

## ИНЖЕНЕРЕН АНАЛИЗ НА ЕКОЛОГИЧНИТЕ ПРОБЛЕМИ ПРИ ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА ПРЕНОСНИТЕ ТРЪБОПРОВОДИ

**доц. д-р инж. Георги Антонов**

Технически Университет-Варна

**доц. д-р Паулина Наскова**

Технически университет-Варна

**маг. инж. Деян Николов – докторант**

Технически Университет-Варна

***Резюме:** Представения анализ в статията има за цел да покаже мащабите, причините и последиците от аварията на тръбопроводи, водещи до замърсяване на атмосферата, почвите и водите, както и до промени в климата на земята и в химическия състав на океаните. В тази връзка е демонстрирано влиянието върху инцидентите с тръбопроводи на различни причинно-следствени фактори, като корозия, повреда в оборудването, неправилна експлоатация, повреда на материала/заваръчния шев и повреда от външни въздействия. Данните от проучването сочат външните въздействия като най-честият причинен фактор, отговорен за 41,21% от общите инциденти с тръбопроводи. Направен е анализ на влиянието на физическите фактори (време в експлоатация, диаметър и дебелина на стената на тръбопровода, якост на материалите) и факторите околна среда, както и връзката им с причинно-следствените фактори. На тази база са показани последствията от инцидентите по отношение на броя на аварията, нараняванията, смъртните случаи и общите икономически загуби. Тези констатации може да допринесат за по-доброто изясняване на механизма на аварията с тръбопроводи, което да спомогне при разработването на точни и ефективни прогнозни модели за оценка на състоянието им.*

***Ключови думи:** Преносни тръбопроводи, инциденти с тръбопроводи, екокатастрофи, причинно-следствени фактори за инциденти, последици от аварията.*

# ENGINEERING ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN THE OPERATION OF TRANSMISSION PIPELINES

**Assoc. Prof. Dr. Eng. Georgi Antonov**

Technical University-Varna

**Assoc. Prof. Dr. Pavlina Naskova**

Technical University-Varna

**M. Eng. Deyan Nikolov – PhD student**

Technical University-Varna

***Abstract:** The analysis presented in the article aims to show the scale, causes and consequences of pipeline accidents leading to pollution of the atmosphere, soil and water, as well as changes in the Earth's climate and the chemical composition of the oceans. In this regard, the influence of various causal factors on pipeline accidents, such as corrosion, equipment failure, improper operation, material/weld damage and damage from external influences, is demonstrated. The data from the study indicate external influences as the most common causal factor, responsible for 41.21% of total pipeline accidents. An analysis of the influence of physical factors (time in operation, diameter and wall thickness of the pipeline, strength of materials) and environmental factors, as well as their relationship with causal factors, is made. On this basis, the consequences of the accidents in terms of the number of accidents, injuries, deaths and total economic losses are shown. These findings may contribute to a better understanding of the mechanism of pipeline accidents, which could help in the development of accurate and effective predictive models for assessing their condition.*

***Keywords:** Transmission pipelines, pipeline accidents, environmental disasters, causal factors for accidents, consequences of accidents.*

## **1 . Въведение**

Съвременният свят е изправен пред големи предизвикателства по отношение на нарастващите енергийни доставки от една страна и екологичните проблеми от замърсяване на водите, атмосферата и почвите, както и изменението на климата от друга. Природните изкопаеми горива представляват потенциално решение на енергийната криза и техният транспорт зависи до голяма степен от състоянието на преносните и разпределителните тръбопроводи. Горивата, особено петролът са основният източник на енергия, но изгарянето му генерира прекомерни емисии на въглероден диоксид, което

води до глобално затопляне на земята и подкисляване на океана[22]. Дългата експлоатация и екстремните условия на работа на тръбопроводите, както и промените в якостно-деформационните свойства на конструктивните материали, увеличават вероятността от извънплановото излизане от строя на елементи от тръбопроводните системи, което води до спиране на цели съоръжения и производства. Това създава предпоставки за големи икономически загуби от непредвидени престои и разходи за възстановяване. Понякога по-големи са загубите от аварийните ситуации, които са предизвикали разрушаване на оборудването и нарушаване на екологичното равновесие на околната среда[1]. За съжаление през последните години станахме свидетели на значителен брой сериозни инциденти главно с преносните тръбопроводи.

В това проучване е направен анализ на основните замърсители на атмосферния въздух и световния океан и причините, които водят до екокатастрофи и глобално затопляне на климата. Представени са данни от редица световни екокатастрофи свързани с експлоатацията на тръбопроводи. Главна задача на проучването е не само да се посочат катастрофалните последици от аварията, влошаващи екологичните показатели на атмосферата и световния океан, но и да се установят и категоризират основните фактори, които имат приоритетно влияние върху инцидентите с тръбопроводи.

Анализът е базиран на редица случаи с инциденти на тръбопроводи, по данни от Администрацията за безопасност на тръбопроводите и опасните материали на Министерството на транспорта на САЩ (PHMSA). Изследванията са фокусирани върху влиянието на диаметъра, дебелината на стената, годините в експлоатация на тръбопроводите и свойствата на материалите върху повредите на преносни тръбопроводи, като се подчертава, че основна причина за дефектите са външните въздействия върху тях[18].

Изследвани са основните физически фактори, оказващи най-силно възникването и мащаба на аварията и инцидентите. Продължителността на експлоатация на тръбите е широко призната като важен фактор, който значително влияе върху безопасността на тръбопроводите. По-дългите периоди на експлоатация водят до повишен риск от повреда поради натрупване на статични или динамични натоварвания в допълнение на постепенното влошаване на свойствата на материала на тръбопровода с течение на времето. От друга страна изследването на връзката на честотата на инцидентите с диаметъра на тръбата показва, че тръбопроводите с по-малък диаметър обикновено имат по-висок процент на повреда, причинени от външни въздействия. Резултатите за корелация между дебелината на стената и процента на откази потвърждава теоретичните

прогнози, че тръбопроводите с по-тънки стени са по-податливи на повреда, т.к. са изложени на рискове от корозия и пробив. Тръбопроводите, изработени от материали с по-висока граница на провлачване, показват по-голяма издръжливост на натоварвания от деформации в почвата и оперативно вътрешно налягане, което води до по-малко случаи на повреда. Данните илюстрират как нивата на отказ, по отношение на якостта на тръбата, следват тенденция, която е аналогична на тази на диаметъра на тръбата при повечето причинно-следствени фактори. Честотата на повредите в резултат на външни въздействия намалява с увеличаване на якостта на тръбата. Установено е, че нивата на повреди за причинно-следствените фактори материал/заваръчен шев и корозия показват по-слаба зависимост от якостта на тръбата. В проучването е обърнато внимание и на факторите, имащи отношение към промените в натоварването на тръбопроводите, климатичните условия (температура, влажност) и местоположението на тръбопроводната мрежа.

Цялостното разбиране на взаимодействието между изследваните фактори и техния принос за повредите на тръбопроводите е важно за получаване на реална представа за процеса на развитие на дефектите в тях. Изясняването на значението на причинно-следствените фактори спомага на операторите на тръбопроводните системи при оценка на риска от авария. Те адекватно могат да идентифицират тръбопроводите с висок риск и съответно да приоритизират усилията за инспекция и поддръжка. Този целенасочен подход дава възможност за ефективно разпределение на ресурсите и активно намаляване на потенциалните рискове от повреда. Освен това идентифицирането в проучването на причинно-следствените фактори за повреди на тръбопроводите предоставя ценни насоки за операторите при прилагането на програми за превантивна поддръжка и контрол, които конкретно се отнасят до тези фактори. Укрепването на мерките за предотвратяване на корозия и провеждането на редовни проверки за идентифициране на признаци на повреда от външни въздействия или повреда на оборудването са примери за адекватни мерки, които могат да бъдат предприети. Представеното изследване спомага за идентифициране и адресиране на потенциални рискове от повреда, преди те да ескалират, повишавайки цялостната безопасност на тръбопровода[22].

Чрез локализиране и справяне с ранните признаци на влошаване на състоянието, операторите могат да предотвратят бъдещи неочаквани повреди и да удължат живота на тръбопроводите.

## 2. Аварии и инциденти при транспорт на течни и газообразни продукти

Нефтените разливи и газовите течове са сред сериозните екологични катастрофи, които имат дълготрайни последствия за природата, икономиката и човешкото здраве. По-долу в табл.1 са посочени някои от най-големите световни екокатастрофи за последните 40 години, свързани с инциденти на тръбопроводи, предизвикали разливи и течове на нефт и газ.

**Таблица 1.**

Световни екокатастрофи с тръбопроводи [26]

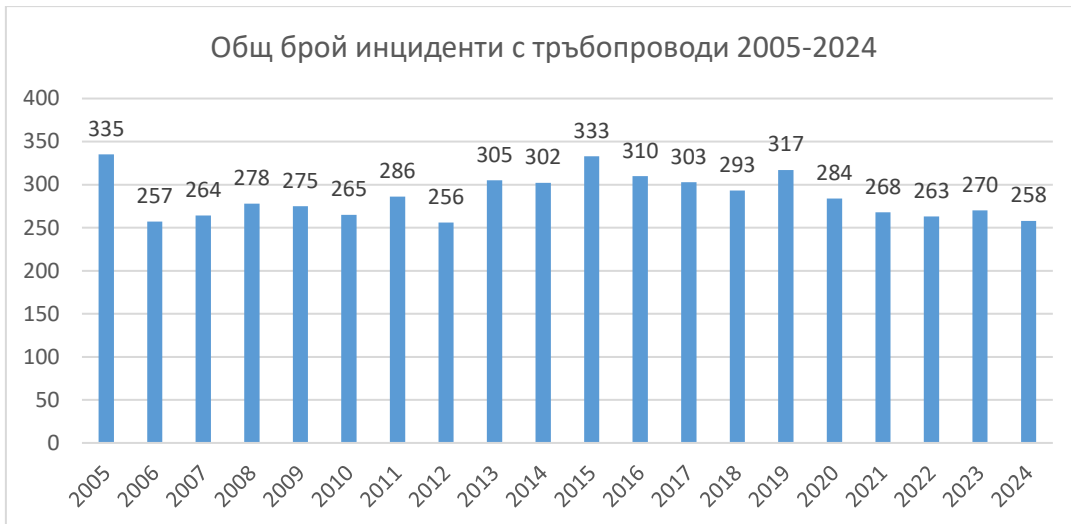
Година	Местонахождение	Описание на инцидента
1984	Бхопал, Индия	Разлив на токсичен газ - метилизоцианат (MIC) от тръбопроводи в завод за пестициди. Попадане на вода в резервоар с MIC, което предизвиква неконтролирана химическа реакция, повишаване на налягането и изтичане на токсичен газ поради пробив в тръбопровода. От тази авария има хиляди загинали и дългосрочни здравословни проблеми за оцелелите.
1988	Газопровод "Piper Alpha" (Северно море,)	Инцидент в подводния газопровод в близост до Шотландия. Експлозия и пожар на платформа за добив на природен газ, свързана с подводен газопровод. Резултатите са: замърсяване на морската среда, загуба на човешки животи (167 души), разрушение на инфраструктурата и огромни финансови загуби.
1989	Газопровод Уренгой-Помари-Ужгород, Русия	Това е една от най-големите магистрални транспортни системи от Русия за Европа. Голяма авария на газопровод възникнала, поради повреда в тръбите. Масивната експлозия е породена от искра на преминаващ влак. Пълно унищожение на два пътническа влака, много жертви и големи материални щети.
2003	Авария в Дацин, Китай	Разлив на нефт от нефтопровод поради прекомерна продължителна експлоатация от десетилетия. Недостатъчна и некачествена поддръжка и остаряване на материалите са довели до на микропукнатини и пробиви в тръбите. Резултатите са големи икономически загуби и дългосрочно значително замърсяване на околната среда, големи количества сурови нефт се разливат в почвата, което води до замърсяване на водоизточниците.
2004	Тръбопровод в Алжир	Газопровод избухва след пробив, причинявайки мащабен пожар и изтичане на природен газ поради корозия и износване на тръбопровода. Това бедствие е едно от най-сериозните в страната, причинявайки значителни жертви и материални щети, което подчертава уязвимостта на газовата инфраструктура.
2005	Абадан, Иран	Експлозията е по причина остарялата инфраструктура (Нефтопреработвателният завод в Абадан е един от най-старите в света, построен през 1912 г.). Техническите съоръжения и тръбопроводите са били износени, с недостатъчно поддържане и липса на модернизация, както и липса на адекватна система за мониторинг и ранно предупреждение за изтичане на газ или повишени рискове. Експлозията предизвиква унищожение на инфраструктурата, а изтичането на токсични газове води до замърсяване на въздуха, почвите и водите.

2006	Аляска (Prudhoe Bay)	Разлив от нефтопровода е възникнал в резултат на изтичане на петрол от тръбопровода, разположен в крайбрежието на Северния ледовит океан. Тръбопроводът транспортира големи количества нефт за САЩ,. Разливът е предизвикан поради корозия на тръбопровода, който за дълго време не е бил подложен на техническо обслужване и контрол. Около 270 000 литра петрол са предизвикали замърсяване на морската вода с опасност за морската флора и фауна. За ограничаване на разпространението в близко намиращите се водоеми са използвани бариери и създаване на временни защитни конструкции
2007	Нефтен разлив в Черно море	Разлив от повреда на тръбопровода в резултат на грешка при неговата експлоатация или друга техническа неизправност. Обемът на разлива е значителен, а усилията за ликвидация на последвалото замърсяване наложи използването на плаващи огради и други съоръжения за предотвратяване на попадане на петрола в крайбрежната зона. Инцидентът предизвика безпокойство у еколозите и специалистите по охраната на околната среда поради възможността за унищожаване на морската флора и фауна, а също и от същественото влияние върху рибната промишленост и курортния отрасъл.
2010	Сондажна платформа „Deep Water Horizon“ в Мексиканския залив	Аварията причини невиджани екологични щети след 87 дни изтичане на милиони барели суров петрол, 11 загинали, 17 ранени и милиарди долари загуби. Въздействието върху дивата природа беше опустошително, като хиляди морски птици, морски костенурки и други морски обитатели бяха убити или увредени.
2010	Сан Бруно, Калифорния	Повреда в газопровод на Pacific Gas and Electric Company (PG&E). Експлозия, унищожила 38 домове и довела до 8 смъртни случая.
2010	Каламазу Ривър, САЩ	Пробив в тръбопровод, собственост на компанията Enbridge, довежда до изтичане на над 3,2 милиона литра битумен нефт в река Каламазу в Мичиган. Разливът има токсичен ефект върху водната флора и фауна. Разрушаване на рекреационни ресурси и замърсяване на питейна вода. Реката е замърсена за години напред, като почистването струва над 1.2 милиарда долара
2019	Keystone,САЩ	Инцидентът с тръбопровода Keystone претърпява няколко сериозни пробива, като през 2019 г. изтичат над 1,4 милиона литра нефт в Северна Дакота. Разливът унищожава земеделски земи и замърсява подпочвените води. Местните общности и екосистеми са подложени на значителни щети.
2019	Транссредиземноморския газопровод, Тунис	Аварията е поради повреда поради корозия на тръбите. Временно прекъсване на доставките на природен газ към Европа. Увреждане на морската екосистема в близост до мястото на инцидента.
2020	Разлив в Сибир, Русия	Пробив в тръбопровод поради стареене на материалите в Норилск води до разлив на над 20 000 тона дизелово гориво в арктическа река. От разлива се получава замърсяване на реките и тундрата, сериозно въздействие върху арктическите екосистеми.
2020	Теч на нефт в Нигерийския шелф	Разливът е поради стареене и корозия на подводен тръбопровод. Замърсени са крайбрежните води и земи има сериозни социално-икономически последици за местните общности, които разчитат на риболов и земеделие

2021	Инцидент в Тихия океан, край бреговете на Калифорния	Увреждане на тръбопровода от котва на кораб. Разлив на около 144 000 галона нефт. Замърсяване на плажове, морски резервати и загуба на морски видове.
2021	Мексикански залив	Разрив на подводен газопровод в мексиканския залив, край бреговете на Мексико, водещ до "огнен вихър" на повърхността на океана. Зрелищен, но опасен пожар в морето, довел до временно прекъсване на газовите операции и големи икономически загуби
2022	Газопровод Nord Stream	Последното значително освобождаване на природен газ настъпва при взривяването на подводните тръбопроводи Nord Stream 1 и 2 в Балтийско море. Счита се, че причината е саботаж или умишлени взривове, които предизвикаха пробиви в тръбопровода. При експлозивната декомпресия се суспендират огромни количества седимент в размер на 250 000 тона, струя която представлява риск за всички риби и бозайници от площ 1200км <sup>2</sup> , надхвърляйки праговете на токсичност на околната среда за повече от месец след взривовете. Количеството метан, изпуснато в атмосферата се оценява на 115 000 тона, което се равнява на около 15 милиона тона CO <sub>2</sub> .
2022	Амазонка, Перу	Пробив в тръбопровод на държавната петролна компания Petroperu води до изтичане на нефт в Амазонската гора. Унищожени са местообитанията за редки видове животни, замърсени са водите, използвани от местните племена. Намалено е биоразнообразието и е нарушено здраве на местните общности
2023	Газопровод в Айдахо, САЩ	През октомври 2023 година фермер от Айдахо проби газопровод, обработвайки земи, и предизвика сериозно изтичане на газ. Инцидентът по газопровода Northwest Pipeline е голям и въобще не е рядко явление по дългата почти 5 млн. км газопрепосна мрежа на САЩ.

Представените случаи на екокатастрофи, които далеч не обхващат абсолютно всички подобни аварии по света, дават представа за тежките последици от тях и необходимостта от изучаване на процесите и факторите, които са причина за подобни инциденти и от предприемане на адекватни действия и мерки за предотвратяване

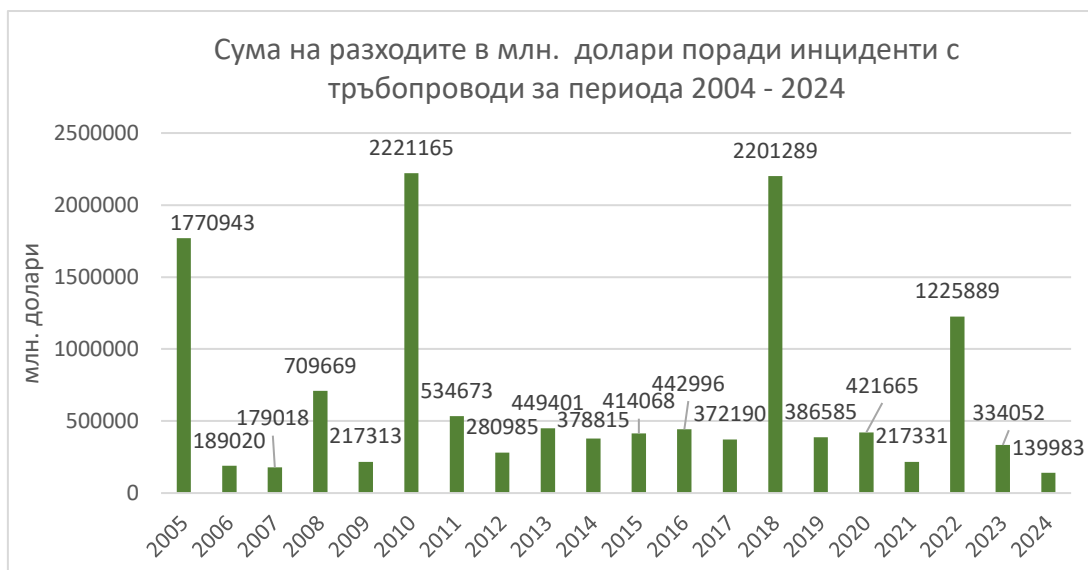
От проучване по данни на PHMSA[27] на фиг.1, 2 и 3 са представени обобщени резултати относно брой на инцидентите с тръбопроводи в САЩ през последните 20 години, броя на фаталните изходи и нараняванията, като и разходите от икономически загуби и за възстановяване на щетите.



Фиг. 1. Общ брой инциденти с тръбопроводи за всяка година 2005-2024



Фиг. 2. Разпределение смъртните случаи и нараняванията при инцидентите с тръбопроводи за периода 2005-2024



Фиг.3. Сума разходи в млн. долари за текущата година



Общо за последните години [22] са отчетени 5 722 инцидента с тръбопроводи, 243 с фатален изход и 1 027 с наранявания. Загубите за този период се равняват общо на 13 087 049 749 USD. Анализът на посочените данни показва едно равномерно разпределение по години на броя регистрирани инциденти тръбопроводи в рамките на около 300 бр. на година. Случаите с наранявания имат пикови стойности през 2010, 2014, 2016 и 2018 години (особено през 2010-многомащабен инцидент), зависещи от спецификата и обема на инцидентите при конкретните аварии. При случаите с фатален изход също се наблюдават по-високи стойности през 2005, 2006, 2010, 2016 и 2023 години, което също е свързано с мащаба на конкретните аварии и последиците от тях

През последните години проблемите с аварии в нефтопроводите и последващо замърсяването с нефт и нефтопродукти става все по-тревожен. Бурното развитие на промишлеността и транспорта изисква увеличаване на производството на нефт и петролни продукти като източник на енергия и суровини за химическата промишленост, а в същото време това е един от най-опасните клонове на промишлеността, за околната среда. Всяка година от аварии с тръбопроводи милиони тонове петрол се изливат върху повърхността на Световния океан, попадат в почвата, в грунтовете подземни води, а след изгаряне водят до замърсяване на въздуха. По голяма част от Земята, по един или друг начин вече е замърсена с нефтопродукти. Това е особено ясно изразено в тези региони, където има изградени петролопроводи, както и развита химическа промишленост, използваща като суровина нефт или природен газ. Ежегодно десетки тонове петрол замърсяват обработваемата земя, което води до намаляване на нейното плодородие, но до момента този проблем не е получил нужното внимание. [2, стр. 34].

В зоните на петролните полета и нефтопроводите, често се случват инциденти с локални нефтени разливи, но те не засягат големи площи. Много по-опасни и с по-сериозни последствия са разливите в океаните и моретата или около морските сондажни кули. В този случай, нефтът се разпространява по повърхността на водата под формата на много тънък мономолекулен филм на площ от стотици и хиляди квадратни километра, образуващ нефтен разлив. Хванат от зоната на прибоя, нефтения разлив се изхвърля на сушата като обхваща големи площи от бреговата ивица, причинявайки огромни щети на всички живи същества в района. Екологичните последици от замърсяването на почвата с нефт и нефтопродукти, зависи от параметрите на замърсяването, свойствата на почвата и характеристиките на околната среда.

Замърсяването на въздуха и последващото замърсяване на води и почви е най-сериозният екологичен проблем, който поражда транспортът, особено в големите

градове. Замярсителите постъпват върху почвената повърхност косвено – чрез атмосферния въздух и валежите или директно при локалното използване на специфични химически вещества[2, стр.20]. Отработените автомобилни газове упражняват доказано фитотоксично действие. Без да предизвикват видими симптоми на повреждане, те причиняват намаляване на растежа на растенията, опадване на цветните им пъпки, скъсяване периода на цъфтеж и намаление на добива. Вредното влияние на автомобилните газове върху растенията се обяснява с комбинираното въздействие на цялата гама от газове и аерозоли. Особена фитотоксичност проявяват веществата от фотохимичния комплекс (озон, пероксиацетилнитрати и др.), образувани от автомобилните газове под активизиращото действие на слънчевата енергия.

### **3. Влияние на въглеродния диоксид върху промените в климата и състава на световния океан**

Човешката дейност изменя концентрацията на веществата в атмосферата и внася нови такива. В глобален мащаб това води до изтъняване на озоновия слой и до натрупване на парникови газове в атмосферата, които причиняват дългосрочни промени на климата[28]. През последните двеста години, много промишлени процеси са били използвани за производство на енергия (главно изгаряне на изкопаеми горива), които отделят големи количества въглероден диоксид в атмосферата (заедно с други замърсители и твърди частици). Наред с намаляването на растителността на планетата, след обезлесяването и други фактори, естественият баланс на въглеродния диоксид и неговото количество в атмосферата е редуцирано до такава степен, че днес нивото на въглероден диоксид в атмосферата е 1,5 пъти по-голямо, отколкото преди 200 години. Тъй като въглеродният диоксид е един от най-разпространените парникови газове, се предполага, че това покачване е причина за глобалното затопляне и много природни катаклизми в последните три десетилетия. На табл.2 са дадени стойности на емисиите от вредни вещества в атмосферата за периода 2018-2022г. в България [29].

Очевидно делът на въглеродния диоксид е в десетки пъти по-голям от останалите замърсители и неговото количество нараства с всяка изминала година. Въглеродният диоксид не винаги се разглежда като замърсител. Той не е токсичен и е основна съставна част от жизнения цикъл на растенията и животните. Когато обаче концентрацията му превиши установените норми, тогава вече се възприема като замърсяващ газ. При повишена концентрация предизвиква кисел вкус в устата и жилене (дразнение) на гърлото и носа. Възможно е и затрудняване дишането при животните и човека[30].

Таблица 2.

Стойности на емисии<sup>1</sup> на вредни вещества в България  
за периода 2018 – 2022 г. (данни НСИ)

Замърсители	2018	2019	2020	2021	2022
Серни окиси (SO <sub>x</sub> )	107	90	51	63	73
Азотни окиси (NO <sub>x</sub> )	94	95	87	94	96
Неметанови летливи органични съединения (NMVOC)	74	74	73	75	76
Метан (CH <sub>4</sub> )	242	232	228	235	234
Въглероден окис (CO)	236	222	230	235	200
Въглероден двуокис (CO <sub>2</sub> )	43577	42267	36644	42425	46994
Двуазотен окис (N <sub>2</sub> O)	16	17	16	16	16
Амоняк (NH <sub>3</sub> )	62	64	60	61	61

<sup>1</sup> Емисиите са изчислени съгласно последното издание на методиките ЕМЕП/ЕЕА air pollutant emission inventory guidebook (CORINAIR) и IPCC Guidelines National Greenhouse Gas Inventories.

Концентрацията на въглероден диоксид се разглежда и в друг аспект. След започване на индустриалната епоха в средата на XIX век, концентрацията му в атмосферата постоянно се увеличава. Той е основен парников газ и именно това превишаване буди тревога. Според Междуправителствената експертна група по климатични промени „The Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) и Световна метеорологична организация (СМО) именно повишението на CO<sub>2</sub> е една от причините за наблюдаваното глобално затопляне. Това е и причината все повече изследвания да са насочени към изучаването на процесите, свързани с CO<sub>2</sub> и търсене на възможности за намаляване на концентрацията му в атмосферата.

**Парниковият ефект** е известен отдавна, но делът на парниковите газове се променя постоянно. Според повечето научни организации, антропогенната (човешката) дейност е основна причина за повишаването на нивата на парникови газове. Пряката връзка между концентрацията на тези газове и температурата на въздуха говори за все по-ускорени темпове и на глобалното затопляне[31]. Земната атмосфера е газовата обвивка на Земята, която се състои от съвкупност от няколко газа. Атмосферата се състои от 78,09% азот, 20,95% кислород и 0,93% аргон. Останалите газове заемат само 0,03% от обема му. Този състав на атмосферата е еднакъв за цялото земно кълбо и остава постоянен до около 100 км височина. Въздухът съдържа и други газове освен изброените, като с най-голямо влияние върху климата са водната пара и въглеродния диоксид.

Увеличението на парниковите газове вследствие на антропогенната дейност обаче усилват естествения парников ефект. По този начин земната повърхност не може да се охлажда, а полученото количество повече енергия в голяма степен се изразходва за

повишаване на температурите – затова и наблюдаваме глобално затопляне[31].

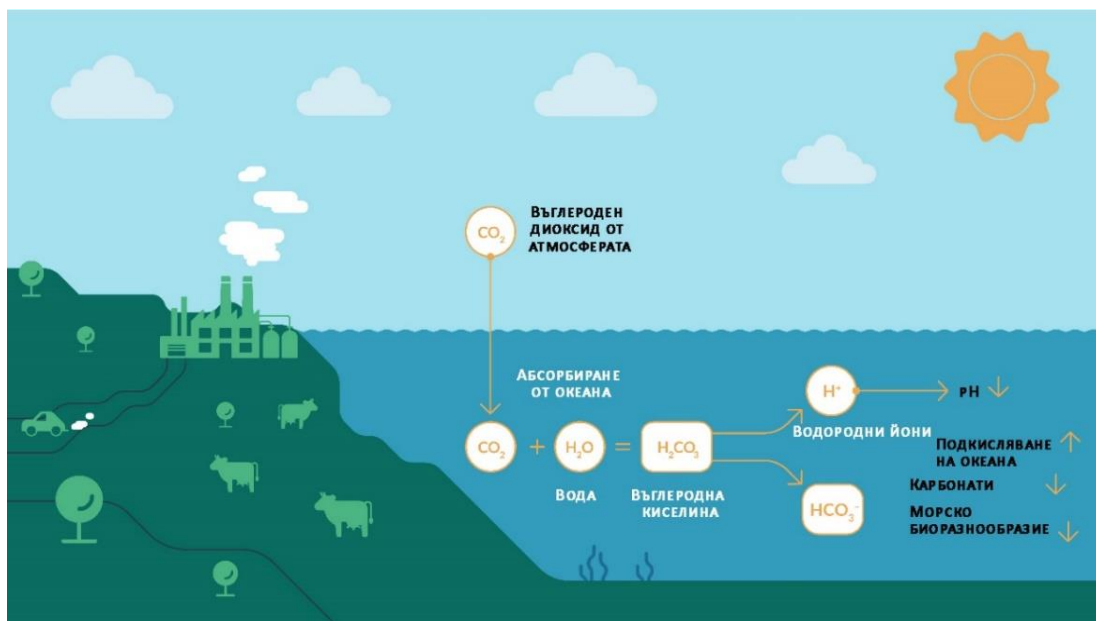
Протичането на повечето процеси и явления на нашата планета зависят от енергията на Слънцето. Една част от нея (слънчевата радиация) достига до земната повърхност под формата на късовълнова радиация, а около 35% от нея се отразява. Останалата част от получената енергия на земната повърхност осъществява нейното затопляне. Всяко затоплено тяло на свой ред също излъчва топлина, под формата на инфрачервена дълговълнова радиация. Така и Земята, затоплена от слънчевата енергия, излъчва към космоса дълговълнова радиация. Около 90% от тази енергия обаче се поглъща от атмосферата и само 10% се пропускат обратно в космическото пространство. Поглъщайки земната топлина, атмосферата се нагрява и на свой ред започва да излъчва инфрачервена радиация насочена както към космоса, така и обратно към земната повърхност. По този начин, поради наличието на атмосфера, Земята получава повече енергия, защото освен късовълновата радиация директно от Слънцето, получава и инфрачервена дълговълнова радиация, заради нагрятата атмосфера. Това води до т.н. *парников ефект* (фиг.4)



Фиг. 4. Парников ефект (Изт: Wonder Works)

**Подкиселяването** е един от "смъртоносните" фактори, пред които е изправен световния океан[32]. Човешката дейност, например в промишлеността, чрез използването на изкопаемите за горива и изсичането на горите е освободила значителни количества въглероден диоксид ( $\text{CO}_2$ ) в атмосферата. Океанът поглъща една четвърт от този антропогенен въглероден диоксид (от емисии на човешката дейност), като по този начин смекчава последиците от глобалното затопляне, но също така води до голяма

заплаха за морския живот. Излишъкът на въглерод в океана променя химическия състав на морската вода, като повишава нейната киселинност и намалява стойността на рН (концентрацията на водородни йони). Когато атмосферният въглероден диоксид се разтваря във водата, той се съединява с молекулите на водата  $H_2O$ , като се образуват свободни йони на водорода ( $H^+$ ). По-високата концентрация на свободни йони  $H^+$  означава по-висока киселинност, образувайки въглеродна киселина и намалявайки рН на водата в океана. Стойността на рН на световния океан вече е спаднала от 8,1 на 8,0, като се смята се, че това е с 26% повишаване на киселинността.



Фиг. 5. Схема на влияние на въглеродния диоксид върху състава на океана (<https://marine.copernicus.eu/bg/explainers/phenomena-threats/ocean-acidification>)

В този смисъл окисляването на океана застрашава здравето на морските екосистеми и видове, като намалява целостта на черупките на калцифициращи се организми, изграждащи черупки, като корали, планктон и ракообразни, което представлява опасност за тяхното оцеляване. Киселинността също така влияе върху размножаването на ракообразните и развитието на ларвите. Комбинираните заплахи за стабилността на екосистемите, свързани с биоразнообразието, загубата на местообитания и нарушенията в хранителната верига, представляват риск за продоволствената сигурност и икономическата стабилност на човечеството. Загубата на коралови рифове (както и на стриди и миди) допълнително прави бреговете по-податливи на наводнения и ерозия. Натрупването на въглероден диоксид в океана може да се усети в продължение на много години. Когато въглеродът достигне до по-дълбоките океански слоеве, той се съхранява в продължение на хилядолетия, което

означава, че дори ако сега намалим емисиите, химическият състав на океана ще продължи да се променя през следващите няколко хиляди години.

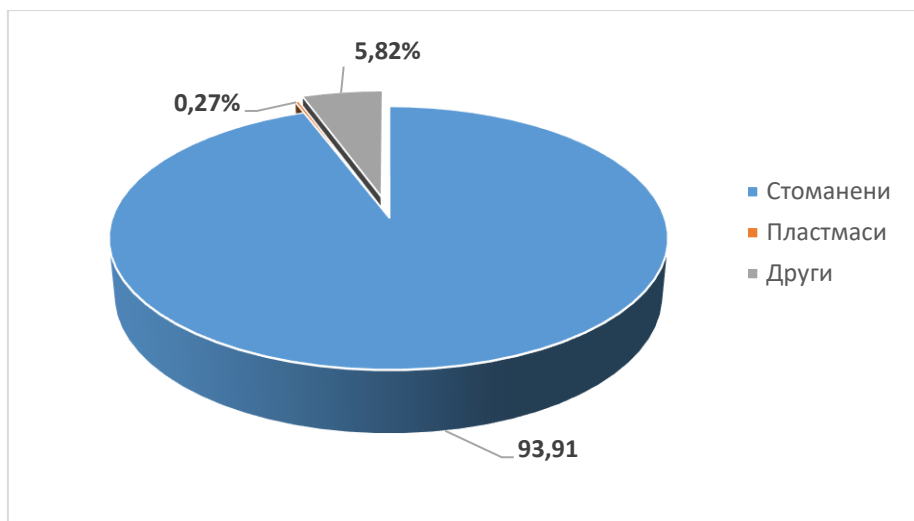
Повишените температури на океана и загубата на кислород действат едновременно с подкисляването му и съставляват т.н. „смъртоносно трио“ [32] на влияние на изменението на условията на живот в морската среда.

#### **4. Анализ на факторите, влияещи на възникване на инциденти при експлоатацията на преносните тръбопроводи**

Природният газ, относително по-чисто изкопаемо гориво, играе жизненоважна роля в прехода към по-чисти енергийни източници [11]. Например, в САЩ природният газ представлява приблизително 25% от общото потребление на енергия и се доставя главно чрез огромни газопроводни мрежи до големи преработвателни съоръжения и крайни потребители. Въпреки това, фактори като лоша поддръжка, корозия, материални и заваръчни дефекти и природни бедствия са допринесли за многобройни инциденти с тръбопроводи, водещи до икономически загуби от десетки милиарда щатски долара и множество наранявания и смъртни случаи през последните 20 години [15].

Целта на това проучване е да се установят и категоризират основните фактори, влияещи върху аварии и инциденти с тръбопроводи и в крайна сметка на влошаване на екологичните показатели на атмосферата и световния океан. Анализът е базиран на редица случаи с инциденти с тръбопроводи, по данни от PHMSA. Изследванията са фокусирани върху влиянието на 4 важни показателя: *диаметъра, дебелината, възрастта на тръбата и качествата на материалите* върху повредите на преносния тръбопровод, подчертавайки като основни причини - *дефектите от външни въздействия* [18]. Цялостното разбиране на взаимодействието между тези фактори и техния принос за повредите на тръбопроводите е важно за получаване на представа за процеса на развитие на дефектите на тръбопроводите.

За целите на това проучване, като пример, са разгледани само инциденти, свързани с газопреносни тръбопроводи. Общо 3006 инцидента са възникнали в газопреносните тръбопроводи през последните 20 години и тяхното разпределение по материал на тръбопровода е показано на Фиг. 6, където може да се види, че стоманата е преобладаващият материал, докато само малка част от газопроводите са изградени от пластмаса или други материали. Следователно, това проучване ще се съсредоточи върху анализирането на факторите, които водят до повреди на стоманени тръбопроводи, т.е. наборът от данни, използван в този анализ, включва общо 2760 инцидента.



Фиг. 6 . Кръгова диаграма използваните материали за тръбопроводи

#### 4.1. Причинно-следствени фактори [22]

Причинно-следствените фактори се дефинират в следните категории: *корозия, повреда в оборудването, неправилна експлоатация, повреда на материала/заваръчния шев и повреда от външни въздействия.*

Фиг. 7 показва разпределението на инцидентите, причинени от различни причинно-следствени фактори. Повредите от външни въздействия са отговорни за 41,21% от всички инциденти с газопреносния тръбопровод, следвани плътно от повредата на оборудването и корозията на материалите.



Фиг. 7. Кръгова диаграма на причинно-следствените фактори за повредата на газопреносните тръбопроводи

Факторът **повреди от външни въздействия** като причина за аварии в тръбопроводите се отнася до механични повреди, причинени от външни въздействия върху тръбопровода, което включва: изкопни и строителни дейности; претоварване от тежкотоварни превозни средства и оборудване; природни бедствия; вандализъм и злонамерени действия ; корозия, предизвикана от външни фактори. Тези видове повреди могат да доведат до течове, експлозии, замърсяване на околната среда и други сериозни последици. Ето защо често се прилагат защитни мерки като маркиране на местоположението на тръбопровода, инсталиране на защитни покрития, мониторинг и предупреждения при строителни дейности в близост.

Факторът **корозия** се обяснява с процес, който протича преди всичко по електрохимичен механизъм и води до влошаване на качествата на металните материали. Корозията може да доведе до неспособност на тръбопровода да издържи нормално оперативното налягане поради загуба на метал и отслабена структурна цялост. Възникването на корозионни процеси по металните тръби на тръбопроводите е твърде нежелано явление, което нерядко се оказва сред основните причини за аварии и течове. Причина за появата на корозия по вътрешните стени на тръбопровода е наличието на кислород, водни пари, сероводород и други агресивни съединения в преминаващия газ. В зависимост от начина на полагане на тръбите – подводно, подземно или надземно, корозията се дължи съответно на състава на морската, почвата или на атмосферните условия. Външните повърхности на тръби, положени над земята са изложени на въздействието на влага, дъжд, слънчева радиация и газове. Сериозен проблем при магистралните газопроводи е наличието на разрушаване вследствие от възникването на стрес-корозия, представляваща корозионното напукване под напрежение на външната катодно защитена повърхност на тръбата [16].

Разрушаването на металите в резултат на корозионни процеси може да засегне цялата повърхност на метала или само отделни участъци. Корозията може да се развива в дълбочина или без видими признаци.

Факторът **повреди в оборудването** като причина за авария в тръбопроводите се отнася до неизправност или повреда на различни компоненти, свързани с функционирането на тръбопроводната система. Това включва откази на клапани, помпи, компресори, измервателни уреди и други критични елементи, които могат да доведат до изтичане, експлозии или оперативни смущения. Този фактор е критичен, защото дори един отказал клапан или повредена помпа може да доведе до сериозна авария в цялата



система. Затова добрата поддръжка и качествено оборудване са от съществено значение за безопасната експлоатация на тръбопроводите.

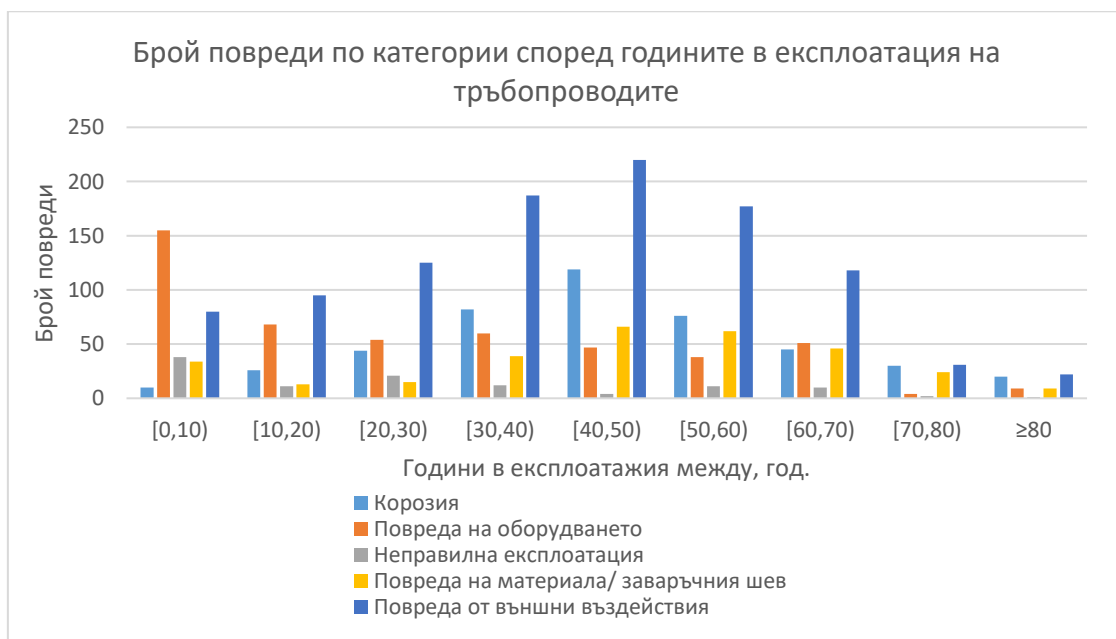
Факторът **материал/заварка** като причина за авария в тръбопроводите се отнася до дефекти, свързани с качеството на материалите, използвани при производството на тръбите, както и до проблеми, възникнали при заваръчните съединения. Това може да доведе до структурни слабости, пукнатини, течове и в крайна сметка до сериозни аварии.

Факторът **неправилна експлоатация** като причина за авария в тръбопроводите се отнася до грешки, допуснати при проектирането, експлоатацията, поддръжката или управлението на тръбопроводната система.

Категорията „**други**“ предполага, че причината за инцидент е била различна или не е била класифицирана към някои от споменатите по-горе от причинно-следствен тип.

#### 4.2. Физически фактори

**Продължителността на експлоатация** на тръбите е широко призната като важен фактор, който значително влияе върху безопасността на тръбопроводите [5], [16], [24]. По-дългите периоди на експлоатация водят до повишен риск от повреда поради натрупване на статични или динамични натоварвания, в допълнение към постепенното влошаване на свойствата на материала на тръбопровода с течение на времето. В това проучване степента на повреда на тръбопроводите е оценена чрез представяне на броя на инцидентите според периода на работа (Фиг.8).

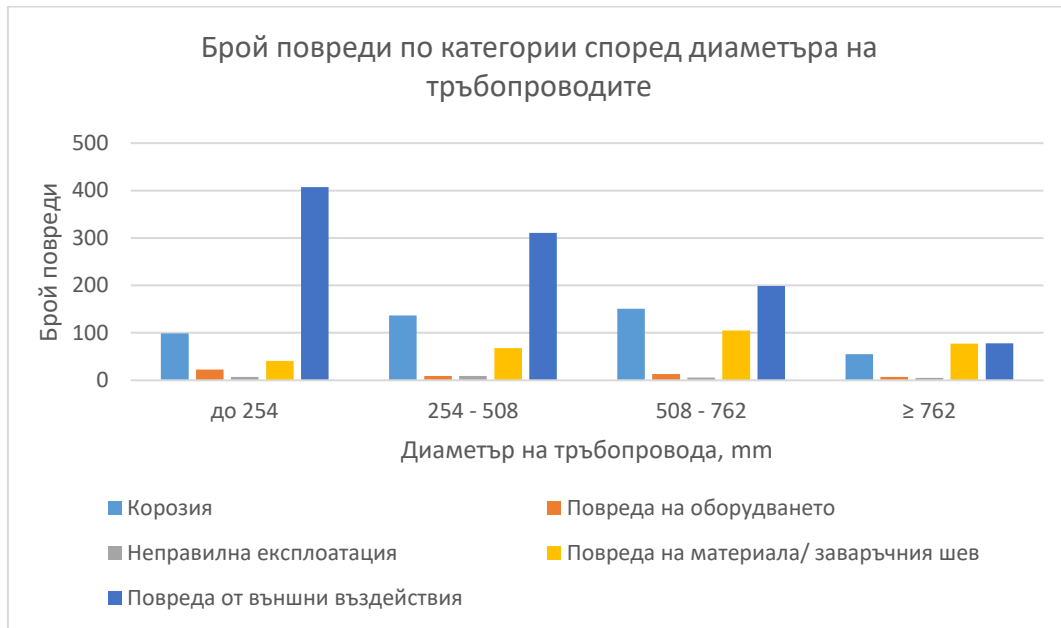


Фиг. 8 . Брой повреди на тръбопроводите за всеки причинен фактор

Степента на корозионна повреда се увеличава с възрастта на тръбопроводите до 40-50 г. и после намалява, тъй като продължителното излагане на корозионните условия причинява влошаване на качествата на материалите, което води до отслабена структурна цялост и повишен риск от повреда. Интересното е, че фигурата разкрива подобен модел в степента на повреда на материалите и заварките в сравнение с тази на корозия, главно поради циклично натоварване и промени в налягането, с малко по-висока честота на повреда в първите години, основно приписвана на производствени и строителни дефекти. В допълнение, нивата на повредите в оборудването и неправилната експлоатация показват подобна тенденция с висока честота на повредите в началния етап, която постепенно намалява с възрастта на тръбопровода. Заслужава обаче да се отбележи, че степента на повреда в оборудването е значително по-висока от тази на неправилната му експлоатация. Процентът на повреди, причинени от външни въздействия, е неравномерен - нараства с възрастта на тръбата до определен диапазон и след това намалява, като най-високият процент на повреда се появява между 40 и 60 години. Както се очакваше, корелацията между честотата на повредите на инциденти, причинени от повреда на оборудването и неправилна експлоатация в зависимост от възрастта на тръбата, е по-малко значима.

Връзката между **диаметъра на тръбата** и процента на повреда е широко призната в литературата, тъй като тръбопроводите с по-малък диаметър обикновено се свързват с по-висок процент на повреда [19] , [25] . Резултатите, представени на Фиг. 9, подкрепят това твърдение, тъй като тръбопроводите с диаметър между 0 и 10 инча (0-254mm) демонстрират най-висок процент на повреда за инциденти, причинени от повреда от външни въздействия. Тази скорост е приблизително четири пъти по-висока от тази, наблюдавана за тръбопроводи с диаметър по-голям от 30 инча (762mm), което показва, че по-малките тръбопроводи са по-уязвими на външни въздействия, като дейности на трети страни или земни движения. Причината за тази чувствителност се дължи основно на по-малката дебелина на тръбопроводите, което води до липса на устойчивост на външни сили и по-голямо напрежение. Освен това, по-малките тръбопроводи често получават относително по-малко внимание и ресурси по отношение на поддръжка и инспекция. Ограничените ресурси и приоритизирането на по-големите тръбопроводи могат да доведат до недостатъчно наблюдение и поддръжка на по-малките тръбопроводи, като по този начин ги оставят по-податливи на неоткрити проблеми, които в крайна сметка могат да доведат до повреда.

За корозия и повреда на материал/заваръчен шев процентите на повреда са сравними и изглежда са по-малко повлияни от диаметъра на тръбата.



Фиг. 9. Брой повреди по категории според диаметъра на тръбопроводите

Броят на инцидентите според диаметъра, произтичащи от повреда на оборудването и неправилна работа са незначителни, тъй като тези повреди обикновено са свързани с друго оборудване.

**Дебелина на тръбата.** Теоретичните съображения предполагат, че тръбопроводите с по-тънки стени са по-податливи на повреда, отколкото тези с по-дебели стени, особено когато са изложени на рискове от корозия и пробив [9], [21]. Фигура 10 по-долу показва степента на повреда на газопроводите за различни дебелини на тръбите, за тръбопроводи с дебелина по-голяма от 0,2 инча (5,08mm), степента на повреда намалява с увеличаване на дебелината на тръбата поради причини за корозия, повреда на материала/заваръчния шев и повреда от външни въздействия. Газопроводите са податливи на околната среда, която може да включва корозивни вещества и сурови климатични условия. Корозията може да отслаби материала на тръбата и значително да повиши риска от повреда, особено в случай на по-тънки тръбопроводи, които показват намалена устойчивост на корозия и други външни сили. Това подчертава значението на дебелината на тръбата за устойчивост на повреди на тръбопровода, причинени от различни фактори. Накратко, степента на повреда на газопроводите с най-малка дебелина на тръбата поради повреда от външни въздействия е значително по-висока от тази, причинена от други причинни фактори.



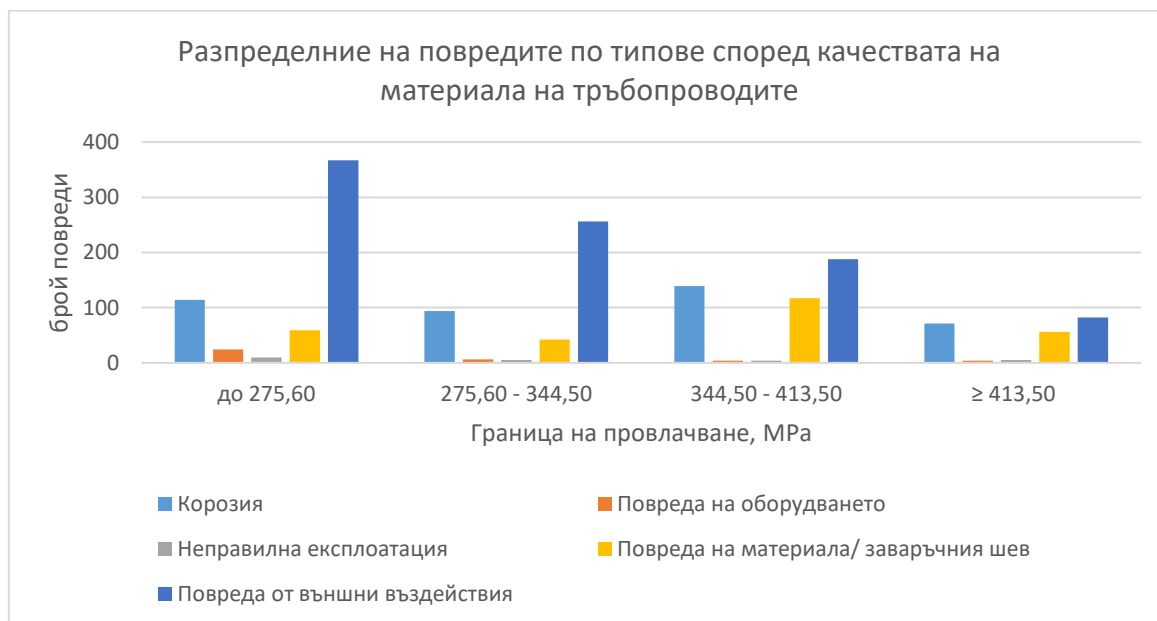
Фиг.10. Разпределение на повредите по категории според дебелината на стената на тръбопроводите

**Якост на тръбата.** Тръбопроводите с по-висока граница на провлачване показват по-голяма издръжливост на натоварвания от почвата, трафик и вътрешно налягане, което води до по-малко случаи на повреда. Фигура 11 илюстрира как нивата на отказ, по отношение на якостта на тръбата, следват тенденция, която е аналогична на тази на диаметъра на тръбата при множество причинни фактори. Честотата на повредите в резултат на външни въздействия намалява с увеличаване на якостта на тръбата, като пиковата стойност е при тръбопроводите с по-ниска механична якост. Независимо от това, нивата на повреда на материал/заваръчен шев и корозия показват по-слаба корелация със якостта на тръбата. Резултатите по отношение на корозионни повреди може да се обяснят с факта, че развитието на корозия обикновено не се влияе от работните напрежения, приложени към тръбопровода, а от заобикалящата среда и наличието на корозивни вещества. В резултат на това появата на корозионни повреди показва по-слаба корелация с якостта на материала на тръбата.

#### 4.3. Оперативни фактори и фактори на околната среда

Установено е, че промените във **вътрешното налягане** могат да доведат до преждевременна повреда на тръбопровода [10], [7]. Тъй като всеки тръбопровод е проектиран за различно максимално допустимо налягане, това изследване използва като

показател съотношението на налягането - съотношение на инцидентното налягане към максимално допустимото работно налягане - за представяне на експлоатационния статус на преносните газопроводи. Показателно е, че тръбопроводите, работещи с коефициент на налягане над 0,8, имат значително по-висок процент на повреда - до приблизително 1000 пъти по-голям от други. Коефициентът на високо налягане значително повишава риска от повреда поради умора и ускорява развитието на дефекти на тръбопровода, което в крайна сметка води до повреда на тръбопровода.



Фиг. 11. Степента на повреда на тръбопроводите за всеки причинен фактор по граница на провлачване на тръбата.

**Климатичните фактори** са идентифицирани като потенциални фактори за повреди на тръбопроводи [10], [20], [4], [12]. По-голяма честота на инциденти, произтичащи от повреда на оборудването и неправилна работа в надземни сценарии, докато инцидентите, произтичащи от повреда от външни въздействия, корозия и повреда на материал/заваръчен шев са по-разпространени в подземни ситуации. Повредите на оборудването, които се случват под земята, изглежда са по-малко повлияни от температурата. Освен това честотата на инцидентите, причинени от корозия, се увеличава с температурата както за надземни, така и за подземни повреди, вероятно поради ускорена корозия при по-високи температури. За сравнение инцидентите, причинени от неправилна работа и дефекти на материала и заварките, са по-малко засегнати от температурата. Увреждането от външни въздействия води до повече

инциденти с подземни тръбопроводи при по-високи температури, най-вероятно поради увеличената човешка дейност.

**Валежите и относителната влажност** допринасят значително за повредата на тръбопроводите, причинена от повреда от външни въздействия. Формите на повреда включват срутване поради ерозия на брега, причинена от прекомерна дъждовна вода, насочени нагоре плаващи сили върху тръбопровода, генерирани от подземните води, и свлачища поради проливен дъжд. Въздействието на валежите върху инциденти, причинени от повреда на оборудването и неправилна работа, е неравномерно за инциденти, възникващи както над земята, така и под земята. И накрая, относителна влажност над 85% има очевидно въздействие върху разрушаването на материала/заваръчния шев, вероятно поради ефекта на свиване на почвата или подуване поради влажност, което допълнително води до периферни повреди на опорите на тръбопроводите [16], [8].

**Класификацията на местоположението** на тръбопроводите също оказва съществено влияние на инцидентите с тръбопроводи [13], [3]. По-високият клас на местоположението показва по-голям брой човешки дейности, които могат да повлияят на работата на тръбопровода и да доведат до по-сериозни последици при случай на инцидент. Повишен процент на отказ, особено в случаите, включващи повреда от външни въздействия, повреда на оборудването и неправилна работа, които са по-склонни да включват човешката намеса и да увеличават повишените смущения.

**Месецът** служи като допълнителен показател за средната температура. Процентът на неизправностите, причинени от корозия, е по-голям през летния сезон, вероятно поради по-високата температура, която стимулира скоростта на корозия [23], [14]. Обратно, повредата на оборудването има по-висок процент на повреда през зимния сезон, вероятно поради студеното време, което засяга нормалната работа на определено оборудване като регулатор, клапан за аварийно изключване и предпазен клапан.

**Зоната на инцидента** на тръбопроводната система, участваща в инцидент, се класифицира като подводна, надземна, подземна или смесена. Повредите на материала/заваръчните шевове са свързани предимно с материала и заварките на тръбопровода, който е подложен на електрохимична корозия при различна електролитната среда.

## 5. Заключение

Констатациите от този анализ имат практически последици за операторите на тръбопроводните и заинтересованите страни. Увреждането от външни въздействия е най-честият причинен фактор(виж фиг.7). Въздействието на физически фактори, като време в експлоатация, диаметър, дебелина на стената и якост на тръбата, варира в зависимост от съответния причинен фактор (виж. фиг.8 до фиг. 11). Като цяло тръбопроводите с по-тънки стени и по-ниска якост са по-податливи на повреда. Влиянието на съотношението на налягането е значително, като по-високите съотношения на налягането са свързани с по-висок процент на повреда. Факторите на околната среда, като температура, валежи и влажност, допринасят по различен начин за повредите на тръбопровода. Освен това тръбопроводите в по-високи класове на местоположение имат по-висок процент на повреда.

Чрез включването на тези фактори в методиките за оценка на риска, операторите на тръбопровода могат ефективно да идентифицират тези, които са с висок риск и съответно да приоритизират усилията за поддръжка и инспекция. Този целенасочен подход дава възможност за ефективно разпределение на ресурсите и активно намаляване на потенциалните рискове от повреда. Укрепването на мерките за предотвратяване на корозия и провеждането на редовни проверки за идентифициране на признаци на повреда от външни въздействия или повреда на оборудването са примери за адекватни мерки, които могат да бъдат предприети. Този подход спомага за идентифициране и адресиране на потенциални рискове от повреда, преди те да ескалират, повишавайки цялостната безопасност на тръбопровода.

Резултатите от това проучване могат значително да допринесат за разработването на прогнозни модели. Например, времето в експлоатация на тръбопровода традиционно се използва широко като индикатор за прогнозиране на повреди на тръбопровода поради връзката му със състоянието на тръбопровода. Тези фактори могат да бъдат интегрирани в модели за прогнозиране, за да се подобри прогнозирането както на вероятността, така и на последствията от повреди на тръбопровода. Освен това идентифицираните причинни фактори за повреда, като корозия, повреда от външни въздействия или повреда на оборудването, могат да бъдат включени в прогнозния модел като отделни променливи. На всеки причинен фактор може да бъде приписана специфична тежест или влияние върху вероятността от неуспех въз основа на неговата значимост и въздействие.

Проучването установи, че причинно-следствените фактори водят до различни типове тежки инциденти (табл.1., фиг.1 до фиг3.), включително течове и разкъсвания от

повреда на материал/заваръчен шев, корозия и „друго“ за повреда на оборудването и неправилна експлоатация, както и за инциденти с повреди от външни въздействия. Чрез идентифициране и справяне с ранните признаци на влошаване на състоянието, операторите могат да предотвратят повреди и да удължат живота на тръбопроводите. Силно се препоръчват редовни проверки и техническо обслужване за съществуващите тръбопроводи. Осигуряването на подходящо обучение и образование за операторите и персонала на тръбопроводите е от решаващо значение за протоколите за безопасност, практиките за поддръжка и процедурите за реагиране при извънредни ситуации.

### Литература

1. Антонов, Г. Транспортни тръбопроводни системи, 2021, ИК „Геа Принт“ Варна, ISBN 978-619-184-045-8, 186с.
2. Наскова П., Моделиране на процесите в почвено-растителните екосистеми, 2020, ИК „Геа Принт“ Варна, ISBN 978-619-184-043-4, 242с.
3. Arafin M.A. , J.A. Szpunar, A novel microstructure - Grain boundary character based integrated modeling approach of intergranular stress corrosion crack propagation in polycrystalline materials, *Comput. Mater. Sci.*, 47 (4) (2010), pp. 890-900
4. Asahi H., Role of microstructures on stress corrosion cracking of pipeline steels in carbonate-bicarbonate solution *Corrosion*, 55 (7) (1999), pp. 644-652
5. Beavers J.A. , B.A. Harle, Mechanisms of high-pH and near-neutral-pH SCC of underground pipelines, *J. Offshore Mech. Arct. Eng.* (2002)
6. Gas Transmission and Distribution Piping Systems, ASME Code for Pressure Piping, B31, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2014.
7. Charles E.A. , R.N. Parkins, Generation of stress corrosion cracking environments at pipeline surfaces, *Corrosion* (1995)
8. Fan Z. , X. Hu, J. Liu, H. Li, J. Fu, Stress corrosion cracking of L360NS pipeline steel in sulfur environment, *Petroleum*, 3 (3) (2017), pp. 377-383
9. Gan F. , Z.W. Sun, G. Sabde, D.T. Chin, Cathodic protection to mitigate external corrosion of underground steel pipe beneath disbonded coating, *Corrosion* (1994)
10. King F. , *et al.* Development of a predictive model for the initiation and early-stage growth of near-neutral pH SCC of pipeline steels NACE - Int. Corros. Conf. Ser., vol. 2001-March, no. 01214 (2001)
11. Koch G., J. Varney, N. Thompson, O. Moghissi, M. Gould, J. Payer, NACE 2016 Impact Study, 2016.
12. Kushida T. , *et al.*, Effects of metallurgical factors and test conditions on near neutral pH SCC of pipeline steels, *Corrosion* (2001), p. 1213
13. Li Z. , S. Ren, Z. Liu, X. Li, C. Du, F. Sun, Comparative study on the stress corrosion cracking of X70 pipeline steel in simulated shallow and deep sea environments *Mater. Sci. Eng. A*, 685 (October 2016) (2016), pp. 145-153



14. Lu B.T. , J.L. Luo, Relationship between yield strength and near-neutral pH stress corrosion cracking resistance of pipeline steels - an effect of microstructure, Corrosion (2006)
15. NACE International, Petroleum and natural gas industries — Materials for use in H<sub>2</sub>S-containing environments in oil and gas production — Part 1: General principles for selection of cracking-resistant materials, ANSI/NACE MR0175/ISO 15156-1:2009, 2009.
16. Parkins R.N. , E. Belhimer, W.K. Blanchard, Stress-corrosion cracking characteristics of a range of pipeline steels in carbonate-bicarbonate solution, Corrosion, 49 (12) (1993), pp. 951-966
17. Parkins R.N. , P.M. Singh, Stress corrosion crack coalescence, Corrosion (1990)
18. Rihan R. , B. Al-Wakaa, N. Tanoli, H. Shalaby, The susceptibility of P110 downhole tubular steel to sulfide stress cracking in H<sub>2</sub>S and NaCl, J. Pet. Sci. Eng., 174 (September 2018) (2019), pp. 1034-1041
19. Roffey P. , E.H. Davies, The generation of corrosion under insulation and stress corrosion cracking due to sulphide stress cracking in an austenitic stainless steel hydrocarbon gas pipeline, Eng. Fail. Anal. (2014)
20. Wang J.Q. , A. Atrens, SCC initiation for X65 pipeline steel in the ‘high’ pH carbonate/bicarbonate solution, Corros. Sci. (2003)
21. Wang L.W. , C.W. Du, Z.Y. Liu, X.H. Wang, X.G. Li, Influence of carbon on stress corrosion cracking of high strength pipeline steel, Corros. Sci. (2013)
22. Xiao Rui a a , Tarek Zayed , Mohamed A. Meguid , Laxmi Sushama, Understanding the factors and consequences of pipeline incidents: An analysis of gas transmission pipelines in the US Engineering Failure Analysis 152 , 2023, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107498>
23. Zhao M.C. , M. Liu, A. Atrens, Y.Y. Shan, K. Yang, Effect of applied stress and microstructure on sulfide stress cracking resistance of pipeline steels subject to hydrogen sulfide, Mater. Sci. Eng. A (2008)
24. Zhiyong L. , C. Zhongyu, L. Xiaogang, D. Cuiwei, X. Yunying, Mechanistic aspect of stress corrosion cracking of X80 pipeline steel under non-stable cathodic polarization, Electrochem. Commun. (2014)
25. Zhu M. , *et al.* Effect of AC current density on stress corrosion cracking behavior of X80 pipeline steel in high pH carbonate/bicarbonate solution, Electrochim. Acta (2014)
26. [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_pipeline\\_accidents](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pipeline_accidents)
27. <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/pipeline-incident-20-year-trends>
28. <https://www.climateka.bg/osnovni-veshtestva-postupvashti-v-atmosferata-na-bulgaria-choveshka-deinost/>
29. <https://www.nsi.bg/bg/content/2550/%D0%B5%D0%BC%D0%B8%D1%81%D0%B8%D0%B8-%D0%B2%D1%8A%D0%B2-%D0%B2%D1%8A%D0%B7%D0%B4%D1%83%D1%85%D0%B0>
30. <https://www.climateka.bg/co2-klimatat/>
31. <https://www.climateka.bg/parnikov-efekt-neobhodimost-ili-zlo/>
32. <https://marine.copernicus.eu/bg/ocean-climate-portal/ocean-acidification-unpublished>