



**МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН  
РИЛСКИ”, СОФИЯ**

**ГЕОЛОГОПРОУЧВАТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ**

**КАТЕДРА: СОНДИРАНЕ, ДОБИВ И ТРАНСПОРТ НА НЕФТ  
И ГАЗ**

**Маг. инж. Веселин Христов Митков**

**МОДЕЛИРАНЕ И АНАЛИЗИРАНЕ НА  
ХИДРОДИНАМИЧНИТЕ ПРОЦЕСИ, ПРОТИЧАЩИ В  
ПРОДУКТИВНИЯ ХОРИЗОНТ И ПРИЗАБОЙНАТА ЗОНА НА  
СОНДАЖИТЕ ПРИ СЪХРАНЕНИЕ НА ГАЗО-ВОДОРОДНИ  
СМЕСИ В ПОДЗЕМНО ГАЗОВО ХРАНИЛИЩЕ**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

на дисертационен труд за присъждане на  
образователна и научна степен **"ДОКТОР"**

Научна област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.8. ПРОУЧВАНЕ, ДОБИВ И  
ОБРАБОТКА НА ПОЛЕЗНИ ИЗКОПАЕМИ

Докторска програма: Разработка и експлоатация на нефтени, газови и  
газокондензатни находища

**Научен ръководител:  
1. Доц. д-р Лъчезар Георгиев**

СОФИЯ, 2026 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Сондиране, добив и транспорт на нефт и газ“ към Геологопроучвателен факултет на МГУ „Св. Иван Рилски“, София, на 26.01.2026 г., съгласно Ректорска заповед № РД-15-2/15.01.2026 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред Научно жури, утвърдено със заповед № Р- ..... от ..... т. на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски“ и ще се проведе на дд. мм. гggг г. от ..... часа в зала..... на .....факултет, МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Сектор „Следдипломна квалификация“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/ 80 60 209.

Утвърденото Научно жури е в състав:

1. Проф. д-р Мартин Бояджиев – катедра “СДТНГ” - председател /вътрешен;
2. Проф. д-р Ефросима Занева – катедра “ГППИ” - вътрешен;
3. проф. д-р Радослав Наков – ГИ “БАН” - външен;
4. доц. д-р Веска Лашева - “ХТМУ” - външен;
5. доц. д-р Борислав Николов - “ТУ” - външен;

Резервни членове:

1. доц. д-р Христо Димитров – катедра “ГППИ” - вътрешен;
2. доц. д-р Ивелина Хинова – “ТУ” - външен;

#### **РЕЦЕНЗЕНТИ:**

1. Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия
2. Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Сондиране, добив и транспорт на нефт и газ“ на Геологопроучвателен факултет .

Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от (научноизследователски проекти):

Национална програма „Млади учени и постдокторанти - 2“ (Етап II 2024-2025 г.).

Автор: маг. инж. Веселин Митков

Заглавие: Моделиране и анализиране на хидродинамичните процеси, протичащи в продуктивния хоризонт и призабойната зона на сондажите при съхранение на газо-водородни смеси в подземно газово хранилище

Тираж: 20 броя

Отпечатано в Издателска къща „Св. Иван Рилски“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

# СЪДЪРЖАНИЕ

БЛАГОДАРНОСТИ.....	4
I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД .....	5
Актуалност на проблема .....	5
Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване.....	5
Научна новост .....	6
Практическа приложимост .....	6
Публикации .....	7
Структура и обем на дисертационния труд .....	7
II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....	8
ГЛАВА I Общи сведения.....	8
Физико химични свойства на водорода .....	9
Класификация и характеристики на водорода .....	9
ГЛАВА II Разработване на интегриран модел за определяне на резервоарните свойства на скалата колектор по време на подземно съхранение на газо-водородна смес .....	10
Модул за определяне на вискозитет на газо-водородната смес .....	13
Основни изводи .....	14
Модул за изследване на ядковите образци.....	15
Приложимост на интегрирания модел за определяне на резервоарните свойства на скалата колектор при подземно съхранение на газо-водородна смес. ....	16
Порестост .....	16
Определяне на порестост чрез томография .....	16
Абсолютна проницаемост .....	17
ГЛАВА III. Конструирание на експериментално оборудване за тестване на влиянието на газо-водородната смес върху помпено-компресорните тръби.....	21
Разработения експериментален стенд за бързо определяне на влиянието на газова-водородните смеси върху тръбите в процеса на добив и експлоатация. ....	22
Последователност за провеждане на експеримента.....	24
Основни изводи .....	25
Определяне на дебита на сондаж по време на добив на газо-водородна смес. ....	26
Определяне на устиевото налягане на сондаж по време на добив на газо-водородна смес. ....	27
Заключение .....	30
ГЛАВА IV. Екологична и икономическо-технологична оценка .....	31
Взаимни ползи от водородната екосистема .....	32
Възможност за създаване на висококачествени работни места .....	32
Прогнози за енергийна рамка на базата на водорода .....	32
Перспективи и ограничения .....	33
ГЛАВА V. Основни изводи и резултати.....	34
ГЛАВА VI. НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ.....	36
А. Научни (методологични) приноси: .....	36
Б. Научно-приложни приноси:.....	36
ЛИТЕРАТУРА.....	37
СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....	41
SUMMARY .....	42

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Авторът изразява искрена благодарност на ректор на МГУ проф. д-р Ивайло Копрев, зам.-ректор на МГУ проф. д-р Ирена Григорова, ръководител катедра СДТНГ проф. д-р Мартин Бояджиев, научен ръководител доц. д-р Лъчезар Георгиев, гл. ас. д-р Николай Христов, доц. д-р инж. Кремена Деделянова, д-р Савина Кирилова за съдействието и методическата подкрепа при подготовката на този труд. Освен това авторът специално благодари на маг. инж. Христо Митков и на Ивалин Григоров чиито практически възможности в областта бяха от голяма полза при изработване на съоръженията за провеждане на експериментите. Авторът изказва също благодарности на членовете на катедра "Сондиране, добив и транспорт на нефт и газ" за оказаната подкрепа при подготовката на този труд. Авторът искрено благодари на своите родители и приятели за подкрепата в продължение на трите години докато той работи върху дисертационния труд.

Дълбока признателност за оказаната подкрепа на Национална програма „Млади учени и постдокторанти - 2“ (Етап II 2024-2025 г.), сп. "Обучение по природни науки и върхови технологии" и сп. "Минно дело и геология".

От автора

# **I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД <sup>1</sup>**

## **Актуалност на проблема**

В настоящата дисертация са разгледани и изследвани подходи и методики за моделиране и анализиране на хидродинамичните процеси протичащи в продуктивния хоризонт и призабойната зона на сондажите при съхраняване на газо-водородни смеси в подземно газохранилище. Водородът е нововъзникващ енергиен носител в подкрепа на декарбонизацията на световните енергийни и промишлени сектори. Подземното съхранение на водород има силен потенциал за растеж в дългосрочен план, който до 2050 г. се очаква да достигне 20-100 милиона тона. Солни каверни (щокове) и изчерпани газове находища, ако са правилно подбрани, могат да предложат осъществимо решение за дългосрочно и безопасно съхранение на големи количества водород. За да се сведе до минимум риск от загуба на водород по време на съхранението, местата за подземно съхранение, трябва да бъдат внимателно подбрани и оценени по отношение на тяхната цялост, а технологичните операции по съхранение трябва да бъдат придружени от системи за непрекъснато наблюдение и контрол. Въпреки че водородът се произвежда, съхранява, транспортира и използва безопасно в ограничени промишлени производства от десетилетия, е необходима обширна научна експериментална работа по процесите на задържане и разрушаване, както и по рисковете, известни от други операции по съхранение на газ, за да се осигурят точни данни за количествените оценки на риска при съхранение на водород. За целта е необходимо правилното определяне на перспективите и възможностите за съхраняване на газо-водородни смеси в подземни газохранилища и комплексно анализирани на протичащите процеси. Основните процеси които протичат в системата сондаж-продуктивен хоризонт при съхранение на газо-водородни смеси трябва да бъдат моделирани, изучени и анализирани за всеки конкретен обект. Основните процеси протичащи в системата сондаж-продуктивен хоризонт зависят от количеството на водород в природния газ. Съхраняването на газо-водородни смеси в изградени подземни газохранилища е необходимо във връзка с компенсиране на неравномерността на потреблението на газо-водородни смеси.

След направения задълбочен литературен обзор по проблема бе очертана ясно целта на настоящия дисертационен труд и бяха извършени значителен обем от лабораторни измервания и бяха разработени и приложени експресни модели за определяне и анализиране на протичащите хидродинамични процеси в призабойната зона на сондажите и продуктивния хоризонт при съхранение на газо-водородни смеси.

Обект на анализи и оценки, на които е базирано настоящето изследване, са ядкови образци и колони от помпено-компресорни тръби от газово находище с перспективи за създаване на подземно газохранилище.

## **Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване**

Основната цел на дисертационната работа е да се изследват, разработят експресни модели за определяне влиянието на водорода върху капацитетни и

---

<sup>1</sup> Препоръчителен обем 2-3 страници

филтрационни параметри на скалата колектор изграждаща продуктивния хоризонт, при забойната зона на сондажа, влиянието на водорода по време на нагнетяване и добиване върху колоната от помпено компресорни тръби (ПКТ).

В съответствие с поставената цел, основните задачи на дисертационната работа се свеждат към следното:

1. Анализ на съвременното състояние на проблемите, свързани с прогнозиране на хидродинамичните процеси, протичащи в продуктивния хоризонт и призабойната зона на сондажите при съхранение на газо-водородни смеси в подземно газово хранилище.
2. Разработване на методика за експериментално лабораторно изследване на ядкови образци за определяне на филтрационните свойства при различно процентно съдържание на водород в природния газ.
3. Разработване на методика за експериментално определяне влиянието на водорода върху ПКТ в процеса на нагнетяване и добив.

### **Научна новост**

Разработен е интегриран модел за определяне на резервоарните свойства на скалата колектор по време на подземно съхранение на газо-водородна смес;

Изградено е експериментално оборудване за тестване на ефекта на смес от газ и водород при различно съдържание на метан и водород (5%, 15%, 25%) върху стоманените тръби, използвани за добив и нагнетяване на газови сондажи за подземно съхранение на газо-водородни смеси;

Получена е нова информация за влиянието на газо-водородната смес върху колоната от помпено-компресорни тръби.

### **Практическа приложимост**

Резултатите могат да бъдат използвани при прогнозиране на хидродинамичните процеси, протичащи в продуктивния хоризонт и призабойната зона на сондажите при съхранение на газо-водородни смеси в подземно газово хранилище.

## Публикации

- Митков В., Л. Георгиев, Н. Лаков. Производство на електрическа и топлинна енергия от природен газ. Национална научно – техническа конференция с международно участие “Автоматизация в минната индустрия и металургията“ БУЛКАМК 2022, стр. 87-91 ISSN 1314-4537
- Georgiev L., V. Mitkov. Perspectives and opportunities for increase capacity for natural gas in underground gas storage in the Republic of Bulgaria (Георгиев Л., В. Митков. Перспективи и възможности за повишаване на капацитета за съхраняване на природен газ в подземни газохранилища в Република България), Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 66/2023 (Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, Том 66/2023) , p. 99-103 (стр. 99-103)
- Mitkov V., Hydrogen storage in underground gas reservoirs (Митков В., Съхраняване на водород в подземни газохранилища), Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 67/2024 (Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, Том 67/2024) , p. 110-113 (стр. 110-113)
- Mitkov V. Constructing an experimental equipment for testing the influence of natural gas – hydrogen mixture on the production tubing, Natural Sciences and Advanced Technology Education, Volume 34 Number 4, 2025 pp 564 – 576, <https://doi.org/10.53656/nat2025-4.05>
- Публикация на тема „Integrated model for determining the reservoir properties of the rock collector during underground storage of a gas-hydrogen mixture” под печат в списание „Natural Science and Advanced Technology Education Journal “

## Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **127** страници, като включва увод, **6** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **64** литературни източници, като **47** са на латиница и **6** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **42** фигури и **47** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

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

### **ГЛАВА I Общи сведения**

Перспективите и възможностите за създаване на подземен водороден газов хъб на територията на Република България, са с цел повишаване на капацитета за съхраняване на природен газ и водород. Това е свързано с добре развитата газопреносна мрежа, изградените множество входни точки за доставки на газ за България и неговото транзитиране за други държави. За целта е необходимо да се направи обобщена класификация на подземните газохранилища, в зависимост от мястото на тяхното създаване, разглеждане на основните принципи за изграждане на подземни газови хранилища в изтощени залежи на въглеродороди, водоносни хоризонти и в непроницаеми скали.

Всеки тип хранилище се характеризира с определени филтрационни, капацитетни параметри (порестост, проницаемост, капацитивни свойства) и икономически показатели (капитални разходи, експлоатационни разходи, приходи, печалба, вътрешна норма на възвращаемост, нетна осъвременена стойност и др.), които определят технико- икономическата ефективност от създаването и експлоатацията на хранилището. Повечето съществуващи хранилища за природен газ се намират в изтощени находища на природен газ или нефт, които са в близост до централите за потребление. При преобразуването на находище от работно в газохранилище се използват предимствата на съществуващите сондажи, събирателни системи и газопроводи.

В Европейския съюз има 27 държави членки, като подземни газохранилища има в 19 от тях. Газохранилищата на територията на Европа са във водоносни хоризонти, в изтощени нефтени или газови залежи, в скални формации или в солни диапири. Общия брой на всички подземни газохранилища на територията на Европейския съюз са 160. Като 22 от тях са във водоносни хоризонти, 82 са в изтощени нефтени или газови залежи, 2 от подземните газохранилища са в скални формации и 54 от тях са в солни каверни. Държавата с най-много подземни газохранилища е Германия с 60 ПГХ, а държави като Белгия, България, Гърция, Португалия имат само по 1 подземно газохранилище в експлоатация. Държави които не са членки на Европейския съюз но са на територията на континента са 6, те общо имат 36 подземни газохранилища като са разпределени по следния начин – 5 са във водоносни хоризонти, 17 са в изчерпани нефтени или газови залежи, 0 са в скални формации и 14 са в солни изработки. Като Украйна има най-голям брой – 13 подземни газохранилища, а Сърбия с 1 ПГХ. Общия брой на подземни газохранилища в експлоатация на територията на континента Европа са 196.

Общата дължина на газопреносната система на „Булгартрансгаз“ ЕАД в Р. България е 3276 км. По продължение на тези газопроводи, които са Национален) и Транзитен показани на фиг. 2, са разположени 11 на брой компресорни станции, като компресорите на КС „Ихтиман“ и КС „Петрич“ са центробежни двустепенни, а компресорите на ПГХ „Чирен“ са бутални. В газопреносната система има 240 вътрешни изходни точки, 2 входни точки от добивни съоръжения, 1 точка за свързване със съоръжения за съхранение, 8 трансгранични входно-изходни точки и 1 точка за между системно свързване “in-country”. Създаването на подземен газов хъб на територията на Р. България е със стратегическо значение, което е свързано с обезпечаване на непрекъснатост на транспортирането и потреблението на природен газ.

## **Физико химични свойства на водорода**

Водородът ( $H_2$ ) е най-разпространеният елемент във Вселената, който се среща на Земята главно във водата и органичните съединения. При стандартни температура и налягане водородът е безцветен, безвкусен, нетоксичен, неметален и леснозапалим двуатомен газ. Атомната маса на водорода е 1,00794 (u, той е най-лекият химичен елемент). Характерно за водородът, че е изключително запалим. Водородът не е токсичен и е много по-лек от въздуха, разсейва се бързо при изпускане, което позволява сравнително бързо разпръскване на горивото в случай на изтичане, което го прави сравнително безопасно от други горива. Основният проблем за безопасността е, че ако изтичането не бъде открито и газа се събере в затворено пространство, той може да се възпламени и да предизвика експлозия. Някои от свойствата на водорода изискват допълнителен инженерен контрол, за да се гарантира безопасното му използване; като например широкият диапазон на запалими концентрации във въздуха (4 - 75%) и по-ниската енергия на запалване (само една десета от енергията за запалване в сравнение с бензина). Водородът има способността да преминава през материалите поради малкия размер на молекулите си и притежава разрушителна способност (водородна крехкост), която може да доведе до механична деградация и повреда до степен на изтичане в някои материали. Водородът има по-висока енергийна плътност на маса ( $\sim 120 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ) в сравнение с въглеродородите. Въпреки това ниската му плътност ( $0,084 \text{ kg.m}^{-3}$  при  $20^\circ\text{C}$  и  $0,1 \text{ MPa}$ ) означава, че ще е необходим по-голям обемен капацитет за съхранение в сравнение с природния газ, за да се осигури същата енергийна мощност. Поради това ще е необходимо съхраняването на големи количества водород, а най-подходящите варианти са подземните геоложки структури. Подземното съхранение на водород може да бъде сигурно и дългосрочно решение за натрупване на голямо количество енергия при пикове в потреблението и да се добие бързо при неравномерното използване на енергия. Подземно съхранение на газо - водород ще се развива успешно в дългосрочен план, който до 2050 г. се очаква да достигне 20-100 милиона тона. Чистият водород е без мирис, без цвят и без вкус. Потокът водород от теч е почти невидим при дневна светлина. Съединения като меркаптани и тиофани, които се използват за ароматизиране на природния газ, не могат да се добавят към водорода за използване в горивни клетки, тъй като съдържат сяра, която би отровила горивните клетки. Водородът, получен от преобразуване на други изкопаеми горива, обикновено се съпровожда от азот, въглероден диоксид, въглероден оксид и други следи от газове. Като цяло, всички тези газове също са без мирис, без цвят и без вкус. Водородът не е токсичен, но може да действа като просто задушаващо вещество, като измества кислорода във въздуха.

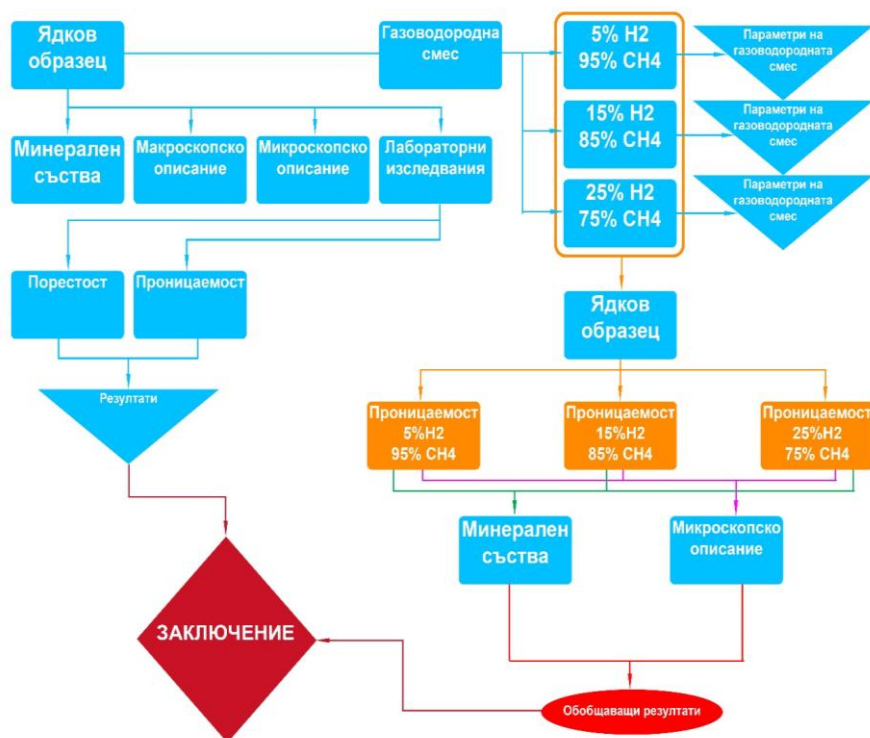
## **Класификация и характеристики на водорода**

Водородът се класифицира в различни "цветове", които отразяват метода на производство и свързания с него въглероден отпечатък. Зеленият водород е най-екологичната цел, добиван чрез електролиза на вода с използване на възобновяеми източници (вятър, слънце) и генериращ единствено кислород ( $O_2$ ), но е скъп и енергоемък.

## ГЛАВА II Разработване на интегриран модел за определяне на резервоарните свойства на скалата колектор по време на подземно съхранение на газо-водородна смес

Влиянието на водорода върху капацитета и филтрационните параметри на скалата колектор трябва да се изследва и анализира, тъй като водородът се очертава като обещаваща алтернатива за задоволяване на нарастващото търсене на устойчиви и възобновяеми енергийни източници. Подземното съхранение на водород в изчерпани газови находища има значителен потенциал за съхранение на енергия в голям мащаб и безпроблемна интеграция на възобновяеми енергийни източници благодарение на способността си да се справи с предизвикателствата, свързани с прекъсващия характер на възобновяемите енергийни източници.

На фигура II.1 е представен разработен интегриран модел за определяне на свойствата на резервоара на скалата колектор при подземно съхранение на смес от газ и водород. Той се състои от четири основни модула: характеризирание на ядката (минерален състав, порестост и проницаемост), определяне на параметрите на сместа от газ и водород при различно съдържание на водород и метан (5%, 15%, 25%), изследване на филтрационните свойства (порестост и проницаемост на ядката при различно съдържание на сместа от газ и водород) и модул, обобщаващ резултатите. Порестостта на ядката се определя чрез два метода: томография и хелиев порозиметър. При използване на метода на томографията се определя и минераложият и петрографският състав на ядката (извлечено от скалния колектор).



Фиг. II.1. Блок схема на интегрирания модел

Всяка газова смес се състои от набор от компоненти, като всеки отделен компонент има свои собствени параметри: моларна маса, критично налягане, критична температура, относителна плътност и др. Съответната газова смес има същите параметри.

В Таблица II.1 показана характеристика на газо-водородната смес използвана за провеждане на лабораторните изследвания и технологичните изчисления. В таблица II.2 са показани данните от за молекулната маса на газо-водородната смес при съдържание на водород 5%, 15% и 25%.

Таблица II.1. Характеристика на газо-водородната смес.

Сертификат на газо-водородна смес						
	Компонент	Процентно съдържание	Моларна маса на компонента	Критично налягане	Критична температура	Относителна плътност
Единица за измерване		mol %	kg.kmol <sup>-1</sup>	MPa	K	
5% H <sub>2</sub>	Метан CH <sub>4</sub>	95.00	16.043	4.605	190.6	0.5539
	Водород H <sub>2</sub>	5.00	2.016	1.299	33.3	0.0696
	ОБЩО:	100.00				
15% H <sub>2</sub>	Метан CH <sub>4</sub>	85.00	16.043	4.605	190.6	0.5539
	Водород H <sub>2</sub>	15.00	2.016	1.299	33.3	0.0696
	ОБЩО:	100.00				
25% H <sub>2</sub>	Метан CH <sub>4</sub>	75.00	16.043	4.605	190.6	0.5539
	Водород H <sub>2</sub>	25.00	2.016	1.299	33.3	0.0696
	ОБЩО:	100.00				

Таблица II.2. Молекулна маса на газо-водородната смес при съдържание на водород 5%, 15% и 25%

Съдържание на H <sub>2</sub> в %	Молекулна маса на газо-водородна смес	M <sub>i</sub> . x <sub>i</sub>	kg.kmol <sup>-1</sup>
5 % H <sub>2</sub>	Метан CH <sub>4</sub>	15.2409	kg.kmol <sup>-1</sup>
	Водород H <sub>2</sub>	0.1008	kg.kmol <sup>-1</sup>
	Молекулна маса на газо-водородна смес	15.3417	kg.kmol <sup>-1</sup>
15 % H <sub>2</sub>	Метан CH <sub>4</sub>	13.6366	kg.kmol <sup>-1</sup>
	Водород H <sub>2</sub>	0.3024	kg.kmol <sup>-1</sup>
	Молекулна маса на газо-водородна смес	13.9390	kg.kmol <sup>-1</sup>
25 % H <sub>2</sub>	Метан CH <sub>4</sub>	12.0323	kg.kmol <sup>-1</sup>
	Водород H <sub>2</sub>	0.5040	kg.kmol <sup>-1</sup>
	Молекулна маса на газо-водородна смес	12.5363	kg.kmol <sup>-1</sup>

В таблица II.5 са показани данните за пресмятане на плътността на газо-водородната смес при стандартни условия газо-водородната смес.

Таблица II.5 Плътност на газо-водородната смес при стандартни условия.

Съдържание на H <sub>2</sub> в %	Плътност на газа при стандартни условия (T=293.15 K ; P=0.1013 MPa)	[(M <sub>i</sub> .x <sub>i</sub> )/100]/24.04	kg.m <sup>-3</sup>
5 % H <sub>2</sub>	Плътност на газовата смес	0.6382	kg.m <sup>-3</sup>
15 % H <sub>2</sub>	Плътност на газовата смес	0.5798	kg.m <sup>-3</sup>
25 % H <sub>2</sub>	Плътност на газовата смес	0.5215	kg.m <sup>-3</sup>

На таблица II.6 са показани данните на относителната плътност на газо-водородната смес.

Таблица II.6 Относителна плътност на газо-водородната смес.

Съдържание на H <sub>2</sub> в %	Относителна плътност на газо-водородната смес		
5 % H <sub>2</sub>	Плътност на въздуха при стандартни условия	1.2045	kg.m <sup>-3</sup>
	Плътност на газовата смес при стандартни условия	0.6382	kg.m <sup>-3</sup>
	Относителна плътност на газо-водородната смес	0.530	
15 % H <sub>2</sub>	Плътност на въздуха при стандартни условия	1.2045	kg.m <sup>-3</sup>
	Плътност на газовата смес при стандартни условия	0.5798	kg.m <sup>-3</sup>
	Относителна плътност на газо-водородната смес	0.481	
25 % H <sub>2</sub>	Плътност на въздуха при стандартни условия	1.2045	kg.m <sup>-3</sup>
	Плътност на газовата смес при стандартни условия	0.5215	kg.m <sup>-3</sup>
	Относителна плътност на газо-водородната смес	0.433	

След като е определено приведеното налягане на газо-водородната смес с 5, 15, 25% съдържание на H<sub>2</sub> и съответно приведена температура на същата газо-водородната смес, използвам само две температури – 288.15 °K и 293.15 °K. След това се определя коефициента на свръхсвиваемост на газо-водородната смес при различни налягания и двете температури по номограмата на „Standing и Katz“. В таблици II.9, II.10, II.11 са показани коефициента на свръхсвиваемост Z.

Таблица II.9. Таблица на свръхсвиваемост за 5% H<sub>2</sub>.

Таблица Z за 5% H <sub>2</sub>					
Налягане P ,MPa	P <sub>пр</sub>	T <sub>пр</sub> при 288.15,K	T <sub>пр</sub> при 293.15 ,K	Z при 288.15	Z при 293.15
0.1	0.0225	1.5769	1.6042	1.00	1.00
0.5	0.1126	1.5769	1.6042	1.00	1.00
1.0	0.2252	1.5769	1.6042	0.99	0.99
1.5	0.3379	1.5769	1.6042	0.98	0.98
2.0	0.4505	1.5769	1.6042	0.97	0.97
5.0	1.1262	1.5769	1.6042	0.94	0.94
10.0	2.2524	1.5769	1.6042	0.89	0.89
15.0	3.3786	1.5769	1.6042	0.85	0.85

Таблица II.10. Таблица на свръхсвиваемост за 15% H<sub>2</sub>.

Таблица Z за 15% H <sub>2</sub>					
Налягане P ,MPa	P <sub>пр</sub>	T <sub>пр</sub> при 288.15,K	T <sub>пр</sub> при 293.15 ,K	Z при 288.15	Z при 293.15
0.1	0.0243	1.7254	1.7553	1.00	1.00
0.5	0.1217	1.7254	1.7553	1.00	1.00
1.0	0.2434	1.7254	1.7553	0.99	0.99
1.5	0.3650	1.7254	1.7553	0.99	0.99
2.0	0.4867	1.7254	1.7553	0.98	0.98
5.0	1.2168	1.7254	1.7553	0.96	0.96
10.0	2.4336	1.7254	1.7553	0.93	0.93
15.0	3.6504	1.7254	1.7553	0.93	0.93

Таблица II. 11. Таблица на свръхсвиваемост за 25% H<sub>2</sub>.

Таблица Z за 25% H <sub>2</sub>					
Налягане P, МПа	P <sub>пр</sub>	T <sub>пр</sub> при 288.15, K	T <sub>пр</sub> при 293.15, K	Z при 288.15	Z при 293.15
0.1	0.0265	1.9048	1.9379	1.00	1.00
0.5	0.1323	1.9048	1.9379	0.99	0.99
1.0	0.2647	1.9048	1.9379	0.99	0.98
1.5	0.3970	1.9048	1.9379	0.98	0.98
2.0	0.5293	1.9048	1.9379	0.97	0.99
5.0	1.3233	1.9048	1.9379	0.95	0.99
10.0	2.6466	1.9048	1.9379	0.98	1.00
15.0	3.9698	1.9048	1.9379	1.01	1.02

От изчисленията, направени съгласно модула от разработения интегриран модел за определяне на коефициента на свръхсвиваемост на газо-водородната смес, се установи, че коефициентът на на свръхсвиваемост за смес от газ и водород в анализирания термобаричен диапазон и със съдържание на водород от 5, 15, 25 % водород в сместа от газ и водород се променя при температура от 288.15 °K в диапазона от 0.85 до 1.01, а при температура от 293.15 °K в диапазона от 0.85 до 1.02, при наляганя от 0.1 до 15 МПа. Изведените корелационни зависимости за определяне на коефициента на свръхсвиваемост в разгледания термобаричен диапазон при съдържание на водород от 5, 15, 25% в природния газ се използват при провеждане на лабораторните експерименти за определяне на определяне на резервоарните свойства на скалата колектор съгласно разработения интегриран модел.

### Модул за определяне на вискозитет на газо-водородната смес

Вискозитета на газо-водородната смес е определен при налягане и температура в следните граници:  
 P = 0,1 МПа ÷ 70,3 МПа ; T = 278 K ÷ 511 K , по зависимостта на Lee-Gonzalez-Eakin описва с достатъчно голяма точност изменението на вискозитета на газо-водородната смес.

С формула II.8 се пресмята вискозитета на газо-водородната смес.

$$\mu_T = A \times e^{B \times \rho_T^C} \text{ [mPa.s]} \quad (\text{II.8})$$

В таблица II.12 са показани данните от пресмятането на вискозитета на газо-водородната смес.

Таблица II.12. Вискозитет на газо-водородната смес -  $\mu$

Вискозитет на газо-водородната смес - $\mu$ , mPa.s (Lee-Gonzalez-Eakin)									
	T, K	P, MPa	Z <sub>288.15</sub>	Mr, kg.kmol <sup>-1</sup>	A	B	C	$\rho$	$\mu$ , mPa.s
5% H <sub>2</sub>	288.15	0.1	1.00	15.3417	0.01125	5.55441	1.28912	0.0006	0.01126
		0.5	1.00		0.01125	5.55441	1.28912	0.0032	0.01129
		1	0.99		0.01125	5.55441	1.28912	0.0065	0.01134
		1.5	0.98		0.01125	5.55441	1.28912	0.0098	0.01141
	293.15	0.1	1.00	15.3417	0.01144	5.52198	1.29560	0.0006	0.01145
		0.5	1.00		0.01144	5.52198	1.29560	0.0031	0.01148
		1	0.99		0.01144	5.52198	1.29560	0.0064	0.01153
		1.5	0.98		0.01144	5.52198	1.29560	0.0096	0.01160
15% H <sub>2</sub>	288.15	0.1	1.00	13.9390	0.01152	5.54038	1.29192	0.0006	0.01152
		0.5	1.00		0.01152	5.54038	1.29192	0.0029	0.01155
		1	0.99		0.01152	5.54038	1.29192	0.0059	0.01160
		1.5	0.99		0.01152	5.54038	1.29192	0.0088	0.01166
	293.15	0.1	1.00	13.9390	0.01171	5.50796	1.29841	0.0006	0.01172
		0.5	1.00		0.01171	5.50796	1.29841	0.0029	0.01175
		1	0.99		0.01171	5.50796	1.29841	0.0058	0.01179
		1.5	0.99		0.01171	5.50796	1.29841	0.0087	0.01185
25% H <sub>2</sub>	288.15	0.1	1.00	12.5363	0.01180	5.52635	1.29473	0.0005	0.01181
		0.5	0.99		0.01180	5.52635	1.29473	0.0026	0.01183
		1	0.99		0.01180	5.52635	1.29473	0.0053	0.01188
		1.5	0.98		0.01180	5.52635	1.29473	0.0080	0.01193
	293.15	0.1	1.00	12.5363	0.01200	5.49393	1.30121	0.0005	0.01200
		0.5	0.99		0.01200	5.49393	1.30121	0.0026	0.01203
		1	0.98		0.01200	5.49393	1.30121	0.0052	0.01207
		1.5	0.98		0.01200	5.49393	1.30121	0.0079	0.01212

### Основни изводи

1. Използвайки разработения интегриран модел за определяне на параметрите на колекторната скала при съхранение на газово-водородни смеси, съдържащи от 5 до 25% водород, с достатъчна точност за практически цели, е възможно да се определят параметрите на газово-водородната смес, които определят филтрационните свойства на скалата колектор.
2. Разработеният интегриран модел определя промяната в коефициента на свръхсвиваемост, плътност и вискозитет при концентрации на водород в диапазона от 5 до 25% в температурен диапазон от 288,15 °K до 293,15 °K и при налягания в диапазона от 0,1 MPa до 15 MPa. Според изчисленията плътността на сместа от газ и водород варира от 0,0306 до 0,0418 kg.m<sup>-3</sup>. Установено е, че при 25% водород коефициентът на свръхсвиваемост Z за сместа от газ и водород се описва с различен числен модел при температура 288,15 °K и 293,15 °K в диапазона на налягане от 0,1 до 15 MPa. Вискозитетът на газово-водородната смес с 5-25% водород варира от 0,01126 до 0,01212 mPa.s.
3. За да се определят правилно перспективите и възможностите за съхранение на газово-водородни смеси в подземни газохранилища и да се анализират процесите, протичащи в зоната на пласта и призабойната зона на сондажа, е необходимо да се определят точно параметрите на газово-водородната смес. Това изисква основните процеси, протичащи в системата от продуктивни хоризонти на сондажа по време на съхранението

на газово-водородни смеси, да бъдат изучени и анализирани за всеки конкретен обект с помощта на разработения интегриран модел.

4. Основните процеси, протичащи в системата от продуктивен пласт - сондаж, зависят от количеството водород в природния газ, което изисква точно определяне на параметрите на газово-водородната смес.
5. Правилното определяне на протичащите процеси в продуктивния хоризонт е изключително важно за вземането на решение дали сондажът да бъде вертикален или с хоризонтален участък.
6. Получените данни за параметрите на газово-водородната смес са изключително важни за анализиране на влиянието на водорода върху капацитета и филтрационните параметри на скалната формация, образуваща продуктивния хоризонт, в долната част на сондажа, влиянието на водорода по време на добив и нагнетяване върху помпено-компресорните тръби (ПКТ) и определяне на оптималния технологичен режим за инжектиране и производство на газово-водородната смес. Посочените параметри на газово-водородната смес могат да се използват при проектирането на хибридни отоплителни системи.

### Модул за изследване на ядковите образци

Таблица II.13. Данни на скална проба №: 1

Наименование на характеристиката	Стандарти / валидирани методи	Единица на величината	Резултати от изпитанието	Условия на изпитанието
Калцит {CaCO <sub>3</sub> }	ЕТС 7.2.1-29/2016	%	72	t (22±4) °C RH (30+60) %
Кварц {SiO <sub>2</sub> }	ЕТС 7.2.1-29/2016	%	17	t (22±4) °C RH (30+60) %
Доломит {CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> }	ЕТС 7.2.1-29/2016	%	11	t (22±4) °C RH (30+60) %

Таблица II.14. Данни на скална проба №: 2

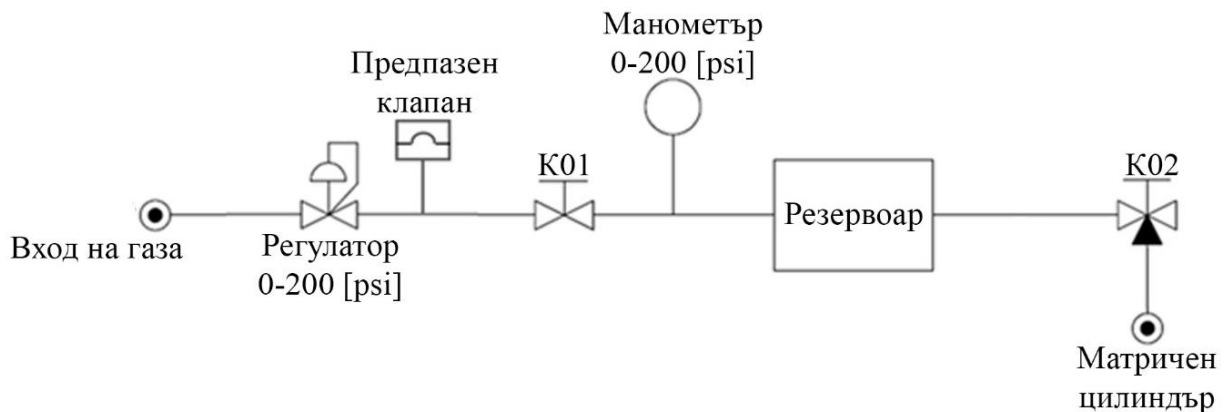
Наименование на характеристиката	Стандарти / валидирани методи	Единица на величината	Резултати от изпитанието	Условия на изпитанието
Калцит {CaCO <sub>3</sub> }	ЕТС 7.2.1-29/2016	%	47	t (22±4) °C RH (30+60) %
Кварц {SiO <sub>2</sub> }	ЕТС 7.2.1-29/2016	%	36	t (22±4) °C RH (30+60) %
Доломит {CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> }	ЕТС 7.2.1-29/2016	%	9	t (22±4) °C RH (30+60) %
Албит {NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> }	ЕТС 7.2.1-29/2016	%	6	t (22±4) °C RH (30+60) %
Пирит {FeS <sub>2</sub> }	ЕТС 7.2.1-29/2016	%	2	t (22±4) °C RH (30+60) %

## Приложимост на интегрирания модел за определяне на резервоарните свойства на скалата колектор при подземно съхранение на газо-водородна смес.

### Порестост

За определяне на порестостта е използвана изследователска апаратура: VINCI TECHNOLOGIES Helium Porosimeter Education. Хелиевият поризметър се използва за определяне на обема на зърната (твърдия обем) на пробата ядка. Принципът му се основава на закона на Бойл-Мариот. Резултатите се получават по-бързо, са много точни и не са чувствителни към минералогията на скалата. Пробата може да се използва за по-нататъшни тестове, а плътността на зърната се определя лесно. Пробите с нередовна форма, счупени и/или с кухини се измерват лесно от измерването на обемния обем. Предоставя се шаблон за отчет в XLS, готов за изчисляване на обема на зърната и обема на порите въз основа на въведените данни за диаметъра, дължината, теглото и налягането на пробата, отчетени на манометъра. Законът на Бойл-Мариот се използва за изчисляване на обема на зърната и порите от две измервания на налягането на известна маса хелий (или азот). Газът първоначално се съхранява в референтен резервоар при референтно налягане и след това се разширява в матрична чаша (държач на ядро).

На фигура II.16 е показана принципна схема на инсталацията и нейните компоненти.



Фиг. II.16. Диаграма на инсталацията

### Определяне на порестост чрез томография

Томографията произлиза от гръцката дума „tomo”, която означава „разрез” или „секция”. Компютърната томография (КТ) се основава на абсорбирането на рентгенови лъчи, което позволява визуализирането на вътрешната микроструктура на материалите. Областта на приложение е много широка – в медицината, в палеонтологията, за анализ на микроструктурата на различни материали и др. Тази технология е много полезна и за изследване на микроструктурата на бетона. Технологията за компютърна томография може да се използва за оценка на границите между бетона и арматурните пръти, порьозността на бетона, идентифициране на порите и предоставяне на информация за вътрешни кухини, размер и разпределение на порите в пробата. Компютърната томография позволява анализ на бетона на макро ниво за идентифициране на повредите, причинени от физични и химични фактори. Компютърната томография е метод, при който от множество рентгенови изображения на обект, заснети от различни ъгли, се получава триизмерно

изображение с помощта на компютърна обработка. Изследването се извършва върху последователни сечения.

За изследването и за получаване на експерименталните резултати се използва индустриална компютърна томография (КТ) Nikon XT H 225. КТ позволява изследване на широк спектър от материали и размери на проби с диапазон от 20 до 225 KV. Томографът е оборудван с пет-осна система за позициониране. Максималното тегло на пробата е 15 кг, а максималните размери на пробата са 15x15x15 см. Получената максимална разделителна способност на детектора е 1900x1500 с активна площ от 467 cm<sup>2</sup> и точност от 3 μm. Системата разполага и със специализиран софтуер за реконструкция и анализ на вътрешната структура на пробата в 3D. На фигура II.20 е показана примерна схема на работа на томографски апарат.



Фиг. II.20. Схема на работата на томографски апарат.

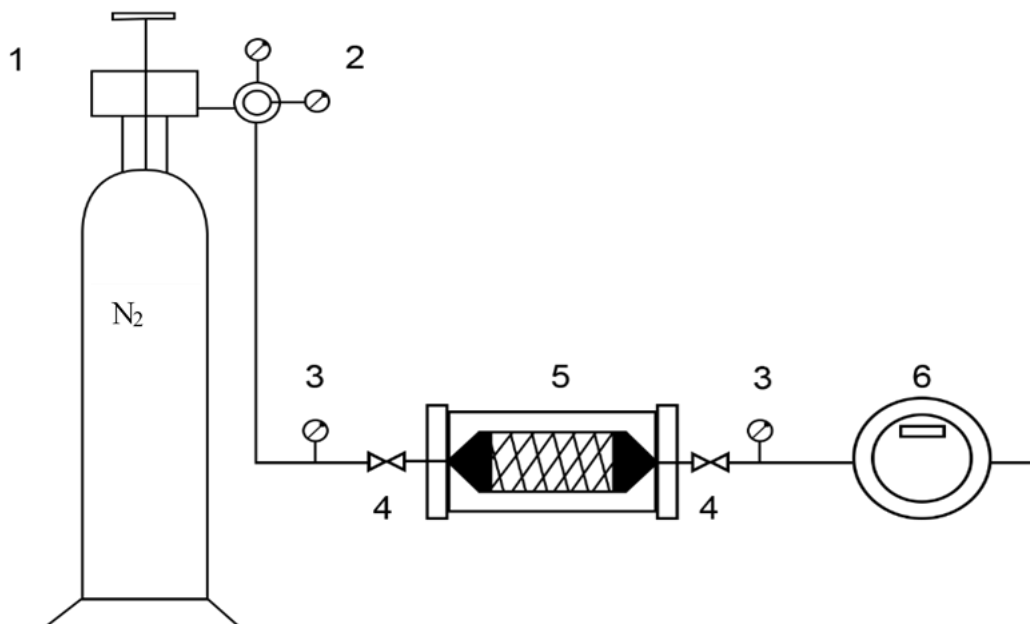
Във вътрешната структура на образец № 1 се наблюдава хомогенност във всички слоеве. На 3D изображението на сканираният обект (долу в дясно), трите цветни сечения представляват съответните различни погледи в дълбочина на детайла. Изображенията представляват различен поглед както следва горе в ляво – изглед отгоре, горе в дясно – изглед от дясно, долу в дясно – изглед отпред, а долу в ляво е 3D сканираният обект. Във вътрешната структура на образец № 2 се забелязват различия в хомогенността на детайла. Налични са различни минерали, които са с различена плътност по цялата вътрешна структура.

От направената 3D томография може да се направи следното заключение:

- Образец 1 е с хомогенна вътрешна структура.
- При образец 2 се наблюдават различни образувания, следствие на различна плътност на минералите.
- Не е възможно надеждното и количествено определяне на порестостта на скалните образци чрез 3D томография.

### **Абсолютна проницаемост**

Физическото свойство на скалите колектори да пропускат флуиди се нарича проницаемост. Абсолютна проницаемост се разбира проницаемостта на скалата при филтрация на една фаза. Лабораторното определяне на абсолютната газопроницаемост се осъществява обикновено чрез филтрация на азот, който газ не взаимодейства със скалата. На фигура II.25 е представена принципна схема на апаратурата за лабораторно определяне на абсолютната газопроницаемост.



Фиг. II.25. Принципна схема на лабораторното оборудване.

- 1) Бутилка с азот – 200 bar
- 2) Регулатор за азот
- 3) Манометър
- 4) Спирателен кран
- 5) Ядкодържател
- 6) Разходомер

Скалната проба се поставя в ядкодържателя и посредством бутилката с азот и регулатора се уплътнява. Пропуска се газ през пробата при предварително създадена оптимална депресия (разлика в налягането) посредством регулатора и отчетена на образцовия манометър. Обемът преминал газ през скалната проба за определено време се отчита на изхода на ядкодържателя посредством разходомера.

Абсолютната газопроницаемост се определя от линейния закон на филтрация на Дарси, показан на формула II.17.

$$K_a = \frac{2 \times V_o \times P_o \times m \times L}{(P_{\text{вх}}^2 - P_{\text{изх}}^2) \times F \times t} \times 1000 \quad (\text{II.17})$$

Където:

$K_a$  – абсолютна проницаемост ,mD

$V_o$  – отчетен обем преминал газ през скалната проба ,cm<sup>3</sup>

$P_o$  – атмосферно налягане ,atm

$m$  – вискозитет на използвания газ ,centipoise

$L$  – дължина на скалната проба ,cm

$P_{\text{вх}}$  – налягане на входа на ядкодържателя ,atm

$P_{\text{изх}}$  – налягане на изхода на ядкодържателя ,atm

$P_o = P_{\text{изх}}$

$F$  – площ на филтрация ,cm<sup>2</sup>

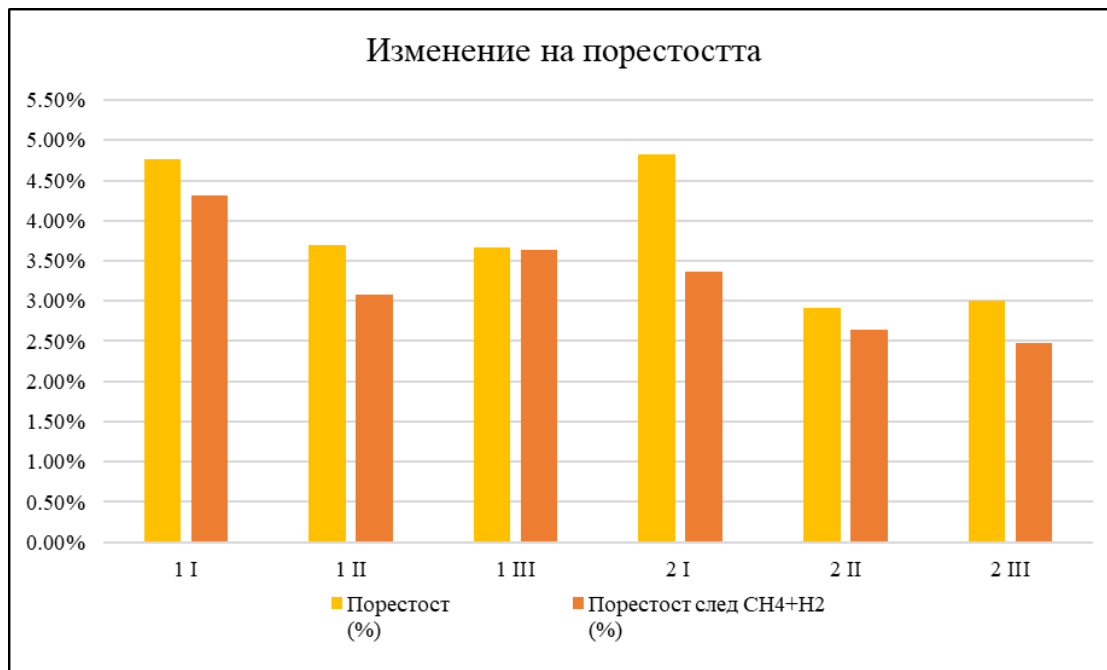
$T$  – време за преминаване на обем газ  $V_o$  през скалната проба ,sec

Таблица II.20. Геометрични и физически параметри на скалните образци.

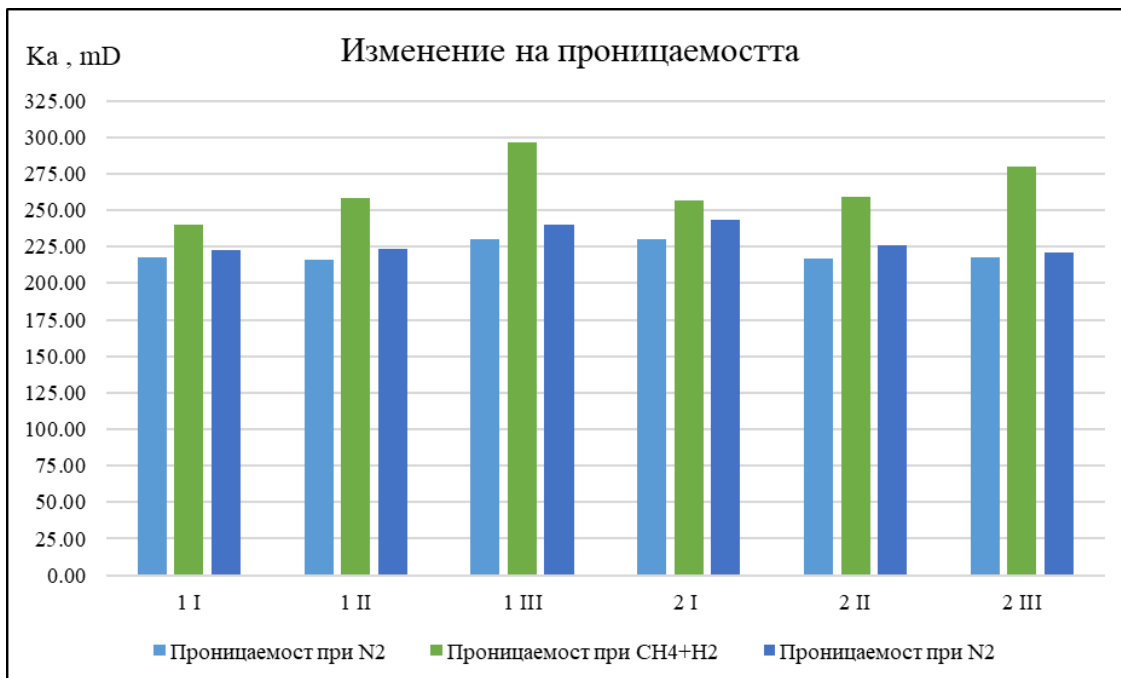
№ на пробата	Име на пробата	Диаметър mm	Радиус mm	Височина mm	Височина cm	Площ mm <sup>2</sup>	Площ cm <sup>2</sup>	Площ m <sup>2</sup>	Обем mm <sup>3</sup>	Обем cm <sup>3</sup>	Обем m <sup>3</sup>	Тегло g	Плътност g/cm <sup>3</sup>	Плътност kg/m <sup>3</sup>
1	1 I	38.30	19.15	31.20	3.12	1152.09	11.52	0.00115	35945.293	35.945	0.00003595	94.99	2.643	2642.738
2	1 II	38.30	19.15	31.30	3.13	1152.09	11.52	0.00115	36060.502	36.061	0.00003606	96.33	2.671	2671.344
3	1 III	38.30	19.15	33.90	3.39	1152.09	11.52	0.00115	39055.943	39.056	0.00003906	104.44	2.674	2674.113
4	2 I	38.30	19.15	34.30	3.43	1152.09	11.52	0.00115	39516.780	39.517	0.00003952	105.63	2.673	2673.042
5	2 II	38.30	19.15	31.60	3.16	1152.09	11.52	0.00115	36406.130	36.406	0.00003641	97.64	2.682	2681.966
6	2 III	38.30	19.15	31.90	3.19	1152.09	11.52	0.00115	36751.758	36.752	0.00003675	98.54	2.681	2681.232

Таблица II.26. Обобщени данни от извършените изследвания.

№ на пробата	Име на пробата	Порестост %	Проницаемост при N <sub>2</sub>	Проницаемост при CH <sub>4</sub> +H <sub>2</sub>	Проницаемост при N <sub>2</sub>	Порестост след CH <sub>4</sub> +H <sub>2</sub> %	Процентно изменение на порестост	Процентно изменение на проницаемост N <sub>2</sub> → CH <sub>4</sub> +H <sub>2</sub>	Процентно изменение на проницаемост N <sub>2</sub> → N <sub>2</sub>
1	1 I	4.77%	217.63	239.69	222.44	4.32%	9.434%	10.136%	2.208%
2	1 II	3.69%	216.26	258.09	223.84	3.08%	16.531%	19.341%	3.503%
3	1 III	3.67%	230.50	296.47	240.20	3.63%	1.090%	28.619%	4.207%
4	2 I	4.82%	230.20	256.51	243.79	3.37%	30.083%	11.430%	5.902%
5	2 II	2.92%	216.95	259.44	225.99	2.65%	9.247%	19.588%	4.167%
6	2 III	3.01%	217.60	280.16	221.11	2.47%	17.940%	28.748%	1.613%



Фигура II.26. Изменение на порестостта на скалните образци.



Фигура II.27. Изменение на проницаемостта на скалните образци.

В резултат от направените проучвания на скалните образци може да се направи следното заключение от данните показани в таблици II.21. - II.26 и изобразени на Фигура II.26 и Фигура II.27.:

- Газо-водородните смеси с концентрация на водород 5, 15 и 25% оказват влияние върху скалните образци с минерален състав показан в таблица II.27.

- След нагнетяването на скалните образци с газо-водородна смес се изменя порестостта на скалите, като процентното изменение преди и след наличието на газо-водородна смес е от 1.090 до 30.083 %.

- Проницаемостта на скалните образци се изменя процентно от 10.136 до 28.748 % при провеждане на експеримента преди наличието на газо-водородна смес и по-време на нагнетяване на скалните образци с газо-водородна смес с 5, 15 и 25% водород и метан.

- Проницаемостта на скалните образци се изменила постоянно от 1.613 до 5.902% след наличието на газо-водородна смес.

- Намаляването на порестостта на скалните проби е възможно да се дължи от минералния им състав и възможното взаимодействие на водорода H<sub>2</sub> с изграждащите ги минерали: Калцит {CaCO<sub>3</sub>}, Кварц {SiO<sub>2</sub>}, Доломит {CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>}, Албит {NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>}, Пирит {FeS<sub>2</sub>}.

- Увеличаването на проницаемостта може да се дължи дифузионите процеси на водорода в газо-водородната смес. Съответно с увеличаването на процентното съдържание на водород в сместа 5, 15, 25% , виждаме и постепенно увеличаване на проницаемостта на скалните образци.

### **ГЛАВА III. Конструирание на експериментално оборудване за тестване на влиянието на газо-водородната смес върху помпено-компресорните тръби**

Изградено е експериментално оборудване за тестване на ефекта на смес от газ и водород при различно съдържание на метан и водород (5%, 15%, 25%) върху стоманените тръби, използвани за добив и нагнетяване на газови сондажи за подземно съхранение на газ и водород. Налични са 5 модула: въведение в разглеждания проблем, теоретичен преглед на представения въпрос, представяне и подробно обяснение на експерименталната апаратура, стъпки необходими за провеждането на експеримента, резултати и обобщение. Резултатите, получени от проведения експеримент, показват потенциала на добив и нагнетяване на смес от газ и водород със стоманени тръби за подземно съхранение в подземни газохранилища. Непрекъснатият растеж на световното население и икономическите дейности доведе до значително увеличение на търсенето на енергия през последния век. Това търсене се задоволява главно чрез потреблението на въглеродни изкопаеми горива, включително въглища, нефт и природен газ. Изгарянето на изкопаеми горива обаче води до изпускане на парникови газове в атмосферата, което причинява глобално затопляне и аномални метеорологични явления, които представляват сериозна заплаха за съвременното общество. За да се смекчат тези климатични въздействия, е необходим спешен преход към въглеродно неутрални енергийни източници. Сред потенциалните алтернативи водородът се очертава като обещаващ енергиен носител, способен да подкрепи глобалната декарбонизация. Водородът предлага и икономически и технически предимства. Като гориво, той предлага по-високо енергийно съдържание на единица маса в сравнение с изкопаемите горива. Това прави водорода привлекателен кандидат за заместване на конвенционалните енергийни източници както в промишлеността, така и в транспорта. Създаването на енергийна система на водородна основа обаче зависи до голяма степен от рентабилни и безопасни методи на експлоатация. Транспортирането по тръбопроводи е най-технологично напредналият и мащабен подход за доставка на водород към момента. Експлоатацията на тръбопроводи при повишено налягане подобрява ефективността на транспортирането, но води до допълнителни енергийни изисквания и разходи. Транспортирането на добития или нагнетен флуид (газо-водородна смес) от призабойната зона на сондажа до устието на сондажа се извършва чрез колона от помпени-компресорни тръби (ПКТ) или тръби, които се спускат в производствената колона. Целта на тръбите е да осигурят транспортирането на добития или нагнетен флуид. Колона от помпени-компресорни тръби също така предпазва обсадната колона от абразивни и корозивни ефекти между сместа от газ и водород и обсадната колона. Колона от помпени-компресорни тръби улеснява ремонтните работи и е необходима за спиране на сондажа в аварийни ситуации. Тръбите се използват за осигуряване на подходящ технологичен режим за работа на сондажа. Повечето газопроводи са изградени от стоманени тръби, които се произвеждат икономично в големи количества. Водородните тръбопроводи исторически са разчитали на стомани със средна якост, като American Petroleum Institute (API) 5L X42, X46 и X52, които могат да работят при налягане до 13 MPa. С нарастването на индустриалното търсене на тръбопроводи, способни да транспортират водород при по-високо налягане, изследванията се фокусираха върху по-висококачествени стомани, като API 5CT API 5L X60, X70 и X80. Въпреки по-високата си якост, тези

висококачествени стомани са по-податливи на водородно крехкост (ВК), феномен, при който наличието на водород води до крехкост на стоманата, също така феномен при който наличието на водород намалява якостта и/или пластичността на металите, което води до аварийни ситуации. Тъй като водородът е силно запалим в присъствието на кислород, всякакви течове в тръбопроводите за транспортиране на водород могат да доведат до катастрофални инциденти. Дългосрочната експлоатация на метални тръбопроводи, транспортиращи водород под високо налягане, може лесно да удовлетвори всички тези условия. Освен това, допълнителни експлоатационни променливи (температура и налягане), като локална концентрация на напрежение и циклично натоварване, могат да влошат водородното крехкост при експлоатационни условия.

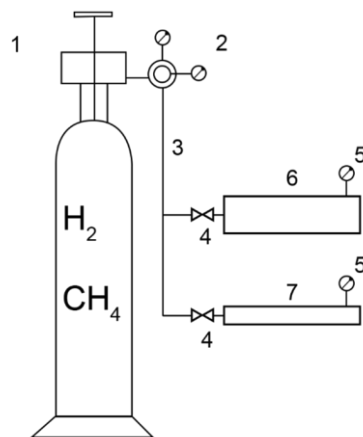
### **Разработения експериментален стенд за бързо определяне на влиянието на газово-водородните смеси върху тръбите в процеса на добив и експлоатация.**

Разработеният изпитателен стенд се състои от четири основни модула:

1. Бутилка със стандартна газово-водородна смес; регулатор; гъвкава връзка за свързване на регулатора към втория модул
2. Комплект тръби с диаметри 2' <sup>7/8</sup> и 4' <sup>1/2</sup> и дължина 42 cm
3. Измервателни манометри с диапазон 25 bar и клапани за високо налягане
4. Оборудване за измерване на течове от смеси от газ и водород и оборудване за определяне на техническото състояние на тестваните тръби (оборудване за откриване на дефекти).

Водородното крехкост е загуба на пластичност и якост в металите, причинена от въвеждането на водородни атоми в решетката, обикновено при температури под ~150 °C. Водородът може да бъде въведен по време на операции при висока температура (леене, заваряване, термична обработка) или електрохимични процеси (корозия, галванично покритие, катодна защита). След като бъде абсорбиран, той се разпространява до границите на зърната, където образува мехури под високо налягане или крехки хидриди (в метали като титан), което води до междузърнесто напукване. Това променя режима на разрушаване на метала от дактилен на крехък. В резервоарите за съхранение на водород типове I–III (метални или с метално покритие) са уязвими по цялата си структура, докато тип IV (композитни с полимерно покритие) са уязвими само в металната част, където се намира клапанът.

Фигура III. 1 показва изследователското оборудване, разработено за бързо определяне на ефекта от газово-водородните смеси върху тръбите.



Фиг. III. 1. Диаграма на разработеното оборудване

- 1) Бутилка с газо-водородна смес – 200 bar
- 2) Регулатор за газо-водородна смес - 825D-15-H. Манометър
- 3) Хидравлични маркучи
- 4) Клапан за високо налягане - GEMELS GE2 Разходомер
- 5) Манометър с бурдонна тръба, Wika модел 233.50
- 6) Комплект помпено компресорни тръби с диаметри 2' <sup>7/8</sup> и 4' <sup>1/2</sup> и дължина 42 cm

Таблица III. 2. показва характеристиките на бутилките с газова-водородна смес. Характеристиките включват работно налягане, температура, обем на бутилката и количество. Таблица III. 3 показва сертификата за газовата-водородна смес в бутилки.

Таблица III.2. Характеристики на бутилките, съдържащи газова-водородна смес.

Бутилка №	Налягане при 15 °C	Мин. остатъчно налягане	Обем	Температура на съхранение	Количество
13325	150 bar	5 bar	10 L	5 °C - 30 °C	1,5 m <sup>3</sup>
13481	150 bar	5 bar	10 L	5 °C - 30 °C	1,5 m <sup>3</sup>
02440	150 bar	5 bar	10 L	5 °C - 30 °C	1,5 m <sup>3</sup>

Таблица III. 3. Сертификат за сместа от газ и водород.

Бутилка №	Пореден №	Газ	Мерна единица	Метод за изпитване	Зададена стойност	Измерена стойност	Очаквана несигурност
13325	1	Водород (H <sub>2</sub> )	Vol. %	BDS EN ISO 6143:2006	5,00	5,00	0,14
	2	Метан (CH <sub>4</sub> )			95,00	95,00	2,73
13481	1	Водород (H <sub>2</sub> )			15,00	15,02	0,43
	2	Метан (CH <sub>4</sub> )			85,00	84,98	2,44
02440	1	Водород (H <sub>2</sub> )			25,00	24,94	0,71
	2	Метан (CH <sub>4</sub> )			75,00	75,06	2,15

Измерените стойности се базират на обемни части при 0 °C и 1013 mbar. Условия на изпитване: 24,0 °C ± 0,6 °C.

Таблица III. 4 показва характеристиките на тръбите. Характеристиките включват външен диаметър, тегло на линеен метър, дебелина на стената, клас на стоманата, устойчивост на срутване, вътрешно налягане на провлачване и граница на провлачване.

Таблица III. 4. Характеристики на тръбите.

Външен диаметър		Тегло		Дебелина на стената		Клас	
inch	mm	ppf	kg.m <sup>-1</sup>	inch	mm		
2 <sup>7/8</sup>	73.02	8.60	12.80	0.217	5.51	P110	
4 <sup>1/2</sup>	114.3	13.50	20.09	0.271	6.88	P110	
Тяло на тръбата							
Външен диаметър		Устойчивост на огъване		Вътрешно налягане на опън		Якост на опън	
inch	mm	psi	MPa	psi	MPa	lb	kN
2 <sup>7/8</sup>	73.02	21040	145.0	20620	142.1	273200	1215.2
4 <sup>1/2</sup>	114.3	10690	73.7	12410	85.5	422000	1877

## **Последователност за провеждане на експеримента**

След изработването на изследователското оборудване, показано на фигура III. 1., бяха проведени следните изследователски дейности:

1. Всяка от тръбите беше измерена с ултразвуков апарат Olympus MG45 в три отделни точки по дължината на тръбата, за да се определи точно дебелината на стената и да се идентифицират евентуални дефекти. В резултат на замерванията не бяха открити такива дефекти в нито една от шестте тръби.

2. Тестване на тръбите за течове. За тази цел те се подлагат на хидравлично изпитване в продължение на 30 дни. Всяка тръба се наляга с природен газ при налягане от 20 bar. Всички тръби са херметични, както показва резултатът от хидравличното изпитване, тъй като в продължение на 30 дни не е регистрирано необичайно падане на налягането.

3. Всяка от тръбите се измерват с ултразвуков апарат Olympus MG45 в три отделни точки по дължината на тръбата, за да се определи точно дебелината на стената и да се идентифицират евентуални дефекти. В резултат на замерването не бяха открити такива дефекти в нито една от шестте тръби.

4. Природният газ се изпуска от всички тръби, след което те се налягат с газова-водородна смес с концентрация на водород към метан от 5, 15 и 25%.

5. Следните дейности се извършват в рамките на 60 дни:

- Визуална проверка на тръбите за корозия или нарушения в целостта на оборудването.

- Наблюдение и записване на налягането в тръбите с манометър.

- Измерване на дебелината на стената на тръбите с Olympus 45MG.

- Проверка за изтичане на смес от газ и водород от резбови връзки, заварени съединения и клапата с помощта на газоанализатор.

Таблица III. 4. Дебелина на стената на ПКТ

№	Газ	D вън	Дебелина на стената на ПКТ																										
			30/09/2025			07/10/2025			14/10/2025			21/10/2025			28/10/2025			04/11/2025			11/11/2025			18/11/2025			25/11/2025		
			H [mm]	C [mm]	K [mm]	H [mm]	C [mm]	K [mm]	H [mm]	C [mm]	K [mm]	H [mm]	C [mm]	K [mm]	H [mm]	C [mm]	K [mm]	H [mm]	C [mm]	K [mm]	H [mm]	C [mm]	K [mm]	H [mm]	C [mm]	K [mm]	H [mm]	C [mm]	K [mm]
A I	5% H <sub>2</sub>	4 <sup>1/2</sup>	6.59	6.55	6.53	6.58	6.55	6.53	6.57	6.55	6.52	6.57	6.55	6.52	6.56	6.54	6.52	6.56	6.54	6.52	6.55	6.54	6.51	6.55	6.54	6.51	6.54	6.54	6.51
A II	15% H <sub>2</sub>		6.73	6.66	6.75	6.72	6.66	6.74	6.72	6.65	6.73	6.71	6.65	6.73	6.71	6.65	6.72	6.70	6.65	6.72	6.70	6.64	6.71	6.69	6.64	6.71	6.69	6.64	6.70
A III	25% H <sub>2</sub>		6.47	6.43	6.47	6.47	6.43	6.46	6.46	6.43	6.45	6.46	6.43	6.45	6.46	6.42	6.44	6.46	6.42	6.44	6.45	6.42	6.43	6.45	6.42	6.43	6.45	6.42	6.42
B I	5% H <sub>2</sub>	2 <sup>7/8</sup>	5.69	5.56	5.69	5.68	5.56	5.69	5.68	5.55	5.68	5.68	5.55	5.68	5.67	5.55	5.68	5.67	5.55	5.68	5.67	5.54	5.67	5.66	5.54	5.67	5.66	5.54	5.67
B II	15% H <sub>2</sub>		5.56	5.63	5.69	5.55	5.62	5.69	5.55	5.61	5.69	5.55	5.61	5.69	5.54	5.60	5.68	5.54	5.60	5.68	5.54	5.59	5.68	5.53	5.59	5.68	5.53	5.58	5.68
B III	25% H <sub>2</sub>		5.73	5.79	5.81	5.73	5.78	5.81	5.72	5.77	5.81	5.72	5.77	5.81	5.72	5.76	5.80	5.72	5.76	5.80	5.71	5.75	5.80	5.71	5.75	5.80	5.71	5.74	5.80

Таблица III. 5. Налягане в ПКТ

№	Газ	D вън	Налягане в ПКТ , bar									
			30/09/2025	07/10/2025	14/10/2025	21/10/2025	28/10/2025	04/11/2025	11/11/2025	18/11/2025	25/11/2025	
A I	5% H <sub>2</sub>	4 <sup>1/2</sup>	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	14.50	14.50	14.50
A II	15% H <sub>2</sub>		15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	14.50	14.50	14.50	14.00	
A III	25% H <sub>2</sub>		15.00	15.00	15.00	15.00	14.50	14.50	14.50	14.00	14.00	
B I	5% H <sub>2</sub>	2 <sup>7/8</sup>	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	14.50
B II	15% H <sub>2</sub>		15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	14.50	14.50	
B III	25% H <sub>2</sub>		15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	14.50	14.50	14.00	

### Основни изводи

1. От резултатите, показани в таблица III. 4. от проведения експеримент, може да се каже, че експериментът е дал отрицателни резултати, както се вижда от данните, че дебелината на стените на тръбите не остава постоянна. Записаното отклонение е между 0,01 mm и 0,05 mm. Поради тази причина можем да заявим, че газо-водородната смес в съотношение 5, 15, 25% при работно налягане 15 bar е повлияла на тръбната колона през 60 дни, през които е проведен експериментът.

2. От резултатите, показани в таблица III. 5. можем да видим налягането вътре в тръбите през 60 дни, през които е провеждан експериментът.

3. Резултатите показват, че в някои от тръбите има загуба на налягане, която е в нормални граници. По време на експеримента тръбите бяха тествани за течове с помощта на Sewerin EX-TEC PM 4, като детекторът за газ сигнализира, че има теч на газо-водородна смес от изхода на клапаните GEMELS GE2. Газовият детектор не показва никакви признаци на изтичане на газо-водородна смес по заварените съединения на тръбите, нито по резбовите съединения на манометъра, нито по входа на клапаните GEMELS GE2. Въз основа на тези данни

може да се каже, че по време на експеримента тръбите са останали херметични и не е имало загуба на налягане поради тръбите, изработени от стомана P110.

#### Заклучение

В резултат на разработеното изследователско оборудване за определяне на влиянието на газова-водородната смес върху колоната от помпено-компресорни тръби за периода на изследване, беше установено, че:

1. Разработеното оборудване е херметично.
2. Газо-водородна смес с концентрация на водород 5, 15, 25% оказва не значително влияние върху помпено-компресорни тръби, изработени от стомана P110.
3. Тестваните тръби с диаметър  $2' \frac{7}{8}$  и  $4' \frac{1}{2}$ , изработени от стомана P110, могат да се използват в процеса на добив и нагнетяване в подземни газохранилища за съхранение на газова-водородна смес с концентрация на водород 5, 15, 25%.

#### Определяне на дебита на сондаж по време на добив на газова-водородна смес.

По формула III.1. се намира дебита на сондаж по време на добив на газова-водородна смес.

$$Q = \frac{\pi \times k \times h \times T_{ст} \times [P_{пл}^2 - P_c^2]}{P_{ст} \times \mu \times Z \times T_{пл} \times \left( \ln \frac{R_k}{R_c} \right)} \quad (III.1)$$

Където:

Q – дебит на сондажа ,m<sup>3</sup>/s

k – проницаемост на скалата колектор ,m

h – дебелина на пласта ,m

T<sub>ст</sub> – стандартна температура ,°K

P<sub>пл</sub> – пластово налягане ,MPa

P<sub>c</sub> – забойно налягане ,MPa

P<sub>ст</sub> – стандартно налягане ,MPa

μ – вискозитет на газова-водородната смес ,Pa.s

Z – коефициента на свръхсвиваемост

T<sub>пл</sub> – пластова температура ,°K

R<sub>k</sub> – приведен радиус на контура ,m

R<sub>c</sub> – приведен радиус на сондажа ,m

Дебитите на сондаж при различни пластови налягания и съдържание на водород от 5-25% в газова-водородна смес са показани в таблици III.9. , III.10. , III.11. Таблицы III.9. Дебитите на сондаж при добив на газова-водородна смес с 5% съдържание на водород.

5 % H <sub>2</sub>									
Р <sub>пл</sub> ,MPa	Р <sub>с</sub> ,MPa	K ,mD	h ,m	T <sub>ст</sub> ,K	T <sub>пл</sub> ,K	Z	R <sub>k</sub> ,m	R <sub>c</sub> ,m	Q ,mln . m <sup>3</sup> /day
8	3	248.1	20	293.15	342.15	0.909	500	0.107	7.41
9	4	248.1	20	293.15	342.15	0.899	500	0.107	8.86
10	5	248.1	20	293.15	342.15	0.890	500	0.107	10.33
11	6	248.1	20	293.15	342.15	0.881	500	0.107	11.82
12	7	248.1	20	293.15	342.15	0.873	500	0.107	13.33
13	8	248.1	20	293.15	342.15	0.865	500	0.107	14.87
14	9	248.1	20	293.15	342.15	0.858	500	0.107	16.42
15	10	248.1	20	293.15	342.15	0.852	500	0.107	17.98

Таблицы III.10. Дебитите на сондаж при добив на газо-водородна смес с 15% съдържание на водород.

15 % H <sub>2</sub>									
Рпл ,MPa	Рс ,MPa	К ,mD	h ,m	Тст ,K	Тпл ,K	Z	Rk ,m	Rc ,m	Q ,mln . m <sup>3</sup> /day
8	3	258.765	20	293.15	342.15	0.941	500	0.107	7.47
9	4	258.765	20	293.15	342.15	0.930	500	0.107	8.94
10	5	258.765	20	293.15	342.15	0.920	500	0.107	10.42
11	6	258.765	20	293.15	342.15	0.913	500	0.107	11.90
12	7	258.765	20	293.15	342.15	0.907	500	0.107	13.39
13	8	258.765	20	293.15	342.15	0.903	500	0.107	14.86
14	9	258.765	20	293.15	342.15	0.901	500	0.107	16.31
15	10	258.765	20	293.15	342.15	0.901	500	0.107	17.74

Таблицы III.11. Дебитите на сондаж при добив на газо-водородна смес с 25% съдържание на водород.

25 % H <sub>2</sub>									
Рпл ,MPa	Рс ,MPa	К ,mD	h ,m	Тст ,K	Тпл ,K	Z	Rk ,m	Rc ,m	Q ,mln . m <sup>3</sup> /day
8	3	288.315	20	293.15	342.15	0.959	500	0.107	7.49
9	4	288.315	20	293.15	342.15	0.954	500	0.107	8.89
10	5	288.315	20	293.15	342.15	0.951	500	0.107	10.29
11	6	288.315	20	293.15	342.15	0.950	500	0.107	11.68
12	7	288.315	20	293.15	342.15	0.951	500	0.107	13.04
13	8	288.315	20	293.15	342.15	0.954	500	0.107	14.37
14	9	288.315	20	293.15	342.15	0.958	500	0.107	15.67
15	10	288.315	20	293.15	342.15	0.964	500	0.107	16.92

### Определяне на устиевото налягане на сондаж по време на добив на газо-водородна смес.

Чрез формула III.2. се пресмята устиевото налягане на газов сондаж по време на добив на газо-водородна смес със съдържание на водород от 5 до 25%.

$$P_y = \sqrt{\frac{P_c^2 - \frac{690,5 \times 10^{-12} \times Z \times T_{cp} \times L \times \bar{\rho} \times \lambda (e^S - 1) Q^2}{d_{пкт}^5 \times S}}{e^S}} \quad (III.2.)$$

Където:

$P_{уст}$  – налягането на устието на сондажа ,MPa

$P_{заб}$  – налягането на забоя на сондажа ,MPa

$Z$  – коефициента на свръхсвиваемост

$T_{cp}$  – средната температура в колоната от помпено-компресорни тръби ,K

$L$  – дължина на колоната от помпено-компресорни тръби ,m

$\bar{\rho}$  – относителна плътност на газо-водородната смес

$\lambda$  – коефициента на хидравлично триене

$Q$  – дебит на сондажа ,m<sup>3</sup>/s

$d_{пкт}$  – вътрешен диаметър на колоната от помпено-компресорни тръби ,m

$e$  – Неперово число  $e = 2,7182818284$

$S$  – параметър, определя се чрез зависимост III.4

$$S = \frac{0,03415 \times \bar{\rho} \times L}{Z \times T_{cp}} \quad (III.4.)$$

За да използваме зависимост III.2 е необходимо да се определи коефициента на хидравлично триене  $\lambda$  в зависимост от критерия на Рейнолдс и относителната грапавост на вътрешната повърхност на колоната от ПКТ. Рейнолдс пресмятаме чрез зависимост III.5.

$$Re = \frac{17,75 \times Q \times \bar{\rho}}{d_{ПКТ} \times \mu} \quad (III. 5.)$$

Където:

$Q$  – дебита на сондажа ,  $10^3 \times m^3/d$

$\mu$  – вискозитет на газо-водородната смес ,Pa.s

$\bar{\rho}$  – относителна плътност на газо-водородната смес

$d_{ПКТ}$  – вътрешен диаметър на колоната от помпено-компресорни тръби ,m

Относителната грапавост на вътрешната повърхност на колоната от ПКТ пресмятаме чрез зависимост III.6.

$$\varepsilon_{от} = \frac{K_e}{d_{ПКТ}} \quad (III. 6.)$$

Където  $K_e$  е абсолютната грапавост, тя зависи от състоянието на колоната на ПКТ, в нашия случай колоната е от нови стоманени тръби и  $K_e = 0,04 \times 10^{-3} m$ . В областта на турбулентна автомоделност (квадратична зона) –  $Re \times \varepsilon_{от} > 500$  коефициента на хидравлично триене  $\lambda$  го изчисляваме с формула III.7.

$$\lambda = 0,11 \times \left( \frac{K_e}{d_{ПКТ}} \right)^{0,25} \quad (III. 7.)$$

Устиевото налягане на сондаж по време на добив на газо-водородна смес със съдържание на водород от 5 до 25% водород е показано в таблици III.12. - III.17.

Таблицы III.12. Устиево налягане при 5% H<sub>2</sub> и  $d_{ПКТ} 4^{1/2}$ .

Рс ,МПа	Q ,m <sup>3</sup> /s	Z	L ,m	Тср К	d <sub>ПКТ</sub> ,m	$\bar{\rho}$	Re	$\lambda$	S	Руст ,МПа
3	85.77	0.968	1750	317.65	0.100	0.530	63378296307	0.0156	0.206	2.707
4	102.49	0.955	1750	317.65	0.100	0.530	75734418360	0.0156	0.209	3.604
5	119.51	0.943	1750	317.65	0.100	0.530	88308819195	0.0156	0.212	4.499
6	136.80	0.931	1750	317.65	0.100	0.530	101082798792	0.0156	0.214	5.392
7	154.33	0.920	1750	317.65	0.100	0.530	114036054417	0.0156	0.217	6.282
8	172.07	0.909	1750	317.65	0.100	0.530	127146739909	0.0156	0.220	7.170
9	190.00	0.899	1750	317.65	0.100	0.530	140391544651	0.0156	0.222	8.057
10	208.07	0.890	1750	317.65	0.100	0.530	153745792418	0.0156	0.224	8.942

Таблицы III.13. Устиево налягане при 5% H<sub>2</sub> и  $d_{ПКТ} 2^{7/8}$ .

Рс ,МПа	Q ,m <sup>3</sup> /s	Z	L ,m	Тср К	d <sub>ПКТ</sub> ,m	$\bar{\rho}$	Re	$\lambda$	S	Руст ,МПа
3	85.77	0.968	1750	317.65	0.062	0.530	102223058560	0.0175	0.206	2.707
4	102.49	0.955	1750	317.65	0.062	0.530	122152287677	0.0175	0.209	3.604
5	119.51	0.943	1750	317.65	0.062	0.530	142433579348	0.0175	0.212	4.499
6	136.80	0.931	1750	317.65	0.062	0.530	163036772245	0.0175	0.214	5.392
7	154.33	0.920	1750	317.65	0.062	0.530	183929120028	0.0175	0.217	6.282
8	172.07	0.909	1750	317.65	0.062	0.530	205075386951	0.0175	0.220	7.170
9	190.00	0.899	1750	317.65	0.062	0.530	226437975244	0.0175	0.222	8.057
10	208.07	0.890	1750	317.65	0.062	0.530	247977084545	0.0175	0.224	8.942

Таблицы III.14. Устиево налягане при 15% H<sub>2</sub> и d<sub>пкт</sub> 4<sup>1/2</sup>.

Pc ,MPa	Q ,m <sup>3</sup> /s	Z	L ,m	Tcp K	d <sub>пкт</sub> ,m	$\bar{\rho}$	Re	$\lambda$	S	Pуст ,MPa
3	86.49	1.023	1750	317.65	0.100	0.481	58001404858	0.0156	0.177	2.746
4	103.44	1.003	1750	317.65	0.100	0.481	69365697914	0.0156	0.181	3.655
5	120.56	0.985	1750	317.65	0.100	0.481	80846241049	0.0156	0.184	4.562
6	137.75	0.968	1750	317.65	0.100	0.481	92378663104	0.0156	0.187	5.465
7	154.93	0.954	1750	317.65	0.100	0.481	103895590537	0.0156	0.190	6.367
8	171.98	0.941	1750	317.65	0.100	0.481	115327865595	0.0156	0.193	7.267
9	188.79	0.930	1750	317.65	0.100	0.481	126605871499	0.0156	0.195	8.166
10	205.28	0.920	1750	317.65	0.100	0.481	137660913758	0.0156	0.197	9.065

Таблицы III.15. Устиево налягане при 15% H<sub>2</sub> и d<sub>пкт</sub> 2<sup>7/8</sup>.

Pc ,MPa	Q ,m <sup>3</sup> /s	Z	L ,m	Tcp K	d <sub>пкт</sub> ,m	$\bar{\rho}$	Re	$\lambda$	S	Pуст ,MPa
3	86.49	1.023	1750	317.65	0.062	0.481	93550652997	0.0175	0.177	2.746
4	103.44	1.003	1750	317.65	0.062	0.481	111880157927	0.0175	0.181	3.655
5	120.56	0.985	1750	317.65	0.062	0.481	130397162982	0.0175	0.184	4.562
6	137.75	0.968	1750	317.65	0.062	0.481	148997843716	0.0175	0.187	5.465
7	154.93	0.954	1750	317.65	0.062	0.481	167573533124	0.0175	0.190	6.367
8	171.98	0.941	1750	317.65	0.062	0.481	186012686443	0.0175	0.193	7.267
9	188.79	0.930	1750	317.65	0.062	0.481	204203018546	0.0175	0.195	8.166
10	205.28	0.920	1750	317.65	0.062	0.481	222033731868	0.0175	0.197	9.065

Таблицы III.16. Устиево налягане при 15% H<sub>2</sub> и d<sub>пкт</sub> 4<sup>1/2</sup>.

Pc ,MPa	Q ,m <sup>3</sup> /s	Z	L ,m	Tcp K	d <sub>пкт</sub> ,m	$\bar{\rho}$	Re	$\lambda$	S	Pуст ,MPa
3	86.67	1.009	1750	317.65	0.100	0.433	47960992478	0.0156	0.162	2.768
4	102.92	0.995	1750	317.65	0.100	0.433	56954449729	0.0156	0.164	3.686
5	119.11	0.983	1750	317.65	0.100	0.433	65910099321	0.0156	0.166	4.603
6	135.13	0.973	1750	317.65	0.100	0.433	74776717333	0.0156	0.168	5.519
7	150.90	0.965	1750	317.65	0.100	0.433	83503681505	0.0156	0.169	6.434
8	166.33	0.959	1750	317.65	0.100	0.433	92041929829	0.0156	0.170	7.349
9	181.33	0.954	1750	317.65	0.100	0.433	100344875770	0.0156	0.171	8.265
10	195.83	0.951	1750	317.65	0.100	0.433	108369244502	0.0156	0.172	9.181

Таблицы III.17. Устиево налягане при 15% H<sub>2</sub> и d<sub>пкт</sub> 2<sup>7/8</sup>.

Pc ,MPa	Q ,m <sup>3</sup> /s	Z	L ,m	Tcp K	d <sub>пкт</sub> ,m	$\bar{\rho}$	Re	$\lambda$	S	Pуст ,MPa
3	86.67	1.009	1750	317.65	0.062	0.433	77356439480	0.0175	0.162	2.768
4	102.92	0.995	1750	317.65	0.062	0.433	91862015691	0.0175	0.164	3.686
5	119.11	0.983	1750	317.65	0.062	0.433	106306611808	0.0175	0.166	4.603
6	135.13	0.973	1750	317.65	0.062	0.433	120607608602	0.0175	0.168	5.519
7	150.90	0.965	1750	317.65	0.062	0.433	134683357267	0.0175	0.169	6.434
8	166.33	0.959	1750	317.65	0.062	0.433	148454725530	0.0175	0.170	7.349
9	181.33	0.954	1750	317.65	0.062	0.433	161846573823	0.0175	0.171	8.265
10	195.83	0.951	1750	317.65	0.062	0.433	174789104036	0.0175	0.172	9.181

## **Заклучение**

В резултат на получените данни от определяне на дебита на сондаж по време на добив на газо-водородна смес и устиевото налягане могат да се направят следните изводи:

1. Дебитите на сондаж при добив на газо-водородна смес се увеличават с увеличаване на съдържание на водород от 5 до 15% а при 25 % намаляват при по- висок коефициент на проницаемост.

2. Устиевото налягане на сондаж по време на добив на газо-водородна смес със съдържание на водород от 5 до 25% се увеличават с увеличаване на коефициента на проницаемост при диаметър на ПКТ 4<sup>1/2</sup> и 2<sup>7/8</sup>.

3. Коефициента на хидравлично триене се изменя от 0,0156 до 0,0175.

## **ГЛАВА IV. Екологична и икономическо-технологична оценка**

Водородът все по-често се разглежда като жизненоважен елемент за глобалния преход към устойчива енергийна среда с ниски въглеродни емисии. Благодарение на гъвкавостта си като носител на чиста енергия, той предлага начин за намаляване на въглеродните емисии в сектори, в които това е трудно, като тежката промишленост, логистиката на дълги разстояния и отоплителните системи в жилищните сгради. Зеленият водород се отличава сред производствените техники, защото почти не генерира въглеродни емисии, което го позиционира като по-екологичен избор в сравнение с традиционните методи с високи въглеродни емисии. Въпреки потенциала му като устойчиво гориво, индустрията все още трябва да се справи с редица сложни социални, екологични и икономически предизвикателства. Тъй като секторът на зеления водород е в начален стадий, както крайната му пазарна траектория, така и по-широкото му въздействие върху обществото и световната икономика остават трудни за предсказване с сигурност.

Въпреки че водородът често се представя като чист енергиен източник, неговите физични свойства създават значителни екологични предизвикателства. Тъй като водородните молекули са изключително малки и силно реактивни, те често се изпускат в атмосферата чрез непреднамерени течове по време на производството и транспорта, както и чрез умишлено изпускане при експлоатацията. Въпреки че водородът сам по себе си не е токсичен и не задържа директно топлината като въглеродният диоксид, той действа като мощен индиректен парников газ. Последните научни модели оценяват неговия 100-годишен потенциал за глобално затопляне (GWP) на  $12 \pm 6$ , което предполага, че той е приблизително дванадесет пъти по-мощен от CO<sub>2</sub> за период от един век.

Мащабът на въздействието на водорода върху климата е пряко свързан с общия обем на водородната икономика и свързаните с нея нива на изтичане. Понастоящем се оценява, че изтичането по веригата на стойността варира в широк диапазон – от едва 0,2 % до 20 % – в зависимост от конкретните методи на производство, транспорт и потребление. Тъй като понастоящем липсват преки измервания на място, тези цифри се основават на лабораторни приближения и теоретично моделиране. Интересно е, че околната среда притежава естествен буфер: между 70% и 80% от изтеклия водород се абсорбира от почвените бактерии и дифузия, като само останалата част попада в атмосферата и допринася за непрякото затопляне.

За да се максимизират екологичните предимства на зеления водород и да се намалят свързаните с него климатични рискове, трябва да се даде приоритет на всеобхватни стратегии за смекчаване на въздействието. Основната линия на защита включва интегриране на строги протоколи за ограничаване и безопасност по цялата верига на стойността – от първоначалното производство до крайното приложение. Тази стратегия изисква внедряване на съдове за съхранение и транспортна инфраструктура с висока степен на цялостност, както и усъвършенствани сензори за откриване на течове и стандартизирани рамки за реагиране при извънредни ситуации. Тези технически нива са от съществено значение за намаляване на вероятността от непреднамерено изтичане на газ и за минимизиране на екологичното въздействие на евентуални изтичания.

Освен подобренията във физическата инфраструктура, оперативните промени също могат да играят важна роля за намаляване на въздействието върху атмосферата. Последните проучвания показват, че преустройството на съществуващите газопроводни мрежи за транспортиране на водород е най-ефективно при използване на смеси от водород и природен газ, а не на чист водород. По-конкретно, ограничаването на концентрацията на водород до 20% обемна смес е определено като практичен метод за намаляване на общия потенциал за изтичане в сравнение със системите, работещи с 100% водород. Като се фокусира върху тези инженерни стандарти с висока интегритет и стратегически техники за смесване, индустрията може по-добре да гарантира, че преходът към зелен водород наистина ще донесе обещаните ползи за климата.

### **Взаимни ползи от водородната екосистема**

С нарастващия натиск върху световната общност да се бори с климатичните промени, търсенето на устойчиви енергийни алтернативи, като зеления водород, достигна критичен връх. Макар преходът да включва справяне с различни рискове и компромиси, споменати по-горе, основната сила на този нововъзникващ сектор се крие в способността му да генерира разнообразни вторични предимства чрез създаването на нова физическа инфраструктура и организации. Зеленият водород може значително да допринесе за постигането на Целите за устойчиво развитие (ЦУР) на Организацията на обединените нации, като предоставя уникална рамка за свързване на множество цели и едновременно справяне с глобални кризи. Тази технология позволява декарбонизация на индустриални сектори, които са трудни за почистване, като потенциално създава над един милион нови работни места и допринася с милиарди за глобалния икономически продукт. Освен това, тя улеснява смесването на възобновяема енергия в националните електропреносни мрежи, намалява зависимостта от чуждестранни енергийни доставки и ефективно намалява общата въглеродна интензивност на енергийните мрежи.

### **Възможност за създаване на висококачествени работни места**

Водородът е изключително гъвкав и устойчив енергиен източник с приложения в енергийния, промишления и транспортния сектор, който предлага цялостна стратегия за икономическа декарбонизация. Възходът на тази технология като основа на глобалната енергийна промяна предлага значителна възможност за стимулиране на финансовия просперитет и заетостта в развиващите се и нововъзникващите пазари, в съответствие с целите за достойни условия на труд и намаляване на неравенството. С прехода на международната общност към възобновяеми енергийни източници, връзката между приемането на решения за чиста енергия и създаването на висококачествени професионални възможности стана изключително ясна. Като се има предвид жизненоважната роля на водорода за постигането на климатичните цели, експертите прогнозираят, че глобалното търсене на въглероден неутрален водород ще достигне 600 Mt до 2050 г., което потенциално ще поддържа 1,5 милиона работни места годишно в нововъзникващите икономики през следващите две десетилетия. Това разширяване на работната сила ще включва както преход на работници от традиционните енергийни сектори, така и създаването на изцяло нови роли, които изискват специализирано обучение и развитие на напреднали умения.

### **Прогнози за енергийна рамка на базата на водорода**

Преходът от енергийна структура, зависима от петрола, към модел, основан на водорода, изисква мащабно развитие на специализирани производствени съоръжения и центрове за зареждане. Тази нова инфраструктура

трябва да задоволи нарастващото потребителско търсене на водород, като същевременно използва съществуващите активи, включително газопроводи и железопътни мрежи, за да поддържа възможно най-ниски разходи за доставка.

### **Перспективи и ограничения**

Преходът към инфраструктура, базирана на водород, би променил фундаментално нефтопреработвателната промишленост и разнообразния ѝ набор от рафинирани продукти. В сценарий, базиран на водород, намаляващото търсене на бензин не само води до по-ниско потребление на суров нефт, но и променя финансовата логика на рафинериите, като превръща бензина от високоценно основно гориво в вторичен съпътстващ продукт на рафинирането. С намаляването на производството в съответствие с пониженото търсене на бензин, едновременно с това намалява и наличността на дизелово гориво, нефтохимически суровини и различни други деривати. Тези промени в предлагането и търсенето създават нови търговски възможности за различни алтернативни решения, включително потенциално суровини, произведени от биомаса, въглища и други устойчиви енергийни източници. В сценарий, при който традиционните запаси от нефт и газ са оскъдни, преходът от петролно-ориентирана рамка към водородно-ориентирана икономика между днес и 2050 г. – и по-нататък – вероятно ще предложи по-добри перспективи за иновации в секторите на биомасата, въглищата и алтернативната енергия. Повишените оценки на нефта и газа в американския енергиен пейзаж служат като катализатор за финансови мотивации за интегриране на нововъзникващите технологии. Преходът към модел, основан на водорода, налага създаването и прилагането на рамка за финансови стимули, които да мотивират изграждането на водородни мрежи и търговското разпространение на транспорта с горивни клетки. В началото е от съществено значение да се определят специализирани сектори, в които решенията на базата на водород могат да се наложат с минимални държавни субсидии. С напредъка в техническата компетентност и ползите от масовото производство, които намаляват разходите за оборудване и гориво, тези приложения на водорода ще намерят по-широко приложение на пазара. Логистиката на транспортирането на водород съставлява значителна част от крайната пазарна цена за потребителя. Проектирането на инфраструктура, която включва съществуващите газопроводи и железопътни мрежи за транспортиране на суровини, ще бъде ключов компонент от цялостната рамка за дистрибуция. Основните трудности при оптимизирането на тази верига за доставки включват съгласуване на наличните ресурси с начините на транспорт, определяне на стратегическите местоположения за производствените съоръжения и изграждане на устойчива мрежа за транспортиране.

## ГЛАВА V. Основни изводи и резултати

1. Анализирано е съвременното състояние на проблемите, свързани с моделиране и анализиране на хидродинамичните процеси, протичащи в продуктивния хоризонт и призабойната зона на сондажите при съхраняване на газо-водородни смеси в подземно газохранилище. На тази база са направени следните изводи:

- основният проблем при моделиране и анализиране на хидродинамичните процеси, протичащи в продуктивния хоризонт и призабойната зона на сондажите при съхранение на газо-водородни смеси в подземно газово хранилище е недостатъчната начална и текуща информация за влиянието на газо-водородната смес при различна концентрация на водород от 5 до 25 %;

- значителната част от необходимата информация се базира на провеждането на лабораторни изследвания на ядрови образци от продуктивния хоризонт и установяване на влиянието на газо-водородната смес върху колоната от помпено-компресорни тръби. В резултат на тези изследвания се уточняват оптималните условия за съхраняване на газо-водородни смеси в подземни газохранилища;

2. Въз основа на направените изводи е формулирана задачата за разработване на методологични подходи за прогнозиране на хидродинамичните процеси, протичащи в продуктивния хоризонт и призабойната зона на сондажите при съхранение на газо-водородни смеси в подземно газово хранилище.

3. Разработен е интегриран модел за определяне на резервоарните свойства на скалата колектор по време на подземно съхранение на газо-водородна смес в интервал от 5 до 25% Чрез него с достатъчна за практиката точност се прогнозира и оценяват:

- параметрите на газо-водородната смес, които влияят върху филтрационните свойства на скалата колектор;

- основните процеси, протичащи в системата - продуктивен пласт – сондаж и тяхната зависимост от количеството водород внесено в природния газ;

- хидро-газодинамичните, физико-химичните и капацитетните параметри на колекторите и насищащите ги флуиди;

- технологичните показатели дебит и устиево налягане на сондажа;

4. С разработеният интегриран модел за определяне на резервоарните свойства на скалата колектор при подземно съхранение на газо-водородна смес са определени филтрационните параметри на ядрови образци. Основните резултати от направената оценка са следните:

- след насищането на скалните образци с газо-водородна смес се изменя порестостта на скалите, като процентното изменение преди и след насищане с газо-водородна смес - е от 1.090 до 30.083 %;

- увеличаването на проницаемостта може да се дължи дифузионите процеси на водорода в газо-водородната смес. Съответно с увеличаването на процентното съдържание на водород в сместа (5, 15, 25%) , се наблюдава и постепенно увеличаване на проницаемостта на скалните образци;

- при нагнетяване на 25% водород в газо-водородната смес се установява намаляване на дебита на сондажа при налягане 15 MPa в сравнение със съдържание 5 и 15% водород.

5. За изследваните ядрови образци е установено, че при нагнетяване на газо-водородни смеси се намаляват капацитивните свойства на скалата колектор

а се увеличава коефициента на проницаемост. Оптималното количество водород в газо-водородната смес трябва да бъде под 25%.

6. С изграденото експериментално оборудване за тестване на ефекта на смес от газ и водород при различно съдържание на метан и водород (5%, 15%, 25%) е определено влиянието върху стоманените тръби, използвани за добив и нагнетяване на газови сондажи за подземно съхранение на газо-водородни смеси. Основните резултати от направената оценка са следните:

- газова-водородна смес с концентрация на водород 5, 15, 25% оказва незначително влияние върху помпено-компресорни тръби, изработени от стомана P110;

- тестваните тръби с диаметър  $2' \frac{7}{8}$  и  $4' \frac{1}{2}$ , изработени от стомана P110, могат да се използват в процеса на добив и нагнетяване в подземни газохранилища за съхранение на газо-водородна смес с концентрация на водород 5, 15, 25%.

## **ГЛАВА VI. НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ**

Основните приноси на дисертационния труд могат да бъдат систематизирани в две групи: научни (методологични) и научно-приложни:

### **А. Научни (методологични) приноси:**

1. Анализирано е състоянието на световните постижения на съвременната наука и практика по проблема за анализиране на хидродинамичните процеси, протичащи в продуктивния хоризонт и призабойната зона на сондажите при съхранение на газо-водородни смеси в подземно газово хранилище. Поставен е акцент върху филтрационните параметри на продуктивния пласт, теорията и практиката на петролната хидрогазодинамика, и моделирането на протичащите процеси;
2. На базата на извършения анализ са обосновани възможностите и са очертани методологичните подходи за анализиране на хидродинамичните процеси, протичащи в продуктивния хоризонт и призабойната зона на сондажите при съхранение на газо-водородни смеси в подземно газово хранилище, съобразени с конкретните природни условия, съдържанието на водород в газо-водородната смес от 5 до 25% и произтичащите от това специфични подходи;
3. На основата на извършените анализи и оценки и с отчитане на спецификата на перспективите и възможностите за създаване на подземен водороден газов хъб на територията на Република България е разработен интегриран модел за определяне на резервоарните свойства на скалата колектор по време на подземно съхранение на газо-водородна смес;
4. На базата на анализа на информацията и с използване на резултатите от проведените от автора лабораторни изследвания са разработени методологични подходи за прогнозиране на хидродинамичните процеси, протичащи в продуктивния хоризонт и призабойната зона на сондажите при съхранение на газо-водородни смеси в подземно газово хранилище.

### **Б. Научно-приложни приноси:**

1. Извършена е апробация на разработен интегриран модел за определяне на резервоарните свойства на скалата колектор по време на подземно съхранение на газо-водородна смес, в резултат на което е получена нова и уточняваща информация и са направени важни изводи за влиянието на газо-водородната смес върху скалата колектор.
2. Изградено е експериментално оборудване за тестване на ефекта на смес от метан и водород при 5%, 15% и 25% върху стоманените тръби, използвани за добив и нагнетяване в газови сондажи за подземно съхранение на газо-водородни смеси.
3. Получена е нова информация за влиянието на газо-водородната смес върху колоната от помпено-компресорни тръби.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бояджиев М., 2023, Невронните мрежи в газовата промишленост. „Принт фактор“, София
2. Бояджиев М., Л. Георгиев. Управление на газовата инфраструктура. ИК МГУ. 2020
3. Геров Л., 2019, Добив и съхраняване на природния газ. МГУ „Св. Ив. Рилски“, София, 297 стр.
4. Караджов М. Проектиране, изграждане, поддръжка и сервиз на битови хибридни системи с използване на природен газ. „ Минно дело и Геология, 9/2022, София, ISSN 0861 – 5713 (Принт), ISSN 2603 – 4549 (Онлайн), 42-46 стр.
5. Минчева Р., Е. Танева, Разработване на методика за лабораторно определяне на параметрите на колекторите на нефт и газ, Проучване и добив на нефт и газ – АД, Плевен, БРВ Нефт и газ, Божурище, 1993г
6. Николов Г., 1993, Транспорт и съхраняване на нефта и газа. МГУ, София.
7. Abe, J.O., Popoola, A., Ajenifuja, E., Popoola, O., 2019. Hydrogen energy, economy and storage: review and recommendation. *Int. J. Hydrogen Energy* 44 (29), 15072–15086
8. ANSI/AIAA G-095-2004, Guide to Safety of Hydrogen and Hydrogen Systems
9. Anteneh G. Dagnachew & Stephanie Solf , The Green Hydrogen Dilemma The risks, trade-offs, and co-benefits of a green hydrogen economy in low- and middle-income countries July, 2024
10. Bertagni, M. B., R. H. Socolow, J. M. P. Martirez, E. A. Carter, C. Greig, Y. Ju, T. Lieuwen, M. E. Mueller, S. Sundaresan, R. Wang, M. A. Zondlo, and A. Porporato. 2023. 'Minimizing the impacts of the ammonia economy on the nitrogen cycle and climate', *Proc Natl Acad Sci U S A*, 120: e2311728120
11. Cavanagh AJ., Yousefi, SH, Wilkinson, M & Groenenberg, RM. 2022: Hydrogen storage potential of existing European gas storage sites in depleted gas fields and aquifers. H2020 HyUSPRe project report, The University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland and TNO, Geological Survey of the Netherlands, Utrecht, The Netherlands
12. Dincer, I., Acar, C., 2015. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *Int. J. Hydrogen Energy* 40 (34), 11094–11111
13. Eicke, Laima, and Nicola De Blasio. 2022. 'Green hydrogen value chains in the industrial sector— Geopolitical and market implications', *Energy Research & Social Science*, 93.
14. *Energy Environ. Sci.*, 2021,14, 853
15. Esquivel-Elizondo, Sofia, Alejandra Hormaza Mejia, Tianyi Sun, Eriko Shrestha, Steven P. Hamburg, and Ilissa B. Ocko. 2023. 'Wide range in estimates of hydrogen emissions from infrastructure', *Frontiers in Energy Research*
16. Garlet B., Taís, Fernando de Souza Savian, José Luis Duarte Ribeiro, and Julio Cezar Mairesse Siluk. 2024. 'Unlocking Brazil's green hydrogen potential: Overcoming barriers and formulating strategies to this promising sector', *International Journal of Hydrogen Energy*, 49: 553-70.
17. Georgiev L., V. Mitkov Perspectives and opportunities for increase capacity for natural gas in underground gas storage in the Republic of Bulgaria.
18. Georgiev L.. Integrated Model for the Determination Development of Gas Field with Horizontal Wells. BMGK Comers. 2023. ISBN 978-619-92104-5-1

19. Ghadiani, H.; Farhat, Z.; Alam, T.; Islam, M.A. Assessing Hydrogen Embrittlement in Pipeline Steels for Natural Gas-Hydrogen Blends: Implications for Existing Infrastructure. *Solids* 2024, 5, 375–393.
20. H. Martz, G. Roberson, M. Skeate, D. Schneberk, S. Azevedo, Computerized tomography studies of concrete samples, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Volume 58, Issue 2, June 1991, Pages 216-226
21. Hanyu Li , Ranming Niu, at al. 2022. Hydrogen in pipeline steels: Recent advances in characterization and embrittlement mitigation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 105 (2022) 104709.
22. Hart D., P. Freund, and A. Smith, *Using Hydrogen – Today and Tomorrow*, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham, UK, 1999
23. Hawkins, S., Joffe, D., 2006. *Technological Characterisation of Hydrogen Storage and Distribution Technologies*. Policy Studies Institute, London, UK
24. Heinemann N., J. Alcalde, J. M. Miocic, *Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges* ,
25. *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies: Rev 0*, December 2001
26. Iabidine Messaoudani, Z., Rigas, F., Hamid, M.D.B., Hassan, C.R.C., 2016. Hazards, safety and knowledge gaps on hydrogen transmission via natural gas grid: a critical review. *Int. J. Hydrogen Energy* 41 (39), 17511–17525.
27. Ivanchev I., Stoimenov N., Sokolov B.. *Testing of Concrete by Contactless Non-Destructive Tomographic Method*. IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020, ISBN:978-1 7281-9719-7, 1-6
28. Kandeve M., N. Stoimenov, B. Popov, Zh. Kalitchin, V. Pozhidaeva, “Abrasive wear resistance of micro- and nano-diamond particles”, *Journal of the Balkan Tribology Association*, Book 2, Vol. 26, ISSN: 1310-4772, pp. 181-193, 2020
29. Karastoyanov, D., Stoimenov, N.. *Innovative Approach for Obtaining Metal Parts with Improved Hardness and Wear Resistance*. Proc. 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2022, 2022, ISBN:ISBN 978-166549607-0, DOI:DOI10.1109/CoDIT55151.2022.9804147, 1114-1117
30. Lakov L., K. Marinova, R. Dimitrova, D.Yovchev, M. Georgieva, M.Gacheva, K. Toncheva. Mineralogical-petrographic and tomographic study of a pilot series of “yellow” paving stones. *International Journal of Modern Engineering Research*, Vol. 14 Iss. 6 Nov.-Dec.2024, p17-24 ISSN: 2249–6645  
<https://www.researchgate.net/publication/386087397>
31. Lakshmanan, Sandhiya, and Madhulika Bhati. 2024. 'Unravelling the atmospheric and climate implications of hydrogen leakage', *International Journal of Hydrogen Energy*, 53: 807-15.
32. *Latin American Journal of Energy Research – Lajer* (2021) v. 8, n. 2, pp. 49–58  
<https://doi.org/10.21712/lajer.2021.v8.n2.p49-58>
33. Lebrouhi, B. E., J. J. Djoupo, B. Lamrani, K. Benabdelaziz, and T. Kousksou. 2022. 'Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview', *International Journal of Hydrogen Energy*, 47: 7016-48
34. Lorentz, Bernhard, Johannes Trüby, Felix Chr. Matthes, Pradeep Philip, Sébastien Douguet, Behrang Shirizadeh, Emmanuel Bovari, Aurélien Ailleret, and Augustin Guillon. 2023. "Green hydrogen: Energizing the path to net zero." In.: Deloitte.
35. M. Wevers, P. Meester, *Microfocus X-ray Computer Tomography in Materials Research*, 15th World Conference on Nondestructive Testing Roma (Italy), October, 2000
36. Manitatis K., *Pathways for the Production of Bio-Hydrogen: Opportunities and Challenges*, IEA Bioenergy, March 2003

37. Mitev, V. 2006. Indicators for evaluation of investment projects for the extraction of mineral raw materials. Sp. "Mining and Geology", no. 5, 2006, pp. 22-23. ISBN 0861-5713
38. Mitkov V., HYDROGEN STORAGE IN UNDERGROUND GAS RESERVOIR, University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia
39. Momirlan, M., Veziroglu, T., 2002. Current status of hydrogen energy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 6 (1–2), 141–179
40. Ogden J. and E. Kaijuka, New Methods for Modeling Regional Hydrogen Infrastructure Development, Unpublished paper, 2003
41. Okoroafor E. R., T. W. Kim, et al. Assessing the Underground Hydrogen Storage Potential of Depleted Gas Fields in Northern California 2022
42. P.O. Carden., Paterson, L., "Physical, chemical and energy aspects of underground hydrogen storage", *Int. J. Hydrog. Energy* 4 (6), 559–569, 1979
43. Plessis A., W. Boshoff, A review of X-ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials, *Construction and Building Materials*, Volume 199, pp. 637-651, 2019
44. Subedi, A., Thapa, B. S., 2023, Compendium of Fundamentals of Hydrogen Technology Issue I, Kathmandu University Dhulikhel, Nepal, ISBN 9789937146043.
45. Sun, T., E. Shrestha, S. P. Hamburg, R. Kupers, and I. B. Ocko. 2024. 'Climate Impacts of Hydrogen and Methane Emissions Can Considerably Reduce the Climate Benefits across Key Hydrogen Use Cases and Time Scales', *Environ Sci Technol*, 58: 5299-309.
46. T. Sprague, X-ray Tomography for Evaluation of Damage in Concrete Bond, thesis, The University of Washington, 2006
47. The Colors of Hydrogen | Belfer Center for Science and International Affairs | July 2024
48. The Green Hydrogen Dilemma The risks, trade-offs, and co-benefits of a green hydrogen economy in low- and middle-income countries Anteneh G. Dagnachew & Stephanie Solf July, 2024
49. Tseng, P., Lee, J., & Friley, P. (2003, June 24–26). Hydrogen economy: Opportunities and challenges Manuscript. International Energy Workshop, Laxenburg, Austria. [https://iea-etsap.org/workshop/worksh\\_6\\_2003/2003p\\_tseng.pdf](https://iea-etsap.org/workshop/worksh_6_2003/2003p_tseng.pdf)
50. Tseng, P., Lee, J., & Friley, P. (2003, June 24–26). Hydrogen economy: Opportunities and challenges (Paper presentation). International Energy Workshop, Laxenburg, Austria. [https://iea-etsap.org/workshop/worksh\\_6\\_2003/2003p\\_tseng.pdf](https://iea-etsap.org/workshop/worksh_6_2003/2003p_tseng.pdf)
51. Verstryngge E., C. Steen, J. Andries, K. BALEN, L. Vandewalle, M. Wevers, Experimental study of failure mechanisms in brittle construction materials by means of x-ray microfocus computed tomography, 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2016
52. Vicente M., J. Mínguez, D. González, The Use of Computed Tomography to Explore the Microstructure of Materials in Civil Engineering: From Rocks to Concrete, *Computed Tomography -Advanced Applications*, 2017.
53. Warwick, Nicola J., Alex T. Archibald, Paul T. Griffiths, James Keeble, Fiona M. O'Connor, John A. Pyle, and Keith P. Shine. 2023. 'Atmospheric composition and climate impacts of a future hydrogen economy', *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23: 13451-67.
54. <http://www.bulgartransgaz.bg>
55. <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/>
56. <http://www.HydrogenAssociation.org>
57. <http://www.vinci-technologies.com> - OpMan HeP Educ v3.28

58. <https://ims.evidentscientific.com/en/>
59. <https://webbook.nist.gov/chemistry/>
60. <https://www.gemels.com>
61. <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/product/xt-h-225>
62. <https://www.sewerin.com/en-gb/>
63. <https://www.voestalpine.com/group/en/>
64. <https://www.wika.com/en-en/homepage.WIKA>

## СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- Митков В., Л. Георгиев, Н. Лаков. Производство на електрическа и топлинна енергия от природен газ. Национална научно – техническа конференция с международно участие “Автоматизация в минната индустрия и металургията“ БУЛКАМК 2022, стр. 87-91 ISSN 1314-4537
- Georgiev L., V. Mitkov. Perspectives and opportunities for increase capacity for natural gas in underground gas storage in the Republic of Bulgaria (*Георгиев Л., В. Митков. Перспективи и възможности за повишаване на капацитета за съхраняване на природен газ в подземни газохранилища в Република България*), Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 66/2023 (*Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, Том 66/2023*) , p. 99-103 (*стр. 99-103*)
- Mitkov V., Hydrogen storage in underground gas reservoirs (Митков В., Съхраняване на водород в подземни газохранилища), Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 67/2024 (*Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, Том 67/2024*) , p. 110-113 (*стр. 110-113*)
- Mitkov V. Constructing an experimental equipment for testing the influence of natural gas – hydrogen mixture on the production tubing, Natural Sciences and Advanced Technology Education, Volume 34 Number 4, 2025, pp 564 – 576, <https://doi.org/10.53656/nat2025-4.05>
- Публикация на тема „Integrated model for determining the reservoir properties of the rock collector during underground storage of a gas-hydrogen mixture” под печат в списание „Natural Science and Advanced Technology Education Journal “

## **SUMMARY**

Modern modeling and analysis of hydrodynamic processes occurring in the productive horizon and the bottom hole zone of wells during storage of gas-hydrogen mixtures in underground gas storage facilities is performed using mathematical models of varying complexity based on numerical solution of equations. In a number of cases (insufficient information, lack of laboratory tests to determine the impact of gas-hydrogen mixtures on the scale collector and pump-compressor pipes, etc.), it is appropriate to use new methods and approaches applicable in the initial stage of studying and researching the possibilities for storing gas-hydrogen mixtures in underground gas storage facilities. The main problem in modeling and analyzing hydrodynamic processes occurring in the productive horizon and the bottomhole zone of wells during the storage of gas-hydrogen mixtures in underground gas storage facilities is the insufficient initial and current information on the influence of the gas-hydrogen mixture at different hydrogen concentrations ranging from 5 to 25%. A significant part of this information is based on laboratory tests of core samples from the productive horizon and determination of the impact on the production column. As a result of these studies, the optimal conditions for storing gas-hydrogen mixtures in underground gas storage facilities are being established.

This abstract examines and studies approaches and methodologies for modeling and analyzing the hydrodynamic processes occurring in the productive horizon and the bottomhole zone of wells when storing gas-hydrogen mixtures in underground gas storage facilities. Hydrogen is an emerging energy carrier supporting the decarbonization of the global energy and industrial sectors. Underground hydrogen storage has strong long-term growth potential, which is expected to reach 20-100 million tons by 2050.

After conducting an in-depth literature review on the issue, the objective of this dissertation was clearly outlined, a significant amount of laboratory measurements were performed, and express models were developed and applied to determine and analyze the hydrodynamic processes occurring in the bottomhole zone of wells and the productive horizon during the storage of gas-hydrogen mixtures.

The subject of the analyses and assessments on which this study is based are core rock samples and production columns from a gas field with prospects for the creation of an underground gas storage facility.