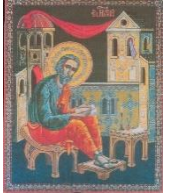




**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ  
ИНСТИТУТ ПО РОБОТИКА**

България, София 1113, ПК 79, ул. "Акад. Г.Бончев", Бл.2,  
Почетен член на "Съвета на Европейската научна и културна общност"



**маг. инж. Мартин Лъчезаров Ралчев**

**ЕМИСИЯ И СЕНЗОРНА РЕГИСТРАЦИЯ НА  
МИКРОЧАСТИЦИ В НЕХОМОГЕННИ СТРУКТУРИ  
ПРИ ЕДНООСНИ ДЕФОРМАЦИИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
на  
**ДИСЕРТАЦИЯ**

за присъждане на образователната и научната степен  
**"ДОКТОР"**

Професионално направление

5.2 Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност „Елементи и устройства на автоматиката и  
изчислителната техника“

Научен ръководител

проф. д-р Сия Лозанова

София 2024 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на разширено заседание на секция „Сензорни и измервателни технологии в роботиката и мехатрониката” към Института по роботика при БАН.

Докторантът работи в ИР-БАН, ул. „Акад. Г. Бончев”, бл. 2, София. Той е зачислен в задочна форма на докторантура в секция „СИТРМ” при ИР-БАН.

Изследванията по дисертационния труд са извършени в Института по роботика – БАН и Националния Център по „Квантова комуникация, интелигентни системи за сигурност и управление на риска QUASAR” при ИР-БАН.

Дисертацията съдържа: Въведение, Пет глави, Научно-приложни приноси, Литература, 68 фигури, 3 таблици и е развит на 114 страници.

Материалите по защитата са на разположение на интересующите се в канцеларията на ИР-БАН, блок 2, стая 406.

Автор: маг. инж. Мартин Лъчезаров Ралчев

Заглавие: „Емисия и сензорна регистрация на микрочастици в нехомогенни структури при едноосни деформации”

## I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

---

Дисертационният труд обхваща разработването и приложението на иновативни методи и технологии на основата на новоткритото явление - Генерация на микро- и наночастици в нехомогенни структури при едноосни деформации. На негова основа са реализирани инженерни методи и системи за превенция на разрушения в критичната инфраструктура.

**Научната област**, третирана в настоящото интердисциплинарно изследване е в обхвата на сензориката, и по-конкретно закономерността „Емисия на частици при едноосно налягане на твърдотелни нехомогенни структури”. Експериментално е установен неизвестен по-рано ефект в нехомогенните твърдотелни системи - скали и бетони, заключаващ се в генерация на микро- и наночастици при въздействие на високи едноосни натоварвания.

### **Актуалност на проблема**

Последните десетилетия, предвид зачестилите природни бедствия и нарастващата им непредсказуемост, в научните изследвания приоритетни са процесите и динамиката на земната кора. Подобряване на съществуващите и създаването на нови сензорни методи, технологии, включително роботизирани системи с елементи на изкуствен интелект за диагностика и контрол на състоянието на скалните образувания и бетонните композити са от стратегическо значение. За установяване на деформационния статус и разкриване на механизмите за възникване на предкритичните състояния, съществуват голям брой измервателни сензорни елементи, компоненти, устройства и регистрираща апаратура. Независимо от прогреса на тези технологии, налице са някои актуални проблеми, нерешени в достатъчна степен от теорията и практиката.

*На първо място* това е характерният недостатък от необходимостта за отделните етапи от развитието на предразрушителния процес да се използват разнородни методи и устройства. Тази специфика е резултат от нерегулярната структура на скалите и бетоните, и при динамични въздействия процесите в тях са необратими и непрогнозируеми. Физикохимичното им поведение се отличава съществено от това на металите и полупроводниците, които са с регулярна кристална решетка. Приложението на повече от един подход и устройство за изследване и контрол на състоянието на крупни строителни съоразения води до съществени грешки, като крайната оценка на резултатите изисква намеса на субективния фактор.

*На второ място* е отсъствието на единен измервателен метод на различните етапи от развитието на разрушителните процеси, който вграден в апаратурата да предоставя интегрална информация за сложните геодинамични явления, инициращи критични ситуации. Специално ще отбележим в аванс, че решението стана случайно. Беше установено експериментално неизвестно явление в нехомогенните системи - скали и бетонни композити, заключаващо се в генерация на нано- и микрочастици при въздействие на високи едноосни деформации. Ефектът е със съществена практическа значимост за реализиране на роботизирани платформи и сензорни системи от ново поколение. Постоянният мониторинг на частиците може да служи за ранно оповестяване и прогнозиране на предаварийни състояния. Сензорната част преобразува с висока точност и чувствителност неелектричната информация (количеството генерирани микрофракции от скалите и бетонните композити при налягане) в електронна информация. Те определят интегрален индикатор за деформационните предразрушителни фази.

*На трето място* е отсъствието на последователна теория на нехомогенните структури в отличие от регулярните (кристалните). Все още отсъства адаптирането на квантовомеханичното уравнение на Е. Шрьодингер за този клас системи. Проблемът най-вече е в необратимостта на деформационните процеси в нерегулярните обекти, което изисква отличен от известния математичен апарат. Ето защо преодоляването на този съществен проблем се постига на този етап с качествени интерпретационни модели, подкрепени с максимално възможен брой експериментални резултати. В рамките на дисертационното изследване са анализирани процесите на образуване на микро- и наночастици при прилагане на едноосни напрежения върху различни по своя тип нехомогенни материали, идентифицирайки възпроизводимите ключови механизми, които могат да допринесат за превенцията на структурни разрушения. В настоящото изследване се съдържат оригинални методи за контрол и мониторинг на образуването на частици.

Информацията и резултатите, представени в дисертацията са опити да се дадат конкретни отговори на тези и други сходни проблеми, формулирани от логиката на развитието и приложението на ефекта „Емисия на микро- и наночастици при едноосни деформации на нехомогенни структури”. Изследванията в настоящия труд са осъществени в Института по роботика при БАН и Националния център за компетентност „Квантова комуникация, интелигентни системи за сигурност и управление на риска” - Quasar към ИР.

## **Цел и задачи на дисертационния труд**

Предметът на изследване в дисертационния труд са изброените по-горе нерешени въпроси, разгледани в тяхното единство.

Ключовата идея на дисертацията е изследване на установения ефект на емисия на частици от повърхността на нехомогенните скални системи от територията на страната. На основата на това явление е предложен иновативен интегрален метод за оценка на напрегнатото състояние на тези нееднородни структури. Предполага се, че количеството и характеристиките на освободените при едноосна деформация микрофракции могат да служат като индикатор за вътрешните напрежения, акумулираната потенциална енергия и структурната цялост на скалните масиви. Чрез емисиите на тези микро- и наноразмерните частици се разкрива възможността за ранно предупреждение и превенция на предстоящи разрушения в критичната инфраструктура. Тези сензорни системи гарантират по-точна и ефективна оценка на рисковете от срутвания и съществено подобряват стратегиите за управление на безопасността на инженерното проектиране с минимизиране ролята на субективния фактор.

Основната цел, която се очаква да бъде постигната е разкриване на закономерностите в новооткритото явление, възникващо при едноосно натоварване на скали. Изследването се фокусира върху изясняване на първопричините и механизмите, които довеждат до генериране на фракциите при деформации. Чрез анализът на тези комплексни механизми, експериментите имат за цел да подобрят методите за прогнозиране и управление на рисковете от предразрушителните и разрушителните процеси в критичната инфраструктура.

Основните задачи, които следва да се решат за постигане на така формулираната цел се свеждат до:

1. Да се анализират скалните проби при едноосна деформация и свързаното с това образуване на фино диспергирани минерални частици в нано- и микроразмерния диапазон като се изясни изменението на техния интензитет в зависимост от стойността на натоварването.

2. Да се определи влиянието на типа скали от различни региони на България върху интензитета и състава на образуваните микро- и наночастици.

3. Да се установи функционалната връзка и зависимостите между емисията на частиците, нивото на деформация на скалните структури, площта на образците и др.

4. Да се проектират, реализират и изследват иновативни инженерни решения за получаване на интегрална информация за състоянието на скалните системи.

Тези задачи са изключително важни за разработването на иновативни методи и системи за прогнозиране и управление на рисковете от разрушенията в условията например на сеизмична активност, минната индустрия, състоянието на язовирните стени и др., предоставяйки научни данни за поведението на скалните материали под напрежение. Планира се разработването на нови екологични подходи за използване на тези частици в различни области, включително в сензориката, материалознанието, роботиката, превенцията на промишлените съоразения и др.

## **Изследователска методология и апаратура**

Използваната изследователска методология в рамките на дисертационния труд обхваща широк спектър проучвания, разработени от нас за детайлно изясняване динамиката от деформациите на скалните масиви. Тези подходи включват:

1. Анализ на съществуващите методи за оценка и наблюдение на напрегнато-деформираното състояние на скалните масиви. Фокусът е върху различни механизми за интерпретация на напреженията и деформациите в нехомогенните системи.

2. Лабораторна апаратура за едноосно деформиране на скални структури. Това позволява директно наблюдение на процесите, които се развиват в пробите под натиск, включително образуването на фино диспергирани минерални частици от повърхността им. Експерименталните изследвания в лабораторна среда са на основата лазерната спектрометрия. Този подход дава възможност за високоточно измерване на емисиите от фино диспергирани частици едновременно в различни размерни обхвани, предоставяйки по-детайлна информация за тяхната структура и състав.

3. Експериментални изследвания на процесите на деформация и разрушаване на скалните образования. Тези данни спомагат за изясняване на механизмите на разрушаване на пробните тела от различни видове скали в България.

## **Научна новост**

Изследванията съдържат няколко иновативни аспекта, допринасящи за разбирането и анализа на процесите, свързани с разрушаването на скалните структури при едноосно компресиране в контекста на новото явление:

1. Експериментално установяване на механизма за емисия на минерални частици от повърхността на структурите в типичния за явлениято диапазон 0.3  $\mu\text{m}$  - 5.0  $\mu\text{m}$ . Основно в тези размерни обхвани е установена новата закономерност. Тя позволява по-задълбоко разбиране на микроскопичните и нано-процеси, които се развиват при натиск върху

нехомогенните системи, и представлява индикатор за напрежението в материала и е критерий за акумулираната потенциална енергия в структурите.

2. Съществено нарастване емисията на частици с увеличаване на деформацията до ниво, предшестващо разрушаването на образците. Този процес предоставя възможност за разработване на нови методи за ранно предупреждение за критичните състояния в скалните масиви, което е от съществено значение за предотвратяване разрушителните състояния в инфраструктурата.

3. Получаване на количествени оценки на емисията на частици в зависимост от ефективните напрежения на натиск и относителното ниво на натоварване за различни видове геоматериали. Тези оценки са ценен ресурс за сензориката и инженерната практика, тъй като позволяват прогнозиране на поведението на материалите при натиск.

4. Новата закономерност надгражда възможностите за моделиране и анализ на деформационните процеси в скалните системи, позволявайки по-точни анализи за поведението им при различни условия на натоварване.

Тези научно-приложни пробиви не само обогатяват теоретичната база на сензориката, материалознанието и геоинженерството, но също така са в основата на разработването на нови технологии и методи за наблюдение, анализ и управление на риска в различни области на инфраструктурата.

## **Достоверност и надеждност на измерванията**

Надеждността и валидността на представената информация, научните експерименти, заключенията и препоръките в този труд се определят от прилагането на цялостна логически обоснована методология на работа. Тя включва използването на съвременни изследователски подходи, устройства и инструментариум. Така се доказва висока степен на повторяемост и точност на измерванията, позволявайки детайлно наблюдение на процесите, които се изследват. Това допринася за обективността и надеждността на получените резултати. Валидността на заключенията е подкрепена от научно обосновани практики за събиране и интерпретация на данните. В съпътстващите изследването публикации са описани отделните етапи на експериментите с цел други учени да са в състояние да се включат, доразвият и надградят тази тематика. *Данните подлежат на критичен преглед и могат да бъдат верифицирани чрез независими процедури.* Предложените оригинални методи и получените резултати в дисертационния труд се характеризират с висока степен на надеждност и приложимост в реални инженерни ситуации.

## **Значимост и практическа ползност на дисертационното изследване**

Практическата стойност на резултатите от дисертацията се проявява основно в провеждането на целенасочени експериментални проучвания, които установяват закономерности и свойства, регулиращи емисиите на фино диспергираните минерални частици при едноосно компресиране на скалните системи. Резултатите в хода на тези изследвания предоставят многообразие от възможности за приложения в различни структуроопределящи области като минната индустрия, високото и антисейзмичното строителство, усвояване на подземните пространства включително метрото, своевременно

предотвратяване на свлачища и срутища преди настъпване на дезинтеграция на земните основи, контролиране състоянието на язовирни стени, мостове, виадукти и др., формирайки научна основа за разработване на нови методи за мониторинг.

Резултатите и изводите могат да бъдат използвани за създаване на принципно нови конструкции, технологични решения, схеми и методи, които да допринесат за прогнозирането на катастрофални явления, свързани с неконтролирано разрушаване на скалните масиви. Това включва разработването на системи за ранно предупреждение, които могат да предотвратят значителни материални загуби, осигурявайки своевременна информация за вероятността от срутвания, свлачища или други форми на структурна дезинтеграция в критичните зони.

Практическата значимост на изследването вече не е само в обхвата на лабораториите, но е в основата на реални инженерни решения, които укрепват безопасността на инфраструктурата и повишават ефективността на управлението на природните ресурси. Емисията на частици при едноосни деформации предлага иновативни решения за дългосрочни и устойчиви стратегии за целите на екологичното инженерство и свързаните с него индустрии. Чрез установената закономерност са вход множество изобретения.

## **Приносът на автора**

Ролята на автора в дисертационния труд включва редица дейности, които допринасят за развитието на научните изследвания и практическите им приложения в областта на нехомогенните структури. Ето някои аспекти на този принос:

1. Обосноваване на закупуването на специализирано оборудване за експерименталните изследвания: Докторантът е предоставил теоретична и практическа обосновка за необходимостта от инструментариума, което е ключово за провеждане на висококачествени експериментални изследвания. Това оборудване е осигурило основата за получаване на точни и надеждни данни.
2. Разработване и създаване на експериментален модел: Авторът е проектирал и конструирал експериментална постановка, която позволява детайлно изучаване на процесите на деформация и генерация на минералните частици при едноосно компресиране. Развит е теоретико-експериментален модел за изследване и демонстриране действието на явлението в нехомогенните системи.
3. Тестване и подобрене на експерименталната техника: Докторантът е извършил тестове и усъвършенстване на използваната експериментална техника, което е довело до конкретното ѝ адаптиране към конкретните изследвания, повишавайки точността на измерванията. Това е важно за гарантирането на валидността на резултатите.
4. Избор и подготовка на образци на скални структури от различни райони на България: Авторът е избрал и подготвил серии от образци на скали за експерименталните изследвания, като е взел предвид техния минерален състав и физико-механични свойства. Този процес е основополагащ за адекватността, релевантността и възпроизводимостта на експериментите.
5. Провеждане на експериментални изследвания: Докторантът е провел множество експериментални изследвания, които са документирали процесите на деформация и емисията на минерални частици при различни условия и режими на натоварване.

6. Обработка на получените експериментални резултати: След събирането на данните, е извършена тяхната обработка и анализ, което е довело до идентифицирането на ключови закономерности и процеси.

7. Изводи и анализи: На основата на събраната и обработена информация, авторът е формулирал основните изводи, допринасящи за научно-приложните приноси в настоящия труд.

Личното участие на автора е перманентно консултирано с научния му ръководител.

### **Апробация**

Основните резултати от дисертационния труд са докладвани на национални и международни конференции и са публикувани в издания:

XVII Национална младежка научно-практическа конференция 2020;

XIX Национална младежка научно-практическа конференция 2022;

Конференция с международно участие „Сигурност и отбрана“ 2023;

Предвид интереса към получените резултати, на докторанта е била предоставена възможността да изнесе два презентации по темата на изследванията пред най-авторитетния в страната форум – Събранието на академиците и член-кореспондентите при БАН през 2021 г. и 2022 г. в рамките на традиционните лекции на САЧК.

### **Публикации**

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 3 научни публикации, от национални и международни конференции, съдържат се в 3 изобретения като новата закономерност е включена в Отчета на БАН за 2022 г., представен пред Парламента на страната.

### **Структура и обем на дисертационния труд**

Дисертационният труд е в обем от 114 страници, като включва увод, Пет глави, Заключение, Основни научно-приложни приноси и използвана литература в обем от 71 източника като 42 са на латиница и 29 на кирилица. Работата включва общо 68 фигури и 3 таблици.



## **II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **ГЛАВА 1. СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЕМАТИКАТА**

#### **1.1 Анализ на състоянието на изследванията**

Напрегнато-деформираното състояние (НДС) на скалните масиви и съществуващите методи за изучаването им разкриват дългогодишен научно-технологичен интерес. Въпреки значителния напредък и разработването на множество подходи и системи, предизвикателствата, свързани с изучаването на НДС остават актуални поради комплексността и разнообразието на геомеханичните и физикохимичните процеси, протичащи в нехомогенните структури - скали и бетони. Техническата дейност и експлоатацията на находища на полезни рудни и нерудни изкопаеми налагат задълбочено познание за първоначално акумулираната в тях потенциална енергия, определяща напрегнатото състояние на скалните масиви. Независимо от използвания съвременен инструментариум, субективният фактор остава определящ. Това води до възникване на грешки в оценката на получаваните резултати и тяхната интерпретация. Съществуващите подходи могат да бъдат класифицирани в няколко групи, в зависимост от физическите принципи, на които се основават. Те включват технологични, деформационни и еластични методи. Всеки от тях има своите предимства и ограничения в зависимост от характеристиките на изследваните материали и условията на терен (натурните експерименти). Настоящата Глава съдържа обзор и оценка на методологията и инструментариума за диагностика на напрегнато-деформационното състояние на нехомогенните твърдотелни структури.

#### **1.2 Възникване на диагностиката на скалните образувания**

Възникването на методи за диагностика на скалните масиви е тясно свързано с развитието на строителството, науките за Земята и специализираното уредостроене. С увеличаване на мащабите на проектите става очевидна необходимостта от разработването на подходи за изследване и оценка на използваните материали. Съвсем накратко развитието на тази проблематика с времето е следното.

- **Античност и средновековие**

В античността и през средновековието строителните материали се избирали предимно на основата на опит и наблюдение. Изпитанията били прости и се основавали на визуална оценка и основни физически тестове като удар или натиск. Въпреки че тези методи не били строго научни, те позволявали на тогавашните строители да идентифицират и използват подходящи материали за своите съоръжения, много от които устояват на изпитанията на времето до днес.

- **Ренесанс и индустриална революция**

По време на Ренесанса и особено през първата индустриална революция интересът към научното разбиране и изпитване на строителни материали и планинските масиви значително нараства. Техническият прогрес и разширяването на инженерните познания са довели до разработването на по-сложни и по-точни методи за диагностика. В този период се появяват първите лаборатории за изпитване на материали, където се провеждат систематични тестове за определяне преди всичко на механичните свойства на бетона и скалите, като якост на натиск, устойчивост на износване, порьозност и др.

- **XXI век**

В началото на XXI век, с навлизането на цифровите технологии и напредъка в материалознанието, методите и инструментариума за диагностика стават още по-прецизни, и най-важното комплексни. Развитието на микроскопични анализи, нанотехнологии и изкуствен интелект отварят нови възможности за изследване и оценка на строителните материали и скалните образувания. Това включва напредъка в

молекулното моделиране и симулации, опитите за приложение на квантовата механика в интерпретацията на свойствата на нехомогенните скални структури, сензориката на неподредените системи и др.

### **1.3 Методи за изучаване на вътрешното напрежение и състояние на скални масиви**

Съществуващите методи за изучаване на вътрешно напрежение и състояние на скални масиви и бетони са разнообразни и всяка технология предлага съответни предимства за различни приложения, [10]. За да се моделира напрежението в хомогенен и изотропен масив, който е изложен на равнинно напрегнато състояние се използват установените отношения от теорията на еластичността, съдържащи модулът на Юнг  $E$  и коефициента на Поасон  $\nu$ . Най-разпространените методи са:

- Сеизмичен метод
- Метод чрез сондиране
- Метод на повърхностно профилиране
- Ултразвуков метод
- Електрометричен метод
- Метод на електрическия потенциал
- Радиометричен метод

### **1.4 Регистриране на деформационното състояние на скалите чрез емисионни методи**

За всички фази от строителството и експлоатацията на минни предприятия е от съществено значение да се изяснят якостните и деформационните характеристики на скалните масиви. За тази цел се използват механични изпитвания като един от най-често използваните методи е тестването на проби за определяне на едноосната якост при натиск.

При деформацията и разрушаването на скалите поради деформации или взривяване се наблюдава образуване на макро-, микро- и наночастици, съпроводени от излъчване на акустични, електромагнитни и термични сигнали, а в някои от случаите радиоактивно лъчение и газа радон. Регистрирането на тези емисии позволява определяне на появата и развитието на пукнатините и техните координати. Методите, които се базират на такива явления се наричат емисионни методи.

### **1.5. Изследователски задачи на дисертационния труд**

Анализът на представените в тази Глава методи и съпътстващата за приложението им апаратура показва, че всеки един от описаните подходи изисква разработването и експлоатацията на съответстващи за него устройства и сензорни системи. Фактически комплексното използване на представените подходи изисква множество еквивалентно реализиращи ги инструменти и технологии. Тяхното взаимно съгласуване в общия случай е практически невъзможно и се налага намесата на антропогенния фактор. Това води до грешки, които не позволяват последователен анализ на геодинамичните процеси в скалните образувания. Новият ефект на генерация на частици при едноосни деформации в нехомогенните твърдотелни структури предоставя уникалната възможност за реализация на интегрален метод за проследяване на негативните процеси от зараждането им до настъпване на предразрушителните и разрушителните състояния. Така с единен метод и съответстваща му измервателна технология ще се осъществи цялостно проследяване и контрол на негативните процеси. До момента не ни е известен такъв подход.

## ГЛАВА 2. ФОРМИРАНЕ НА МИКРОЧАСТИЦИ ПРИ НАТОВАРВАНЕ НА СКАЛНИ СТРУКТУРИ

### 2.1. Класификация на генетичните типове скали

Класификацията на генетичните типове скали в геологията се основава на произхода и процесите, които са довели до образуването им. Скалите се групират в три основни категории: магматични, седиментни и метаморфни, всяка от които се характеризира с уникални генетични типове и образувателни процеси.

Магматичните скали се формират чрез кристализация и затвърдяване на магма или лава. В зависимост от местоположението на кристализацията те се разделят на:

- Вулканични (екструзивни) скали,
- Седиментните скали,
  - Кластични (детритични) скали,
  - Химични седиментни скали,
  - Органични седиментни скали,
  - Метаморфни скали,

Тези категории и подтипове предоставят основа за разбиране на разнообразието и процесите, довели до образуването на скалните масиви на Земята.

### 2.2. Нехомогенност и петрографски анализ на скалните формации

Нехомогенната структура на скалите е една от техните основни характеристики, която оказва ключово влияние върху физикохимичното им поведение. Тази нееднородност се отнася до разнообразието от минерали, размера и формата на зърната и структурата на кристалите, порьозността, и разпределението на порите и пукнатините. Петрографските характеристики на скалите обхващат тяхната минералогия, текстура, структура, и химически състав, които са съществени за определянето на тяхната класификация и свойства.

Разбирането на хетерогенността и петрографските характеристики на скалите е от съществено значение за геологията, геотехниката и добивната индустрия, тъй като те влияят на прогнозирането на ресурси, планирането на добива, и управлението на земните ресурси, Таблица 1. В областта на структурните нехомогенности на скалните масиви съществуват множество класификации, като една от най-значимите е разработена от М.В. Рац.

Таблица 1. Класификация на скалните масиви

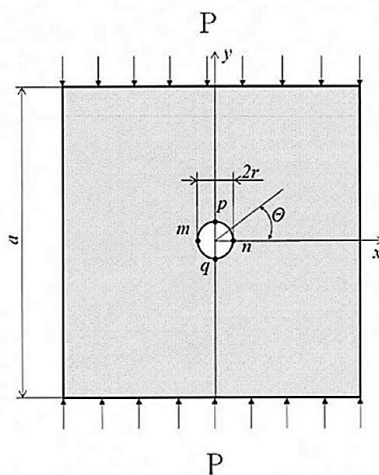
Скална маса	Хомогенна	Хетерогенен	
		Статично хетерогенен	С подредена нехомогенност
Изотропен	Свойствата на скалата не зависят от посоката и координатите на точката на вземане на проби	Свойствата на скалата не зависят от посоката, а са случайни функции на координатите на точката на вземане на проби	Свойствата на скалата не зависят от посоката, а са някои детерминистични функции на координатите на точката на вземане на проби
Анизотропен	Свойствата на скалата зависят от посоката, но не зависят от координатите на точката на вземане на проби	Свойствата на скалата зависят от посоката и са случайни функции на координатите на точката на вземане на проби	Свойствата на скалите зависят от посоката и са някои детерминирани функции на координатите на точката на вземане на проби

### 2.3. Аерозолни частици

Аерозолните системи се характеризират със способността да съдържат микроскопични твърди или течни частици, разтворени в газова среда, с размери между 0.1  $\mu\text{m}$  и 0.01  $\mu\text{m}$ . Тези микрофракции присъстват непрекъснато в околната среда, оказвайки значимо влияние върху живота на Земята - от локални ежедневни условия до глобални климатични процеси. Изключително е важно откритието, че дори в региони на планетата, за които се счита, че са с изключителна чистота на въздуха, атмосферата им все още съдържа поне 100 аерозолни частици на кубичен сантиметър. Това подчертава убедително универсалното присъствие на аерозолите и фундаменталното им значение за атмосферната химия и сензориката, както и за оцеляването и развитието на жизнените процеси. Аерозолните частици могат да бъдат класифицирани условно в три основни категории: прахове, изпарения и мъгли. В рамките на настоящото изследване, особено внимание се отделя на категорията на праховете, която ще бъде по-подробно анализирана. Праховите частици представляват твърди материали, диспергирани в газова среда. Те възникват в резултат на механични процеси като смилането на твърди материали (например, прах, генериран при раздробяването и финото смилане на скали и минерали, дейности по пробиване и взривяване) или под въздействието на аеродинамични сили, например въздушни струи върху прахообразни материали.

### 2.4. Модел на образуването на частици от повърхността на цилиндрична кухина

Задачата се свежда до едноосно компресиране на пробата. Фигура 1.1. илюстрира образец с проходна цилиндрична кухина в центъра, подложен на едноосно компресиране, където  $a$  е дължината на страната на образца,  $r$  е радиусът на кухината, а  $\theta$  е ъгълът, при който се разглежда действието на напреженията в контура на цилиндричната кухина.



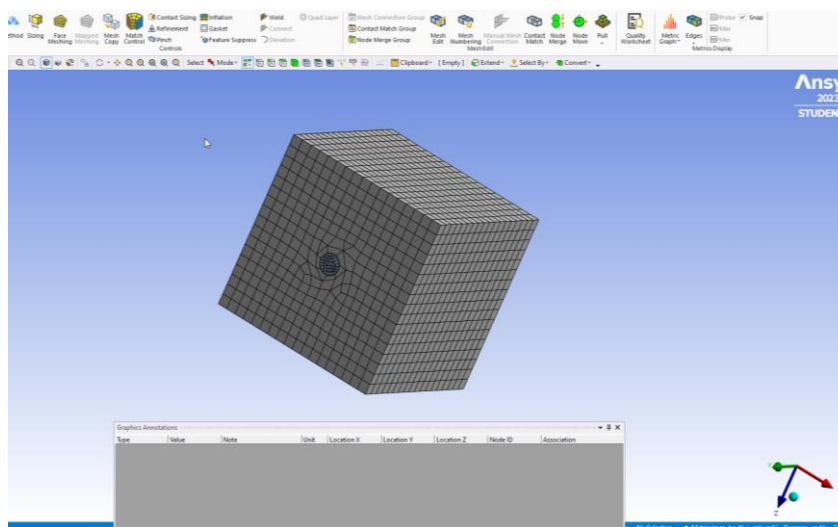
Фиг.2.1. Скална проба при едноосово натоварване:  
 $m$  и  $n$  - зони с максимални напрежения на натиск;  
 $p$  и  $q$  - зони с максимални напрежения на опън

### 2.5. Моделиране на деформационно-разрушителните процеси в цилиндрични кухини

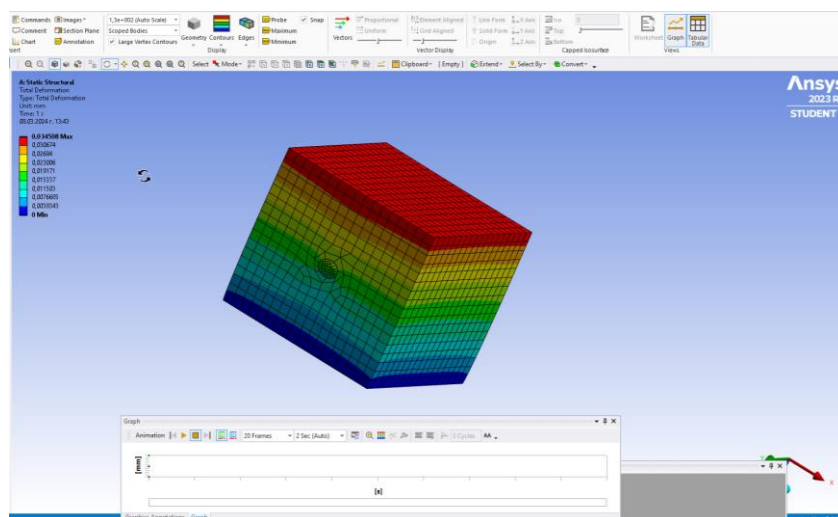
В последните десетилетия особено актуално е изучаването на деформационно-разрушителните процеси в материалите, като по-специално внимание се обръща на поведението на цилиндрични кухини при различни натоварвания, и не на последно място при излезанията на сеизмичната активност. Тези изследвания са от първостепенно значение, тъй като имат широко приложение в геотехниката, минното дело, сеизмиката, строителното инженерство и дизайна на материалите. Цилиндричните кухини, често

срещани в скални масиви представляват сложни нехомогенни системи. Тяхното поведение при натиск може да разкрие важна информация за механичните свойства и границите на здравина на изследваните материали. Моделирането на тези процеси чрез компютърни симулации предлага възможността за по-адекватно разбиране на динамиката на деформацията и разрушаването, позволявайки да се предвиди поведението на материалите в реални условия и да се осъществят по-ефективни решения за техния дизайн и устойчивост.

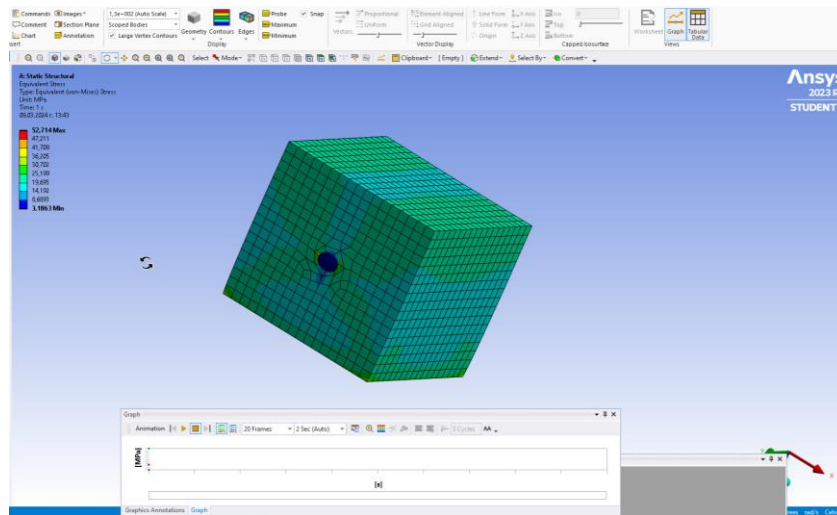
Моделирането на деформационните и разрушителните процеси в цилиндрични кухини при едноосно компресиране са осъществени в ИР- БАН чрез метода на крайните елементи, използвайки компютърната програма ANSYS MAXWELL. Фигура 2.2. демонстрира разпределението на максималните и минималните главни напрежения на натиск в образец с проходна цилиндрична кухина подложен на едноосно компресиране. За граничните условия, натоварването  $P$  е приложено към горната повърхност на образца, докато долната му част е стабилно закрепена.



Фиг. 2.2. а) Силви линии на образец в покой



Фиг. 2.2. б) Високи стойности на натиск 50 000 N. Силви линии на деформацията



Фиг. 2.2. в) Стрес на пробата при 50 MPa

Фиг. 2.2. Разпределение на основните напрежения на натиск в образец с проходна цилиндрична кухина при условия на едноосен натиск: а) образец в покой

б) най-високи напрежения на натиск  $\sigma_I$ ; в) Високо напрежение на натиск 50 000 N. Силви линии на деформация

## 2.6. Изводи към Глава II.

Теоретичните изследвания на процесите, свързани с формирането на частици при натоварване на нехомогенни структури (геоматериали), разкриват сложното взаимодействие между морфологичните, петрографските и генетичните характеристики на скалните формации и влиянието им върху динамиката на образуването на частиците. Ще отбележим, че така получените резултати са феноменологични и се основават на елементи на теорията на еластичността.

1. Анализирани са видовете структури на скалните формации и тяхната реакция на физически натоварвания. Определени са факторите, влияещи за увеличаване образуването на частици, локализиращи в зоните на повишени напрежения, инициращи разрушаването.

2. Моделирани са деформационно-разрушителните процеси в цилиндрични кухини като е изследвано образуването на частици от тяхната повърхност. Идентифицирано е разпределението на напреженията около цилиндричните образувания и динамиката на отделяне на фракциите. Доказано е, че цилиндричните кухини изпълняват едновременно ролята на макронарушения в скалната структура и на усилватели на деформационното въздействие, оказвайки влияние върху генерационния процес.

3. На основата на метода на крайните елементи и програмата Ansys Maxwell е развит иновативен модел на деформационните и разрушителните процеси в скални цилиндрични кухини при едноосно натоварване. Идентифицирани са два източника за генериране на микрочастици в цилиндричните кухини: единият е областта на максимални компресионни деформации, а другият - зоната на максимални напрежения на опън.

## ГЛАВА 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАНОВКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИНАМИЧНИ ПРОЦЕСИ В НЕХОМОГЕННИ СТРУКТУРИ

Добиването на проверима информация за процесите в скалните структури при едноосно натоварване изисква специфични експериментални методи, сензорни устройства и апаратура. Генерирането на аерозолни частици при механично натоварване на геоматериали не е forward solution (от само себе си очевиден процес). Това явление беше установено случайно при изследване здравината на скални структури от различни региони на страната при едноосна деформация. След като беше потвърдено, че ефектът е възпроизводим и се подчинява на определени закономерности, беше разработена експериментална постановка за неговото комплексно изследване.

### 3.1. Обосновка на използваната методология

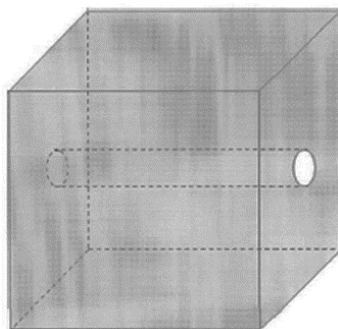
Коректността на експерименталните методи за детектиране на аерозолните частици при едноосен натиск изисква възпроизводима и високоточна метрология на отделящите се фракции от повърхността на образеца в резултат на едноосното въздействие. Предизвикателството в случая е свързано с уплътняването на зоната, от която се осъществява генерацията. Същевременно процесът на откъсване на скален материал от повърхността на пробата допълнително влияе на количеството на емитираните частици от тази зона. В Института по роботика – БАН беше разработен и апробиран иновативен подход за провеждане на тези специализирани експерименти, [A1-A3]. За да се осъществява възпроизводимост и сравнителен анализ, частиците следва да се генерират от един и същ изолиран обем, създаден вътре в самия пробен образец. Този обем се реализира чрез проходна цилиндрична кухина, описана в Глава II. и централно разположена в пробата. По този начин емисията на частици се регистрира директно от вътрешността на структурата.

### 3.2 Описание на методологията и експерименталната постановка

#### *Варианти на експерименталната постановка и нейната реализация. Образци*

За еквивалентната реализация на описаната методология са апробирани три конфигурации експериментални постановки за измерване на генерираните микрочастици. Те се определят основно от геометричната форма на пробните тела. Предвид обстоятелството, че е наблюдавано ново явление, в дисертацията е описана с необходимите подробности опитната постановка и използваната апаратура, [A1-A6].

1. *Кубични образци.* Пробните тела с кубична форма са с дължина на страните 100 mm и централно разположена цилиндрична кухина с диаметър 6 или 7 mm. Фигура 3. илюстрира такъв образец, Фиг. 3.1.



Фиг. 3.1. Схематично представяне на образец с кубична форма и проходен цилиндричен отвор

2. *Цилиндрични образци.* Тази постановка включва формиране на структури с цилиндрична форма, изрязани чрез диамантени глави с диаметри  $d$ : 40 mm, 60 mm и 80 mm, и височина  $h = 120$  mm. Странично, в средите на тези пробни тела е реализирано с настолна автоматизирана бормашина Bernardo проходно цилиндрично отверстие със съответните диаметри. Специално е проведена експериментална сесия, както това беше осъществено при кубичните скални структури, целта на която е да се установи въздействието на цилиндричните отвори в средната част на пробите върху якостните характеристики на изследваните структури, Фиг. 3.2.



Фиг. 3.2. Цилиндричен образец

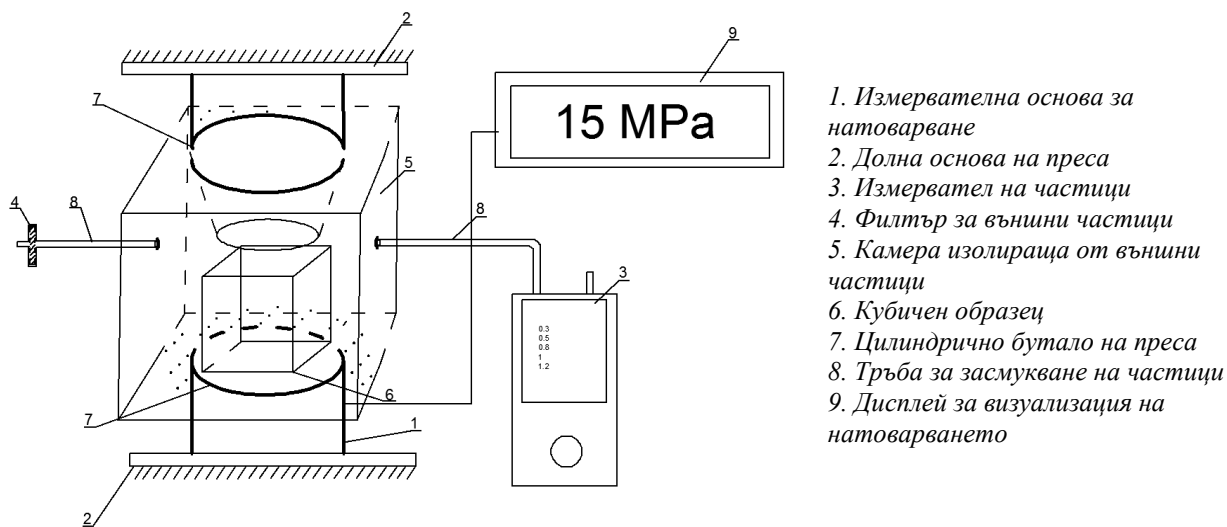
3. *Образци с паралелепипедна форма.* Постановката използва паралелепипедни пробни тела с размери: височина  $h = 80$  mm и равни странични ребра  $m = n = 50$  mm. Подготовката на образците е осъществявана с режещо устройство, екипирано с диамантен диск, Фиг. 3.3.



Фиг. 3.3. Образец с паралелепипедна форма

4. *Високочувствителен вариант.* Беше разработен и апробиран четвърти вариант на опитната постановка, с който са осъществени измерванията и са преодолени указаните недостатъци. Той е с висока чувствителност и повишена измервателна точност и схематично е показан на Фиг. 3.4.





Фиг. 3.4. (а) Чертеж на опитна постановка



Фиг. 3.4. (б) - реализирана опитна постановка

Фиг. 3.4. Високочувствителен вариант - измерване на периферното отделяне на частици

На Фигури 3.4. – 3.6. също са представени експериментите хидравлична преса и съпътстващите сензорни устройства. Експерименталната постановка, предназначена за провеждане на високоточни измервания на емисията на фино дисперсни минерални частици при едноосно компресиране на скални материали включва интеграцията на шест основни компонента: 1) преса; 2) система за регистрация на натоварването и неговите динамични изменения; 3) прецизен брояч на фини частици; 4) компютър за анализ и съхранение на данните; 5) високочувствителна сензорна сонда; и 6) автоматизирана бормашина за подготовка на пробите.



Фиг. 3.5. Брояч на аерозолни частици Hal-НРС601 и неговото сертифициране от производителя



Фиг. 3.6. Общ изглед на експерименталната постановка в Лабораторията за високи едноосни и хидростатични налягания

Този иновативен експериментален стенд ни даде възможност да извършим наблюдения с висока точност в контролирани лабораторни условия, което е от съществено значение за изясняване на процесите, свързани с емисиите на минерални частици при натоварени скални проби.

### 3.5 Изводи към Глава III.

1. Формулирана и обоснована е методология за изследване свойствата и характеристиките на скални образци с различна геометрична форма чрез ефекта на емисия на частици в нехомогенни структури при едноосни деформации.

2. Проектирана, конструирана, реализирана и тествана е експериментална постановка със съответната специализирана измервателна система и сензорен модул за изследване на динамичните характеристики на скални образци чрез генерацията на частици при едноосна деформация.

## ГЛАВА 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Основната цел на проведените комплексни изследвания с различни разновидности скални образци и разработената иновативна експериментална постановка е да се установят закономерностите на ефекта „Емисията на микро- и наночастици в нехомогенни структури при едноосни деформации”. Явлението е ново, свойствата му са практически неизвестни, което изисква многостранни и многочислени опити с различни видове скални образци и режими на натоварване.

### 4.1. За произхода на скалните образци

България е известна с разнообразието от скални материали, които се използват основно в строителството и са в обхвата на критичната инфраструктура. Ето някои от основните видове скали, Фиг. 4.1., които са лабораторно изследвани:

1. Сив гранит от с. Лиляново, Санданска област. Този гранит се отличава със своята здравина и устойчивост на атмосферни влияния, което го прави идеален за строителството и различни видове настилки.

2. Гранит от Пловдивска област. Характеризира се със специфична текстура и цетова гама, и е предпочитан за разнообразни строителни решения и архитектурни акценти.

3. Сив мрамор „мура“ от Сандански: Известен е с фината си текстура и характерния сив цвят. Тази скала се използва за създаването на строителни детайли, архитектурни фронтони и облицовки.

4. Долomit от с. Богутево, Родопски регион. Тази скална модификация е предпочитана в строителните и архитектурните решения.

5. Риолит от с. Дебръщица, област Пазарджик. Тази вулканична скала се отличава със своята твърдост и цетова гама, варираща от светло до тъмно. Този материал е удобен за екстериорни приложения като облицовки, огради и градински елементи, устойчиви на атмосферни влияния.

6. Врачански варовик от област Мездра. Този варовик е ценен със своята устойчивост, което го прави подходящ за широк спектър от приложения, включително фасади, интериорни и екстериорни облицовки, както и архитектурни детайли.



Фиг.4.1. Проби, подготвени за експериментите

Представените скали в не малко случаи създават и опасни ситуации чрез свлачища и срутища в критичната инфраструктура.

## 4.2. Характеризиране на емисията на микрочастици от скални структури

Предвид разпространението им и особено от приложението в строителството са проведени многостранни изследвания на гранит и доломит. Якоста на пробите, определена по тяхната дезинтеграция (счупване) при едноосно деформиране структурите не се отличава повече от 55 - 60 Мра.

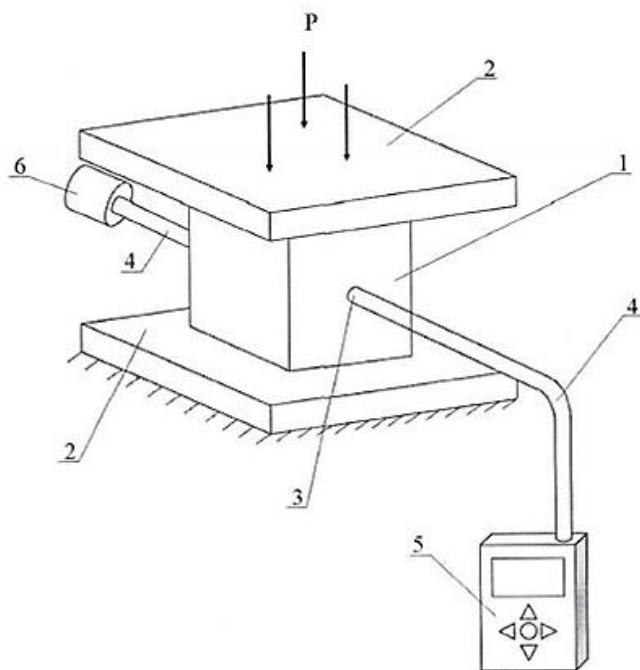


Фиг. 4.2. Хидравличната преса със скален образец от гранит за изследване на емисиите на микрочастици при едноосно натоварване

Конструкцията на апаратурата за изпълнение на експерименти, целящи изследване на емисията на частици при едноосово компресиране на геоматериали, е илюстрирана на Фиг. 4.2. и Фиг. 4.2.2.

Методологията за изследване включва следните стъпки:

1. Подготовка на тестова проба и измервателен обем:
  - В центъра на избраната за тест проба 1 се формира цилиндричния обем, представляващ се от проходна кухина 3 с диаметър 6 mm.
  - Към тази кухина са интегрирани тръби за вземане на проби 4 от двете ѝ страни, като едната тръба е свързана с лазерно устройство за броене на аерозолни частици 5, а другата - с въздушен филтър 6.
2. Осъществяване на експеримента:
  - Пробата се разполага между компресионните плочи на пресата 2, където е подложена на едноосово компресиране от началото до момента на разрушение.
  - В хода на експеримента се регистрират характеристиките на емитираните частици в обхвата 0.3  $\mu\text{m}$  - 5.0  $\mu\text{m}$ .
3. Защита на измервателния обем:
  - За предпазване на кухината от навлизане на частици от външната среда е използван специален въздушен филтър, блокиращ преминаването на частици с размери над 100 nm.
  - Това осигурява допълнителна контролирана среда за наблюдение на вътрешните процеси на емисия на частици без външно замърсяване.



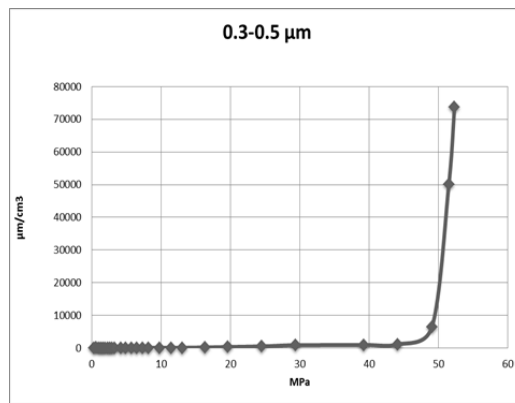
Фиг. 4.2.2. Принципна схема на устройството за изследване

Таблица 2.  
Брой частици, регистрирани по време на едноосно компресиране на проби (геоматериали) и в атмосферния въздух на лабораторията

Проба	Количество частици за 60 секунди		
	Диапазон на частици, $\mu\text{m}$		
	0.3 – 0.7	1.0 – 7.0	>7.0
Гранит	9800	460	1425
Мрамор	25425	1200	3800
Риолит	28954	5521	6741
Варовик	5498	589	3880
Въздух	$10^5$	$10^4$	60

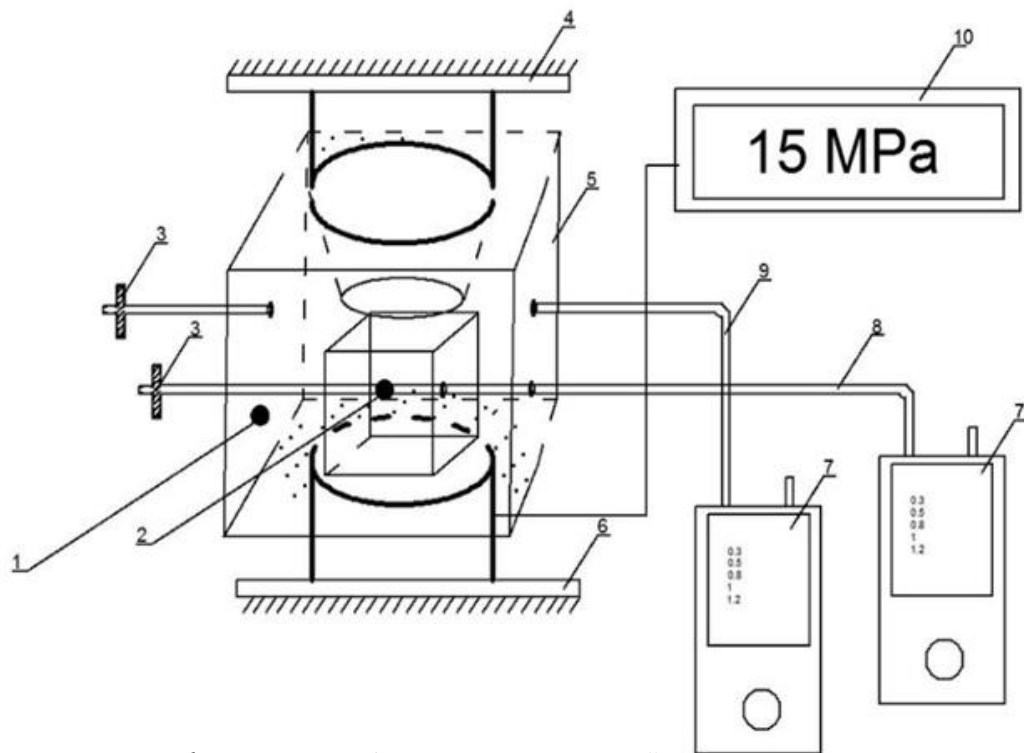
Таблица 2. предоставя систематизирана информация за броя на частиците, генерирани от повърхността на цилиндричната кухина при приложено натоварване към проби от гранит, мрамор, риолит и варовик, като натоварването е с относителна стойност от 0.8 от Мах. Също така са представени данни относно фоновата концентрация на частици в лабораторни условия, под които е извършено изследването за период от 60 секунди, осигурявайки сравнителна или реперна основа за анализ на емисиите.

Резултатите се съдържат на Фиг. 4.2.4., където напрежението, приложено към материала е представено на абсцисата (x ос), измерено в МРа, а редуцираният брой частици – на ординатната ос (y ос), изразен в единици на квадратен метър за секунда ( $1/\text{m}^2\text{s}$ ). Тази графика позволява интуитивно разбиране на взаимовръзката между приложеното напрежение и реакцията на материала в термини на промени в дисперсията на частиците. Такъв подход при анализа е изключително важен за определянето на оптималните условия за приложение на материалите в реални инженерни решения и за разработването на нови материали с подобрени свойства, [45].



Фиг. 4.2.4. Зависимост на количеството микрочастици от едноосен натиск за гранит в типичния за емисиата обхват 0.3 µm – 0.5 µm

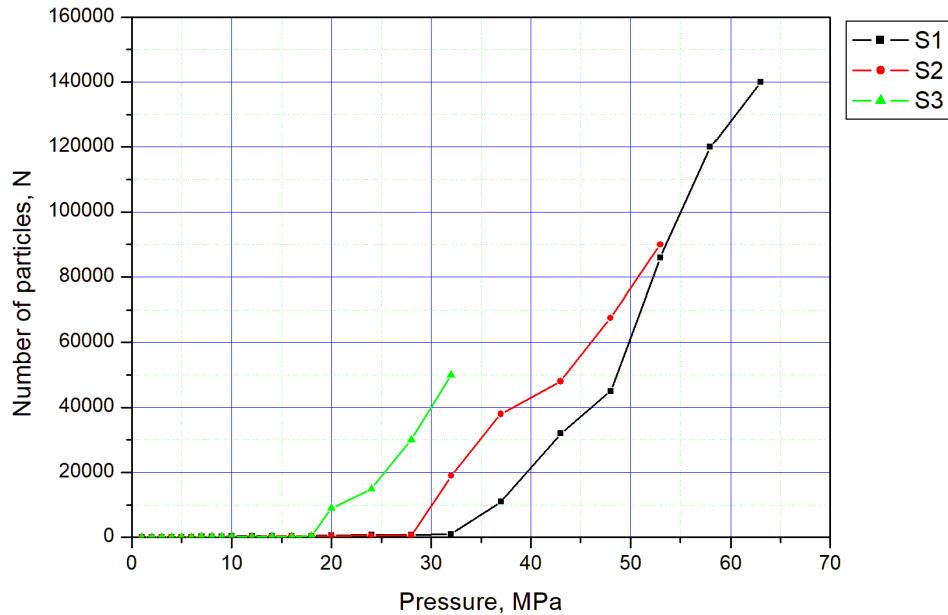
Анализът на данните и от Фиг. 4.2.4. разкрива закономерностите в поведението на материалите (варовик) под въздействието на компресия. Изследването детайлно илюстрира, че при приближаване на напрежението на натиск до 4.0 мегапаскала (MPa), се отбелязва значимо увеличение на емисиите на частици във всички размерни диапазони. Този феномен може да се интерпретира като индикатор за началото на структурни промени в материала, които водят до по-висока степен на фрагментация и съответно до увеличаване на броя на частиците



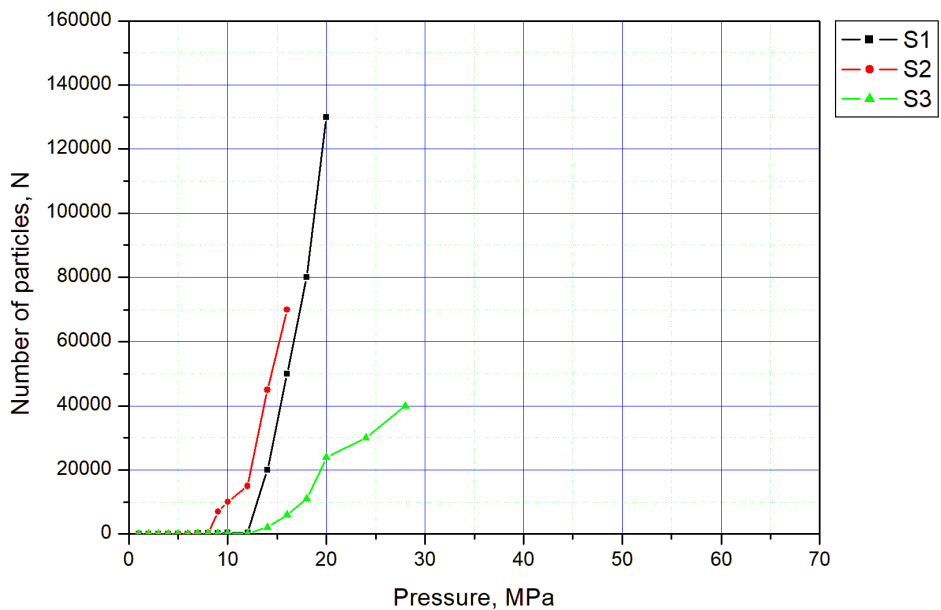
1. Измерване по периферията на пробата или казано „отвън“
2. Измерване във вътрешността на пробата или казано „отвътре“
3. Филтър
4. Бутало на преса за натиск
5. Плексигласова камера
6. Измервателен тензосензор за натоварване
7. Лазерен сензорен спектрометър
8. Тръбопровод частици от вътрешността на пробата
9. Тръбопровод частици от периферията на пробата
10. Дисплей за стойност на натоварването

Фигура 4.4. Схема за реализиране на едновременно комбинирано измерване отвън и отвътре на пробата

В следващите графични резултати се виждат разпределените частици както отвън, така и отвътре на пробите. Тези данни характеризират структурата на повърхността и вътрешната структура на материалите, Фиг. 4.5. – Фиг. 4.10. Тези комбинирани данни са твърде полезни като информация за възможните механизми на образуване и движение на частиците, както и за специфични характеристики, които могат да повлияят върху цялостната стабилност и функционалност на пробите.

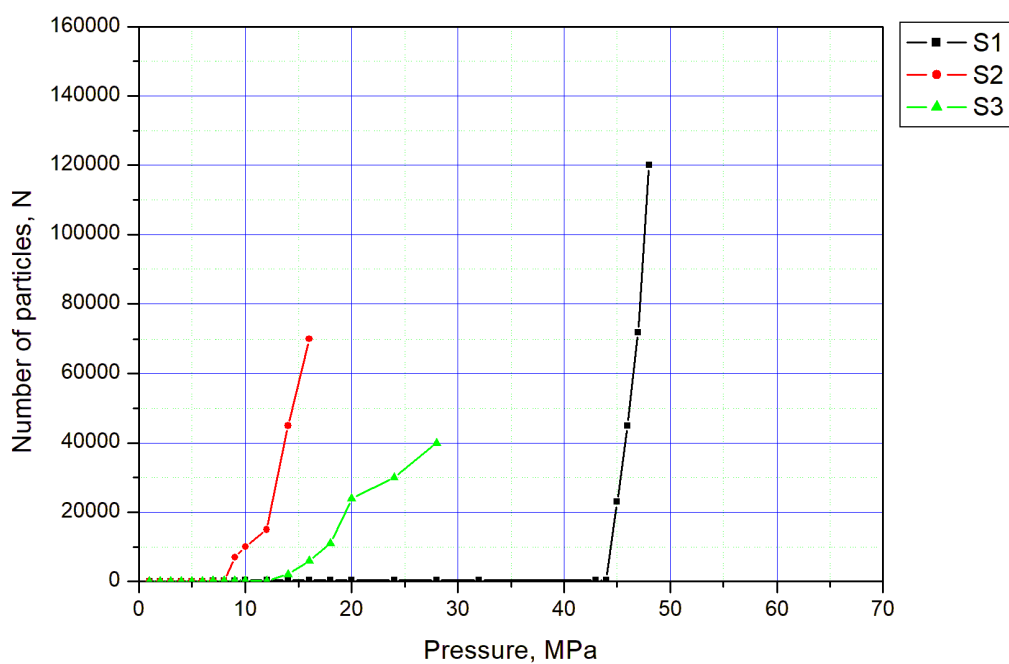


Фигура 4.5. Разпределение на частиците при нефиксирано относително ниво на натоварване на проба от сив гранит. Съответно S1(0.3-0.5μm), S2(0.5-5μm), S3(>5μm)

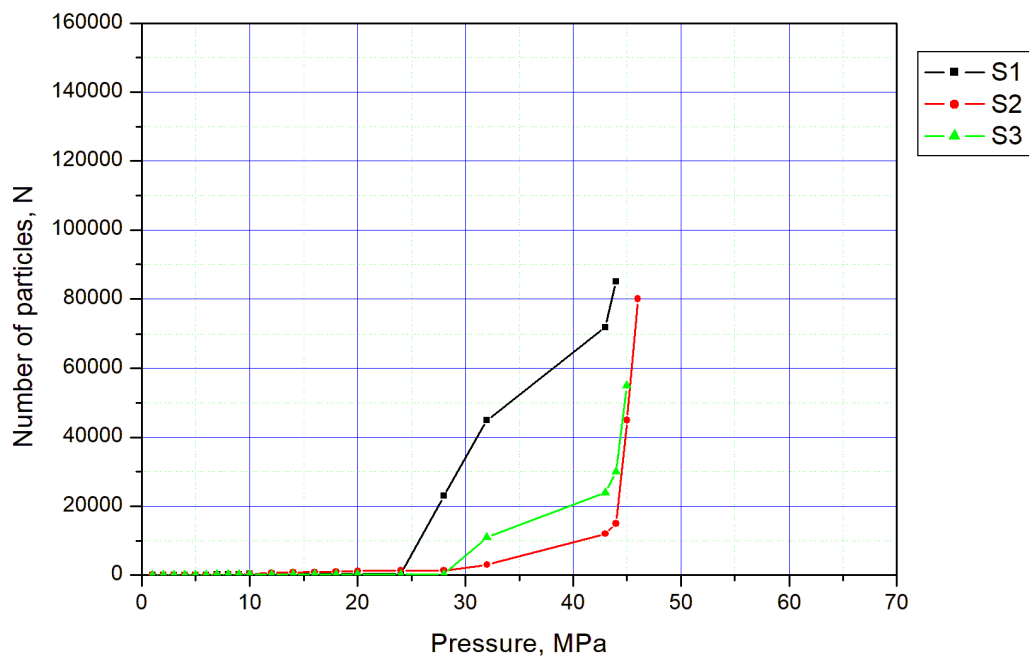


Фигура 4.6. Разпределение на частиците при нефиксирано относително ниво на натоварване на проба от гранит от Пловдивска област. Съответно S1(0.3-0.5μm), S2(0.5-5μm), S3(>5μm)



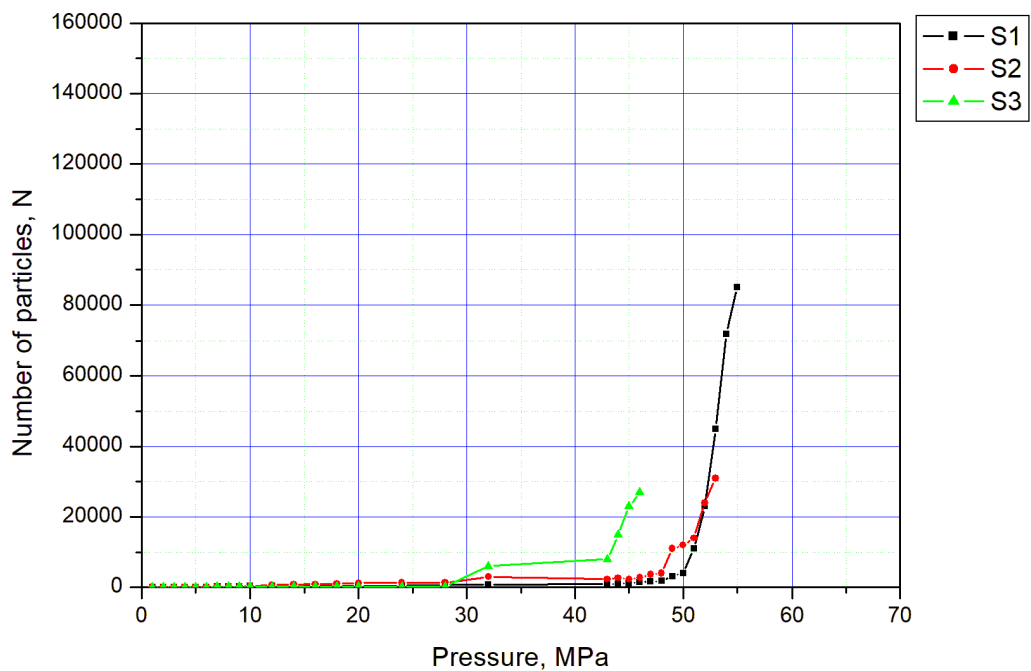


Фигура 4.7. Разпределение на частиците при нефиксирано относително ниво на натоварване на проба от Български сив мрамор „мура“ – от област Сандански. Съответно S1(0.3-0.5μm), S2(0.5-5μm), S3(>5μm)

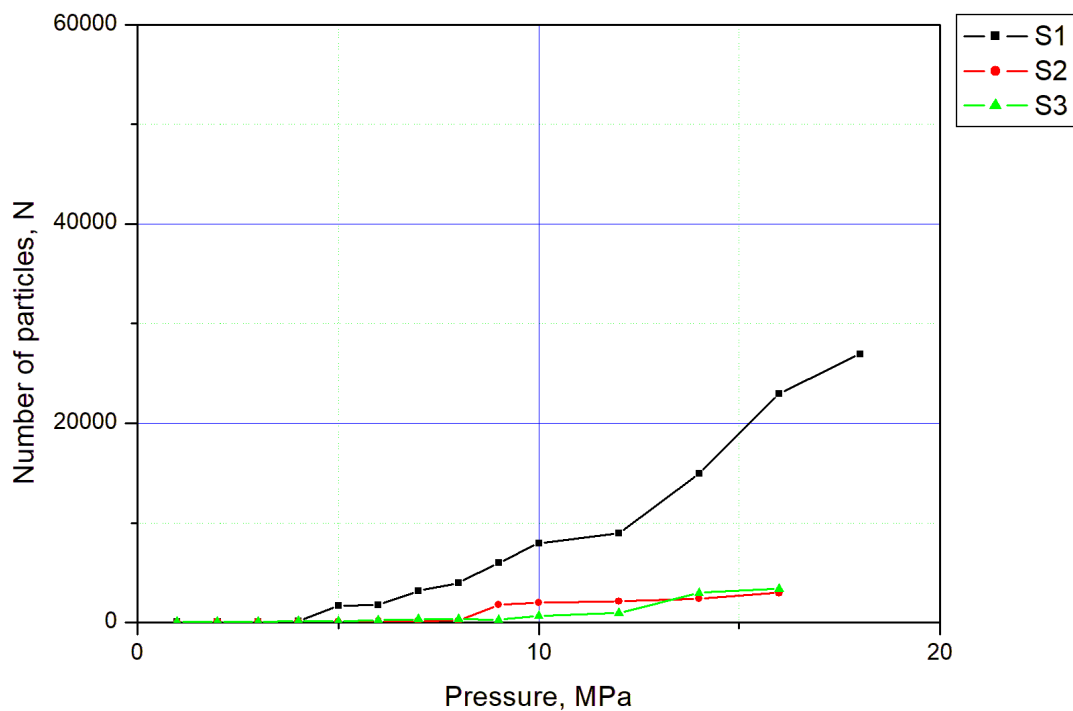


Фигура 4.8. Разпределение на частиците при нефиксирано относително ниво на натоварване на проба от Български мрамор – с. Копревлен, област Гоце Делчев. Съответно S1(0.3-0.5μm), S2(0.5-5μm), S3(>5μm)



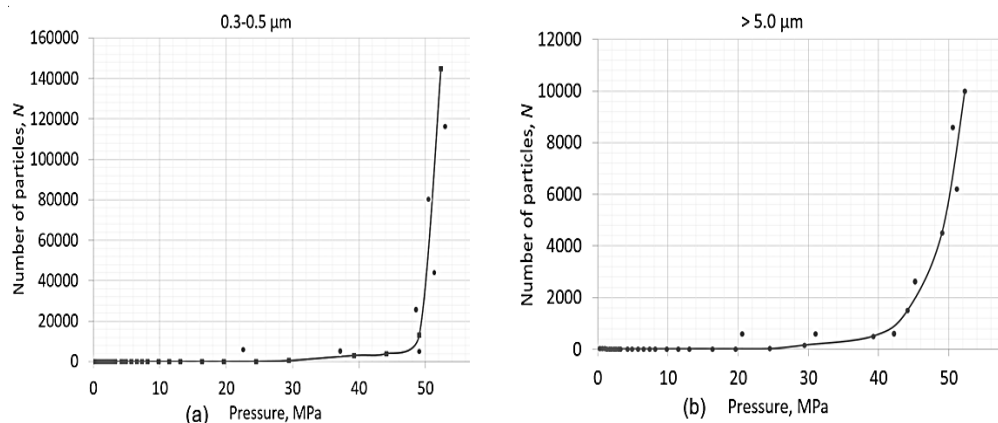


Фигура 4.9. Разпределение на частиците при нефиксирано относително ниво на натоварване на проба от Риолит – от с.Дебръщица, област Пазарджик. Съответно S1(0.3-0.5μm), S2(0.5-5μm), S3(>5μm)

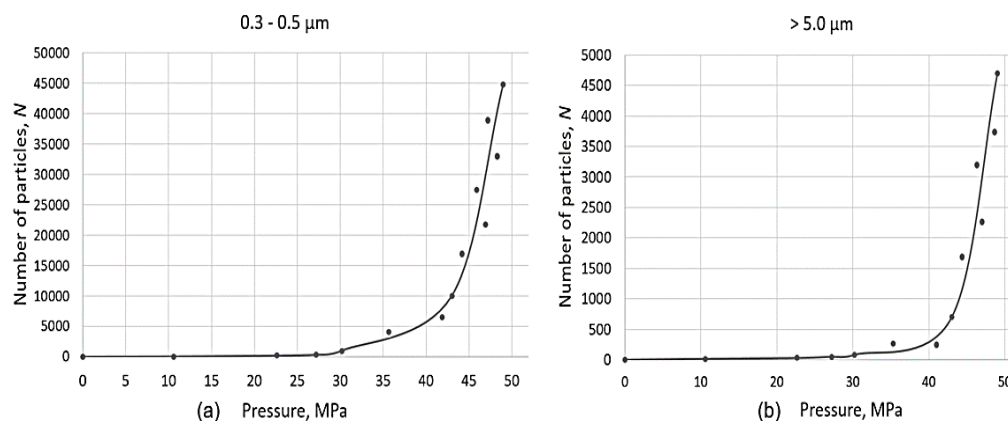


Фигура 4.10. Разпределение на частиците при нефиксирано относително ниво на натоварване на проба от Варовик от област Мездра. Съответно S1(0.3-0.5μm), S2(0.5-5μm), S3(>5μm)

Съгласно анализа на получените данни, въпреки значителната разлика в количеството  $N$  на генерирани микрочастици между двата разглеждани случая - разлика, която надхвърля два порядъка - деформационният натиск  $F$ , измерен в произволно избрани точки и зависимостите му, представени във Фигури 4.3.17. и 4.3.18., показват почти идентични стойности. Такъв резултат подчертава високата точност и надеждност на използваната апаратура и методики на измерване. Това позволява адекватно възпроизвеждане на деформационните процеси, дори при значителни разлики в началните условия. Специално ще отбележим, че именно тези зависимости от фигурите бяха включени в Научния Отчет на БАН за 2022 г. и представени в Парламента на страната, [71].



Фигура 4.3.17. Интензитет на емисията частици при едноосно налягане за гранитни цилиндрични проби в диапазона: 0.3 μm – 0.5 μm; (b) Емисия на частици в обхват > 5.0 μm



Фиг. 4.3.18. (a) Емисия на частици за модел на сондаж - в диапазона 0.3 μm – 0.5 μm (проби от гранит с кубична форма); (b): за проби от гранит в диапазона > 5.0 μm

Анализите на резултатите от изпитванията на скалните образци ясно показват, че при натоварването на хомогенни мономинерални скали, като варовик, мрамор и пясъчник, количествените разлики в емисията на частици са минимални в сравнение с нехомогенните полиминерални скали, като варовик и гранит. Въз основа на тези наблюдения, за по-детайлно изучаване на емисията на фини минерални частици при едноосово натоварване са избрани образци от геоматериали: варовик, гранит, мрамор и пясъчник. Тези пробни тела са подложени на едноосно стъпаловидно компресиране, според предварително определената методология. Образците имаха кубична форма със страна 100 mm и проходна цилиндрична кухина в центъра си с диаметър 6 mm. През

целия експеримент се измерва отделянето на финодисперсните минерални частици с характерните за новия ефект размери  $0.3 \mu\text{m}$  -  $5.0 \mu\text{m}$  от повърхността на цилиндричната кухина, [A1-A6].

Изводите от изследването на бетонни образци показват, че подложените на циклично натоварване структури показват признаци на отслабване на якостните характеристики. Рязкото увеличение в интензивността на емисията на частици служи като индикатор за предстоящото им макроразрушение. По този начин новото явление беше идентифицирано и при бетонните образци, подчертавайки значението на този подход за прогнозиране на структурната устойчивост на такъв ключов строителен материал като бетона. В бъдеще се планира разширяване обхвата на сензорните изследвания към други видове строителни материали. Безспорно е, че емисията на частиците успешно ще определя важни параметри в строителните материали, което ще надгради разбирането ни за динамиката на техните деформационните процеси.

Новата закономерност открива възможности за интерпретация и прогнозиране на срутванията на крупни инженерни съоръжения. Доказателството, че експоненциалното увеличаване броя частиците служи *като надежден индикатор* за предсказване на критични състояния в скали и бетони е основа за разработването на иновативни методи и системи за мониторинг и оценка стабилността на съоръженията.

## **ГЛАВА 5. ВЪРХУ ПРОИЗХОДА НА ЕМИСИОННИЯ ЕФЕКТ И ПЕРСПЕКТИВИ ЗА НАДГРАЖДАНЕТО МУ**

В глава V. фокусът е върху физикохимичната интерпретация на произхода на ефекта и перспективите за неговото надграждане, особено за целите на сеизмиката и превенция на инфраструктурата. Приложимостта на получените резултати се основава на ясна и категорична възпроизводимост на новата закономерност в едни и същи скални структури, получени от различни области на страната. Направен е първи опит за обяснение на генерацията на частици в нехомогенните твърдотелни структури при едноосно въздействие.

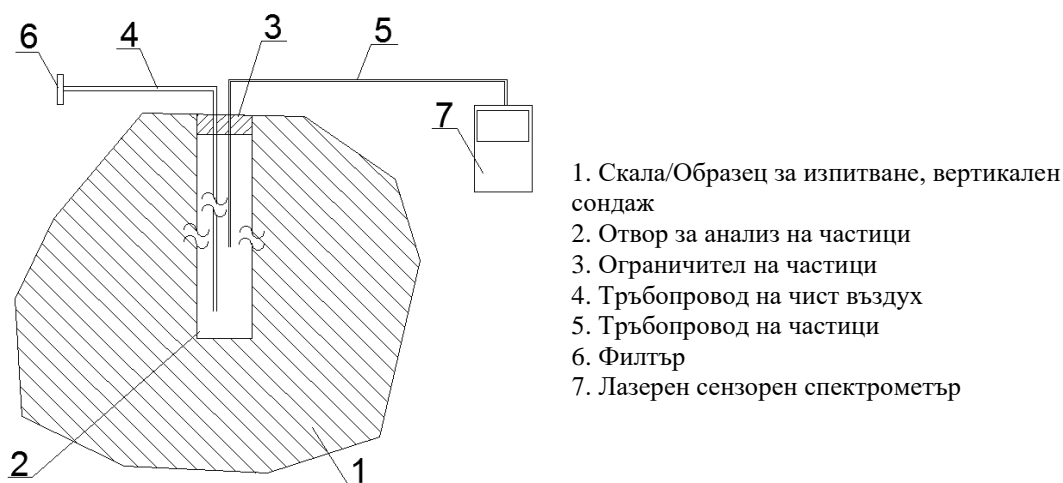
### **5.1. Върху произхода на емисията на микрочастици в нехомогенните структури**

Развитието на резултатите от емисионния ефект изисква изясняване на процесите на микро- и нанониво. Именно това е първопричината за генериране на минералните фракции при едноосни деформации в неподредените системи - скалите и бетоните. Очевидно е, че тези образования драстично се различават от структурата на металите и полупроводниците, които са с регулярни кристални решетки. На този етап обаче отсъства квантовомеханично описание на новото явление, въпреки че в основата на процесите на емисията е квантова природа. Установено е, че скалните и рудните образци при високи деформации излъчват електромагнитни вълни в широк честотен диапазон. Произходът на този процес е свързан с преместването на дислокациите, съдържащи електрически товари в полето на високи механични напрежения. Също така колебателното движение на заредените краища на пукнатините и взаимодействието на електричните товари на краищата на пукнатините води до появата на токове и формирането на електромагнитни полета с вихрова структура. Освободната енергия допълнително поляризира съседните молекули като взаимодействието вероятно е чрез сили на Van der Waals. Интензивността на емисията е свързана със стойността на действащите външни натоварвания. Генерацията на частиците може да се обясни с това, че в образците от геоматериали в стадий на доразрушителното деформиране се образуват локални микрообласти на дезинтеграция.

Това „разтопяване” е в резултат на нееднородното разпределение на напреженията и локалното превишаване на границата на здравина на материала. Установено е, че максималното количество частици се освобождава именно в момента на увеличаването на натоварването близо до тези критични стойности. Процесът е свързан с времето на преразпределение на вътрешните напрежения, в резултат на които става откъсване на частици от повърхността на скалните структури, [A1-A3]. Промяната в положенето на електростатичните връзки е необратима, обратно на ситуацията в металите. Това модифицира разположението между положително и отрицателно заредените групи частици. При скалите възстановяване на състоянието след деформиране е невъзможно. Тяхната „памет” – т.е. „еластичността” за началното състояние отсъства. Развитие на този необратим процес води до възникване на микроразкъсвания в скалната структура. Нано- и/или микродефектите някъде в обема или на повърхността на образеца формират „кожух” от хаотично дислоцирани електрически заредени кълъстерни конфигурации. Освободената потенциална енергия допълнително поляризира съседните молекулни групи. Колкото е по-високо едноосното налягане, толкова повече нараства разкъсването на електростатичните и механичните връзки. Крайният резултат от деформацията на скалата е емисията, т.е. генерация на частици със съответен спектрален състав, който експериментално се наблюдава. Те първоначално напускат приповърхностните зони на образеца. Най-същественото в този качествен модел е неговата т.н. „еднопосочност”, т.е. необратимо изтощаване на генерационния процес. Фактически това свойство може да се сравни с „експлозия” на електрически заредени частици вътре в обема на скалната структура. От предложената интерпретация се вижда, че явлението носи интегрален, т.е. колективен характер на поведение. Това свойство позволява да се осъществи единен метод и система за контрол и наблюдение на негативните процеси.

## 5.2. Регистриране на деформационното състояние на скалните масиви с вертикален сондаж

На базата на получените резултати може да се конструира система за регистриране на разрушителни състояния в скалните масиви в реални условия, която е показана на Фиг. 5.1. В изследвания обект 1 се пробива вертикален отвор 2 и се инсталира херметична тапа 3, през която минават тръби 4. Едната от тях е свързана със сензорния брояч на аерозолни частици 5, а втората – към въздушен филтър 6.



Фиг. 5.1. Система за установяване на реални разрушителни състояния в скални масиви чрез вертикален сондаж

Така чрез емисията на микрочастици в този вертикален сондаж може да се контролира състоянието на скалния масив. Новостта на тази разработка е подкрепена с две наши изобретения. Така установените модели за емисия на минерални частици могат да станат основа за създаването на принципно нов инструментален подход със съществено практическо значение. Този метод ще позволи оценка на степента на напрежение в скални масиви или строителни конструкции и прогнозиране на потенциала за развитие на катастрофални процеси.

Изследването на емисионното явление предлага възможности за надграждане както в сферата на изучаване физиката на процесите на разрушение на различни материали, така и в приложни области. Особено значимо е приложението му в сеизмологията за прогнозиране на земетресения, както и в минната индустрия за контрол на риска от скални удари и предвиждане на динамичните прояви на скално налягане.

### 5.3. Интегрален сензорен метод

Резултатите от експерименталните изследвания са интегрирани в сензорен метод за установяване на деформационното състояние на скални масиви, който е с повишена точност и чувствителност. Предварителните експерименти са проведени със скални структури от планински райони на България. Резултатите са постигнати с предварително определена функционална зависимост между емисията на микрочастиците и силите на натиск с помощта на реперни образци.

#### 1. Описание на метода

Интегралният сензорен метод за установяване на деформационното състояние на скални масиви изисква най-напред в масива да се формира сондаж. От зоната с най-голяма дълбочина се изважда цилиндрична скална ядка, от която се изрязва цилиндрично тяло с фиксирани радиус  $r$  и височина  $h$ . Тази структура представлява реперен образец. След това се определя емитиращата микрочастиците площ  $S_r$  на околната му повърхнина. За целта цилиндричното тяло се поставя в изолиран от околната среда обем, за конкретност кубичен. Той е от твърд материал без дъна, височината  $h$  е по-малка от тази на реперното тялото, а размерът е по-голям от неговия. Този измервателен вариант на постановката е описан подробно в т. §3.2.2.(4). Следващата стъпка е експериментално установяване зависимостта на генерираните частици във функция на едноосното налягане  $F$  в характерните размерни обхвати. В дънната зона на сондажа се формира измервателна вместимост с фиксирана площ  $S_b$ , емитираща минерални микрофракции. Въвежда се мащабен коефициент  $K > 1$ , представляващ отношението на излъчващата частици площ  $S_b$  в сондажа и емитиращата площ  $S_r$  на образца,  $K = S_b/S_r \gg 1$ . С него се умножава броят на частиците  $N_r$  в размерните обхвати, получени от реперния образец за съответните фиксирани стойности на едноосното налягане  $F = \text{const}$ . Така от зависимостите на количеството минерални частици  $N_b$  в измервателната вместимост на сондажа от налягането  $F$ ,  $N_b(F)$ , определено с помощта на реперния образец, се намира деформационния натиск  $F$  в реалния скален масив. Сензорният метод съпоставя чрез мащабиране количеството емитирани частици  $N_r$  за даден тип скала от лабораторните експерименти с броя на генерираните частици  $N_b$  във фиксиран обем в сондажа. Това мащабиране установява адекватното налягане  $F$  в сондажната вместимост в съответствие с полученото количество частици  $N_b$  в нея. Предразрушителното състояние на скалите се проявява, когато стартира нарушаване на линейността между деформацията и компресиращите сили  $F$ . От този момент възниква добре известното експоненциално нарастване броя на частиците. Настъпването на този процес на генериране на микрофракции в сондажа е индикатор за предстоящо предкатастрофално/катастрофално събитие. Следователно по динамиката на отделящите се частици  $N_b$  в измервателната вместимост и по съответстващите им сили на натиск  $F$ , калибрани преди това в

лабораторни условия, се осъществява научно-обоснован контрол на настъпващо разрушително състояние, А1-А6. Подобен метрологичен подход за директно регистриране на предкритични и критични процеси в скалните масиви не ни е известен.

## **2. Експериментални резултати**

### **а) Определяне на деформационното състояние на скални образци**

В апробацията на сензорния метод важен компонент е формирането на сондаж в скален масив и изваждането на цилиндрична ядка. Също така в дънната област се реализира вместимостта с фиксирана площ  $S_b$ , от която се измерват микрочастиците  $N_b$ . На настоящия етап такива натурни експерименти и мониторинг в реален сондаж на подходящ район в България е трудно постижимо. Проблемът е логистичен и от части финансов, а не научно-технологичен. Ето защо тази част на подхода до момента не е осъществена. Това се планира през Втория етап от дейността на ЦК „QUASAR”. Независимо от това, останалата последователност от действия на новия сензорен метод е реализирана в пълен размер. Фактически сензорният метод за първи път осъществява връзка чрез мащабиране на количеството емитирани частици  $N_f$  за конкретен тип скална структура от лабораторните изследвания с броя на генерираните частици  $N_b$  във фиксиран обем в сондажа, съответстващи на развитието на деформационния процес в масива.

На основата на получените експериментални данни е установено еднозначно, че зависимостта на емитираните частици от излъчващата ги площ  $N(F = \text{const}) \sim S$  е правопрпорционална.

## **3. Примушества на сензорния метод**

Описаният сензорен метод е интегрален индикатор за измерване на емисионните характеристики, обуславящи предразрушителните и катастрофалните процеси в скалните масиви. Този резултат се определя от мониторинга на частици чрез генерирането на фракциите при деформационен натиск. Новият подход може да се приложи за откриване на силни, близки до границата на здравина механични напрежения в подземни съоразения, където директното определяне на критичните деформации е невъзможно. Повишената измервателна точност на метода е в резултат на регистрираните с малка грешка емитирани частици. Предварително калибрираните стойности на генериращите се минерални микрофракции съответстват на реалните сили на натиск в скалния масив, определени преди това в лабораторни условия. От съществено значение е установената за първи път правопрпорционална зависимост в скалните структури на генерираните частици  $N$  от емитиращата ги площ  $S$  при  $F = \text{const}$ ,  $N \sim S$ . Високата чувствителност на метода се дължи на предварително определената функционална връзка между емисията на частици  $N_f$  и силите на натиск  $F$  чрез реперните образци. Новият подход дава възможност за автоматизация на измервателния процес в сондажната вместимост чрез роботизирана платформа. Това съдейства за отстраняване на субективния фактор, [А4-А6].

### **5.4. Развитие на приложните изследвания на емисионния ефект**

Ефектът на генерация на микрочастици при въздействие на едноосни деформации в нехомогенните системи и сензорната им регистрация предоставят възможността за разширяване на научните изследвания на поведението на скалните масиви в условията на многообразие от външни въздействия. По наша оценка предстои в близко бъдеще навлизане в тази „каменна” област на методологията и апарата на квантовата механика. Приложният аспект на явлението е многостранен. На негова основа могат да се конструират иновативни роботизирани платформи, сензорни устройства и технологии от ново поколение. Така постоянният мониторинг на частиците служи за ранно оповестяване

и прогнозиране на предаварийни и аварийни прояви в критичната инфраструктура. Резултатите са съществени за решаване на множество проблеми в: Минната промишленост - рудо-, нефто- и въгледобив; Сеизмично активните райони - за детектиране нагъването на тектонски плочи и разместването на скални масиви; Строителството - за контрол на устойчивостта на високите сгради и своевременно установяване на предразрушителни състояния; Урбанизацията - за усвояване на подземните пространства, включително безопасното движение на метрото; Своевременно предотвратяване на свлачища и срутища преди настъпване на дезинтеграция на земните маси; Наблюдение на състоянието на язовирни стени, мостове, виадукти, крупни енергийни съоръжения – АЕЦ, ВЕЦ, ТЕЦ и др. Технологичните решения притежават ключовото предимство в своя интегритет и универсална инструментална база, [74].

### **5.5. Изводи към Глава V**

1. Предложена е интерпретация на емисията на микрофракции в скалните структури при едноосни деформации, използвайки елементи от квантовото поведение на емитираните частици в нехомогенните системи.

2. Формулиран и развит е интегрален сензорен метод и система за регистриране на деформационното състояние на скалните масиви. Предложен е вертикален сондаж и сензорно устройство за контрол на предразрушителни състояния на скални масиви.

## НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

В дисертационния труд е установен и изследван нов научен проблем в областта на сензориката - емисия на микрочастици в нехомогенни структури при едноосни деформации. Той обхваща следните научно-приложни приноси:

1. Експериментално е констатирана неизвестна по-рано закономерност в твърдетелните нехомогенни системи – скали и бетони, заключаваща се в генерация на частици при въздействие на високи едноосни деформации. Доказано е, че количествата емитирани минерални микрофракции в обхвата  $0.3 \mu\text{m} - 5.0 \mu\text{m}$  са възпроизводими за конкретен вид скала в различните планински масиви от райони в България.

2. На основата на оригинална методология е проектирана, конструирана, реализирана и тествана опитна постановка в четири варианта в зависимост геометричната форма на скалните образци за изследване емисията на фините минерални фракции при едноосен натиск. Тя е оборудвана със съвременни сензорни устройства, измерващи с висока точност и чувствителност характеристиките на отделящите се микрочастици.

3. Определена е функционалната зависимост на генерацията на частиците от външни фактори като при деформация интензитетът и размерите им зависят от вида скали, доставени от различните райони в страната. Предложена е феноменологична и физикохимична интерпретация на новата закономерност.

4. При нива на деформационен натиск на скалните структури до границата на тяхната дезинтеграция възниква рязко, в първо приближение, експоненциално нарастване на частиците във всичките им размерни обхвати. Тяхното количество е право пропорционално на генериращата повърхност на образците като интензивността на емисионния процес е обосновано да служи като индикатор за прогнозиране на тяхното разрушаване.

5. Предложен и развит е интегрален метод и система за динамично определяне на напрегнато-деформационното състояние на скалните масиви. Постоянният мониторинг на микрочастиците служи за ранно оповестяване на предаварийни и аварийни ситуации в критичната инфраструктура с приложимост в: сеизмично активните райони за детектиране нагъването на тектонските плочи; минната промишленост; строителството на високи сгради и предразрушителните им състояния; предотвратяване на свлачища; контролиране състоянието на язовирните стени, мостовете, виадуктите и др.



## АВТОРСКИ ПУБЛИКАЦИИ

по темата на дисертационния труд

**A1.** S. V. Lozanova, **M. L. Ralchev**, Sensor system for determining the deformation state of rock massives. *Proc. Intern. Scient. Confer. UNITECH 2022*”, TU - Gabrovo, 2022, ISSN: 1313-230X, vol. I, pp.165-170.

**A2.** **М.Л. Ралчев**, Емисия на частици при деформиране на скални материали, *XIX Национална научно-практическа конф. 2022 г.*, Сборн. докл. ФНТС, стр. 139-147, 2022.

**A3.** **M. L. Ralchev**, Innovative sensor technology for critical infrastructure security purposes, *Proc. of I National scient.confer. with intern. participation „Security and defence“ 2023*, pp. 729-740, 2023.

## ИЗОБРЕТЕНИЯ

**A4.** С.В. Лозанова, **М.Л. Ралчев**, Ч.С. Руменин, Устройство за определяне на физико-механичното състояние на деформирани скали и строителни материали, *Патент № BG 67599 B1/13.02.2024 г.*

**A5.** С.В. Лозанова, **М.Л. Ралчев**, Ч.С. Руменин, Сензорна система за прогнозиране на катастрофални макроразрушения на здания и строителни конструкции, *Патентен регистров № 113607 A1/27.10.2022 г.*

**A6.** С.В. Лозанова, **М.Л. Ралчев**, Ч.С. Руменин, Сензорен метод за определяне на предразрушителното състояние на скални структури, *Патентен регистров № 113614 A1/09.11.2022 г.*

## УЧАСТИЕ В ПРОЕКТИ

**П1.** Проект BG05M2OP001-1.002-0006 на ОП НОИР 2014-2020 за изграждане и развитие на **Център за компетентност КВАЗАР**.

**П2.** Проект 101091399 - „Български национален план за квантово комуникационна инфраструктура - **DIGITAL-2021-QCI-01**“, между Главна дирекция „Комуникационни мрежи, съдържание и технологии“ - (Director-General Communications Networks, Content and Technology) към Европейска комисия и Институт по роботика (Център за компетентност КВАЗАР) към БАН, като водещ партньор (Координатор)

## БЛАГОДАРНОСТИ

Изказвам благодарност на моя научен ръководител проф. д-р инж. Сия Лозанова, която винаги ме е съветвала и помагала, предоставяйки своите професионални умения и идеи в областта на сензориката и изкустения интелект. Умението ѝ да обяснява сложните неща по възможно най-ясния и разбираем начин е качество, което дълбоко ценя. За нея всяка теоретична постановка, колкото и абстрактна да изглежда, е начало за практическо решение, защитимо с патент за изобретение.

Изразявам своята искрена признателност на акад. Чавдар Руменин, сътрудничеството с който направиха възможни тези изследвания.

За мен е истинско удоволствие да благодаря на Директора на ИР-БАН проф. д-р инж. Август Иванов, без помощта на който изследванията не биха могли да се осъществят.

Изказвам също благодарност на колегите от секция „СИТРМ” и Института по роботика при БАН, където творчеството и добронамереността са пословични.

София, 29 април 2024 г.

## SUMMARY

### EMISSION AND SENSOR REGISTRATION OF MICROPARTICLES IN NON-HOMOGENEOUS STRUCTURES UNDER UNIAXIAL DEFORMATIONS

**Author: M.Sc. Eng. Martin Lachezarov Ralchev**

The phenomenon of particle emission in solid-state heterogeneous systems under uniaxial deformations has been discovered and interpreted. This previously unknown pattern in non-homogeneous structures—rocks and concrete composites—was experimentally established through innovative methodology and original sensor devices. Metrology is carried out in specially implemented cylindrical cavities in rock samples. It has been found that under uniaxial deformations, the quantities of emitted mineral micro-fractions are in the characteristic range of 0.3  $\mu\text{m}$  to 5.0  $\mu\text{m}$ . An experimental setup has been designed, constructed, implemented, and tested in several variations, depending on the geometric shape of the studied rock structures. It is equipped with modern sensor devices, measuring with high accuracy and sensitivity the characteristics of the emitted microparticles. It has been proven that the quantities of generated micro-fractions, regardless of their size, increase simultaneously with compression pressure. The results are reproducible for specific rocks from different mountain ranges in regions of Bulgaria. At uniaxial deformation levels of rock structures up to their disintegration limit, there is a sharp, approximately exponential increase in particles across all size ranges. Their quantity is directly proportional to the generating surface of the samples. It has been established and proven that the intensity of the emission process serves as a clear indicator for predicting the destructive status of rock formations. A phenomenological and physicochemical interpretation of the new pattern has been proposed. An integrated method and system for dynamically determining the deformation state of rock formations have been developed and tested. The increased measurement accuracy of the method results from the small-error registration of emitted particles. Continuous monitoring of microparticles serves as early warning for pre-emergency and emergency situations in critical infrastructure, removing the subjective factor.

Through the new emission effect, innovative robotic platforms and next-generation sensor technologies are constructed. Thus, continuous particle registration serves as an early warning and prediction system for pre-emergency and emergency events in infrastructure. The results are significant for solving various problems in: Mining Industry - ore, oil, and coal extraction; Seismically active regions - for detecting the folding of tectonic plates and the displacement of rock formations; Construction - for monitoring the stability of high-rise buildings and timely detection of pre-destructive conditions; Urbanization - for utilizing underground spaces, including subways; Timely prevention of landslides and rockfalls before the disintegration of land masses occurs; Monitoring the condition of dam walls, bridges, viaducts, large energy facilities, etc.

The scientific and technological solutions are contained in 3 publications from national and international forums and 3 inventions, the result of participation in two European projects.