на входни параметри за числени (МКЕ) модели, базирани на ефективни напрежения. Използваните подходи осигуряват възможност за калибриране на съвременни конститутивни модели като NorSand, PM4Sand и UBCSand, което позволява реалистични прогнози на реагирането на масива при бъдещи натоварвания.

В процеса на геотехническото характеризиране на хвостохранилища „Люляковица“ и „Бенковски-2“, което е в ход, ще се включат световно признати експерти от Япония, Италия и Турция, което допълнително ще затвърди прилагането на най-високи международни стандарти в оценката на устойчивостта и безопасността на тези съоръжения. Подобен интердисциплинарен и международен подход е ключов за повишаване на доверието в добивната индустрия и минимизиране на риска от аварии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ASTM International. (2007). *ASTM D4428/D4428M-07(2015): Standard test methods for crosshole seismic testing*. West Conshohocken, PA: ASTM International. https://doi.org/10.1520/D4428_D4428M-07R15.



- [2] ASTM International. (2020). *ASTM D5778-20: Standard test method for electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils*. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D5778-20>.
- [3] ASTM International. (2020). *ASTM D6066-20: Standard practice for determining the normalized penetration resistance of sands for evaluation of liquefaction potential*. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6066-20>.
- [4] ASTM International. (2022). *ASTM D1586-22: Standard test method for standard penetration test (SPT) and split-barrel sampling of soils*. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1586-22>.
- [5] European Committee for Standardization. (2004). *EN 1998-5: Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects*. Brussels, Belgium: CEN.
- [6] Gnanendran, C. T., & Wood, D. M. (1999). *Numerical experiments with the NorSand model*. *Géotechnique*, 49(5), 709–726. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.5.709>
- [7] International Organization for Standardization. (2011). *EN ISO 22476-3:2005+A1:2011: Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 3: Standard penetration test*. Geneva, Switzerland: ISO.
- [8] International Organization for Standardization. (2012). *EN ISO 22476-1:2012: Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test*. Geneva, Switzerland: ISO.
- [9] Jefferies, M. G. (1993). Nor-Sand: a simple critical state model for sand. *Géotechnique*, 43(1), 91-103.
- [10] Jefferies, M., Shuttle, D., & Been, K. (2015). Principal stress rotation as cause of cyclic mobility. *Geotechnical Research*, 2(2), 66-96.
- [11] Kiyota, T., Maekawa, Y., & Wu, C. (2019). Using in-situ and laboratory-measured shear wave velocities to evaluate the influence of soil fabric on in-situ liquefaction resistance. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117, 164-173.
- [12] Ladd, C. C., & Foott, R. (1974). *New design procedure for stability of soft clays*. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 100(7), 763–786.
- [13] Milev, N. (2016). *Soil-structure interaction* (Doctoral dissertation, PhD Thesis, UACEG, Sofia) – in Bulgarian).
- [14] Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1).
- [15] Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations division*, 97(9), 1249-1273.
- [16] Skempton, A. W. (1957). *Discussion on the structure of inorganic soils*. In *Proceedings of the Conference on the Engineering Properties of Soils* (Vol. 1, pp. 19–22). London: Institution of Civil Engineers.



ХИДРОТРАНСПОРТНА СИСТЕМА НА ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ „БЕНКОВСКИ 2“. ОСНОВНИ ПОЛОЖЕНИЯ ПРИ ХИДРАВЛИЧНО ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА НАПОРЕН ХИДРОТРАНСПОРТ

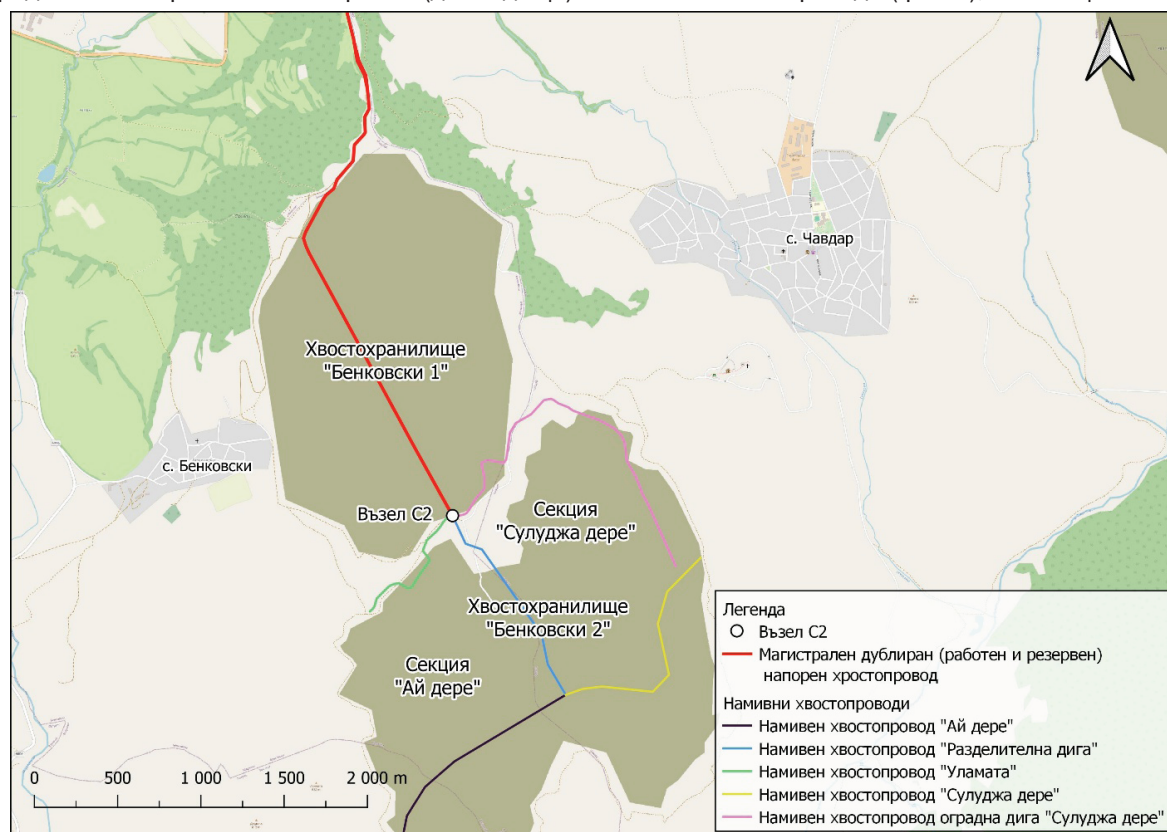
Веселин Карасинкеров, v.karasinkerov@ellatzite-med.com
Йоана Балачева, y.balacheva@ellatzite-med.com

РЕЗЮМЕ

Хидротранспортът е най-разпространеният метод за пренасяне на твърди частици чрез движеща се течност. Основните задачи при оразмеряването на хидротранспортните системи е определянето на критична скорост на потока, диаметър на тръбопровода и хидравличните загуби на напор, при известни производителност на фабриката, зърнометричен състав и реологични свойства на пулпа. В настоящия доклад се разглеждат необходимите изходни данни и предварителни проучвания за провеждане на изчисленията, избор на корелационна зависимост и изчислителен метод. Надеждното оразмеряване на хидротранспортните системи, в минната промишленост, води до оптимизиране на капиталовите разходи, по-висока ефективност на работа и повишаване на експлоатационна сигурност на съоръженията.

Въведение

„Елаците Мед“ АД е минна компания с основен предмет на дейност добив и първична преработка на медно-порфирни, златосъдържащи руди от находище „Елаците“. Флотационният отпадък от обогатителната фабрика, преработваща рудата, постъпва в хидротранспортна система под формата на пулп. Депонирането на отпадъка се извършва в хвостохранилище „Бенковски 2“ намиращо се на около 7 km от фабриката. Хидротранспортната система чрез която се извършва преноса на пулпа представлява мрежа от магистрални (довеждащи) и наливни хвостопроводи (фиг. 1), състояща се от:



Фигура 1. Схема на магистралните и наливни хвостопроводи на хвостохранилище „Бенковски 2“



- Разпределителна шахта 0 /РШ-0/ – намираща се след флотация;
- Дублиран безнапорен улеен хвостопровод – представлява стоманобетонов канал с двойно правоъгълно сечение;
- Напорна разпределителна шахта – разположена в края на улейния хвостопровод. Чрез нея движението преминава от безнапорно към напорно;
- Дублиран /работен и резервен/ магистрален напорен тръбопровод, състоящ се от две нитки – източна и западна. Работната нитка е изградена изцяло от стоманени тръби Ø813x10 mm с вътрешно полиуретаново покритие 8 mm и завърша при разпределителен възел С2, намиращ се на територията на хвостохранилището. Резервната нитка е съставена от двоен успореден базалтиран тръбопровод Ø490 mm, който след това преминава в една тръба изградена последователно от HDPE 711x32 mm, 762x32 mm и 900x53 mm. Понастоящем се изпълнява инвестиционната програма на дружеството предвиждаща цялостната подмяна на резервната нитка със стоманени тръби Ø813x10 mm с вътрешно полиуретаново покритие;
- Разпределителен възел С2 – служи за насочване на потока към наливните хвостопроводи за отделните стени;
- Намивен хвостопровод по разделителна дига – захранва секция „Ай дере“ или „Сулуджа дере“ в зависимост от това къде се депонира отпадъка. Тръбопровода е изпълнен от стоманени тръби Ø813x10 mm с вътрешно полиуретаново покритие. Той е с постоянен наклон 0,5% и завършва на мястото, където се събират работните корони на двете секции;
- Намивни хвостопроводи по работните корони на хвостови стени „Ай дере“ и „Сулуджа дере“ – изпълнени са от стоманени тръби Ø813x10 mm с вътрешно полиуретаново покритие;
- Намивен хвостопровод по оградна дига „Сулуджа дере“ – изпълнен последователно от HDPE тръби Ø1000x59.3 mm, Ø800x47.4 mm и стоманени тръби Ø820x10 mm;
- Намивен хвостопровод по хвостова стена „Уламата“ – изпълнен последователно от HDPE тръби Ø1000x59.3 mm и стоманени тръби Ø820x10 mm;

Във връзка с увеличаване капацитета и височината на хвостохранилище „Бенковски 2“ до 2041 година е необходимо изготвянето на различни хидравлични модели на хидротранспортната система. Целта на задачата е изясняване на основните параметри на потока – критична (незатлачваща) скорост и загубите на напор, при всеки един етап от надграждане на хвостохранилището и различните режими на работа на фабриката. На базата на получените резултати и анализа на данните ще може да се даде оценка, както за надеждността на съществуващата система, така и за нормалната ѝ експлоатация.

За осъществяването на тази цел в „Елаците Мед“ е закупен специализиран софтуерен продукт „*Flud Flow*“ на ирландската фирма Flite Software Ltd. за хидравлично оразмеряване и проверка на напорни системи, вкл. хидротранспортни. Софтуера дава възможност за моделиране на конкретен двуфазен флуид на базата на физичните и реологичните свойства на течността. Определянето на хидравличните загуби на напор може да се извърши по пет различни корелационни зависимости, а на критичната скорост по три.

Избора на изчислителен метод, както по отношение на определяне загубите на напор, така и по отношение на критичната скорост зависят от редица фактори. В настоящия доклад са разгледани някои основни изчислителни зависимости използвани в съвременните софтуерни продукти, както и необходимите входни данни за моделиране.

Основни параметри на пулпа

Важни физически показатели, които характеризират пулпа и участват в оразмерителните формули са неговият зърнометричен състав, плътност и консистенция. Докато плътността и зърнометричният състав се определят опитно, консистенцията на пулпа представлява отношението на количеството на твърдата фаза към количеството на пулпа.

Консистенцията на пулпа бива тегловна и обемна.

- Тегловна консистенция на пулпа:

$$C_w = \frac{G_T}{G_B} * 100 [\%] \quad (1)$$



- Обемна консистенция на пулпа:

$$C_V = \frac{Q_T}{Q_{\Pi}} = \frac{\rho_{\Pi} - \rho_B}{\rho_T - \rho_B} * 100 [\%] \quad (2)$$

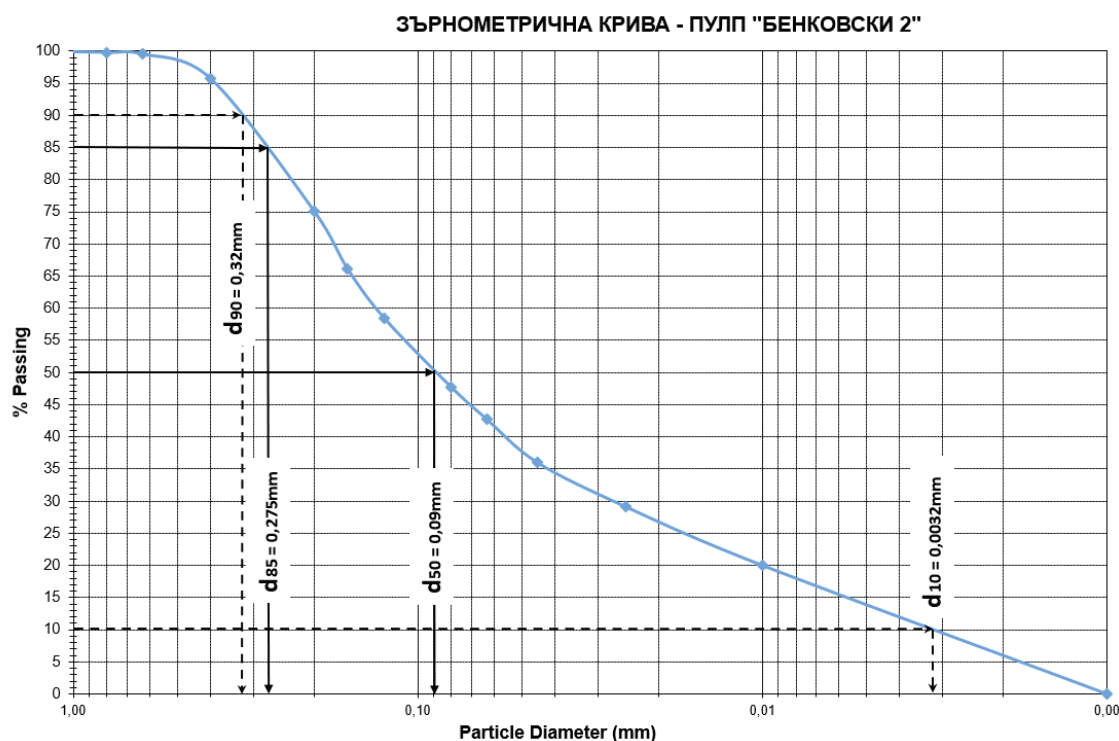
където G_T и G_B са тегловен разход на твърдото вещество и водата, [t/h];

Q_T и Q_{Π} са обемното количество на твърдата фаза и пулпа, [m³/h];

ρ_{Π} , ρ_T и ρ_B са обемната плътност на пулпа, твърдата фаза и водата, [t/m³].

- Зърнометричен състав:

Зърнометричният състав на твърдата фаза в пулпа характеризира геометричната едрина на частиците, разнородността и транспортируемостта на материала. Осреднени стойности на зърнометричния състав на пулпа при изход флотация на ОК „Елаците“ е даден на фигура 2.



Фигура 2. Зърнометрична крива на пулпа постъпващ в хидротранспортната система на хвостохранилище „Бенковски 2“

- Коефициент на разнородност:

$$U = \frac{d_{90}}{d_{10}} \quad (3)$$

където d_{90} и d_{10} са диаметрите на зърната които съответстват на 90-процентното и 10-процентното съдържание в състава на пробата.

При $U \leq 5$ – еднороден зърнометричен състав на пробата;

При $U > 5$ – разнороден зърнометричен състав на пробата.

Нютонова и ненютонова течност

При движение на течностите в тях възникват тангенциални напрежения известни като вискозност или сили на вътрешно триене. Връзката между тангенциалните напрежения и скоростта на ъглова деформация изразява т.нар. реологични свойства на течността (реограми). Тези свойства представляват съотношението между приложените тангенциални напрежения към безкрайно малък обем и поведението на течността.

За нютонова течност реограмата има линеен характер (фиг. 3), която се описва с израза:



$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (4)$$

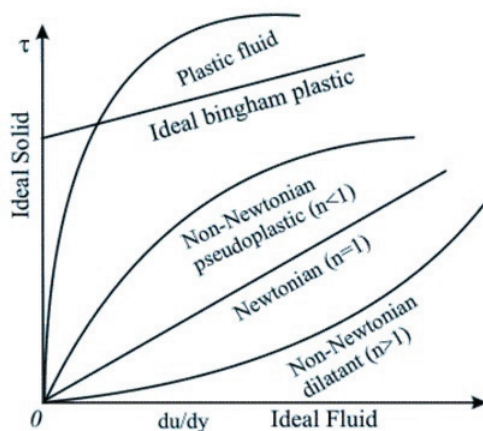
където μ е динамичен коефициент на вискозност, $[Pa \cdot s]$;

τ – срязващо напрежение възникващо в течността, при неравномерно разпределение на скоростта в дадено напречно сечение на потока, $[Pa]$;

$\frac{du}{dy}$ – градиент на скоростта или скорост на ъглова деформация, $[s^{-1}]$.

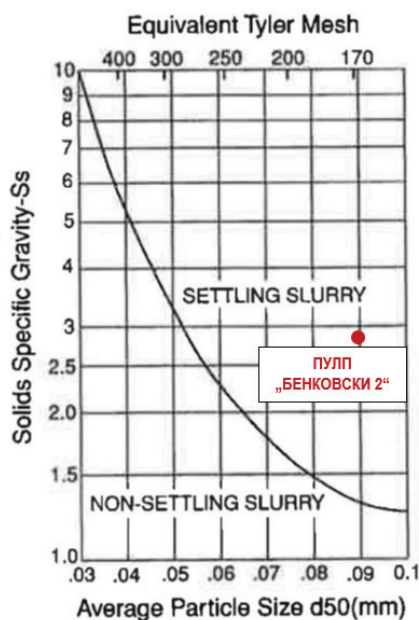
Уравнение (4) е известно като закон на Нютон за вътрешно триене, а течностите които се подчиняват на този закон се наричат нютонови. За нютоновите течности динамичният коефициент на вискозност се определя от ъгловия коефициент, който е постоянна величина и напълно характеризира реологичните свойства на течността при дадена температура.

Ненютоновите течности представляват еднородни дисперсни системи, които имат определена специфичност в реологичните си криви (фиг. 3). Реограмите на ненютоновите течности са разнообразни и най-вече не са линейни.



Фигура 3. Реологични криви на нютон и ненютон флуиди.

В случай, че не се разполага с конкретна реограма за пулпа, на база диаметъра на частиците съответстващи на 50% от състава на пробата (d_{50}) и специфичната плътност на твърдата фаза може да се определи дали флуида е нютон или ненютон.



Фигура 4. Графика за определяне вида на флуида – нютон или ненютон (Booth, 2002)



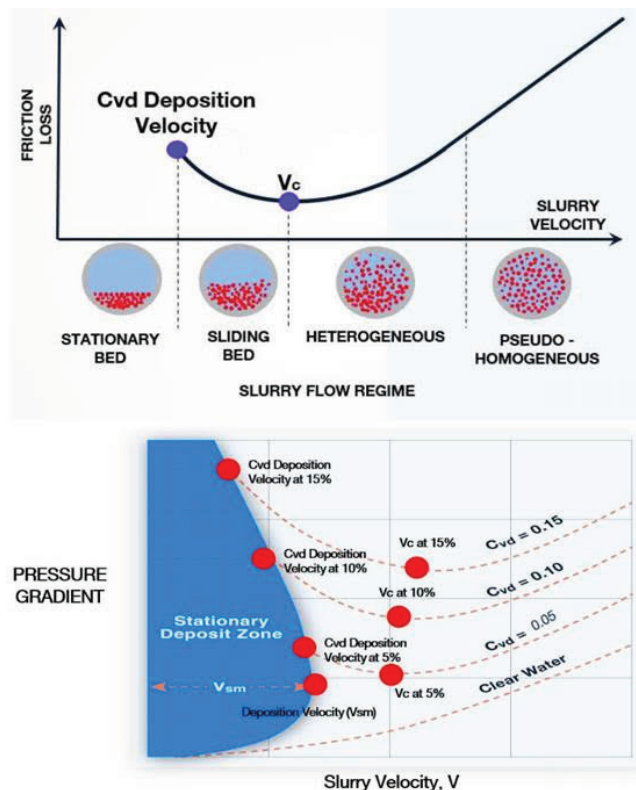
За пупла на „Бенковски 2“ при диаметър на частиците $d_{50} = 0,09 \text{ mm}$ и специфично тегло на изходната скала $S_s = 2,7$ от фигура 4 се определя, че течността е *нютонова*.

Режим на движение на пупла

При силно разнороден зърнометричен състав на твърдата фаза може да се очаква, че и поведението на отделните фракции в течението е различно – едни фракции „плуват“, втори „подскачат“, трети са в критично състояние и т.н. Опитът показва, че при дадени геометрични размери на пулпопровода и даден пулп при достатъчно големи скорости всички твърди частици се движат при сравнително еднаква концентрация по дълбочина на течението. С намаляването на скоростта концентрацията в придънните слоеве се увеличава, част от твърдите частици започват да падат на дъното, образуват се вълни от твърдата фракция, след което част от твърдия материал остава неподвижен на дъното. На базата на многобройни опити и изследвания са установени следните основни режими на движение на пулпа в тръбопровода:

- Еднороден поток (*Homogeneous*) – при движение частиците не се утаяват, получава се еднороден флуид (ненютонув).
- Псевдо-хомогенен поток (*Pseudo-homogeneous*) – всички утаяващи се частици са в суспендирано състояние при турбулентно движение.
- Нееднороден поток (*Heterogeneous*) – наличие на по-едра разнородна фракция и по ниски скорости спрямо псевдо-хомогенния поток.
- Поток с подвижен придънен пласт (*Sliding bed*) – при средна скорост на потока близка, но по-малка, до критичната се формира тънък пласт отложения по дъното на тръбопровода, който периодично се разрушава;
- Поток с неподвижен пласт (*Stationary bed*) – при средна скорост на потока по-малка от критичната се формира постоянен пласт отложения, което може да доведе до частично или пълно запушване на тръбопровода.

На фигура 5 е дадена връзката между средната скорост на потока, хидравличния наклон и режима на движение на пулпа.



Фигура 5. Режими на движение на пулпа спрямо скоростта в тръбопровода



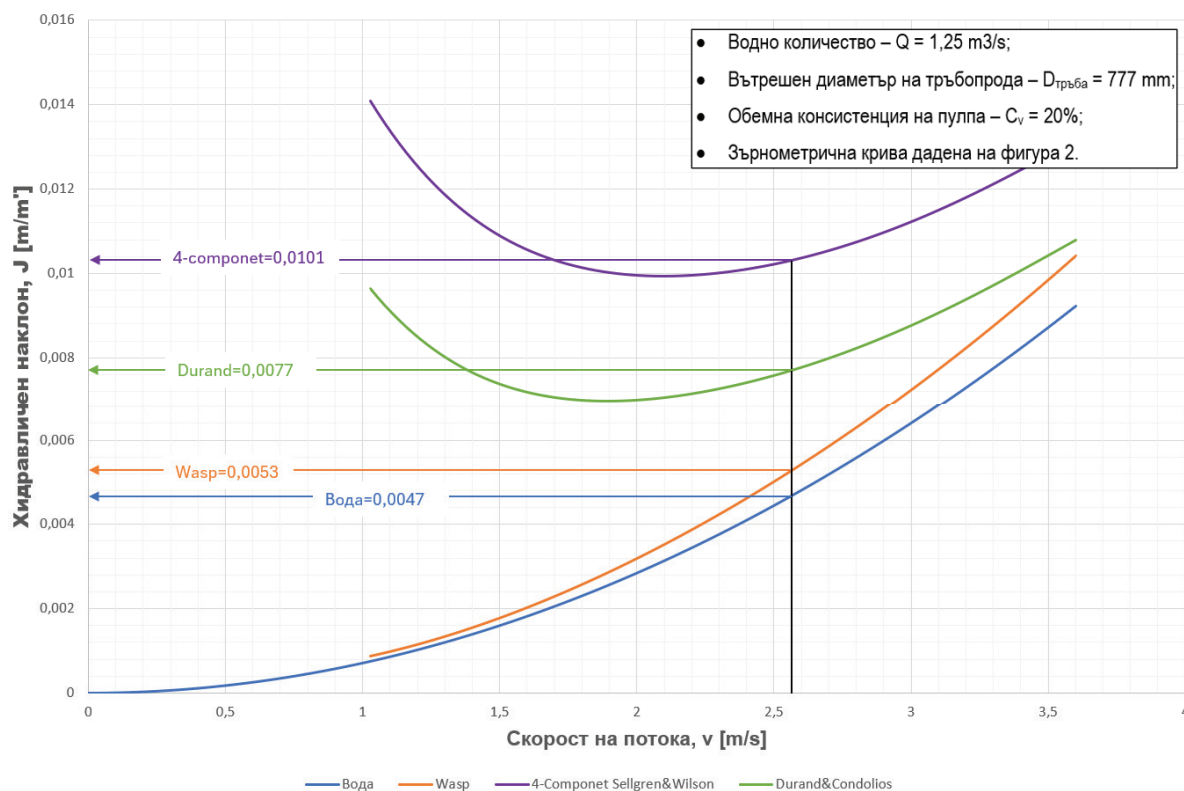
Избор на изчислителен метод

Избора на изчислителен метод зависи най-вече от това при какви условия е изведен и доколко е приложим за конкретни условия на хидротранспортната система и пулпа постъпващ в хвостохранилище „Бенковски 2“. Всички зависимости са с ясно изразен емпиричен характер, получени на базата на експериментални изследвания. В таблица 1 са посочени някои от най-приложимите изчислителни методи, използвани в софтуера FluidFlow.

Таблица 1. Корелационни зависимости и предпоставки за приложимостта им

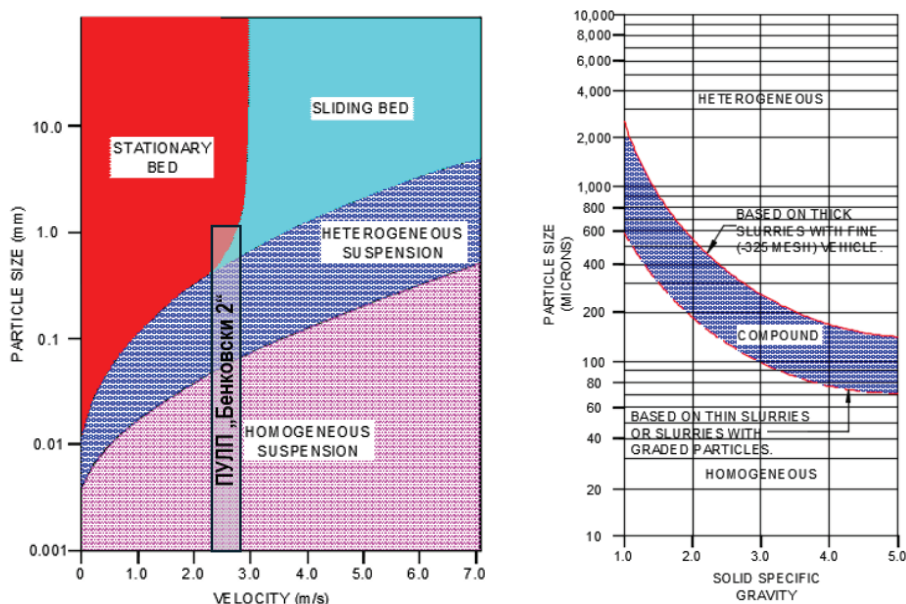
Корелация	Пояснение	Приложимост
WASC (2006) Wilson, Addie, Clift and Sellgren	Приема се хетерогенен режим на движение на пулпа, който се разделя на две компоненти зависещи от d_{50} и d_{85} . Дава големи отклонения, ако средната скорост е близка или по-малка от критичната.	При $d > 0,15$ mm. При средна скорост по-голяма от критичната $v_{cp} > v_{кр}$.
Durand and Condolios (1952)	Изцяло емпиричен модел, изведен на базата на 305 опита с пясък и чакъл. Използва само d_{50} .	При $d=0,18\div 25$ mm, диаметър на тръбопровода $ID=40\div 580$ mm и обемна консистенция $C_v = 2\% \div 22\%$
Wasp (1970, 1977)	Доразвит модел на Durand и WASC. Разработен за хомогенен (псевдо-хомогенен) и хетерогенен режим на движение. Базира се на повече от 13 годишни експериментални изследвания на дребнозърнести и фини пясъци транспортирани на голямо разстояние (над 100 km). Използва цялата зърнометрична крива на материала за да разграничи кога потока е хомогенен или хетерогенен.	При дълги тръбопроводни с наличие на фини частици. Неточност при определяне на хидравличния наклон, ако $d > 0,015 \cdot D_{тръба}$. При $v_{cp} > v_{кр}$. При наличие на пълната зърнометрия на частиците.
Sellgren and Wilson- 4- Component Slurry Model (2007, 2014)	Модела разделя потока на четири компонента спрямо зърнометричния състав на частиците: - Хомогенен – при $d < 0,04$ mm; - Псевдо-хомогенен – при $0,04 < d < 0,2$ mm; - Хетерогенен – при $0,2 < d < 0,015 D_{тръба}$ mm; - Поток с придънен пласт – при $d > 0,015 D_{тръба}$ mm; Загубите на напор се определят за всяка компонента, след което се сумират.	При силно разнороден зърнометричен състав, с преобладаваща по-едра фракция ($d > 0,2$ mm). Не моделира утаяване на частици с $d < 0,2$ mm. Отчита наклона на тръбите при определянето на загубите на напор и критичната скорост. При наличие на пълната зърнометрия на частиците.

При избора на изчислителен модел е добре да се направи сравнение между различните корелации за да се оцени до каква степен са приложими за дадени условия. На фиг. 6 са изведени ключови криви за връзката между скоростта на потока и хидравличния наклон, изчислени с Fluid Flow за условията на хидротранспортната система на хвостохранилище „Бенковски 2“.



Фигура 6. Ключови криви за връзката между скоростта на потока и хидравличния наклон

На фиг. 7 са дадени ориентировъчни стойности за режима на движение на пулпа спрямо зърнометричния състав, средната скорост и специфичната плътност на твърдата фаза. Изхождайки от зърнометричния състав на пулпа за „Бенковски 2“ даден на фиг. 2 може да се съди, че са налице основно еднороден (хомогенен и псевдо-хомогенен) и нееднороден (хетерогенен) режими на движение.



Фигура 7. Режим на движение на пулпа според зърнометричния състав и скоростта на потока [3]



На база зърнометричния състав, средната скорост на потока и физичните свойства на пулпа постъпващ в хвостохранилище „Бенковски 2“ за моделиране на хидротранспортната система е избран метода на Wasp (1970, 1977).

Заклучение

Избора на правилния метод за изчисление, който максимално се доближаване до действителния режим на работа на хидротранспортната система ще помогне на „Елаците Мед“ АД да минимизира капиталовите разходи за развитие на хидротранспорта до 2041 г., чрез оптимизация на трасета и диаметри и отпадане на нуждата от помпаж в последните етапи на експлоатация на хвостохранилище „Бенковски 2“. Внедряването и използването на съвременни софтуерни продукти като *FluidFlow* в минната промишленост, води до оптимизиране на капиталовите разходи, по-висока ефективност на работа и повишаване на експлоатационна сигурност на хидротранспортната инфраструктура.

Използвана литература

- [1] Abulnaga, B., E., *Slurry System Handbook*, 2002.
- [2] Bootle, M., J., *Selection and Sizing of Slurry Pumps. In Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control*. Society of Mining Engineers. Littleton, Colorado, 2002. pp 1373 – 1402.
- [3] Fluid Flow, *Designer Handbook*.
- [4] Miedema, S., A., *Slurry Transport*, 2016.
- [5] King, R., P., *Introduction to Practical Fluid Flow*, 2002.
- [6] Sellgren, A., Wilson, K., C., *Validation of a Four-Component Pipeline Friction-Loss Model*.
- [7] Wilson, K., C., Addie, G., R., Sellgren, A., Clift, R., *Slurry Transport Using Centrifugal Pumps*, 3rd edition. Springer Science+Business Media Inc. New York, 2006.
- [8] Филдишев С., *Хидрология, хидравлика и хидротранспорт*, Техника София, 1983.



ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА РЕАГИРАНЕ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩА

Лена Михова¹, Николай Керенчев²

¹ Университет по архитектура, строителство и геодезия, София, България, l_mihova@yahoo.com

² Университет по архитектура, строителство и геодезия, София, България, kerenchev@gmail.com

РЕЗЮМЕ:

Статията има за цел да представи теоретични постановки и методология за определяне на параметри, свързани със сеизмичното поведение на земнонасипни съоръжения, като акцент се поставя върху определянето на коефициента на реагиране R на съоръжението, респ. коефициента на поведение q , който е реципрочен. Представена е концепцията за моделиране по МКЕ и провеждане на статичен анализ за дефиниране на плъзгателен механизъм за загуба на устойчивост на насипа и динамичен анализ за определяне на средното ускорение на хлъзгащото се тяло в дискретни моменти от времето на въздействието. Коефициентът на реагиране е променлива величина, зависеща от геометрични и механични параметри на насипа от хвост, както и от честотата на сеизмичното въздействие. Изведени са данни от конкретен пример с най-голямото хвостохранилище на Балканския полуостров, хвостохранилище Люляковица.

Ключови думи: хвостохранилище, коефициент на реагиране, динамичен анализ

Въведение

В основата на Еврокод 8 (БДС EN 1998-1:2005) е залегнала линейната теория на спектралния анализ за земетръсно изследване на конструкциите. Коефициент на поведение q се въвежда в този анализ за редукция на сеизмичните сили, така че последните да се доближават в по-голяма степен до нелинейно еласто-пластично поведение на изследвания обект. За сеизмично проектиране в хидротехническото строителство в България се ползва Наредба № РД-02-20-2/2012 г., която също определя за меродавна линейната теория на спектралния анализ, но там се използва реципрочната на коефициента на поведение величина – коефициента на реагиране R . Сеизмичното поведение на земнонасипни съоръжения в хидротехническото и геотехническото строителство се различава в значително от сеизмичното поведение на конструкции от други материали. Донякъде това се дължи на безкрайната степен на статическа неопределимост на непрекъснатите среди и способността им да преразпределят напреженията и деформациите по значително по-различни закони от черупковите и прътовите конструкции. Механизмите на разрушение на почвен масив и строителна конструкция са коренно различни – при почви разрушението не настъпва мигновено, то е предшествано от процес на развитие на срязващи напрежения и деформации, които формират механизъм на разрушение. Изследването за потенциални механизми на разрушение и установяване на меродавния механизъм на разрушение е първостепенна задача в геотехническото проектиране..

Настоящото изследване се базира на теоретични и експериментални изследвания на хвостохранилище „Люляковица“ (фиг. 1). Изграждането на хвостохранилището започва през 80-те години на миналия век върху скална земна основа на кота +639,0 m, като през 2022 г. билото е на кота +840,00 m, с перспектива да се достигне до кота +930,0 m. Изследвания по отношение на извеждане на коефициент на реагиране са провеждани за конкретни нива на билото на насипания материал в диапазона от кота +830,0 m до кота +930,0.



Фиг. 1: Поглед към Хвостохранилище „Люляковица“

Концепция за определяне на коефициент на реагиране на хвостохранилище

За дефиниране на сеизмичните сили в почвата, приложени като квазистатични хоризонтални инерционни сили, се ползва т. нар. квазистатичен сеизмичен коефициент k_h . Той показва каква част от силата на теглото W се превръща в квазистатична инерционна сеизмична сила E , т.е.

$$E = k_h \cdot W \quad (1)$$

В Наредба №РД-02-20-2/2012г. в частта Хидротехнически съоръжения, сеизмичните сили от собствено тегло на почвени съоръжения се дефинират с израз

$$E = C \cdot R \cdot K_c \cdot W \quad (2)$$

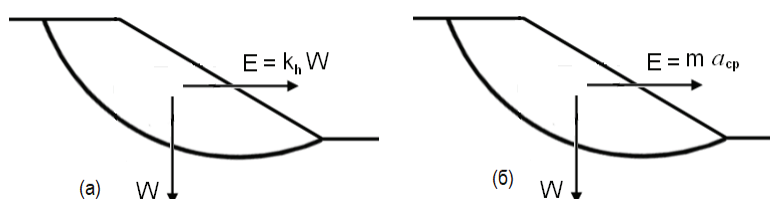
където: C е коефициентът на значимост на съоръжението; R – коефициентът на реагиране; K_c – сеизмичният коефициент при основата на съоръжението, чрез който се дефинира ускорението при основата $PGA = K_c \cdot g$.

Записът по формула (2) съответства на общата формулировка и термини в теорията на спектралния анализ за строителни конструкции.

От формули (1) и (2) следва, че коефициентът на реагиране R се изразява чрез сеизмичния коефициент k_h чрез зависимостта

$$R = k_h / (C \cdot K_c) \quad (3)$$

Тъй като почвените масиви и съоръжения представляват непрекъсната среда, основен въпрос, който възниква при сеизмичното им оразмеряване, е кои са меродавните „сечения“, за които трябва да се определят оразмерителните сеизмични сили. За откосни почвени масиви е меродавна проверката за устойчивост по отношение на потенциален механизъм на разрушение, свързан с формиране на плъзгателна повърхнина и плъзгащо се почвено тяло. На фиг. 2 са показани силите, които действат на потенциално плъзгащо се тяло при квазистатичен модел и при модел на динамичен анализ, като с m е означена масата, а с a_{cp} – еквивалентно средно ускорение на тялото.



Фиг. 2: Сили за хлъзгащо се тяло при квазистатичен модел (а) и при динамичен анализ (б)

От приравняването на хоризонталните сили от двата модела следва, че

$$k_h = a_{cp} / g, \quad (4)$$

където g е земното ускорение.

От изрази (3) и (4) за коефициента на реагиране R следва:

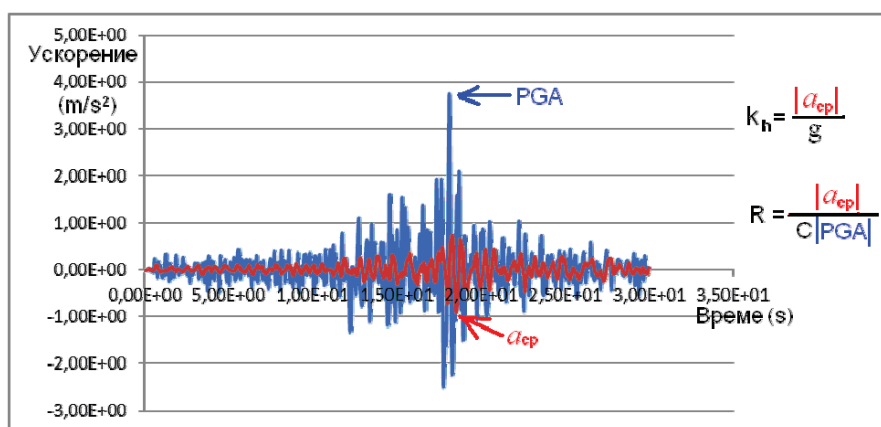
$$R = a_{cp} / (g \cdot C \cdot K_c), \quad (5)$$

Въвеждайки означението $K_c = PGA / g$, за R се получава

$$R = a_{cp} / (C \cdot PGA). \quad (6)$$

Имайки предвид, че ролята на коефициента на значимост C е да скалира стойността на сеизмичната сила по критерий „значимост“ на съоръжението, следва, че физическият смисъл на коефициента на реагиране R се изразява като отношение на средното ускорение на плъзгащото се тяло и ускорението при основата на съоръжението. Физическият смисъл на сеизмичния коефициент k_h се изразява като средно ускорение на плъзгащото се тяло, отнесено към земното ускорение.

Следователно, същността на постановката за определяне на коефициента на реагиране се състои в дефиниране на потенциални механизми на разрушение, формиращи плъзгателно тяло, и намиране на еквивалентното средно ускорение a_{cp} на плъзгащото се тяло. Последното се получава чрез среднотежестно осредняване на ускоренията в подробни точки от плъзгащото се тяло в конкретен момент от сеизмичното въздействие. Максималната стойност на еквивалентното средно ускорение във времеви интервал на сеизмичното въздействие е меродавната стойност, от която се получава коефициентът на реагиране. За получаване на точна картина на разпределение на ускоренията, се провежда Time history анализ на съоръжението с използване на съвременни конститутивни модели за материала и записи на сеизмични събития, съответстващи на данните от анализа на сеизмичния hazard за обекта (фиг. 3).

Фиг. 3. Определяне на сеизмичния коефициент k_h и коефициента на реагиране R



чрез еквивалентното средно ускорение a_{cp}

Динамичен анализ с помощта на еласто-пластичен модел с двойно изотропно уякчаване
и отчитане на коравината при малки деформации

За основната стена на хвостохранилище „Люляковица“ са съставени 2D изчислителни модели по МКЕ с програмен продукт Plaxis за динамичен сеизмичен анализ, при следните предпоставки:

- За геометрията на напречното сечение се изхожда от многослойния модел, съответстващ на етапите на изграждането на съоръжението, като пластове са окрупнени, с цел избягване на прекалено много граници на пречупване и отразяване на сеизмичните вълни, което отежнява компютърното решение при нелинеен анализ и влияе негативно върху точността резултатите от анализа. На фиг. 5 е показан моделът по МКЕ при кота на билото на хвоста +880,00.

- Границите на изследваната област се моделират с демпферни опори, поглъщащи в достатъчна степен сеизмичната вълна и симулиращи безкрайно полупространство на земната основа.

- Сеизмичното въздействие се въвежда чрез акселерограма (Time history анализ). Като основен критерий при избора е максимална близост между собствената честота на масива, опитно установена със стойност $f_1 = 0,83$ Hz за хвост, изграден до кота +830,0 m, и честотата на въздействието. Използвани са следните три акселерограми: (1) от земетресение Перник, 2012 г., продължителност 30 s, преобладаваща честота 2 Hz, $PGA = 0,177g$ ($T_R = 1000$ г.), скалирана до $PGA = 0,4g$ ($T_R = 10000$ г.), сеизмично ниво SEE (Safety Evaluation Earthquake); (2) DDD8, детерминистична, магнитут M7,0, дистанция D15, $V_s = 800$ m/s, продължителност 10 s, преобладаваща честота 5 Hz, $PGA = 0,23g$, сеизмично ниво DBE (Design Basis Earthquake); N3 изкуствена акселерограма по равновероятностен спектър, TEST9, $V_s = 1000$ m/s, продължителност 40 s, преобладаваща честота 5 Hz, $PGA = 0,332g$ ($T_R = 1000$ г.), сеизмично ниво SEE (Safety Evaluation Earthquake).

- За почвените пластове – хвоста и скалния материал на опорните призми, се използва еласто-пластичен конститутивен модел HSS (Hardening soil model with small strain stiffness) [1]. Основните предпоставки на този модел са следните: зависимостта между напрежения и деформации е хиперболична [2]; коравината на материала се изменя в зависимост от траекторията на натоварване (Stress path); отчитат се пластични обемни и срязващи деформации; G модулът при динамично натоварване получава редукция, като неговата минимална стойност се дефинира чрез коравината при състояние разтоварване-отново натоварване; критерият на разрушение е приет по теорията на Mohr-Coulomb.

- Вискозните свойства, триенето и развитието на пластични деформации в почвите са причина за затихването на трептенията във времето. Чрез използвания конститутивен модел HSS, това „вътрешно“ затихване се отчита, но в степен, по-малка от реално наблюдаваната при почви. Причината за това е фактът, че хиперболичната деформационна зависимост при малки деформации е близка до линейна и е невъзможно да се отчете хистерезисното поведение на материала в тази зона. Ето защо, се изисква въвеждане на допълнително вискозно затихване по модела на Rayleigh [5]. Стойностите на коефициентите α и β по Rayleigh се получават като функции на две целеви честоти f (Hz) при желан коефициент на затихване ξ . В изследването е приложен подходът на авторите Hashash & Park [3], според които за първа целева честота се приема първата собствена честота на почвения депозит f_1 , а за втора целева честота - най-близкото нечетно число, по-голямо от отношението f_p/f_1 , където f_p е преобладаващата честота на входния сеизмичен сигнал от спектъра на Фурие. По литературни данни е прието допълнително вискозно затихване $\xi = 5\%$.

- Почвените пластове под депресионната линия (НПВ) в тялото на хвоста се моделират с недренирано поведение, което означава, че модулът на обемната деформация на двуфазната почвена среда се формира от този на твърдата фаза и от модула на обемна деформация на несъдържаща въздух вода ($K_w = 2,2 \cdot 10^6$ kPa).

- В процеса на динамичното въздействие изчислителните модели генерират допълнителен порен натиск в пластове от хвоста, както под НПВ, така и над НПВ. Тази предпоставка е приета, поради констатираната висока степен на водонасищане на хвоста в зоните над депресионната линия – $S_r >$

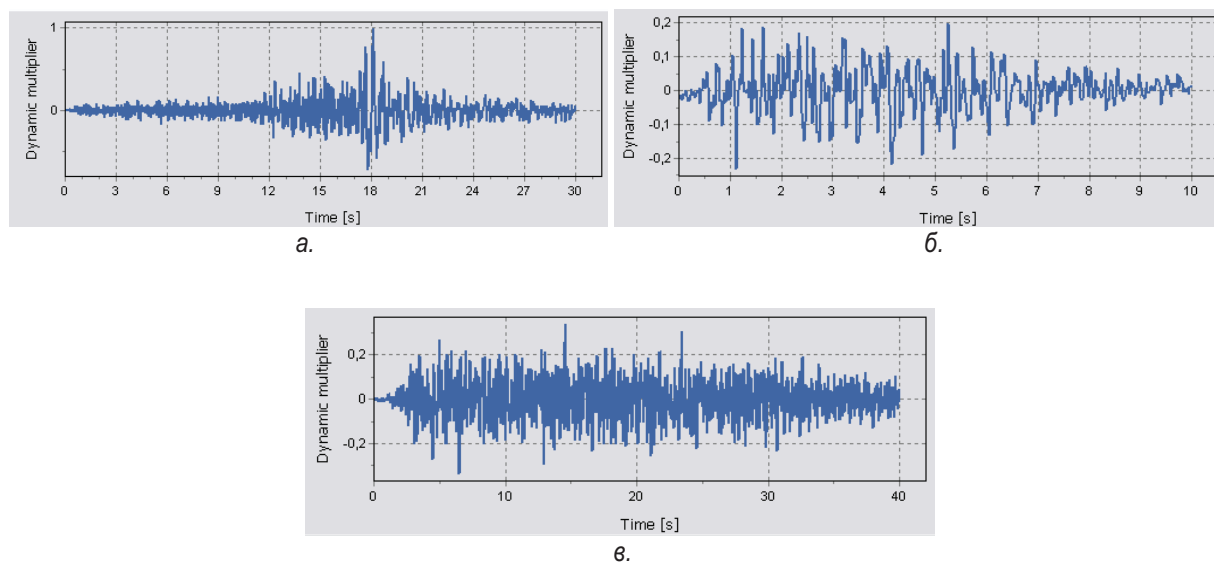


0,9. Генерираният порен натиск, получен на базата на използвания конститутивен модел, не е с кумулативна стойност за времето на земетръсното въздействие. Това е причината, получените стойности на порния натиск да се считат за много приблизителни, и не могат да бъдат критерий за втечняване.

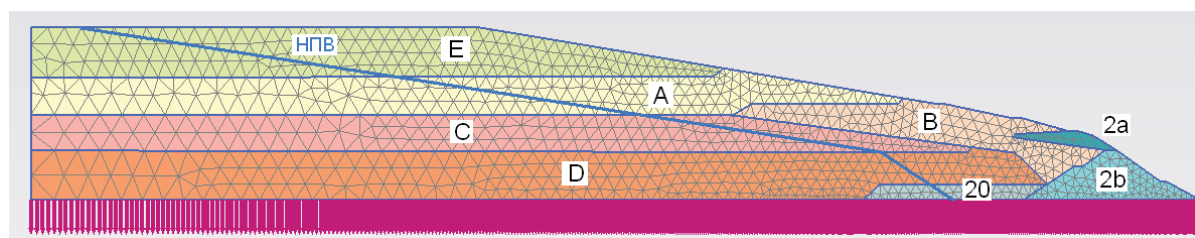
- За мрежата от крайни елементи е използван 15 възлов триъгълен краен елемент. За определяне на гъстотата на мрежата се прилага критерият на Kuhlemeyer & Lysmer [4] за динамичен анализ, съгласно който средният размер на крайния елемент L_{ave} не трябва да надвишава $1/8$ от дължината на вълната λ , или

$$L_{ave} \leq \lambda / 8 = V_{s \min} / (8 f_{\max}) \quad (7)$$

където $V_{s \min}$ е минималната скорост на вълна в почвения депозит; $f_{\max}$ – максимална честота на вълновото действие.



Фиг. 4. Представителни акселерограми: а. От земетресение Перник, 2012 г. – Перник EWAQ085; б. Детерминистична – DDD8; в. Изкуствена по равновероятностен спектър – N3



Фиг. 5. Модел 880: Геометрия на модела и мрежа от крайни елементи.

Тъй като геотехническите доклади за обекта не съдържат пълна информация по отношение на всички необходими материални параметри за HSS-модела, за тяхното дефиниране и калибриране се използват данни от полеви и лабораторни изследвания, както и позоваване на утвърдени в литературата формулировки. Приетите параметри са показани в Таблица 1.



Таблица 1: Свойства на хвоста по зони, използвани в модела по МКЕ от фиг. 5

Показател	Озн.	Дим.	Mohr-Coulomb					HSS				
			пласт А	пласт В	пласт С	пласт D	пласт Е	пласт А	пласт В	пласт С	пласт D	пласт Е
Естествено обемно тегло	γ_n		19,5	19,5	19,8	20,8	19,0	19,5	19,5	19,8	20,8	19,0
Об. тегло на водонаситена почва	γ_r	kN/m ³	20,3	-	20,6	21,6	-	20,3	20,3	20,6	21,6	-
Модул на деформация (еластичен)	E	kN/m ³	12 000	16 000	16 000	18 000	8 000	-	-	-	-	-
Референтно напрежение	p_{ref}	kPa	-	-	-	-	-	100	100	100	100	100
Оedomетричен модул при p_{ref}	$E_{oed,ref}$	kPa	-	-	-	-	-	12 000	16 000	16 000	18 000	8 000
Модул при 50% от якостта при p_{ref}	$E_{50,ref}$	kPa	-	-	-	-	-	12 000	16 000	16 000	18 000	8 000
Модул при разтоварване при p_{ref}	$E_{ur,ref}$	kPa	-	-	-	-	-	38 000	53 000	53 000	55 000	28 000
Начален модул на сръзване** при p_{ref}	$G_{0,ref}$	kPa	-	-	-	-	-	111 598	107 222	120 351	137 857	85 340
Коефициент на Poisson	ν	kPa	0,35	0,32	0,347	0,327	0,35	-	-	-	-	-
Коеф. на Poisson при разтоварване	ν_{ur}	-	-	-	-	-	-	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Сръзващи деформации при 0,722 от редуцията на модула на сръзване**	$\gamma_{0.7}$	%	-	-	-	-	-	0,050*	0,038*	0,058*	0,058*	0,038*
Параметър m	m	-	-	-	-	-	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Коеф. на страничен натиск в покой	K_0	-	-	-	-	-	-	0,562	0,455	0,531	0,47	0,593
Параметър R_f	R_f	-	-	-	-	-	-	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Коефициент на преуплътняване	OCR	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1
Кохезия	c	-	12	14	17	19	10	12	17	16	19	10
Ъгъл на вътрешно триене	φ	kPa	26	32	28	31	24	26	33	28	32	24

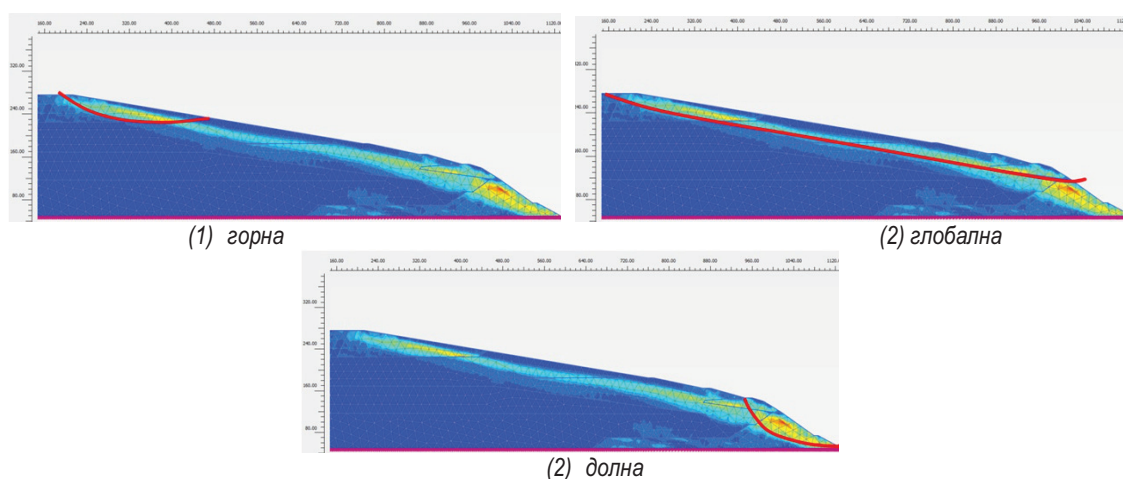
Решение и резултати за коефициента на реагиране

За приложение на описания по горе метод първоначално се трасиран меродавни плъзгателни повърхнини. За целта са използвани два подхода:

- Квазистатичен анализ в среда от крайни елементи с приложение на редукция на якостните параметри на материалите – ъгъл на вътрешно триене φ и кохезия c . Тази техника позволява получаването на меродавни плъзгателни повърхнини с произволна геометрия като очертание на зони в насипа с най-голямо нарастване (инкремент) на сръзващите деформации.

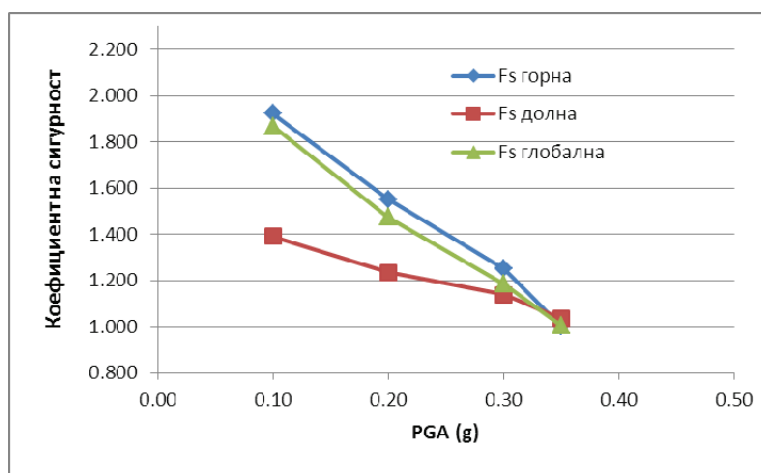
- На базата на диаграмата на максималните девиаторни деформации в насипа, получена от проведения еластопластичен динамичен анализ.

На база тези два подхода са определени и меродавните плъзгателни повърхнини фиг. 6.



Фиг. 6. Меродавни плъзгателни повърхнини: (1) горна; (2) глобална; (3) долна.

За плъзгателните повърхнини (механизмите на разрушение), са определени коефициентите на сигурност F_s за устойчивост на насипа по метода на φ , c редукция при изменящи се стойности на сеизмичния коефициент k_h , като $PGA = 0,1 - 0,4$ (фиг. 7).



Фиг. 7. Насип при кота било +880,00 m: Коефициенти на сигурност F_s във функция от PGA за плъзгателни повърхнини от фиг. 6 (механизми на разрушение)

В Таблица 2 са представени резултати за коефициента на реагиране при кота било +880 m, получени за трите потенциални механизми а разрушение от фиг. 6 от решения с дефинираните сеизмични въздействия.

Таблица 2: Стойности на коефициента на реагиране R при коефициент на значимост $C = 1$ за различните плъзгателни повърхнини при различни сеизмични нива - кота +880 m

Сеизмично ниво	PGA	Долна	Горна	Глобална
Перник EW AQ085-DBE - R	0.177	0.37	0.408	0.26
Перник EW AQ085-SEE - R	0.4	0.24	0.28	0.15
DDD8-DBE - D	0.23	0.3	0.42	0.28
N3-SEE - A	0.332	0.33	0.46	0.26
Средно		0.31	0.39	0.24

От анализа на резултатите в Таблица 2 следват изводите:

- Коефициентът на реагиране не е постоянна величина – той зависи, както от геометрията на плъзгателната повърхнина, физико-механичните параметри на материалите и собствения период на трептене на почвения масив, така и от параметри на сеизмичното въздействие, като максимално ускорение и честотен състав.
- Най-ниски стойности на коефициента на реагиране се получават при глобалния механизъм на разрушение. Една от причините за този резултат е възможността еквивалентното средно ускорение да бъде определено въз основа на повече на брой точки със стойности на ускорения в рамките на плъзгащото се тяло.
- Скалирането на акселерограма Перник до стойност на $PGA = 0.4g$ е свързано с получаване на по-ниски стойности на коефициента на реагиране, т.е. ефектът на дисипация на сеизмичната енергия вследствие пластифициране на материала се усилва.
- Коефициентът на реагиране приема стойности, предимно в диапазона 0.24-0.42, които са по-ниски от дефинирания в Еврокод 8-5 аналогичен коефициент със стойност 0.5.

Литература

1. Benz, T. (2007) Small-strain stiffness of soil and its numerical consequences. Mitteilung 55 des Instituts fur Geotechnik Universitat Stuttgart.



2. Duncan, J. M., Chang, C. Y. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 96, No. SM5, pp. 1629-1653.
3. Hashash, Y., Park, D. (2002) Viscous damping formulation and high frequency motion propagation in non-linear site response analysis. Soil Dynamic Earthquake Engineering, 22 (7), 611-624.
4. Kuhlemeyer, R. L., Lysmer, J. (1973) Finite element method accuracy for wave propagation problems. Jour. of Soil Mech. and Found. Division, 99 (5), pp. 421-427.
5. Rayleigh, J. W. S., Lindsay, R. B. (1945). The theory of sound, Dover Publications, New York.



ГЕОТЕХНИЧЕСКА БАЗА ДАННИ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ „БЕНКОВСКИ 2“

Никола Тошков¹

n.toshkov@ellatzite-med.com

Цветан Дилов¹

tz.dilov@ellatzite-med.com

Желязко Ялъмов¹

zh.yalamov@ellatzite-med.com

1 “Елаците-Мед“ АД. Мирково 2086, Софийска област, България

РЕЗЮМЕ

Големите масиви от информация са неотменим елемент от нормалната работа на всеки аспект от човешката дейност и в частност минната индустрия. Обществената, екологичната и финансовата важност на хвостохранилищата, като необходима част от всяка минна и металургична дейност налага грижливо събиране и подреждане на множество ключови материални параметри. Ефикасното управление на тези масиви е немислимо в нашето съвремие, без използването на релационни бази данни. В настоящата работа описваме усилията на служителите от „Елаците-Мед“ АД да изграждат и поддържат такава база данни, с параметри на материалите изграждащи хвостохранилище „Бенковски II“, необходима за присъщите дейности за проектиране и числено моделиране.

ABSTRACT

Large information arrays are irreplaceable elements of the usual operation in every human activity aspect, including the mining industry. The social, ecological, and financial importance of tailings storage facilities, which are necessary part of every mining and metallurgical business requires careful collection and arrangement of numerous key material parameters. Efficient management of such arrays is nowadays unthinkable without application of relational databases. We describe here the efforts of Ellatzite-Med's personnel to build and maintain such a database, which contains material parameters used for Benkovski II Tailings Storage Facility construction. These parameters are necessary for intrinsic design and numerical modelling activities.

Въведение

Хвостохранилищата като съоръжения в глобален мащаб се изграждат в условия на все повече ограничения от различно естество. Първоначално изискване е осигуряването на достатъчно голяма площ, което е все по-трудно да се реализира. Пространственото ограничение в площ налага строителството на тези съоръжения във височина. Това от своя страна води до допълнителни мерки за гарантиране на сигурността на съоръжението за продължителен период от време, надхвърлящ живота му в активна оперативна дейност. При липса на достатъчно добре структурирана геотехническа информация, стабилитетните изчисления се провеждат с множество допускания и използване на ключови входни параметри по подобие със сходни съоръжения изградени на друго място. Такъв подход в много случаи не е надежден и е необходимо създаването на програми за набавяне на реално измерени геотехнически параметри за конкретното място.

Едни от основните мерки са геотехническите проучвания и изграждането на пиезометри за последващ мониторинг на подземните води в реално време. Те имат за цел установяване на актуалното състояние на геотехническите и хидрогеоложки условия, които са в постоянна динамика поради непрекъснатия характер на строителство на хидротехническото съоръжение. Също така всяко съоръжение има своите индивидуални особености обосновани от местоположение и релеф, металургичен процес, начин на депониране, вид на дренране и тип на скалите от находището. Анализването и обобщаването на



информацията от проучването, установяване на якостните свойства на материалите и хидромеханичните условия е от ключова важност за изучаване на поведението и устойчивостта на съоръжението, както при статично така и при динамично натоварване. Именно затова, изграждането, валидирането и поддръжката на тримерна геотехническата база данни е важен процес служещ за основа на множество видове анализи, чрез които се взимат решения за правилното и безопасно използване на хвостохранилищата.

Някои от съществуващите бази данни за хвостохранилища са например Глобалният портал за хвостохранилища или Австралийската геопространствена база данни за хвостохранилища. Първата е свободна за използване база данни създадена през 2020 г., като предоставя обща и детайлна информация за 1950 хвостохранилища от цял свят, в т.ч. местоположение, начин на изграждане на съоръжението, геотехническа информация и др. ([Global Tailings Portal](#)). Австралийската геопространствена база данни за хвостохранилища съдържа информация за 331 в експлоатация и 759 затворени хвостохранилища, извлечена от сателитни снимки (Sarker et al., 2022). Споменатите две бази данни не са специализирано насочени към геотехническа информация. Примери за специализирани такива са описани в Johns (2010) и Tetra Tech EBA (2021). Първият автор представя характерна геотехническа информация, която е подходяща за използване по подобие за съоръжения, които не разполагат с достатъчна детайлна база данни с локално измерени параметри. Втората публикация е с анонимен(ни) автор(и), като в нея са описани множество геотехнически проучвания за хвостохранилищата на Мина Кантунг за добив на волфрам, Северозападни Територии, Канада (сондажи, теренно картиране, интегриране на историческа информация). С нея е демонстрирано как може да се натрупва специфична информация за дадено съоръжение и как тя да се използва за управлението му. Shelbourn (2010) описва особеностите по събиране, представяне и използване на данни от мониторинг, полеви измервания и методологии за верифициране на геотехническите входни параметри, необходими за проектиране. Спазването на описаните в тези публикации принципи подобрява качеството и количеството на геотехническата информация.

Геотехническата база данни на съоръжението за депониране на минни отпадъци „Бенковски 2“ е базирана на множество инженерно-геоложки и хидрогеоложки проучвания извършени в периода от 2014 г. до 2024 г., с над 200 сондажа. В нея са включени лабораторни данни за физични свойства, зърнометричен състав, пластичност, полеви данни от динамични и статични пенетрационни тестове, филтрационни свойства от полеви опитно-филтрационни изследвания (ОФИ) и геофизични проучвания. Базата данни е изградена като релационна (PostgreSQL, 2023-2025, версия 16.8). Водеща информация са тримерните координати на всеки определен параметър. По този начин е възможно да се извършват селекции по зададен обем, профилни линии, типове данни и време на определяне на параметрите. Различните геопространствени данни са въведени в специализиран тримерен софтуер за работа със сондажни данни (MOVE Suite, 2023), който спомага за едновременен статистически и пространствен анализ.

Технология на депониране и геотехническите условия

След натрошаване, смилане и извличане на полезния компонент чрез флотация, остатъчният хвостов материал се транспортира до хвостохранилището по хидро-гравитационен способ. Съоръжението е разделено на две секции – „Сулуджа Дерее“ и „Ай дерее“. Докато едната секция е в период на експлоатация, другата е в период на покой. Тогава водното количество намалява, а материалът се консолидира. По време на експлоатация отпадъкът се транспортира до короната на хвостохранилището, където се извършва разделяне на едрозърнестата от фината фракция, чрез използване на хидроциклони. От едрата фракция се изгражда опорна призма с приблизително постоянен среден зърнометричен състав. Финият материал се изпуска през изливни тръби зад короната в посока на утаечното езеро. Движението на потока допълнително разделя флувиално частиците, като средния зърнометричен размер намалява с отдалечаване от короната. Отделената едрозърнеста фракция е непластична с $I_p < 1$, докато с намаляване на зърнометричния размер пластичността нараства. Относителната плътност на депонирания материал нараства в дълбочина и с



времето вследствие полагането на отгоре-лежащи пластове. Материалът, който се циклонира, претърпява максимално повишаване на относителната си плътност.

Видове инженерно-геоложки, хидрогеоложки и геофизични изследвания

Проучванията се извършват основно чрез сондажи, като в тях през определена дълбочина се взима проба, а след пробовземането се провежда динамична тръбна пенетрация (SPT). След преминаване на насипа от хвостов материал и достигане на нивата в скалната основа са извършват опитно филтрационни водочерпения и водоналивания. След завършване на тестовите в хвостовото тяло, сондирането продължава в скалната основа, обикновено до 20 m под естествения терен. Освен описание на скалите и взимане на проби за якостни свойства, се извършват водонагнетявания на всеки 5 m, за установяване на филтрационните свойства. В допълнение към полевите SPT тестове, се извършват и статични пенетрационни тестове с конусен накрайник (CPT) до дълбочина 20 m. При тях се определят върхово и околно съпротивление на накрайника за проникване с еднаква скорост.

След стигане до проектната дълбочина голяма част от сондажите се оборудват с глухи и филтърни тръби, както и със сензор за измерване на водно ниво. В някои случаи, сондажите са без тръби и в тях се инсталира сензор за порово налягане на желана дълбочина.

Когато е необходимо се провеждат геофизични проучвания, било то като профилиране или в прокарани сондажи. Такива са определяне на Vs30 скорости на разпространение на сеизмични вълни в хвостовия материал и скалната основа, томография чрез електросъпротивителна и предизвикана поляризация, вертикално електрическо сондиране и др.

В лабораторни условия се извършват изпитвания за определяне на различни физико-механични свойства на взетите образци от депонираният материал (зърнометричен анализ, пластичност, компресионни свойства, физични параметри и якост на срязване).

Структура на базата данни

Инженерно-геоложките и хидрогеоложки проучвания са представени в доклади с различните типове информация. В базата данни тази информация е структурирана, като се описва: име и година на доклада; име, координати и дълбочина на сондажа; време на завършване и име на съоръжението в което е изграден; дали той е използван за пиезометър и каква е конструкцията му. По нататък базата данни е разделена на 4 подгрупи според типа на информацията: лабораторни данни, данни от SPT тестове, данни от CPT тестове и данни от ОФИ. Всяка група е разделена на допълнителни подгрупи, които съдържат числовите данни. В крайна сметка, всяка конкретно измерена числена стойност за всички параметри е привързана към триизмерни координати и време на измерването (Таблица 1). Последното е важно да бъде отчитано, защото с напредване на изграждане на хвостохранилището като съоръжение, някои от параметрите се променят поради полагането на отгоре-лежащи пластове, т.е. те търпят еволюция.

Пространствена база данни и геотехнически модел

Поради сложността и размерите на съоръжението информацията от сондажната база данни е интегрирана в софтуера Move3D заедно с геометрични данни за съоръжението. Софтуерът позволява визуализация на атрибутивната информация по оста на сондажите под различна форма, чрез графики или оцветени и мащабирани точки (Фигура 1, 2 и 3). Масивът с данни позволява провеждането на бърза оценка за качеството на параметрите и дали съществуват пространствена и/или времева непълнота. Някои пакети от информация по определени параметри могат да се окажат негодни за използване при по-нататъшно проектиране и моделиране, поради статистическа ненадеждност, различни по естество грешки и неточности в записите. Базата данни се използва за округняване и правилно осредняване на параметрите, които са необходими като входна информация за проектиране и моделиране.



Таблица 1. Количествено описание на типовете структурирани данни за хвостохранилище „Бенковски II“

Тип данни	Брой индивидуални измервания	Брой сондажи*
Стандартни динамични пенетрационни тестове (SPT)	239	66
Конични статични пенетрационни тестове (CPT)	658 m	41
Лабораторни проби	590	151
Определяне на зърнометричен размер на частиците	395	134
Геофизични профилирания и измервания	3	7
Опитни филтрационни изследвания	188	61

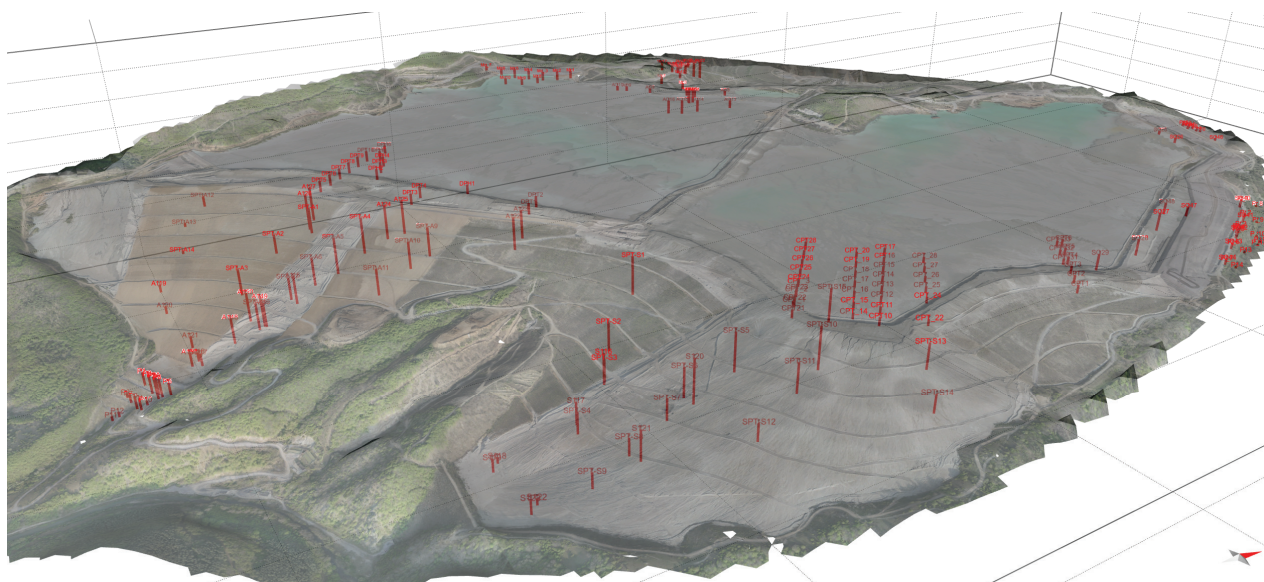
* Сумата на сондажите по типове данни е по-голяма от броя на сондажите поради комбинираното им използване.

Заклучение

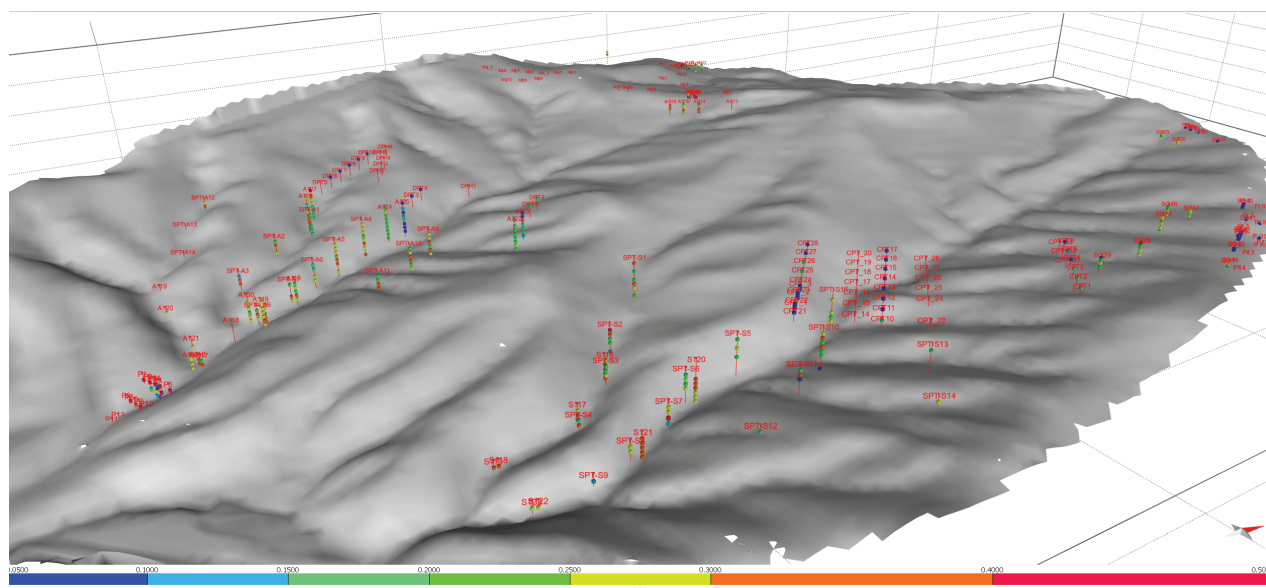
Съвременните най-добри практики от минната индустрия налагат осигуряването на безопасността на големи съоръжения, каквито са хвостохранилищата. Тяхната важност по отношение на екология, стабилитет, запазване на тяхната цялост за периода им на живот и след това, както и влиянието им върху местните общности изисква провеждането на надеждно проектиране и последващо моделиране на реално изграденото съоръжение по отношение на неговото поведение при статично и динамично натоварване. Проектирането и моделирането се нуждаят от реално определени входни параметри за материалите изграждащи тези съоръжения. Разнообразните подходи по полево, лабораторно и дистанционно измерване на тези параметри изискват подреждането им в релационна база данни, откъдето да може бързо да се правят различни селекции, справки, промени, добавяне на празноти в записите и статистически анализи в тримерното пространство и времето. Целият този процес спомага за по-ефикасната и надеждна експлоатация, промени в подхода на изграждане и рекултивация на сложните съоръжения, каквито са хвостохранилищата.

Благодарности

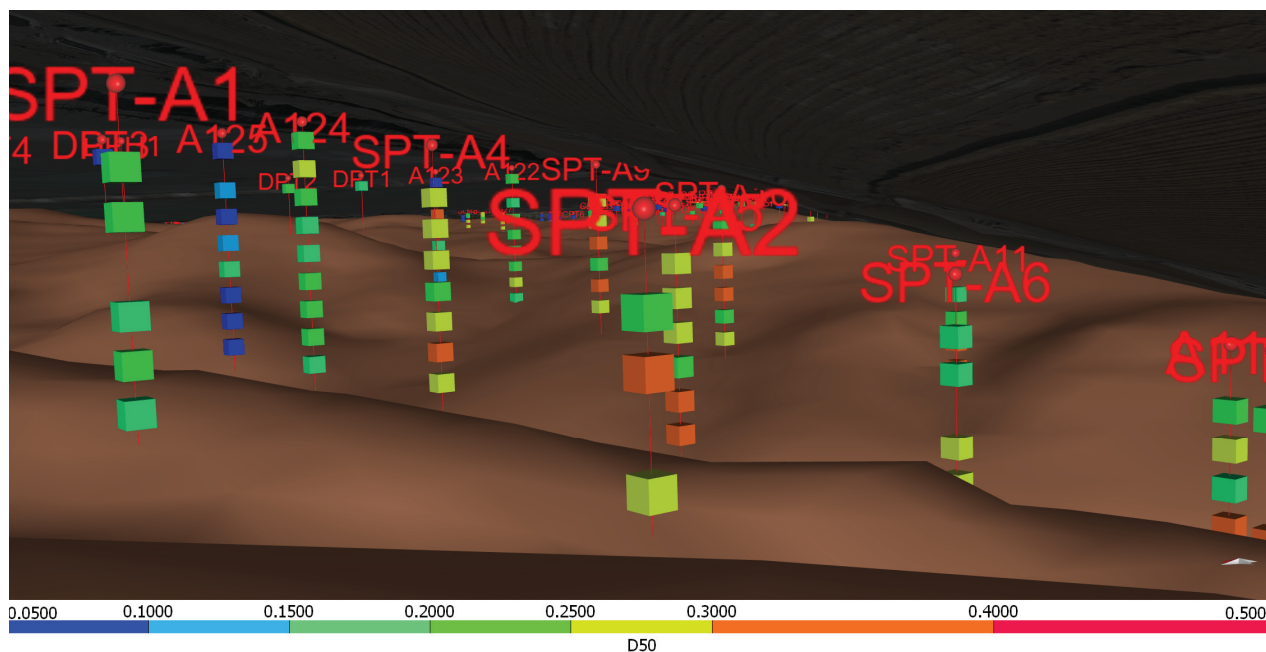
Този проект бе подпомогнат да се случи с активната работа на Николай Кръстанов, служител на „Елаците-Мед“ АД, и Ивана Цветкова и Михаил Стоянов, стажанти в „Елаците-Мед“ през Стажантска програма 2023 г.



Фигура 1. Триизмерен поглед на СЗ към хвостовата стена на секция „Сулуджа дере“. Сондажната информация се вижда като висяща над естествения погребан релеф. С определена степен на прозрачност е показана геометрията на горната почвена повърхност в момента.



Фигура 2. Триизмерен поглед на СЗ към хвостовата стена на секция „Сулуджа дере“. Разликата с Фигура е 1 е, че тук е изобразен само естествения погребан релеф.



Фигура 3. Триизмерно изобразяване с цветно кодиране на зърнометрия определена в проби от различни сондажи.

Използвана литература и източници на информация

[Global Tailings Portal](#) (Източник на информация за компании, инвеститори, регулатори и местни общности; най-добри практики, иновация, прозрачност; собственост на капитала, особености на съоръженията, рискове за околната среда).

Johns, C. 2010. Geotechnical Properties of Mine Tailings and Implications for Tailings Storage Facility Design, 63rd Canadian Geotechnical Conference & 6th Canadian Permafrost Conference, Calgary.

MOVE™ Suite, 2023, Engineering and Structural Geology Software, part of *Petex IPM Suite*, PE Limited, Guildford, Surrey, UK.



PostgreSQL, 2023-2025, Version 16.8, The PostgreSQL Global Development Group.

Sarker, S., Haque, N., Bruckard W., Bhuiyan M., Pramanik B. 2022. Development of a geospatial database of tailing storage facilities in Australia using satellite images, *Chemosphere*, **303** (2), doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135139

Shelbourn, M. 2010. Geotechnical design verification and performance assessment of tailings storage facilities, in R Jewell & AB Fourie (eds), *Mine Waste 2010: Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 3-14, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1008_01_Shelbourn

Tetra Tech EBA Inc. (Tetra Tech EBA). 2021. Geotechnical Assessment of Tailings Facilities Cantung Mine, Northwest Territories. Prepared for North American Tungsten Corporation Ltd., c/o Alvarez and Marsal Canada Inc. and Crown-Indigenous Relations and Northern Affairs Canada, File: 704-ENW.WENW03039-05



ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОТЕНЦИАЛА НА ХВОСТОХРАНИЛИЩАТА НА РУДНИ НАХОДИЩА КАТО ИЗТОЧНИЦИ НА КРИТИЧНИ И СТРАТЕГИЧЕСКИ СУРОВИНИ: ПРЕДВАРИТЕЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Димитрина Димитрова¹, Румяна Вацева¹, Диана Йорданова², Ирена Пейчева¹

¹ Геологически институт, Българска академия на науките, София, 1113, e-mails:

didi@geology.bas.bg, rvatseva@gmail.com, ipeytcheva@geology.bas.bg

² Национален институт по геофизика, геодезия и география, Българска академия на науките,
София, 1113, e-mail: diana_jordanova77@abv.bg.

РЕЗЮМЕ

Повишеното търсене на критични и стратегически суровини (КСС) в последните години предопредели необходимостта от разширяване на добива и преработката на полезни изкопаеми, както и оптимизиране на използваните технологии. Настоящата работа представя първоначални данни за съдържанието на КСС в рудни минерали в отпадни материали от проучвателен сондаж на хвостохранилище „Люляковица“ на медно-порфирно находище „Асарел“. Измерените вариации на обемната магнитна възприемчивост (K) на отпадъка в дълбочина открояват нива със завишено съдържание на рудни минерали, които биха могли да бъдат потенциални концентратори на КСС.

Увод

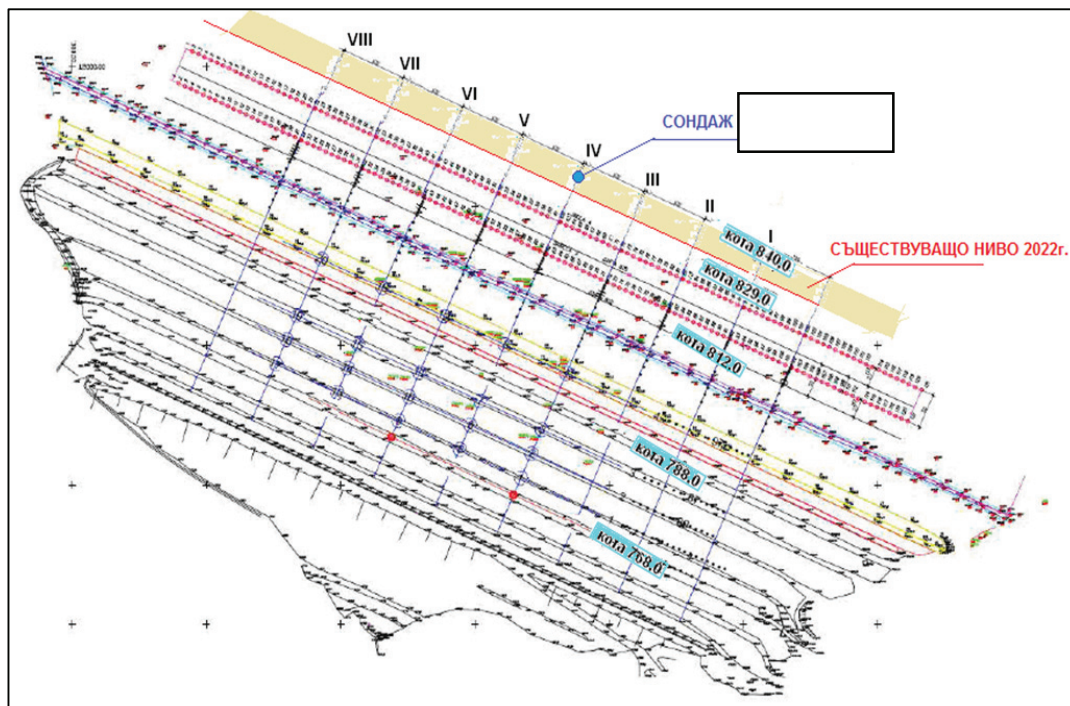
Развитието на европейската икономика и осъществяването на плавен преход към възобновяеми енергийни източници и безотпадни технологии са силно зависими от минерални суровини. През периода 2010-2024 г. 34 от тях бяха определени от Европейския съюз като критични, а 16 и като стратегически (Grohol and Veeh, 2023). Използват се в електрониката, транспорта, здравеопазването, отбраната, изследването на космоса, авиацията и други индустриални области. Значението на критичните и стратегически суровини (КСС) нарасна силно с превръщането на редица метали в енергийни суровини. Фотоволтаичните клетки изискват алуминий, мед, сребро и други елементи, като индий, селен и телур. За производството на вятърната енергия са необходими стомана, мед, алуминий, цинк и олово, както и неодим за турбинни магнити. Съхранение на енергия в батерии също изисква използване на метали, смес от графит, литий, кобалт, никел и манган са необходими за най-съвременните батерии на електрическите автомобили, докато ванадият е необходим за съхраняване на вятърна и слънчева енергия (Harrington, 2021). Амбицията на Европа е да се достигне до напълно кръгова икономика, в която търсенето на суровини може да бъде задоволено чрез повторна употреба и рециклиране. За съжаление, дори за метали като алуминий и кобалт, за които рециклирането е до 70%, снабдяването само от рециклиране няма да бъде достигнато в близко бъдеще.

Нарастващото търсене на КСС определя необходимостта от разширяване на добива и преработката на полезни изкопаеми, както и оптимизиране на използваните технологии. Някои от тези технологии използват широко геохимични и минералого-геохимични методи за повишаване на ефективността и намаляване на отпадъка. Приложението им в полиметални и медно-порфирни находища в България са сред основните цели на проект REXPro: Устойчиво и ефективно проучване, добив и преработка на критични и стратегически суровини в медно-златни и полиметални находища в България: от рудата до хвостохранилището ([https://www.geology.bas.bg/en/projects-116/show-125\(20\)](https://www.geology.bas.bg/en/projects-116/show-125(20))), финансиран от ЕС – NextGenerationEU по Плана за Възстановяване и Устойчивост, договор № ПБУ-11 от 27.05.2024 г. (BG-RRP-2.011-0040-C01). Проектът се фокусира в три направления, в които има предшествващи изследвания и изградена компетентност: (а) количествена минералогия (напр. Metodiev et al., 2016) за подобро минно планиране; (б) извличане на допълнителни полезни компоненти (вкл. КСС) в процеса на обогатяване, намаляване и използване на крайния отпадък в хвостохранилище; и (в) приложение на недеструктивни магнитометрични изследвания за оценка на състава на отпадъка. Настоящото изследване представя първоначални данни за последните две направления, като иновативните техники са приложени към отпадъци от хвостохранилище „Люляковица“ на медно-порфирно находище „Асарел“.



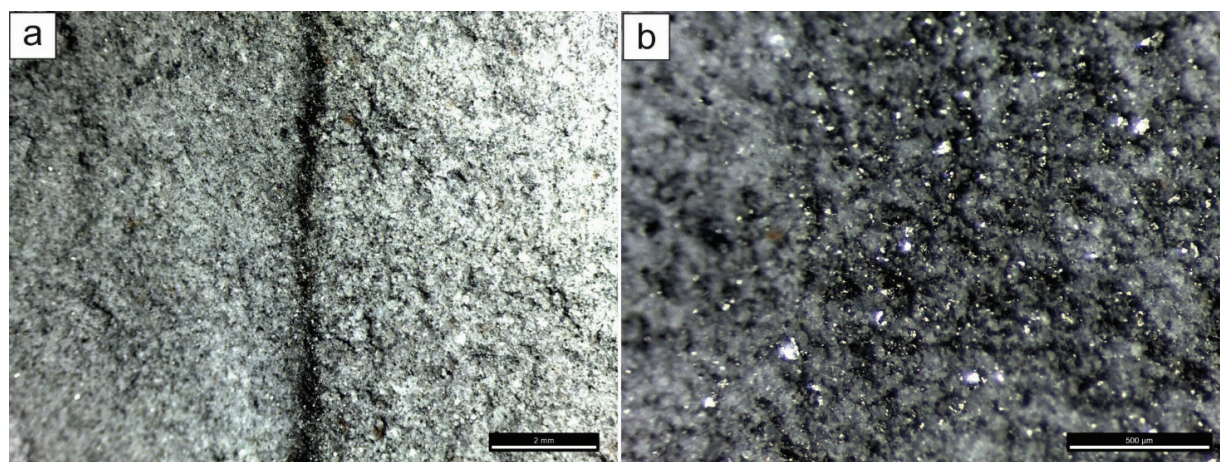
Материали и методика

В настоящото изследване са използвани отпадни материали от проучвателен сондаж в хвостохранилище „Люляковица“ на Асарел-Медет АД. В хвостохранилището се съхраняват отпадни материали от флотацията на руда от медно-порфирно находище Асарел (Богданов, 1987, Попов и др. 2012, Strashimirov et al. 2002). Сондажът е направен в периода 05.12.-20.12.2022 г. до дълбочина 100 m (Фиг. 1). След извършените предходни на този проект изследвания (Вацева, Симеонов, 2023) са съхранени отделни участъци с обща дължина 5,40 m. Материалът е песъкливо-глинесто-прахов като фракциите от прах и дребнозърнест пясък имат неравномерно разпределение (Вацева, Симеонов, 2023). Наблюдават се отделни тънки слоеве (<1 mm) от натрупани рудни минерали (предимно пирит), които са били частично окислени (ръждиви участъци) по време на съхраняването сондажния материал. Отпадният материал е разгледан с помощта на бинокуларен микроскоп за установяване на подходящи участъци, от които да се сепарира набогатена рудна фракция. В интервала от дълбочина 48,4–48,5 m (проба Ash2) бе установен тънък (<0.5 mm) слой от утаен дребнозърнест пирит (Фиг. 2). От този слой бяха сепарирани фракции от пирит и магнетит и бе изготвен микроскопски препарат за последващи оптичномикроскопски изследвания в отразена светлина и анализи на микрохимичния състав чрез лазерна аблация с маспектрометрия в индуктивно свързана плазма (LA-ICP-MS).



Фиг. 1. Местоположение на проучвателния сондаж (Вацева, Симеонов, 2023)

Микрохимичният състав на пирита и магнетита бяха определени чрез LA-ICP-MS. Анализите бяха извършени със система за лазерна аблация и маспектрометър PerkinElmer ELAN DRC-е при следните условия: честота на лазерния лъч 6 Hz; енергия върху образеца 6,0-6,2 J/cm² и размер на точката на анализ 35 μ m. По време на експеримента са измерени следните изотопи на елементи: ²³Na, ²⁵Mg, ²⁷Al, ²⁹Si, ⁴⁹Ti, ⁵¹V, ⁵³Cr, ⁵⁵Mn, ⁵⁷Fe, ⁵⁹Co, ⁶⁰Ni, ⁶⁵Cu, ⁶⁶Zn, ⁷¹Ga, ⁷⁴Ge, ⁷⁵As, ⁷⁷Se, ⁹⁵Mo, ¹⁰⁷Ag, ¹¹¹Cd, ¹¹⁵In, ¹¹⁸Sn, ¹²¹Sb, ¹²⁵Te, ¹⁸²W, ¹⁸⁵Re, ¹⁹⁷Au, ²⁰²Hg, ²⁰⁵Tl, ²⁰⁸Pb и ²⁰⁹Bi. За изчисляване на концентрациите на отделните елементи в изследвания материал са използвани два външни стандарта NIST SRM 610 и USGS MASS1 и съдържанието на желязо в пирита и магнетита. За обработка на резултатите е използван софтуерът SILLS ver. 1.1.0 (Guillong et al., 2008).

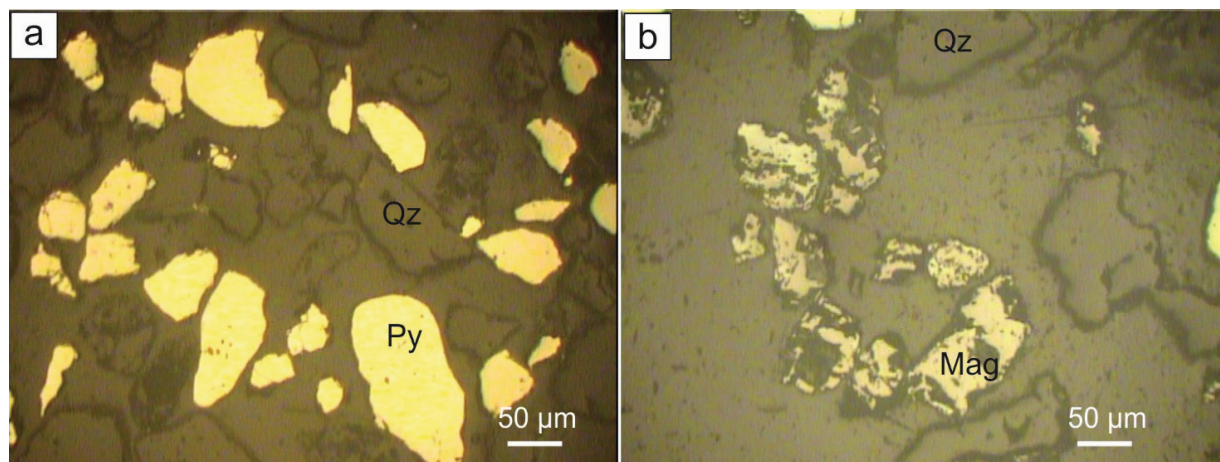


Фиг. 2. Микрофотографии на изплевания материал: а) слой от утаен руден материал в интервал 48,4–48,5 м; б) дребнозърнести частици пирит всред основна маса от глини и кварц.

Проведени са непрекъснати измервания на К с полеви капаметър КТ5. на всеки 5 см интервал, съответстващ на диаметъра на измервателната бобина на уреда. По този начин са обхванати измененията на магнитните свойства в 75 нива от сондажа, попадащи в интервалите: 14 – 15 м; 48 – 51.0 м; 57 – 60.0 м; 70 – 71 м; 88.5 – 90 м; 97.5 – 99 м. От наличния ядков материал са взети 13 бр. проби. Магнитната възприемчивост на пробите е измерена с лабораторен капаметър MFK-1A (AGICO, Czech Republic), имащ чувствителност 10^{-8} SI и точност 0.1%. Мас-специфичните стойности са получени чрез умножение на обемните стойности на К по плътността на насипния материал, запълващ номинален обем от 10 cm³.

Резултати

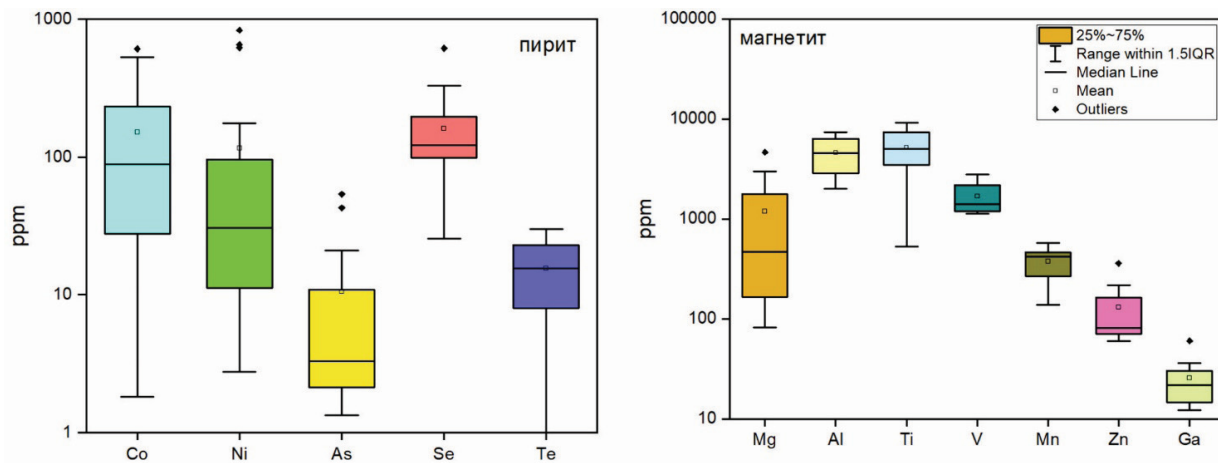
Набогатената рудна фракция в интервал 48,4–48,5 м (проба Ash2) се състои основно от пирит и в подчинено количество магнетит. Размерите на частиците пирит в отпадния материал са от 20 до 80 µm, а на магнетита - 20-50 µm (Фиг. 3). В някои от пиритовите зърна има микроскопски видими включения от рутил. С LA-ICP-MS бяха направени 30 точкови анализа в пирит и осем в магнетит от проба Ash2, за да се определи присъствието на микроелементи. Пиритът, който генетично принадлежи към различни парагенези (Strashimirov et al., 2002) показва широк размах в разпределението на типични структурно свързани елементи-примеси като кобалт, никел, арсен, селен и телур (Фиг. 4). Всред тези елементи, телурът е най-рядко регистриран, последван от арсенът. Селенът, кобалтът и никелът са най-чести елементи-примеси, като кобалтът и никелът достигат и най-високи аномални концентрации – съответно 611 и 834 ppm, със средно съдържание съответно - 152 и 117 ppm.



Фиг. 3. Размери на частици в проба Ash2 (микрофотографии в отразена светлина): а) пирит и кварц; б) магнетит и кварц.

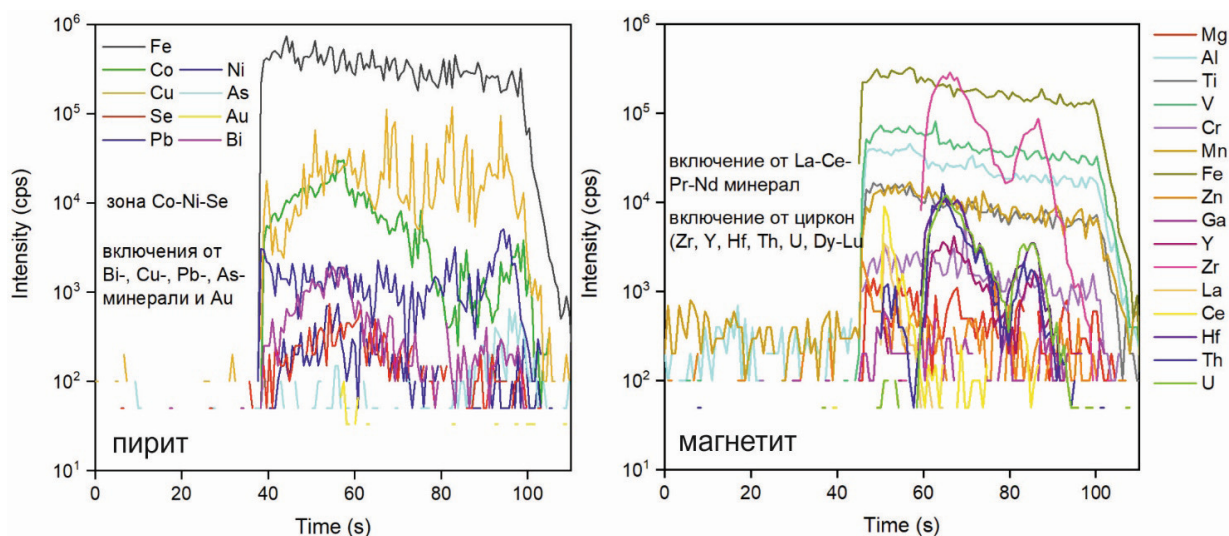


Селенът е специфичен елемент-примес в пирита от медно-порфирните находища. В пирита от изследвания отпадък концентрацията му достига до 618 ppm, средно – 161 ppm. Установяват се концентрации и на други елементи, най-често мед, олово и бисмут. Медта се явява като елемент-примес, но и като резултат от присъствие на халкопирит в изследвания обем. Поради това са регистрирани и аномално високи съдържания – 6585 ppm. Съдържанията на олово и бисмут се обуславят от наличие на микроразмерни включения от олово- и бисмут-съдържащи минерали, най-често галенит, но и бисмутови сулфосоли (Фиг. 5). Двата елемента често, но не винаги, показват идентични модели на флуктуации в интензитетите получени при LA-ICP-MS анализ, поради което коефициентът на положителна корелация между тях е умерено изразен ($r=0.44$, Фиг. 6).



Фиг. 4. Микрехимичен състав на пирит и магнетит в руден сепарат от проба Ash2.

Представените съдържания на тези елементи са базирани на измерено количество от друг минерал в матрицата на основния минерал. Максималните регистрирани концентрации за олово и бисмут са 163 и 17 ppm, а средните съдържания са съответно 28 и 4 ppm. Регистрирано е и присъствие на злато като микроразмерни включения в пирит (Фиг 5).

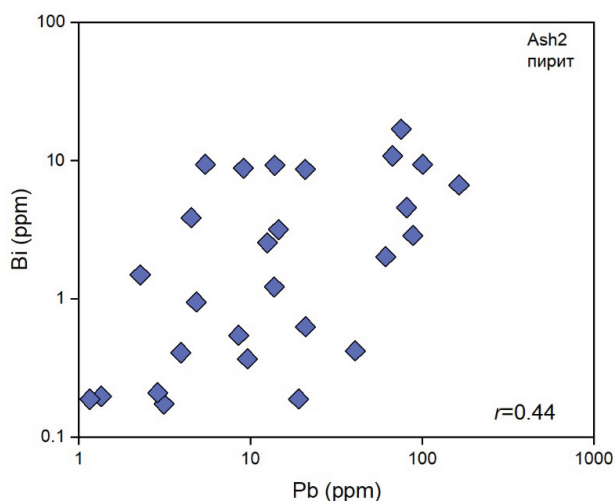


Фиг. 5. LA-ICP-MS спектри илюстриращи интензитети на елементи свързани с анализираните минерали пирит и магнетит и други принадлежащи на включения от минерали в анализирания обем

Магнетитът е сравнително рядък в рудната фракция в отпадния материал, дребнозърнест, генетично принадлежи към най-ранната рудна парагенеза (Богданов, 1987; Strashimirov et al., 2002). Направените LA-ICP-MS анализи показват присъствие на характерни елементи-примеси като магнезий,

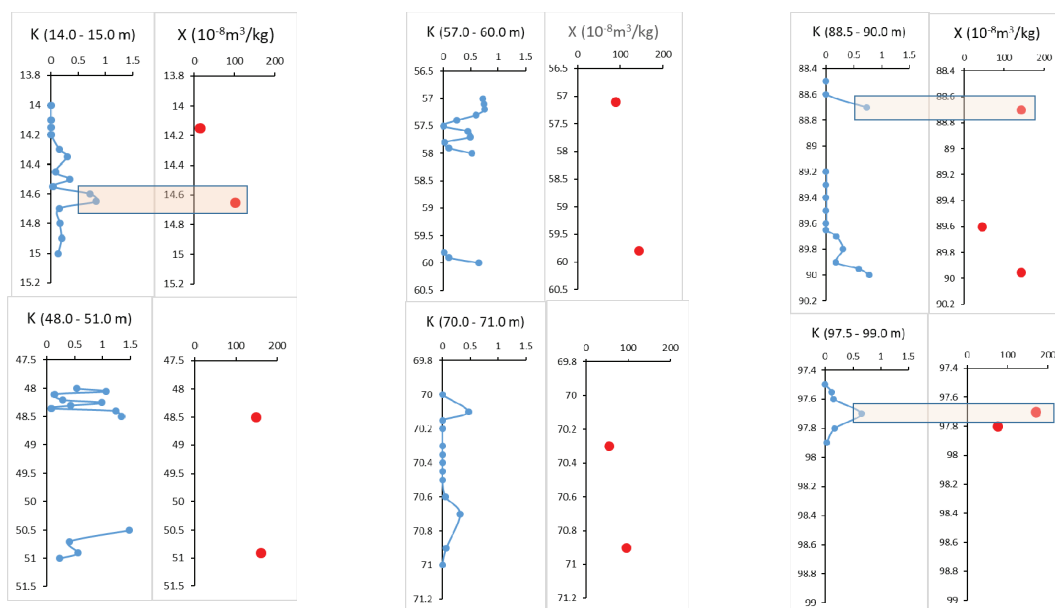


алуминий, титан, ванадий, манган, цинк и галий (Фиг. 3). С най-високи максимални и средни концентрации са алуминий и титан (в ppm, максимални 7425 и 9205, средни 4610 и 5193), а с най-ниски такива са цинк и галий (max. 359 и 60, средни 131 и 26). Максималните концентрации за магнезий, ванадий и манган са съответно (в ppm): 4639, 2787 и 575, а средните концентрации са съответно 1189, 1687 и 376. Регистрирани са съдържания на цирконий, итрий, хафний, торий и уран, както и някои тежки редкоземни елементи (Dy-Lu) (Фиг. 5), които се дължат на включения от циркон в анализирания обем от магнетит. Измерени концентрации от лантан, церий, празеодим, неодим и фосфор са свързани с включение от друг минерал, вероятно монацит.



Фиг. 6. Концентрации на олово и бисмут в пирит от проба Ash2.

Резултатите за К от полевите измервания са представени на левите панели на Фиг. 7. Вижда се, че ясно се отделят нива с повишено съдържание на магнитни желязосъдържащи минерали, отразени във високи стойности на К, достигащи до 1.34×10^{-3} SI. Мас-специфичната магнитна възприемчивост (X) на пробите (означени с червени точки) варира в интервала $(13 - 170) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ и индикира различна степен на обогатяване с пирит ($\pm$ магнетит) на ядковия материал.



Фиг. 7. Вариации на обемната магнитна възприемчивост (K) (представена в единици 10^{-3} SI) в дълбочина по сектори от сондажната ядка. С червени символи са представени стойностите на мас-специфичната магнитна възприемчивост (X) на избраните проби.



Дискусия

За разлика от рутинното определяне на среден химичен състав на отпадъка от флотацията, изследването на микрохимичния състав на рудната фракция в този отпадък позволява да се определи формата на присъствие на някои критични елементи (кобалт, никел, бисмут, галий, цирконий, редкоземни елементи и др.) привързана към конкретни минерали. В настоящото изследване се установи, че присъствието на кобалт и никел е изключително структурно свързано с пирита в отпадъка, а на бисмут като дребни включения от редки минерали като вече описаните в находището айкинит, витихенит (Петрунов и др., 1991) и бисмутинит (Cioacă et al., 2020). Завишените концентрации на цирконий, хафний, итрий, торий, уран и редкоземни елементи пък се дължи на редки включения от циркон и монацит, които са характерни акцесорни минерали в магмените скали (кварц-диоритови и кварц-монцитови порфири, гранодиорит и гранит порфири, и вместващите гранитоиди на Смиловенския плутон, Nedyalkov et al., 2007), в които се намира впръснатата медна минерализация. Предшестващите изследвания на екипа на проект REXPro показаха повишаване на съдържанията на някои КСС в процеса на обогатяване (Peytcheva et al., 2022) и вероятни възможности за по-комплексно извличане на съпътстващи елементи в рудата преди транспортиране на краен отпадък до хвостохранилище. Отпадъците от миннодобивна дейност могат да съдържат значимо количество неизвлечени КСС (Веселинов и др., 1996а,в; Blengini et al., 2019; Stanimirova et al., 2023). Според Доклада на Съвместния изследователски център (JRC) към Европейската комисия, оползотворяването на критични и други материали от миннодобивни отпадъци и сметища е от съществено значение за кръговата икономика (<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4b410d88-a774-11e9-9d01-01aa75ed71a1/language-en>). За България все още липсва пълнота в базата от знания за КСС (включително REE, Co, Ga, Ge, In и др.) в хвостохранилищата. Планираните и приложени аналитични методи в проекта (XRF, XRD, SEM-EDS/EPMA, LA-ICP-MS на средни проби и in-situ на отделни минерални зърна с определяне на над 50 елемента) върху отпадни материали от флотацията в хвостохранилище „Люляковица“ ще позволят да се получат по-пълни данни за техния потенциал като източник на КСС.

Теренните и лабораторни измервания на магнитната възприемчивост К на материалите от хвостохранилището ясно индикират присъствието на сулфидни и силно магнитни минерали (окиси на желязото). Те дават възможност за насочено селективно допълнително минераложко и геохимично изучаване на тези материали с цел привързване на потенциални източници на КСС. Базирайки се на най-съвременните тенденции в магнитните геофизични изследвания и на свои данни (Attoucheik et al., 2021; Jordanova et al., 2017, 2021) екипът на REXPro насочи усилията си към характеризиране на количеството остатъчна неизвлечена руда и формата на присъствие на магнитната фракция в депонираните отпадъци от флотацията в хвостохранилище „Люляковица“ с цел оценяването на потенциала ѝ като източник на КСС и евентуално подобряване на извличането на полезни компоненти.

Изводи

Получените предварителни резултати потвърждават присъствието на КСС (кобалт, никел, бисмут, цирконий, редкоземни елементи) в депонирания отпадък в хвостохранилище „Люляковица“ като го привързват към конкретни минерали в отпадъка (пирит, магнетит, микроразмерни частици от редки бисмутови и акцесорни минерали). Магнитометричните измервания в запазените участъци от сондажната колонка открояват интервалите със завишени стойности на К, където може да се извърши допълнително минераложко и геохимично изследване на рудоносната фракция в отпадъка.

Благодарности

Това изследване е извършено с подкрепата на договор BG-RRP-2.011-0040-C01 (ПБУ-11/ 29.06.2024 г.) REXPro, финансиран от Европейския съюз по програма NextGenerationEU, процедура Финансиране на научноизследователски проекти в областта на зелените и цифровите технологии.



Литература

- Богданов, Б. 1987. *Медните находища в България*. София, Техника, 388 с.
- Вацева, Р., С. Симеонов. 2023. Отчет по Договор № Д-III-114/14.10.2022 г. „Изследвания за определяне коефициенти на реагиране на хвостохранилище „Люляковица“ и анализ на опасността от втечняване на хвоста при статични натоварвания“, Геологически институт, Българска академия на науките, Раздел 4.
- Петрунов, Р, П. Драгов, Х. Нейков. 1991. Полиелементни (с As, Sn, V, Bi, Ag, Te, Ge, Se и др.) минерализации в медно-порфирното находище Асарел. – *Сн. БГД*, 52, 1, 1–8.
- Попов, П., С. Страшимиров, К. Попов, М. Каназирски, К. Богданов, Р. Радичев, С. Димовски, С. Стойков. 2012. *Геология и металогения на Панагюрския руден район*. София, Изд. Минно-геоложки университет, 227 с.
- Attoucheik, L., Jordanova, N., Bayou, B., Lagroix, F., Jordanova, D., Maouche, S. Henry, B., Boutaleb, A. 2017. Soil metal pollution from former Zn-Pb mining assessed by geochemical and magnetic investigations: case study of the Bou Caid area (Tissemsilt, Algeria). *Environmental Earth Sciences*, 76 (7), Article Number: 298, <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6622-9>
- Cioacă, M.-E., M. Munteanu, E. Lynch, N. Arvanitidis, M. Bergqvist, G. Costin, D. Ivanov, V. Milu, R. Arvidsson, A. Iorga-Pavel, K. Högdahl, V. Stoilov. 2020. Mineralogical setting of precious metals at the Assarel porphyry copper-gold deposit, Bulgaria, as supporting information for the development of new drill core 3D XCT-XRF scanning technology. – *Minerals*, 10, 946; <https://doi.org/10.3390/min10110946>.
- Herrington, R. 2021. Mining our green future. – *Nature Review Materials*, 6, 456–458. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00325-9>
- Grohol, M., C. Veeh. 2023. *European Commission: Study on the Critical Raw Materials for the EU– Final Report*. Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Publications Office of the European Union; <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585>.
- Guillong, M., D. L. Meier, M. M. Allan, C. A. Heinrich, B. W. D. Yardley. 2008. Appendix A6: SILLS: A MATLAB-based program for the reduction of laser ablation ICP-MS data of homogeneous materials and inclusions. – In: Sylvester, P. (Ed.). *Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues*. Vancouver, B. C., Mineralogical Association of Canada Short Course, 40, 328–333.
- Jordanova, N., Jordanova, D., Tcherkezova, E., Georgieva, B., Ishlyamski, D. 2021. Advanced mineral magnetic and geochemical investigations of road dusts for assessment of pollution in urban areas near the largest copper smelter in SE Europe. *Science of the Total Environment*, 792, art. No 148402
- Jordanova, N., Petrovský, E., Kapicka, A., Jordanova, D., Petrov, P. 2017. Application of magnetic methods for assessment of soil restoration in the vicinity of metallurgical copper-processing plant in Bulgaria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, Article number 158
- Metodiev, S., I. Peytcheva, K. Kouzmanov, D. Dimitrova, E. Stefanova, D. Dimitrov. 2016. Quantitative mineralogy and geochemical characteristics of ores from Au-Ag-W deposits, Tran region, Western Bulgaria: A combined SEM, QEMSCAN and LA-ICP-MS study. – *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, 69, 11, 1455-1462.
- Nedialkov, R., A. Zartova, R. Moritz. 2007. Magmatic rocks and evolution of the Late Cretaceous magmatism in the region of the Asarel porphyry copper deposit, Central Srednogorie, Bulgaria. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 68, 1–3, 46–65.
- Strashimirov, S., R. Petrunov, M. Kanazirski. 2002. Porphyry-copper mineralization in the central Srednogorie zone, Bulgaria. – *Mineral. Deposita*, 37, 587–598; <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0275-6>.



МИННИ И МЕТАЛУРГИЧНИ ОТПАДЪЦИ ОТ ДОБИВА НА МЕТАЛИ И ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ТЯХНОТО ОПОЛЗОТВОРЯВАНЕ. ПРЕГЛЕД НА БЪЛГАРСКАТА И СВЕТОВНАТА ПРАКТИКА

Ирина Маринова, irimari@gmail.com, Борислав Барбов, boby6bv@abv.bg, Лилия Цветанова, lilicvetanova79@abv.bg
Институт по минералогия и кристалография, Българска академия на науките

Въведение

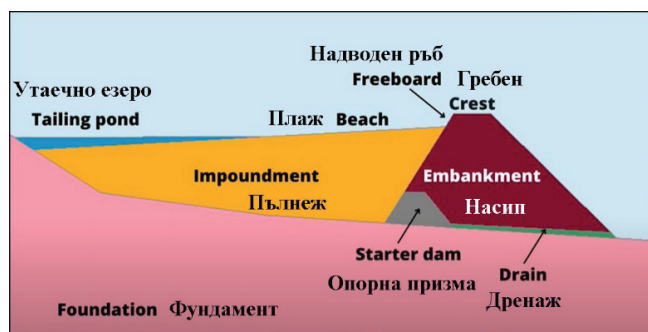
През последните няколко десетилетия бурното развитие на технологиите увеличи търсенето на различни метали. Европа е бедна на много от тези метали. В същото време няколко страни разполагат с огромни запаси от тях и диктуват износа им и цените им. В тази връзка Европейската комисия определя критични и стратегически суровини за Европейския съюз (European Commission, 2023). През ноември 2024 г. с решение на Министерския съвет на Р. България започна изпълнението на Национална научна програма „Критични и стратегически суровини за зелен преход и устойчиво развитие“ с планирана продължителност 5 години. Тази програма идва в отговор на призива на Европейската комисия за целенасочени действия за търсене на критичните и стратегическите суровини в рамките на Европа. Тези суровини могат да бъдат първични, вторични или резултат от рециклиране. Част от тази програма е задачата за охарактеризиране на отпадъците от минно-добивна и металургична дейност като потенциален източник на критични и стратегически суровини. Настоящата статия е преглед на литературата от български и чуждестранни източници като първа стъпка към систематизиране на въпросите с минните и металургичните отпадъци от добива на метали, тяхното оползотворяване, и оценка на потенциала им за критични и стратегически суровини.

В България понастоящем се добиват медни руди в Средногорието (Богданов, 1987), оловно-цинкови руди в Родопите (Димитров, 1988) и сребърно-златни руди от находище Хан Крум, Крумовградско (Източни Родопи). Доскоро се добиваше и желязна руда от находище Кремиковци, Софийско, която се преработваше в металургичния комбинат Кремиковци, спрял работа през 2009 г. след неуспешна приватизация и последваща продажба. Флотационните фабрики на медни руди произвеждат меден концентрат; на оловно-цинкови руди – оловен и цинков концентрат, а на сребърно-златни руди – сребърно-златен концентрат. Всички тези руди имат комплексен състав, известно от научни публикации, но поради ниски съдържания или липса на икономически ефективна технология, от тях освен основния метал/метали, се добиват единични редки и разсеяни елементи: телур, сребро и бисмут от оловния концентрат; кадмий от цинковия концентрат; злато от медния концентрат; злато и сребро от сребърно-златния концентрат (интернет-данни на Асарел-Медет, КЦМ Пловдив и ДГМ). В същото време по света са разработени технологии за добив от цинков концентрат на германий, индий, и рений (Song et al., 2021; Leszczynska-Sejda et al., 2024); от меден и оловен концентрат – на телур и селен (Makuei and Senanayake, 2018; Zeng et al., 2022; Chung et al., 2024), от желязни руди – на редкоземни елементи (Peelman et al., 2016; Xiao et al., 2024), от молибденит, който се получава от меден концентрат – на рений (Lessard et al., 2014; Луцкий и Игнатович, 2021). Всички тези елементи са в списъка с критични и стратегически суровини на Европейската комисия от 2023 г.

При добива на руди и метали се получават огромно количество ситно смляна скална маса или шлака, които постъпват в хвостохранилища, насипища или отвали и се наричат отпадък (минен или металургичен) (Закон за управление на отпадъците, 2012). Отпадъците са в твърдо, течно или шламово състояние. Едрината на смления отпадък зависи от вида на изходната скала и процеса на обогатяване. Хвостохранилищата са най-честата форма на депониране на минни отпадъци. Те са инженерни съоръжения за съхраняване на ситно смлени минни отпадъци, обикновено от обогатяването на твърди полезни изкопаеми, наред с променливи количества вода. Най-често хвостовият материал е с размер под 0.2-0.1 мм, като около и над 60 тегл. % от хвостовия отпадък е с размери под 80 μm , т.е. минният отпадък представлява много фин материал. Обикновено хвостът представлява маса с размери на



среднозърнест пясък до глина и прах, оводнен и склонен към протичане при наличие на вода (Тошев, Чолаков, 2021, 2023). В България от активно действащите хвостохранилища, 2 бр. хвостохранилища са от язовирен (наливен) тип и 10 бр. са от наливен тип (данни на Министерство на енергетиката). При наливването на твърдия хвостов материал твърдите частици се утаяват, а водата се оттича в утаечното езеро/утайник като благоприятства седиментацията на нееднородни по състав и едрина слоеве. Стените на наливните хвостохранилища обикновено са от каменно-насипен тип (фиг. 1). Водата се дренира от отводнителни канали (Тошев, Чолаков, 2021, 2023; Николов, Кантарджиев, 2023). В язовирния тип хвостът е по-фин, около 80% от него е с размери под 75 μm . При него хидротранспортната система излива пулпа направо в утаечното езеро, а стената е насипна язовирна. От язовирен тип са хвостохранилищата „Ерма река“ и „Лъки“ (Тошев, Чолаков, 2021). Всяко хвостохранилище има уникален дизайн, който зависи от топографията на конкретния терен, минната техника и технологиите, използвани от оператора. Смлениите минни отпадъци във времето на активен добив в мината и преработка на рудата не носят печалба на собственика на мината, но са свързани с големи разходи по поддръжка на безопасността на съоръженията. В България са изградени, консервирани или действащи над 40 хвостохранилища. От тях 21 са спрени от експлоатация (запълнени) и частично рекултивирани, а действащите са 12. Хвостохранилищата от добива на метали у нас са резултат от преработката на медна, оловно-цинкова, сребърно-златна, желязна, и уранова руда (данни на Министерство на енергетиката). Общата схема на хвостохранилище е дадена на фиг. 1.



Фиг. 1. Обобщена схема на хвостохранилище.

В европейските стратегии и политики отдавна са залегнали принципите на кръговата икономика, според които промишлените отпадъци, в това число минните и металургичните отпадъци, трябва да се използват за получаване на вторични суровини, продукти, и енергия (European Commission, 2015). Принципите на кръговата икономика имат стратегически, икономически и екологични измерения, и са породени от ограничените природни ресурси на планетата, деградацията на околната среда вследствие на човешката дейност, стремежа към устойчиво развитие на икономиката, съпътствано от икономически растеж, и очаквания ръст на населението на Земята, което означава нарастващо потребление на природни ресурси. Оползотворяването на минните и металургичните отпадъци се налага по редица причини. Огромните количества складираните минни и металургични отпадъци в хвостохранилища (всяко отделно хвостохранилище вмества десетки милиони кубически метри ситно смлян минен отпадък - Тошев, Чолаков, 2021) и насипища изискват непрекъснато наблюдение и контрол, които са скъпоструващи дейности. Въпреки това, главно при хвостохранилищата, опасността от опасни инциденти не е елиминирана напълно (Rico et al., 2008). Минните отпадъци в хвостохранилищата, които съдържат сулфиди, каквито са всички отпадъци от третирането на медни, оловно-цинкови и златни руди в България, произвеждат кисели дренажни води, които увреждат околната среда. Процесът протича поради естествено окисление на сулфидните минерали, изложени на въздух и вода (напр. Garcia et al., 2005; Mafra et al., 2020). Металургичната дейност също уврежда околната среда поради емисии от CO_2 , SO_2 , азотни окиси, фини прахови частици. Металургичните предприятия са основни замърсители на атмосферата с емисии на As, Cu, Cd, Sb, и Zn и също допринасят съществено за глобалните емисии от Cr, Pb, Se, и Ni, като замърсяват почви, води и живи



същества (Dudka, Adriano, 1997; Csavina et al., 2012; Samouhos et al., 2021). От друга страна, минните и металургичните отпадъци могат да заместят невъзобновяеми природни ресурси, които се изразходват и се изчерпват във времето, например при производството на цимент, както и да намалят количеството емисии от CO_2 в атмосферата, които променят неблагоприятно климата. Циментовата промишленост (декарбонация на варовика и нагряване на пещите за производство на цимент до около 1450°C с електроенергия, получена главно при горене на изкопаеми горива) е отговорна за около 5-8% от световните емисии на CO_2 , основен парников газ, който води по повишаване температурата на Земята (Gartner, 2004; Scrivener and Kirkpatrick, 2008). Минните и металургичните отпадъци позволяват производството на строителни материали, алтернатива на бетона, като при това намаляват емисиите от CO_2 в атмосферата с между 55 и 75-80 % (van Verten et al., 2012; Yang et al., 2013).

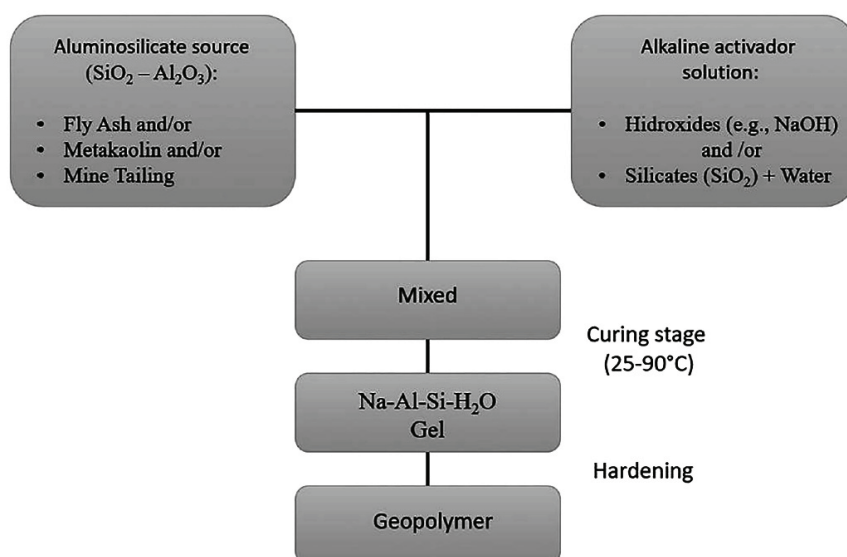
Устойчивото обществено развитие и развитието на икономика, щадяща околната среда, изискват замяната и на други невъзобновяеми суровини с нови, алтернативни материали, напр. замяната на медните проводници с оптични влакна; замяната на нефтените продукти с биополимери, както и по-ефективно рециклиране на промишлените отпадъци. За съжаление, рециклирането в България, Европа, и по света представлява много малка част от brutния вътрешен продукт на страните, като за Европа той е под 0.5% от brutния вътрешен продукт на континента (Di Maio, Rem, 2015). Причините за ниската степен на оползотворяване на минните отпадъци имат технологични, икономически и регулативно-правни измерения.

Насоки и перспективи при оползотворяване на минни и металургични отпадъци по света

Производство на геополимери

Хвостохранилищата, в които се складира шлам от алумосиликатни скали са много подходящи за създаване на нови строителни материали, каквито са геополимерите (или неорганични полимери) - екологосъобразни строителни материали, получени при процес, наречен геополимеризация: химична реакция между отпадък, богат на алуминий и силиций, и алкален (или по-рядко кисел) разтвор. Получените геополимери имат свойства, сравними с тези на бетона, получен на основата на портланд-цимента. В процеса на геополимеризация алумосиликатните минерали преминават през няколко стадия: 1) разтваряне в алкални условия; 2) коагулация; 3) полимеризация и образуване на гел със създаване на тримерен скелет от Si-O-Al връзки (сиалати) и втвърдяване. В зависимост от отношението $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ на изходната суровина се образуват сиалати от няколко типа: полисиалатен ($\text{Si}:\text{Al}=1$), полисиалатно-силоксенен ($\text{Si}:\text{Al}=2$), полисиалатно-дисилоксенен тип ($\text{Si}:\text{Al}=3$) или сиалатна връзка ($\text{Si}:\text{Al}>3$). По-подробно, при разтваряне на изходния алумосиликатен материал, алуминият и силицият се освобождават в разтвора; следва процес на полимеризация, генериращ първоначален гел, богат на Al. Впоследствие Si в разтвора реагира с този гел, като се образува крайният гел, богат на Si (гел с основен състав Na-Al-Si- H_2O), известен накратко като N-A-S-H гел. Този гел бързо се втвърдява, образувайки крайния геополимерен продукт. По същество геополимерите са нанокмполитни материали с изглед на скала. Те нямат стехиометричен състав и представляват смеси от аморфни до слабо изкристализирани вещества и кристалинни частици с Al-Si състав. Геополимеризацията протича при стайна температура до температура около 90°C (Davidovits, 1991; Silva et al., 2007; Duxson et al., 2007; Mehta, Siddique, 2016; Negrís et al., 2018; Castillo et al., 2022). Схема за получаване на геополимери е представена на фиг. 2.

За отделни хвостохранилища, резултат от добива на медни, железни, златни и волфрамови руди, както и за насипища, които съхраняват металургична шлака от производството на стомана и мед, проведените изследвания показват, че са подходящи за производство на геополимери. Резултатите показват, че хвостовият отпадък и шлаките съдържат достатъчно съдържание на силициев двуокис и двуалуминиев триокис, което ги прави подходящ прекурсор в синтеза на геополимери, алтернатива на бетона, обикновено с добавяне на летяща пепел и цимент (Ahmari, Zhang, 2013; Nath, Kumar, 2013; Yusuf et al., 2014; Mehta, Siddique, 2016; Onisei et al., 2018; Almeida et al., 2020; Li et al., 2020; Nikolov, 2021; Nikolov, Karamanov, 2022). Тези примери показват потенциала за използване на геополимерите в строителната промишленост.



Фиг. 2. Схема за получаване на геополимер (Castillo et al., 2022).

Добавяне към цимент, бетон; при производство на хоросан

Отдавна се експериментира с различни минни и металургични отпадъци като частични заместители на обикновения портланд цимент. Една от възможностите е добавяне на шлама, получена при производството на стомана (Escalante-Garcia et al., 2009). При получаването си шлаката е гранулирана, като за целите на циментов заместител тя се смила. Съставът ѝ е (тегл.%) 35.6 CaO, 36.4 SiO₂, 11.2 Al₂O₃, и 9.4 MgO. Най-често като алкални активатори са използват натриев силикат (водно стъкло) и натриев хидроокис. Полученият бетон е с якост на натиск, сравним с този на бетона, но при по-ниска цена и по-ниска консумация на енергия (не се изисква нагряване и няма декарбонитизация на CaCO₃, както при портланд цимента), т.е. производството оказва по-слабо неблагоприятно въздействие върху околната среда. Заместването на част от цимента с хвостов отпадък от медни хвостохранилища води до повишаване на якостта на натиск, устойчивостта към проникване на хлориди и подобряване на дълготрайността на бетона (Ghazi et al., 2022). Хвостов отпадък от флотацията на оловно-цинкови руди успешно е използван при заместването на речен пясък при производство на бетон. Добавката е 10 и 20% от теглото на речния пясък. В производството на бетона се използват цимент, речен пясък, минерален пълнител, хвостов отпадък и поликарбооксалат (Janković et al., 2015). Получените резултати показват, че е възможно да се използват минни отпадъци от Pb-Zn флотационни фабрики при производството на бетон, и че най-добрият ефект се постига чрез замяна на фините фракции на речния пясък с 10% хвост. Минните отпадъци от добива на златна руда също могат да се използват при производството на хоросан за влагане до 30% вместо цимент (Ince, 2019). Сулфидни минни отпадъци могат да служат като фин агрегат в строителен разтвор, при което се постига добра якост и стабилност чрез стабилизиращи добавки като въглищна пепел и вар (Andrews et al., 2022). Отпадъци от медна и волфрамова руда също намират приложение в създаването на бетонни смеси и противопожарни покрития. Добавянето на волфрамови отпадъци подобрява противопожарната защита и устойчивостта на стареене (Wang et al., 2023).

Производство на огнеупори и керамика

Минните отпадъци могат да се използват и за получаване на огнеустойчиви композитни покрития със структура на слоести двойни хидроксида. Слоеите двойни хидроксида са клас синтетични високо подредени двумерни анионни глини, състоящи се от положително заредени слоеве (с два метални йона) с аниони за балансиране на заряда, които са октаедрично координирани в междуслоево пространство. Слоеите двойни хидроксида могат да бъдат изразени с общата формула $[M_{1-x}^{2+}M_x^{3+}(\text{OH})_2](A^{n-})_{x/n} \cdot m\text{H}_2\text{O}$, където A^{n-} е анион, компенсиращ заряда на слоя (CO_3^{2-} , SO_4^{2-}).



M^{2+} и M^{3+} са двувалентни (Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+}) и тривалентни катиони (Al^{3+} , Fe^{3+}), съответно (Tian et al., 2015; Deng et al., 2023). Композитните покрития на основата на двойни хидроксиди се характеризират с добра адсорбция, корозоустойчивост, инертност, ниска токсичност и огнеустойчивост. Такива огнеустойчиви покрития са получени с използване на минен отпадък от добива на волфрамови руди. За получаването им е използван методът на съутаяване. Покритията се състоят от частици с размери най-често в обхвата 1-20 микрона (Wang et al., 2023).

Изследванията върху различни по минерален и химичен състав хвостови отпадъци показват, че отпадъците, богати на кварц и алкални фелдшпати, са много подходящи за получаване на мулитов тип керамика, но с добавяне на алуминий, който не е в достатъчни съдържания в отпадъка (Solismaa et al., 2018; Karhu et al., 2019). Мулитът е алумосиликат с химическа формула $Al_6Si_2O_{13}$ (Костов, 1993). Неговата влакнеста морфология придава голяма здравина на керамиката. Освен за мулитова керамика, минните отпадъци могат да бъдат подходящи за създаване на фосфатна и алкално-активирана керамика, което разширява възможностите за тяхното рециклиране (Solismaa et al., 2018).

Керамични плочки за подови и стенни покрития успешно се получават и при използване на хвостов отпадък от добива на желязна руда. Минералният му състав включва като главни минерали хематит, кварц и каолинит, а като второстепенни – гьотит, илит и монтморилонит; съответно в химичния състав рязко преобладават Fe_2O_3 и SiO_2 . Плочките се изпичат в печи при температура 1150 °C за подовите и при 1060 °C за стенните плочки. След изпичането полученият минерален състав включва кварц SiO_2 , анортит $CaAl_2Si_2O_8$, мулит $Al_6Si_2O_{13}$ и фаялит $FeSiO_4$. Качественото охарактеризиране на плочките показва по-добри показатели за твърдост и сила на огъване, но по-лоши стойности на абсорбирана вода и праволинейност на страните в сравнение с европейските стандарти, което изисква още прецизиране на технологията (Das et al., 2000). Отново с използване на хвостов отпадък от добива на желязна руда е създадена „кафява“ керамика с добри декоративни качества и висока якост. Използвана е глинестата фракция от 4 хвостохранилища, Тези глинени притежават добра пластичност и здравина в сухо състояние, а при изпичане се получават мулит и стъкло. Използваните глинени са подходящи както за занаятчийска дейност, така и за промишлено производство (Fontes et al., 2019).

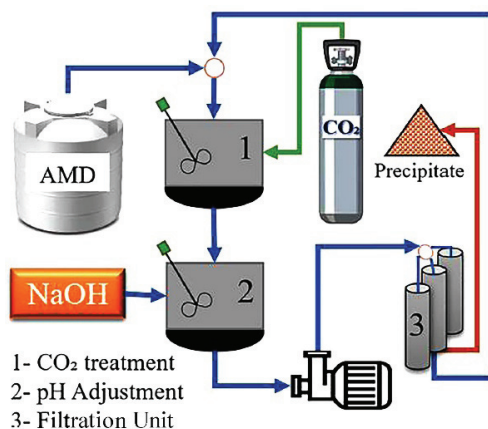
Комбинацията от минни отпадъци и стъклена вата допринася за производството на високопроизводителни керамики. Смляната стъклена вата подобрява качествата на керамиката – уплътняване и развитие на якост при по-ниски температури. Свойствата на изготвената строителна керамика покриват изискванията за строителни материали (Lemougna et al., 2020).

Получаване на редкоземни елементи

Редкоземните елементи (РЗЕ) са група от 17 елемента, включваща 15-те лантанидни елемента заедно със скандий и итрий, всички с подобни физикохимични свойства. Тези елементи обикновено съществуват в трета валентност на окисление и се заместват взаимно в различни съотношения в техните минерали-носители. РЗЕ се класифицират в две групи като леки РЗЕ (ЛРЗЕ: Sc, La, Ce, Pr, Nd, Sm) и тежки РЗЕ (ТРЗЕ: Y, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu). Широката гама от приложения, от зелено производство на енергия до последните високи технологии, повишават значително търсенето и цената на РЗЕ. Въпреки нарасналото търсене на РЗЕ, добивът на тези елементи чрез минна дейност е ограничен, тъй като процесът не е икономически изгоден. Повечето от развитите страни внасят РЗЕ от Китай, който определя цената и условията на доставка. Поради риска от спиране или ограничаване на доставките и недостига на първични ресурси, РЗЕ са класифицирани като критични елементи от ЕС (European Commission, 2023). Една от възможностите за получаване на РЗЕ е от кисели дренажни води на минни отпадъци. Добре е известно, че сулфид-съдържащите минни отпадъци във хвостохранилищата се окисляват при наличие на кислород и вода, което води до освобождаване главно на желязни, оловни, цинкови, медни и сулфатни йони и образуване на кисели дренажни води (напр. Garcia et al., 2005; Mafra et al., 2020). Тези кисели дренажни води са основно предизвикателство пред минния добив и обществото тъй като могат да замърсят повърхностните и подземни водоизточници. В същото време те разтварят и много полезни химични елементи, сред които и РЗЕ.



Hassas et al. (2020) разработват технология за получаване на РЗЕ от кисели дренажни води, в които началното съдържание на РЗЕ е ниско – 500 ppb при pH 3.67, Eh 184.3 mV и обща киселинност като CaCO_3 260.8 mg/L. Първоначално авторите използват NaOH за неутрализиране на киселия дренажен разтвор и промяна на pH. Разтворът в обем 20 L се разбърква 24 часа при по-малко от 400 оборота за минута. Утайки се събират при различни pH и се анализират за химичен състав с граница на откриваемост $\mu\text{g/L}$. В извършените опити основната част от РЗЕ се утаяват при pH 7-8. Изсушената утайка съдържа 4.6 тегл. % РЗЕ, утаени при pH 7, което е 70% от общото разтворено количество РЗЕ в използвания кисел дренажен разтвор. При pH 7 се утаяват също 70% от разтворените Al и Fe. Изследванията със SEM-EDS установяват, че утайките се състоят главно от гибсит $\text{Al}(\text{OH})_3$ и малко количество гьотит FeOOH . Не се установяват минерали на РЗЕ. При втората серия опити авторите използват продухване с CO_2 на дренажния разтвор и след това pH се регулира с NaOH. При тези опити се образуват неразтворими и стабилни метални карбонати, както е обобщено в следното уравнение: $\text{MO} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{MCO}_3 + \Delta\text{H}$. Сравнението на свободната енергия на образуване на Гибс (ΔG°_f) за карбонатите и хидроксидите на РЗЕ показва, че спонтанното образуване на $\text{РЗЕ}_2(\text{CO}_3)_3$ е термодинамично по-благоприятно. С SEM-EDS се установява, че утайките при pH 7 и продухване с CO_2 , се състоят главно от CaCO_3 и ограничено количество MnCO_3 , те са по-добре изкристализирани и показват цепителност. Не се наблюдава образуване на алуминиев карбонат, при това е установено, че Al се утаява със Si вероятно като аморфен алуминиев силикат. Не се намерени минерални фази на РЗЕ. Вместо образуване на собствени минерали се предполага, че субмикронни (и в някои случаи нано-) частици от РЗЕ могат да се адсорбират върху повърхността на по-груби утайки и да се утаяват заедно с тях.



Фиг. 3. Схема за извличане на РЗЕ от кисели дренажни води (Hassas et al., 2020).

Опити по оползотворяване на хвостов и металургичен отпадък в България

Съгласно разпоредбите на Закона за подземните богатства (ЗПБ), гл. 8, чл. 22а., ал. 5, отпадъците престават да бъдат такива, след като са преминали през процес на оползотворяване, за което е необходимо да отговарят на следните условия: 1) за използването им за специфични цели е налична възприета практика; 2) за тях има пазар или търсене; 3) отговарят на техническите изисквания за специфичните цели и са в съответствие с нормативните изисквания и стандарти, приложими за тях и 4) употребата им няма да доведе до отрицателно въздействие върху околната среда или човешкото здраве. Минните отпадъци престават да бъдат такива и когато те се връщат в отработеното пространство и когато се запълват отработените пространства (ЗПБ, гл. 8, чл. 22б, ал. 6). Допълнително в чл. 5, т. 2 от Наредбата за управление на минните отпадъци е посочено, че е възможно оползотворяването на минните отпадъци чрез рециклиране, повторно използване или използване за специфични цели, доколкото това е благоприятно за околната среда и е съобразно нормативните изисквания за опазването ѝ.

Към настоящия момент, по данни на Министерство на енергетиката, е предоставена само една концесия за добив на производствени технологични отпадъци от миннодобивната и



миннопреработваща дейност – подземни богатства по чл. 2, т. 7 от ЗПБ, от хвостохранилище "Медет". Концесията за добив е предоставена по смисъла на ЗПБ, тъй като самото хвостохранилище не е закрито и не е рекултивирано.

Опити за оползотворяване на минни и металургични отпадъци са правени и се правят от отделни учени и колективи, но разработките са в начален стадий и все още нямат масово производство и търговска реализация.

Колектив от Химико-технологичния университет, София в сътрудничество с учени от Румъния и Турция успешно са получили геополимери и огнеопори, които отговарят на техническите и екологични критерии за използването им в гражданското строителство. Използван е хвостов материал от обогатителните фабрики на Асарел Медет и Елаците Мед, както и пепели от ТЕЦ „Бобов дол“ (Сурлева и др., 2023). В изследвания хвостов материал е оценена мобилността на тежките метали желязо, мед, цинк, олово, кадмий и никел при контакт с вода. Авторите установяват, че формата на свързване на тези метали не представлява опасност за околната среда при нормални условия. Притеснително е, че химическите изследвания на хвостовия материал за съдържания на нитратни, фосфатни и сулфатни йони са показали съдържания на сулфатни йони над нормите, регулиращи качеството на водите.

Геополимери от металургична шлака са получени при използване на отпадъка от производството на мед в Аурубис АД, разположен между градовете Златица и Пирдоп. Отпадъкът се състои основно от фаялит, по-малко магнетит, и малко количество пироксен. За получаване на геополимери шлаката е смляна, изсушена и смесена с метакаолин в съотношение 5:1. За алкален активатор са използвани КОН и натриев силикатен разтвор (водно стъкло). Получените полимери се отличават с огнеустойчивост до 1150° С и голяма здравина (Nikolov, 2021; Nikolov, Karamanov, 2022).

В заключение, литературата върху оползотворяването на минни и металургични отпадъци показва широки перспективи за използване в строителството, производството на строителна керамика, изолации, огнеопори, тухли, производство на редкоземни елементи, и критически и стратегически суровини. В България като цяло степента на използване на минните и металургичните отпадъци като суровини е много ниска (Тодорова, Дачев, 2023). Очевидно, за да се случи търговска реализация на получените от учените продукти е нужно партньорство между учените и индустрията, така както се случва в други страни (van Verten et al., 2012).

Благодарности: Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Критични и стратегически суровини за зелен преход и устойчиво развитие“, одобрена с Решение на МС № 508/18.07.2024 г и финансирана от МОН.

Литература

- Богданов Б. 1987. Медните находища в България. С., Техника, 387 с.
- Димитров Р. (ред.). 1988. Оловно-цинковите находища в България. С., Техника, 259 с.
- Закон за подземните богатства (обн., ДВ, бр. 23 от 1999 г., посл. изм. и доп. ДВ, бр. 86 от 2023 г.)
- Закон за водите (обн., ДВ, бр. 67 от 1999 г., посл. изм. и доп. ДВ, бр. 102 от 2023 г.)
- Костов И. 1993. Минералогия, С., Техника, 734 с.
- Луцкий Д., А. Игнатович. 2021. Исследование гидрометаллургического извлечения меди и рения при переработке медных некондиционных концентратов. Записки Горного института, 251, 723-729.
- Наредба за управление на минните отпадъци (обн., ДВ, бр. 5 от 2016 г., посл. изм. и доп., ДВ, бр. 38 от 2019 г.)
- Николов Н., Л. Кантарджиев, 2023. Проектиране на хвостохранилища съгласно добрите инженерни практики. Втора национална научно-техническа конференция „Управление и безопасност на хвостохранилища“, 26-28 април 2023, Научно-технически съюз по минно дело, геология и металургия, 61-68.
- Сурлева А., Д. Илиева, Л. Ангелова, Т. Радойкова. 2023. Геополимерите като алтернативен подход за валоризация на хвостов материал от български източници. Втора национална научно-техническа конференция „Управление и безопасност на хвостохранилища“, 26-28 април 2023, Научно-технически съюз по минно дело, геология и металургия, 92-97.



- Тодорова Е., Г. Дачев. 2023. Прилагане на нормативната уредба в областта на управлението на минните отпадъци, мониторинга и инспектирането на съоръженията за минни отпадъци – основни аспекти и насоки при прилагането. X International Geomechanics Conference, Proceed., 19 – 23 Sept 2022, Varna, Bulgaria, 257-270.
- Тошев Д., Т. Чолаков. 2021. Състояние на хвостохранилищата в България – минало и настояще. Национална научно-техническа конференция „Управление и безопасност на хвостохранилища“, 28 октомври 2021, Научно-технически съюз по минно дело, геология и металургия, 5-14.
- Тошев Д., Т. Чолаков. 2023. Върху управлението и безопасността на хвостохранилищата. Втора национална научно-техническа конференция „Управление и безопасност на хвостохранилища“, 26-28 април 2023, Научно-технически съюз по минно дело, геология и металургия, 1-7.
- Ahmari S., L. Zhang. 2013. Utilization of cement kiln dust (CKD) to enhance mine tailings-based geopolymer bricks. Constr. Build. Mater., 40, 1002–1011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.069>.
- Almeida J., A.B. Ribeiro, A. Santos Silva and P. Faria. 2020. Overview of mining residues incorporation in construction materials and barriers for fullscale application. J. Building Engineering, 101215. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101215>.
- Andrews A., E.F. Nyarko, A.A. Adjaottor, E. Nsiah-Baafi, M. Adom-Asamoah. 2022. Reuse and stabilization of sulphide mine tailings as fine aggregate for construction mortar. J. Cleaner Production, 357, 131971. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131971>.
- Castillo H., H. Collado, T. Droguett, M. Vesely, P. Garrido, and S. Palma. 2022. State of the art of geopolymers: A review. e-Polymers, 22, 108–124. <https://doi.org/10.1515/epoly-2022-0015>.
- Chung H., S. Friedrich, J. Becker & B. Friedrich. 2024. Purification principles and methodologies to produce high-purity tellurium. Canadian Metallurgical Quarterly, 63 (4), 1626-1642. <https://doi.org/10.1080/00084433.2024.2355031>.
- Csavina J., J. Field, M.P. Taylor, S. Gao, A. Landázuri, E.A. Betterton, A.E. Sáez. 2012. A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. Science of the Total Environment, 433, 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.013>.
- Das S.K., S. Kumar, P. Ramachandrarao. 2000. Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles. Waste Management, 725-729. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00034-9).
- Davidovits J. 1991. Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. J. Thermal Analysis, 37 (8), 1633-1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>.
- Deng C., Y. Liu, H. Jian, Y. Liang, M. Wen, J. Shi, H. Park. 2023. Study on the preparation of flame retardant plywood by intercalation of phosphorus and nitrogen flame retardants modified with Mg/Al-LDH. Construction and Building Materials, 374, 130939. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130939>.
- Di Maio F., P.C. Rem. 2015. A Robust Indicator for Promoting Circular Economy through Recycling. J. Environmental Protection, 6, 1095-1104. <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2015.610096>.
- Dudka S., D.C. Adriano. 1997. Environmental Impacts of Metal Ore Mining and Processing: A Review. J. Environmental Quality, 26, 3, 590–602. <https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600030003x>.
- Duxson P., A. Fernandez-Jimenez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, J.S.J. van Deventer. 2007. Geopolymer technology: the current state of the art. J. Mater. Sci., 42, 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.
- Escalante-Garcia J.I., L.J. Espinoza-Perez, A. Gorokhovskiy, L.Y. Gomez-Zamorano. 2009. Coarse blast furnace slag as a cementitious material, comparative study as a partial replacement of Portland cement and as an alkali activated cement. Construction and Building Materials, 23, 2511–2517. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.002>.
- European Commission. 2015. Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM(2015) 614 final.
- European Commission. 2023. Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1>.



- Fontes W.C., J.M.F. de Carvalho, L.C.R. Andrade, A.M. Segadães, R.A.F. Peixoto. 2019. Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to “brown porcelain”. *Construction and Building Materials*, 206, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.052>.
- Garcia C., A. Ballester, F. Gonzalez, M.L. Blazquez. 2005. Pyrite behaviour in a tailings pond. *Hydrometallurgy*, 76, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.07.010>.
- Gartner E. 2004. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete Research* 34, 1489 – 1498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>.
- Ghazi A.B., A. Jamshidi-Zanjani, H. Nejati. 2022. Utilization of copper mine tailings as a partial substitute for cement in concrete construction. *Construction and Building Materials*, 317, 125921. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125921>.
- Hassas B.V., M. Rezaee, S.V. Pisupati. 2020. Precipitation of rare earth elements from acid mine drainage by CO₂ mineralization process. *Chemical Engineering J.*, 399 (1), 125716. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125716>.
- Ince C. 2019. Reusing gold-mine tailings in cement mortars: mechanical properties and socio-economic developments for the Lefke-Xeros area of Cyprus. *J. Cleaner Production*, 238, 117871. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117871>.
- Karhu M., J. Lagerbom, S. Solismaa, M. Honkanen, A. Ismailov, M.-L. Räisänen, E. Huttunen-Saarivirta, E. Levänen, P. Kivikytö-Reponen. 2019. Mining tailings as raw materials for reaction-sintered aluminosilicate ceramics: Effect of mineralogical composition on microstructure and properties. *Ceramics International*, 45 (4), 4840-4848. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.180>.
- Lemougna P.N., et al. (2020). Utilisation of glass wool waste and mine tailings in high performance building ceramics. *J. Building Engineering*, 31, 101383. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101383>.
- Lessard J.D., D.G. Gribbin, L.N. Shekhter. 2014. Recovery of rhenium from molybdenum and copper concentrates during the Looping Sulfide Oxidation process. *Int. J. Refractory Metals and Hard Materials*, 44, 1–6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.01.003>.
- Leszczynska-Sejda K., J. Malarz, D. Kopyto, K. Goc, A. Grzybek, M. Ciszewski, A. Palmowski, G. Benke and K. Pianowska. 2024. Recovery of Zinc and Rhenium for the Production of Zinc Perrhenates. *Crystals*, 14, 725. <https://doi.org/10.3390/cryst14080725>.
- Li X., Na Zhang, J. Yuan, Xinke Wang, Y. Zhang, F. Chen, Yihe Zhang. 2020. Preparation and microstructural characterization of a novel 3D printable building material composed of copper tailings and iron tailings. *Construction and Building Materials*, 249, 118779. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118779>.
- Mafrá C., H. Bouzahzah, L. Stamenov, S. Gaydardzhiev. 2020. Insights on the effect of pyrite liberation degree upon the acid mine drainage potential of sulfide flotation tailings. *Applied Geochemistry*, 123, 104774. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104774>.
- Makuei F.M., G. Senanayake. 2018. Extraction of tellurium from lead and copper bearing feed materials and interim metallurgical products – A short review. *Minerals Engineering*, 115, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.10.013>.
- Mehta A., R. Siddique. 2016. An overview of geopolymers derived from industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 127, 183-198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.136>.
- Nath S.K., S. Kumar. 2013. Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer. *Constr. Build. Materials*, 38, 924–930. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.070>.
- Negris D.D.B., M.M.A.B. Abdullah, P. Vizureanu and M.F.M. Tahir. 2018. Geopolymers and Their Uses: Review. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 374 (2018) 012019. [doi:10.1088/1757-899X/374/1/012019](https://doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012019).
- Nikolov A. 2021. Characterization of geopolymer based on fayalite and metakaolin with standard consistency. *Comptes Rendus L'acad. Bulg. Sci.*, 74, 1461–1468. https://www.proceedings.bas.bg/DOI/doi2021_a_05.html.
- Nikolov A., A. Karamanov. 2022. Thermal Properties of Geopolymer Based on Fayalite Waste from Copper Production and Metakaolin. *Materials*, 15, 2666. <https://doi.org/10.3390/ma1507266>.



- Onisei S.; A.P. Douvalis; A. Malfiet, A. Peys, Y. Pontikes. 2018. Inorganic polymers made of fayalite slag: On the microstructure and behavior of Fe. *J. Am. Ceram. Soc.* 101, 2245–2257. <https://doi.org/10.1111/jace.15420>.
- Peelman S., Z. Sun, J. Sietsma & Y. Yang. 2016. Hydrometallurgical extraction of rare earth elements from low grade mine tailings. *Rare metal technology*, 2016, 17-29. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48135-7_2.
- Rico M., G. Benito, A.R. Salgueiro, A. D'íez-Herrero, H.G. Pereira. 2008. Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. *J. Hazardous Materials*, 152, 846–852. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.050>.
- Samouhos M., A. Peppas, G. Bartzas, M. Taxiarchou and P.E. Tsakiridis. 2021. Arsenic release through refractory gold ore processing. Immobilization and decontamination approaches. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 20:100236. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100236>.
- Silva P.D., K. Sagoe-Crenstil, V. Sirivivatnanon. 2007. Kinetics of geopolymerization: role of Al_2O_3 and SiO_2 . *Cem. Concr. Res.* 37, 4, 512–518. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.003>.
- Scrivener K.L., R.J. Kirkpatrick. 2008. Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 38, 128–136. [doi:10.1016/j.cemconres.2007.09.025](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.025).
- Solismaa S., A. Ismailov, M. Karhu, H. Sreenivasan, M. Lehtonen, P. Kinnunen, M. Illikainen and M. L.a Raisanen. 2018. *Bull. the Geological Soc. Finland*, 90 (1). [doi:10.17741/bgsf/90.1.002](https://doi.org/10.17741/bgsf/90.1.002).
- Song J., C. Peng, Y. Liang, D. Zhang, Z. Lin, Y. Liao, G. Wang. 2021. Efficient extracting germanium and gallium from zinc residue by sulfuric and tartaric complex acid. *Hydrometallurgy*, 202, 105599. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105599>.
- Tian Z., Q. Li, J. Hou, L. Pei, Y. Li, S. Ai. 2015. Platinum nanocrystals supported on CoAl mixed metal oxide nanosheets derived from layered double hydroxides as catalysts for selective hydrogenation of cinnamaldehyde. *J. Catalysis*, 331, 193-202. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2015.08.020>.
- Yang, K.-H., J.-K. Song, and K.-I. Song. 2013. Assessment of CO_2 reduction of alkali-activated concrete. *J. Cleaner Production*, 39, 1, 265-272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.001>.
- Yusuf M.O., M.A.M. Johari, Z.A. Ahmad, M. Maslehuddin. 2014. Influence of curing methods and concentration of NaOH on strength of the synthesized alkaline activated ground slag-ultrafine palm oil fuel ash mortar/concrete. *Constr. Build. Materials*, 66, 541–548. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.070>.
- Van Deventer J.S.J., J.L. Provis, P. Duxson. 2012. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, 29, 89–104. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.009>.
- Wang F., H. Liu, L. Yan. 2023. Construction of layered double hydroxide composites derived from tungsten tailing particles for simultaneously enhancing fire protection and anti-ageing properties of intumescent fire-resistant coatings applied in wood surface. *J. Building Engineering*, 77, 107409. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107409>.
- Xiao W., D. Zhou, Z. Wang, T. Qi, Y. Lin, G. Li, Y. Li, D. Wang. 2024. Selective extraction of rare earth elements and cobalt from iron residue containing rare earth using mechanical activation and reductive leaching method. *Separation and Purification Technology*, 337, 126447. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126447>.
- Zeng Y., J. Zou, C. Liao, F. Liu, X. Zhou. 2022. Selective separation and recovery of selenium from copper anode slime by compound leaching followed by sulfate roasting. *Minerals Engineering*, 186, 107749. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107749>.



ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ ЧЕЛОПЕЧ – НАШИЯТ ПОДХОД КЪМ ПОСТИГАНЕ НА СЪОТВЕТСТВИЕ С ГЛОБАЛЕН ИНДУСТРИАЛЕН СТАНДАРТ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА МИННИ ОТПАДЪЦИ

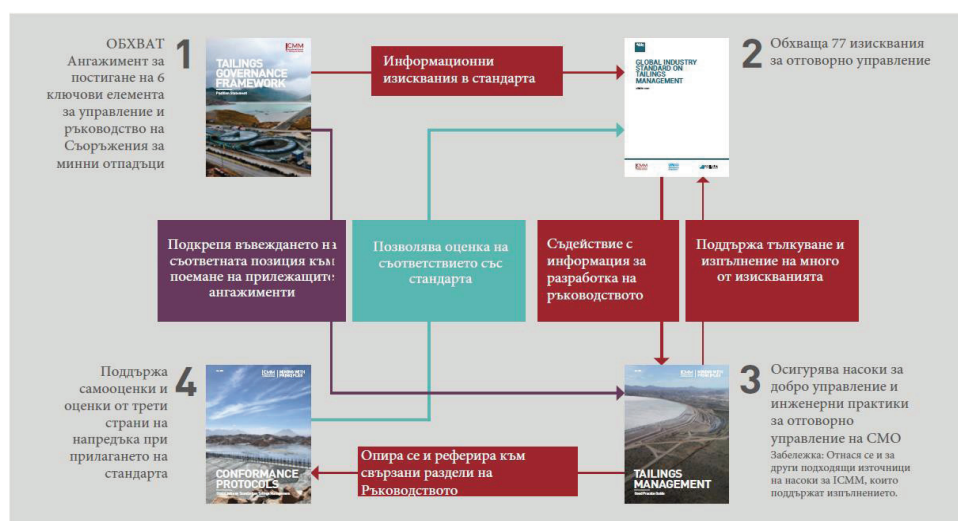
инж. Людмил Стоянов Кантарджиев, Lyudmil.Kantardjiev@Dundeeprecious.com

РЕЗЮМЕ

Дънди Прешъс Металс постигна значителен напредък с управлението на хвостохранилище Челопеч в съответствие с високите изисквания на „Глобален индустриален стандарт за управление на съоръжения за минни отпадъци“. През последните четири години бяха приведени в съответствие значителен обем правила и норми за управление, признати в световната практика, които продължиха надграждането на установените в дружеството, високи технически и технологични стандарти. Основен фокус в усилията за постигане на целите са специфичните изисквания покриващи всички аспекти на заобикалящата среда - интегриране на социални, екологични, местни икономически и технически съображения за съоръженията, обединявайки целите за нулево въздействие на минния отпадък върху хората и околната среда.

Въведение

Глобалният индустриален стандарт за управление на съоръжения за минни отпадъци е първият комплексно разработен стандарт, който умишлено поставя висока летва с насоки и изискванията към минната промишленост. Първата публикация на Стандарта е през 2020 г. в подкрепа на безопасното управление на Съоръжения за минни отпадъци (СМО), свързани със събитията, с катастрофални последствия в предходните години. Основно изискване е да се сведе до минимум рискът от всички вероятни предпоставки за значителна авария през всички фази от жизнения цикъл на СМО. Целта на това изискване е да потвърди, че всички потенциални модели за катастрофални инциденти са взети предвид при оценката на риска и че свързаните опасности и последствия са подходящо контролирани, за да се сведе до минимум рискът, придружен от всички вероятни форми на негативно въздействие.

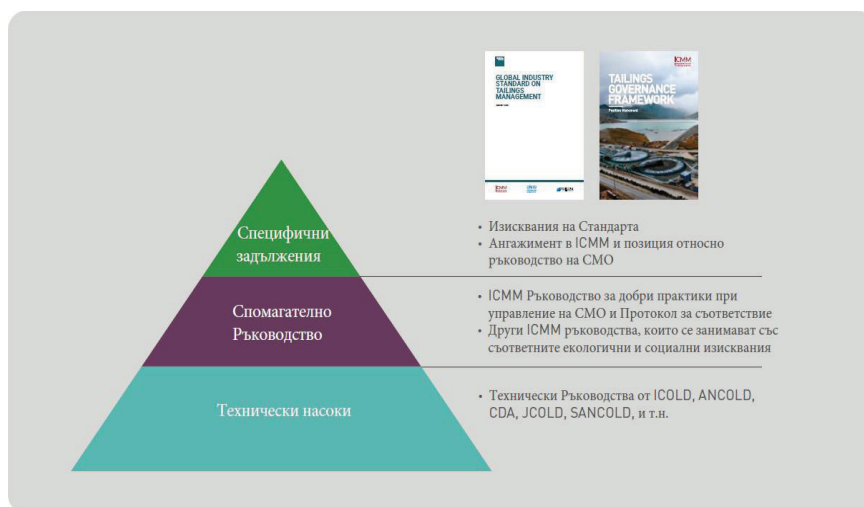


Фиг.1 Връзка между ключови документи

Стандартът се състои от шест тематични области, 15 принципа и 77 подлежащи на одит изисквания и обхваща нормите и практиките през целия жизнен цикъл на съоръжението за минни отпадъци (СМО).



Съвместно с Ръководството за добри практики при управление на СМО, издадено от Международния съвет по минно дело и метали (ICMM) изискванията се фокусират към идентификация на всички вероятни предпоставки за авария, в резултат, от което да бъдат приложени стабилни контроли за управление на риска, като превенция срещу причиняване на негативни последици.



Фиг.2 Детайлизиране на нивата между Специфичните задължения, Спомагателно ръководство и Технически насоки

Основно изискване на Глобалния индустриален стандарт за управление на съоръжения за минни отпадъци (GISTM) е да се сведе до минимум рискът от всички вероятни форми на нарушения в конструкцията и инциденти свързани със съоръжението и прилежащата инфраструктура във всички фази от жизнения цикъл на СМО. Целта на това изискване е да потвърди, че всеки потенциален режим на значителна авария е взет предвид, при оценката на риска и свързаните с него критични последици са подходящо контролирани. Основна насока е минимизиране на свързаният риск с всички вероятни форми на разрушаване.

Идентифицирането и адресирането на всички вероятни форми на риск от нарушения в конструкцията на съоръжението и прилежащата инфраструктура, е от съществено значение при разработването на устойчиви системи за управление с превантивна цел. Достоверността на потенциалните вероятности за нарушения обикновено се оценява спрямо стандарти за незначителност и летвата за демонстриране на незначителност трябва да бъде поставена много високо. Премахване вероятност от потенциален риск, свързан с нарушение в целостта на СМО, без достатъчна строгост може да доведе до неадекватни: надзор на проектирането, контрол на качеството на строителството, спазване на оперативните изисквания или наблюдение и мониторинг, могат да се считат за незначителни, ако вероятния модел на разрушаване бъде премахнат от разглеждане. Оценка модела на разрушаване трябва да вземе предвид не само резервния капацитет на съоръжението при „екстремно“ натоварване, но и коефициент на несигурност поради недостатъчна изученост, както и неправилно характеризирани материалите, числени модели, които не обхващат напълно поведението на строителните почви, конструктивни дефекти, изчислителни грешки, неспазване на оперативните процедури, други човешки грешки и присъщата несигурност, свързани с геотехническото инженерство.

Реализацията на проекти, използващи множество слоеве за защита, базирани на цялостни проучвания на обекта, които приемат консервативни и допълващи се инструменти и методи, строг контрол на качеството на строителството и цялостен мониторинг на ефективността, хвостохранилищата и съоръженията за минни отпадъци могат да постигнат много високите нива на безопасност и надеждност, които се изискват от цялата критична инфраструктура. За това



правилното идентифициране и управление на вероятните режими на повреда са от съществено значение.

Дънди Прешъс Металс Челопеч (ДПМЧ) управлява хвостохранилище Челопеч, за което самостоятелно декларира, съответствие с Глобален Стандарт (GISTM), за много високи до екстремни последствия в случай на значителни нарушения в конструкцията. Този Доклад описва подходът, възприет от ДПМЧ за внедряване на Глобален Стандарт и рамката за привеждане в съответствие, вътрешни и външни участници, предизвикателства и уроци, извлечени от техническите и нетехническите перспективи, обобщение на констатациите и възможности за следващи стъпки. ДПМЧ подкрепя инициативата за непрекъснато подобряване управлението на хвостохранилище Челопеч и прилагането на Глобален Стандарт. Целта на този Доклад е да допринесе за базата от знания в индустрията относно добрите практики за управление на хвостохранилищата и да сподели наученото и потенциалните възможности за непрекъснато подобряване, идентифицирани чрез опита на ДПМЧ с прилагането на Глобалния стандарт за управление на СМО.

Обзор на управлението на Хвостохранилище Челопеч

Въпреки, че не членува в Международния съвет по минно дело и метали (ICMM), ДПМ приема голяма част от управлението на хвостохранилище Челопеч, да бъде в съответствие с високите изисквания на международните стандарти и добри практики. Преди първата публикация на Глобален Стандарт, отправна точка за управление на хвостохранилището са техническите ръководства на „Международната комисия по големи язовири“ (ICOLD), „Канадската асоциация по язовири“ (CDA) и „Най-добрите налични техники за управление на флотационни и скални отпадъци в минните дейности“. Подходът на ДПМ към привеждането в съответствие с Глобален Стандарт е с начало към създаване на одобрена политика за управление на хвостохранилища и преразглеждане на вътрешен Стандарт за управление на съоръженията за минни отпадъци, уточнявайки необходимостта от съответствие с Глобалния стандарт. В съответствие с него се създават различни екипи за ръководство, управление и оценка на резултатите. Въведени са позиции на вътрешна и външна оценка, за което спомага организацията на „Независим съвет за оценка на СМО“ (ITRB), „Инженер по записите“ (EoR), Отговорен Директор (AE) и Отговорен инженер СМО (RTFE), чието участие е определено като ключово в изискванията на Глобален Стандарт.

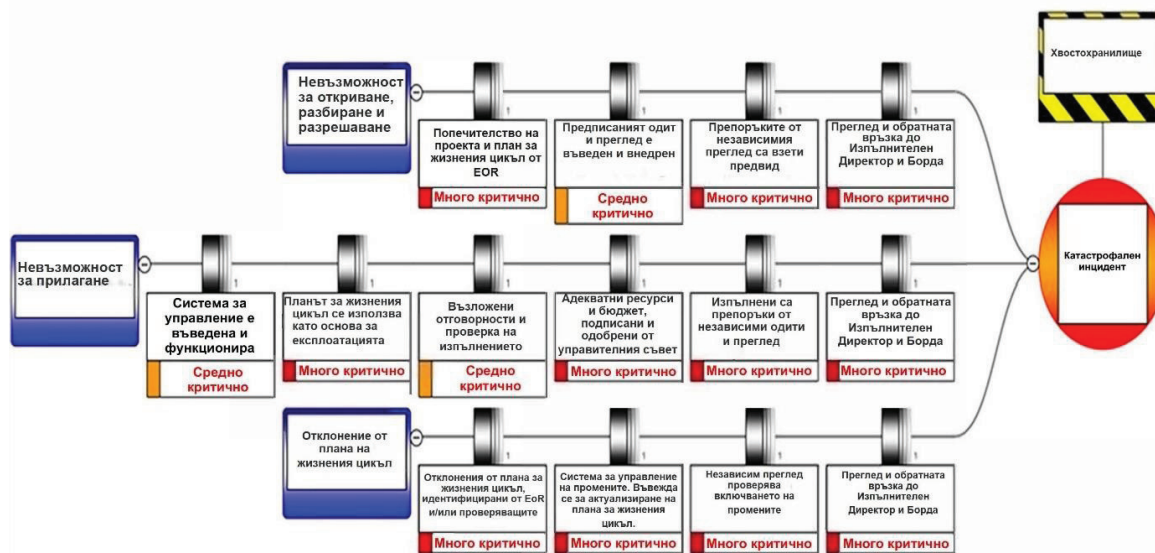
Привеждането в съответствие на стари хвостохранилища представлява значително техническо предизвикателство, тъй като съоръжението е на възраст, която превишава 50 години и през етапите на собственост и експлоатация са действали различни норми. Много от съществуващите технически документи са съвместими с целите на GISTM, но не са във формат, който да позволява лесна проверка или одит. Характеристичните проучвания и доклади, проектните документи, строителните записи и детайли често са ограничени по обхват, частично завършени или недостъпни. Въпреки че хвостохранилището разполага с достатъчно подробности в базата данни, за да се определи комплексно състоянието на съоръженията, данните не бяха във форматите, посочени в Глобалния Стандарт. При разглеждане на доказателствата, необходими за демонстриране на съответствие, стана необходимо да се вземат решения кога да се проведат допълнителни характеристики, да се завършат допълнителни инженерни проучвания и, когато е необходимо, корекция в проекти, като същевременно се отчита наличността на необходимите ресурси.

Първи преглед за съответстви е и налични и сторически данни (2021)

Фокус в началния преглед е съществуващо положение, свързано с налична техническа и нетехническа информация, ръководство и управление на хвостохранилище Челопеч, съществуващи процедури за експлоатация и практики за мониторинг и управление на риска. За целите на Стандарта е сформирал Независим съвет от международни експерти с дългогодишен опит в проектиране, одитиране и експлоатация на хвостохранилища. Прегледът е извършен през месец юни 2021 година, след като Независимият съвет е запознат с възприетите процедури за ръководство и



управление на хвостохранилището и текущото състояние на съоръженията. На работна среща са обсъдени първите стъпки към оптимизация на ръководството и управление, свързани с постигане съответствие, както оценката акцентира върху управлението и технически предизвикателства, свързани с допълване на процедурите. Независимия съвет представя Доклад с препоръки и пътна карта за превенция на катастрофален инцидент с влияние върху всички аспекти в жизнения цикъл на съоръжението.



Фиг.3 Схема за превенция на катастрофален инцидент

Втори преглед за съответствие (2022)

Основен аспект на Техническия съвет през втория отчетен период е фокусиран към дефиниране ролите и отговорностите на всички участници в ръководство и управление на Проекта и корекция в технически несъответствия. Въвежда се изискване за проверка съвместимостта на Проекта с последното издание на международните ръководствата за оперативно управление и контрол, изисквания за устойчивост на външни въздействия и мониторинг. Допълнителна препоръка е насочена към актуализация и валидиране на всички съществуващи документи за оперативен контрол и мониторинг. Независимият съвет разглежда в детайли процедурите за изпълнение и мониторинг компонентите на околната среда и излиза с препоръки за актуализация и допълване на провежданите анализи за ранно прогнозиране и актуализация на съществуващи проекти за закриване и рекултивация.

Трети преглед за съответствие (2023)

Направлението в което акцентира работната среща е насочено, основно към корекция на изпълнени препоръки от предходен етап, пояснения и необходимост от валидиране. Важен аспект на третия преглед е въвеждане на корекции и актуализация на аварийния план, критериите за проектиране и разработка на Доклад базиран на цялостния проект. Препоръките се изпълняват съвместно с Консултанта, определен в Глобалния стандарт като Инженер по записите (EoR).

Четвърти преглед за съответствие (2024)

Извършена е комплексна оценка по изпълнение на препоръките на Независимия съвет с представени изводи за постигнат значителен напредък в изпълнение на критични и второстепенни препоръки. Независимият съвет потвърждава съответствие с приоритетната част от изискванията на



Глобален Стандарт и коментира необходимост от въвеждане на незначителни корекции.

Протоколите за съответствие с Глобален Стандарт определят насоки за измерване на съответствието, а първоначална оценка на пропуските в работата по изпълнението до момента беше проведена от началото на 2021 г. от екипа за управление на хвостохранилищата на ДПМЧ.

Основните критерии издадени от експертите се формулират с шест критични контроли за оценка на статуса, представени в следващата таблица:

КОНТРОЛ	ОПИСАНИЕ	КРИТЕРИИ
СС #1	Назначен е Консултант(Инженер по записите). Налице е план за жизнения цикъл (TLFP) и Проект. Планът е актуален.	Назначен е Консултант. Компетенциите и ефективността на Консултанта са проверени и потвърдени. Проектът и Планът за жизнения цикъл на съоръжението са налични и актуални. Изисква се изпълнение (проектно намерение) отразено в Ръководството за Експлоатация
СС #2	Планът за проектиране и жизнен цикъл е прегледан от Независимият съвет и обхваща всички ключови рискове.	Проектът и Планът за жизнен цикъл на съоръжението са прегледани от Независимият съвет и са потвърдени като адекватни.
СС #3	Експлоатацията съответства на плана за жизнения цикъл. Не са установени несъответствия, които повишават риска. Потвърдено от Консултанта и Независимия съвет.	Съответствие с проектните критерии (съгласно Доклада за основата на Проекта), потвърдено от Консултанта Съответствие с Ръководството за експлоатация и Аварийен план, потвърдено от Консултанта План за действие и реакция е представен на Независимия съвет.
СС #4	Разпределени са отговорности и са разпределени адекватни ресурси и бюджет. Потвърдено от Консултанта и Независимия съвет.	Официализирани са назначения за Отговорен Директор, Консултант и Отговорен инженер. Назначенията съответстват на стандарта за управление. Разпределен е бюджет. Напредъкът по изпълнението на проектите и оперативното изпълнение са потвърдени от Консултанта.
КОНТРОЛ	ОПИСАНИЕ	КРИТЕРИИ
СС #5	Съществени промени, идентифицирани, оценени и включени в плана за жизнения цикъл от Консултанта. Потвърдено от Независимия съвет.	Няма съществени промени в процес на изпълнение, или Съществени промени се управляват чрез системата за управление на промените. Промените са приключени чрез включване в Доклада за основата на Проекта и проекти, реализирани с оперативни промени, включени в Ръководството за експлоатация.
СС #6	Препоръките на Независимия съвет са внедрени и включени в жизнения цикъл	Заседанията на Независимия съвет се провеждат в съответствие с графиката. Препоръките от прегледите са включени в системата за въпросследяване и са приключени в рамките на договорените срокове.

Табл.1 Система за оценка на статуса и критичен контрол

Акцент към безопасността

Съответствието само с Глобален стандарт, въпреки че предоставя по-задълбочено разбиране на състоянието на хвостохранилище Челопеч, не покрива напълно всички аспекти на безопасността. Без



добри оперативни системи и практики, безопасността съоръженията може да бъде компрометирана. Поради това е поставен значителен акцент върху гарантирането, че нашата документация е подходяща за целта; нашите служители са добре обучени; и рисковете са добре разбрани и съобщени от оперативна гледна точка.

Като международна компания ДПМЧ се ангажира с поддържането на съответствие с Глобалния Стандарт. Ако разгледаме как изглежда устойчивото съответствие със Стандарта на оперативно ниво, то изисква промяна в работата, предприета за постигане и поддържане на съответствие, към работа, необходима за внедряването му. Въпреки че разликата е малка, внедряването на Стандарта изисква всички области на организацията, както на оперативно, така и на корпоративно ниво, да работят заедно и да мислят с проактивно и ангажирано мислене, водено от подобрения в начина, по който функционира.

С напредване изпълнението на изискванията и приближаване към постигане на пълно съответствие с Глобален Стандарт, ангажираният екип на ДПМЧ премина от поставяне на съответствието с Глобален Стандарт като цел, към гарантиране, че той ще стане част от начина, по който работим. Това включва гаранция, че тези междофункционални взаимоотношения се поддържат и укрепват със системи, които да подкрепят и установяват постоянна комуникация за изпълнение на ангажиментите. Съвкупността от поетите ангажименти включва гаранции, че всяка документация, свързана с функционирането на хвостохранилище Челопеч, е в съответствие с предприетите действия, особено по отношение на Ръководството за експлоатация и мониторинг на хвостохранилището, План за управление на водите, План за действие и реагиране, както и План за реагиране при извънредни ситуации. Резултатът от това подкрепя гаранцията на ДПМЧ, че всички ще се приберем въщи здрави и безопасно, което е неразделна част от начина, по който работим.

Поуки и резултати

Внедряването на Глобален Стандарт в рамките на ДПМЧ имаше и все още има някои предизвикателства и поуки. Те включват:

- Стандартът се разглежда като проект, който трябва да бъде реализиран и след завършването му ние сме в съответствие с изискванията в дългосрочен план. Полагат се и са полагани значителни усилия за насърчаване и обучение на заинтересованите страни, за да разберат, че постоянният ангажимент към Глобален стандарт изисква постоянни усилия за поддържане на съответствие в бъдеще.
- Положени са усилия за стандартизиране на ключовата документация и изискванията за отчетност, но погледнато назад, това би се облагодетелствало от по-бавно първоначално внедряване, което беше въведено поетапно, за да се съобрази с поставените цели на ДПМЧ.
- Плановите за управление и документацията, изготвени в съответствие с изискванията на Глобалния стандарт, не винаги са били използвани ефективно от експлоатацията за подобряване на базата данни за хвостохранилището или за подпомагане на подобренията в оперативната безопасност.
- Ефективно управление на промените и ранна намеса в процеса за управление на промените, се даде възможност за продължаващо внедряване на Стандарта. Поради продължаващите промени в структурата в оперативната среда, ефективното предаване на задачи между персонала изисква ръководството да осигури достатъчен трансфер на знания между отделните лица и запознаване с продължаващото въвеждане на иновативни системи.

Положителни резултати

Внедряването на Глобален стандарт доведе до много положителни резултати, които включват:

- Централизиране на нашата база знания за хвостохранилището, с цел да се осигури лесен достъп до цялата документация. Това позволява информацията да бъде преглеждана от всички отдели на дружеството.



- По-добро разбиране на риска, свързан с хвостохранилище Челопеч, и подобрения в начина, по който се управлява този риск.
- По-подробно и реално наблюдение на хвостохранилището, с редовно докладване на по-голяма група заинтересовани страни относно текущото състояние.
- Оперативна интеграция на служителите в по-широк екип, за да бъдат поддържани и утвърдени взаимоотношения, което е допринася за подобрене на процесите за вземане на решения.
- Идентифициране на области, които изискват допълнително внимание в бъдеще и къде можем да продължим да подобряваме оперативната дейност, за да намалим рисковете, свързани с нарушение в целостта на съоръженията и инциденти.

Заклучение

Екипът на ДПМЧ все още напредва по пътя на обучение, за да обедини всички области на оперативните функции и да постигне внедряване и поддържане на съответствие с Глобален Стандарт. Съответствието на пръв поглед може да се постигне без сътрудничество, но текущата поддръжка и ефективност не могат. За ДПМЧ все още има път, по който да се извърви, за постигане нивото на сътрудничество и плътността на комуникацията, с осигуряване на обичайно бизнес мислене и постепенна интеграция в оперативната система, което е напълно постижимо. Въпреки това, фокусът върху напредъка за поддържане на ефективно внедряване е гаранция, че изготвената документация е подходяща за целта. Където все още съществуват пропуски, ще се работи за подобряване на тези области, за да се осигури съгласуваност.

Въпреки че стандартизираният подход е предпочитан за по-лесно управление и съгласуваност в минните компании, внедряването на Глобален стандарт трябва да бъде специфично за всяка една Експлоатационна единица. Изпълнение на изискванията на Стандарта може да бъде постигнато в зависимост от локалните условия на всяко Съоръжение за минни отпадъци и не може да бъде универсален подход.

Библиография

- ICMM. 2016. Tailings Governance Framework. London: International Council of Mining and Metals.
- ICMM. 2020. Global Industry Standard on Tailings Management. London: International Council of Mining and Metals.
- ICMM. 2021a. Tailings Management Good Practice Guide. London: International Council of Mining and Metals.
- ICMM. 2021b. Conformance Protocols Global Industry Standard on Tailings Management. London: International Council on Mining and Metals.

УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ - СТАНДАРТ ЗА КАЧЕСТВЕН ЖИВОТ

ГОДИНИ
50 ЕЛАЦИТЕ МЕД
25 ГОДИНИ В ГРУПА ГЕОТЕХМИН



УПРАВЛЕНИЕ

с. Мурково 2086, Тел: (02) 923 77 21,
e-mail: office@ellatzite-med.com

РУДОДОБИВЕН КОМПЛЕКС

гр. Етрополе 2180, Тел: (02) 923 76 72,
e-mail: mine.complex@ellatzite-med.com

ОБОГАТИТЕЛЕН КОМПЛЕКС

с. Мурково 2086, Тел: (02) 923 77 29,
e-mail: flotation.complex@ellatzite-med.com

